

การเตรียมสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ด้วยวิธีการไฮโมจีไนซ์เซชั่น



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ด้วยวิธีการโฮโมจีไนซ์เซชัน



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 144407  
วันเดือนปี 24 พ.ย. 2559

b. 10818711  
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SELF-HEALING COATING PREPARED BY HOMOGENIZATION METHOD



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

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การเตรียมสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ด้วยวิธีการไฮโมจีโนซเซชัน  
โดย นายณัฐชนน พันธุ์สิงห์  
นางสาวณัฐชยา สุขสมจิตต์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี  
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ  
(ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์)

.....กรรมการ  
(รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา)

.....กรรมการ  
(ดร.สันติ วัฒนานสรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การเตรียมสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ด้วยวิธีการโฮโมจีไนซ์เซชัน  
โดย นายณัฐชนน พันธุ์สิงห์  
นางสาวณัฐชยา สุขสมจิตต์  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2558  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์ณ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสารเคลือบผิวที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้ด้วยวิธีการโฮโมจีไนซ์เซชัน โดยกลไกการซ่อมแซมจะใช้ความเสียหายที่เกิดขึ้น เช่น รอยขีดข่วน หรือแรงฉีกขาด ที่ตัววัสดุเองเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการซ่อมแซมตัวเอง ในงานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลจากยูเรียพอร์มาลดีไฮด์ โดยบรรจุน้ำมันเมล็ดฝ้ายที่มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนไว้ภายใน จากนั้นนำไปผสมให้เข้ากันกับสารเคลือบผิวอีพอกซี แล้วนำไปเคลือบบนผิวของเหล็กกล้าเพื่อทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน ความแข็งแรงในการยึดเกาะ และประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเอง โดยทำการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ เครื่องปั่นกวนด้วยใบพัด และเครื่องกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก ซึ่งจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของแคปซูลคือ วิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ และอัตราเร็วในการปั่นกวน จากผลการทดลองพบว่า กระบวนการที่ใช้ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลนั้นเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดขนาดของไมโครแคปซูล เมื่ออัตราเร็วในการปั่นกวนสูงขึ้นจะทำให้ไมโครแคปซูลที่ได้มีขนาดเล็กลงอีกด้วย โดยสามารถทราบขนาดของแคปซูลได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) ผลคือที่สภาวะการสังเคราะห์เดียวกัน กระบวนการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ จะทำให้ได้ไมโครแคปซูลขนาดเล็กที่สุด และมีลักษณะเป็นทรงกลมสมบูรณ์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 18.62 ไมโครเมตร ที่อัตราเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที และเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อให้ทราบองค์ประกอบของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้ ทดสอบค่าความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเครื่องอิเล็กโทรเคมีคอลลิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS) และดูลักษณะการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Self-Healing Coating Prepared by Homogenization Method	
By	Mr. Natchanon	Pansing
	Ms. Nutchaya	Suksomjitt
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Chemical Engineering	
Year	2015	
Advisor	Asst. Prof. Dr. Apinan Namkanisorn	

## Abstract

This research aims to develop self-healing coating by homogenization method. The ability of coating to self repair itself is due to the release of corrosion inhibitor from microcapsules embedded in the coating matrix. In this work, the microcapsule which contains linseed oil (Core) and urea-formaldehyde (shell) was prepared by homogenization method. We compared the result from homogenization with conventional methods such as microencapsulation using high speed rotor and magnetic stirrer. The microcapsule was characterized for its particle size distribution using Scanning Electron Microscopy (SEM) and chemical structure using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The efficiency of self-healing was investigated by Optical Microscope (OM). Then, the epoxy resin was added to the microcapsule to form a coating solution which was coated onto steel surface. The effectiveness of the coating to provide corrosion resistant was tested using Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). In addition to a visual inspection of samples after immersion in a salt solution. Our results reveal that the smallest microcapsule particle size of 18.62 microns was obtained at the agitation rate of 400 rpm and reaction time of 4 hours. FTIR results confirm that the core consists of linseed oil and the shell is urea-formaldehyde. The EIS analysis yields the corrosion resistance (impedance) of 2,344.23  $k\Omega\text{ cm}^2$ .

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดีจากคำแนะนำ และความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และบุคคลต่าง ๆ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอกราบขอบพระคุณ

ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ความรู้เกี่ยวกับการสังเคราะห์อนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเล็ก การออกแบบ วางแผนการทดลอง และคอยชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงาน

ผศ.ดร. อธิลักษณ์ เอียดเอื้อ และเพื่อนๆ วิทยานาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย และอนุเคราะห์เครื่องไฮโมจิโนเซอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ไม่ใคร่แคบซูล

อาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำปรึกษา ตลอดจนคำแนะนำในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเทคนิคการใช้เครื่องอิเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี

ขอขอบคุณคณะเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ ทดสอบค่าต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัว ที่เป็นกำลังใจสำคัญ ดูแลเอาใจใส่ และให้การสนับสนุนมาโดยตลอด

พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

คุณค่า ประโยชน์จากปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขออภัย และขออภัยไว้ ณ ที่นี้

ณัฐชนน พันธุ์สิงห์

ณัฐชยา สุขสมจิตต์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สารเคลือบผิว	3
2.2 การกัดกร่อน	3
2.2.1 การป้องกันการเกิดสนิมโดยเคลือบผิวโลหะด้วยสารเคลือบผิว	3
2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุ	4
2.3.1 ส่วนประกอบ และรูปแบบของไมโครเอนแคปซูล	4
2.3.2 คุณสมบัติที่ดีของเซลล์	5
2.3.3 วิวัฒนาการของวัสดุซ่อมแซมตัวเองได้	5
2.4 สารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้	5
2.4.1 กลไกการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุ	6
2.4.2 น้ำมันเมล็ดฝ้าย	6
2.4.3 กระบวนการสังเคราะห์ไมโครเอนแคปซูล	7
2.4.4 ตัวทำละลาย	12
2.4.5 พอลิเมอร์ และเรซินสังเคราะห์	13
2.5 หลักการและเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์แคปซูล	14
2.5.1 High Shear Disperser	14
2.5.2 โฮโมจีไนเซอร์ (Homogenizer)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 กระบวนการที่เกิดขึ้นของสารเคลือบผิว	15
2.6.1 การเตรียมสารเคลือบผิว	15
2.6.2 วิธีการเคลือบผิว	15
2.6.3 การเกิดฟิล์ม	16
2.6.4 การแห้งของสารเคลือบผิว	16
2.7 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว	17
2.7.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.7.2 การศึกษาขนาด และลักษณะทางกายภาพ	17
2.7.3 การวิเคราะห์พันธะเคมีของไมโครแคปซูล	17
2.7.4 การทดสอบค่าความต้านทานการกัดกร่อน	18
2.7.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว	18
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน	21
3.1 ขั้นตอนการศึกษา	21
3.2 วิธีดำเนินงาน	21
3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	21
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	22
3.3.1 กระบวนการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล	22
3.3.2 สภาวะที่ทำการทดลองในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล	23
3.3.3 กระบวนการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว	23
3.3.4 สภาวะที่ทำการทดลองในการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง	26
4.1 ผลการทดลอง	26
4.1.1 ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้	26
4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูล	27
4.1.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูล	30
4.1.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของไมโครแคปซูล	33

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดสอบค่าความต้านทานความกัดกร่อน	35
4.2.1 ผลของความเข้มข้นของไมโครแคปซูลที่ผสมในสารเคลือบผิว	38
4.2.2 ผลของลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูล	39
4.2.3 ผลของระยะเวลาที่ตัวอย่างถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	39
4.3 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	43
5.1 ไมโครแคปซูลที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเอง	43
5.1.1 ขนาดอนุภาค และการกระจายตัว	43
5.1.2 ลักษณะทางกายภาพ	43
5.1.3 องค์ประกอบทางเคมี	43
5.2 สารเคลือบผิวที่มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองที่ดีที่สุด	44
5.2.1 ความเข้มข้นของไมโครแคปซูลที่ผสมในสารเคลือบผิว	44
5.2.2 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว	44
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก	47
ภาคผนวก ก เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของงานวิจัย	48
ภาคผนวก ข อินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR Spectroscopy)	53
ภาคผนวก ค ลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลจากเครื่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)	57

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบ และรูปแบบของไมโครแคปซูล	4
2.2 การรักษาตัวเองแบบอัตโนมัติโดยไมโครแคปซูลที่หุ้มสารซ่อมแซมถูกฝังไว้ในเมทริกซ์	6
2.3 เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตไมโครแคปซูล	7
2.4 กระบวนการผลิตไมโครเอนแคปซูลด้วยวิธีโคเอกเซอร์เวชัน (Coacervation)	8
2.5 องค์ประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน	9
2.6 ลักษณะรูปร่างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว	9
2.7 ปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นของพอลิยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์	11
2.8 ปฏิกริยาการสังเคราะห์เฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน	11
2.9 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิรีโซซินอลฟอร์มาลดีไฮด์	11
2.10 ปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิรีโซซินอล-ยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์	12
2.11 ระบบแบบโรเตอร์ - สเตเตอร์ ของเครื่อง High Shear Disperser	14
2.12 ระบบอิมัลชันของสารละลายเมื่อผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน	14
2.13 ลักษณะเครื่องโฮโมจีไนเซอร์	14
2.14 (ก) ทิศทางการไหลของสารละลายเมื่อไหลผ่านเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (ข) Velocity profile ของสารละลายเมื่อไหลผ่านเครื่องโฮโมจีไนเซอร์	15
2.15 วิธีการเคลือบผิวโดยใช้ใบมีด	15
4.1 ขนาดอนุภาค และลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกววนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที	28
4.2 ขนาดอนุภาค และลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกววนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที	28
4.3 ขนาดอนุภาค และลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกววนเท่ากับ 500 รอบต่อนาที	29
4.4 ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน โดยควบคุมอัตราเร็วที่ 400 รอบต่อนาที	30
4.5 ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์โดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกววนต่างกัน	31
4.6 ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์โดยใช้วิธีการต่างกัน ที่สภาวะที่ดีที่สุด (ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด และลักษณะทางกายภาพดีที่สุด)	32
4.7 องค์ประกอบของสารในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล (ก) ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ (ข) น้ำมันเมล็ดฝ้าย (ค) ไมโครแคปซูล	33
4.8 กราฟ Bode โดยเทคนิค EIS ของสารเคลือบผิวอีพอกซี (C-00) ซึ่งถูกกรดทำให้เกิดรอยแตกบนชั้นฟิล์ม และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่เวลาต่างๆ	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟ Bode โดยเทคนิค EIS ของสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ M4-XX ซึ่งถูกกรีดให้เกิดรอยแตกบนชั้นฟิล์ม และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาต่างๆ	36
4.10 กราฟ Bode โดยเทคนิค EIS ของสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ M5-XX ซึ่งถูกกรีดให้เกิดรอยแตกบนชั้นฟิล์ม และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาต่างๆ	37
4.11 ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิว หลังจากแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 วัน (ก) รอยแตกด้านข้าง (ข) รอยแตกตรงกลางของพื้นผิวดังตัวอย่าง	40
4.12 ลักษณะรอยแตกด้านข้างของพื้นผิวดังตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ หลังจากแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา (ก) 1 วัน (ข) 10 วัน และ (ค) 21 วัน	41
ก.1.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FT-IR Spectroscopy	49
ก.2.1 หลักการทำงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	50
ก.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	51
ก.3.1 เครื่องวัดการกักต่อน Potentiostat/Galvanostat Autolab PGSTAT302N	51
ก.4.1 ลักษณะกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Optical microscope (OM)	52
ข.1.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของยูเรีย-ฟอร์มมาลดีไฮด์	54
ข.2.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันเมล็ดฝ้าย	55
ข.3.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของไมโครแคปซูล	56
ค.1.1 อัตราการปั่นกว 300 รอบต่อนาทีของเครื่องไฮโมจีไนเซอร์ ที่กำลังขยาย 100 เท่า	58
ค.1.2 อัตราการปั่นกว 300 รอบต่อนาทีของเครื่องไฮโมจีไนเซอร์ ที่กำลังขยาย 400 เท่า	58
ค.2.1 อัตราการปั่นกว 400 รอบต่อนาทีของเครื่องไฮโมจีไนเซอร์ ที่กำลังขยาย 100 เท่า	59
ค.2.2 อัตราการปั่นกว 400 รอบต่อนาทีของเครื่องไฮโมจีไนเซอร์ ที่กำลังขยาย 300 เท่า	59
ค.3.1 อัตราการปั่นกว 500 รอบต่อนาทีของเครื่องไฮโมจีไนเซอร์ ที่กำลังขยาย 100 เท่า	60
ค.3.2 อัตราการปั่นกว 500 รอบต่อนาทีของเครื่องไฮโมจีไนเซอร์ ที่กำลังขยาย 400 เท่า	60
ค.4.1 อัตราการปั่นกว 400 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวด้วยใบพัด ที่กำลังขยาย 100 เท่า	61
ค.4.2 อัตราการปั่นกว 400 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวด้วยใบพัด ที่กำลังขยาย 300 เท่า	61
ค.5.1 อัตราการปั่นกว 400 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวด้วยแท่งแม่เหล็ก ที่กำลังขยาย 100 เท่า	62
ค.5.2 อัตราการปั่นกว 400 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวด้วยแท่งแม่เหล็ก ที่กำลังขยาย 100 เท่า	62
ค.6.1 อัตราการปั่นกว 1,000 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวด้วยแท่งแม่เหล็ก ที่กำลังขยาย 100 เท่า	63
ค.6.2 อัตราการปั่นกว 1,000 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวด้วยแท่งแม่เหล็ก ที่กำลังขยาย 100 เท่า	63

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถือว่าผิดกฎหมาย

## สารบัญรูปรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.7.1 อัตราการปั่นกวน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ และตามด้วย 1,000 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก ที่กำลังขยาย 100 เท่า	64
ค.7.2 อัตราการปั่นกวน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ และตามด้วย 1,000 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก ที่กำลังขยาย 300 เท่า	64
ค.8.1 อัตราการปั่นกวน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (ปรับปรุง) ที่กำลังขยาย 100 เท่า	65
ค.8.2 อัตราการปั่นกวน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (ปรับปรุง) ที่กำลังขยาย 400 เท่า	65



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สภาวะต่างๆ ที่ทำการทดลองในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล	23
3.2 สภาวะต่างๆ ที่ทำการทดลองในการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวของสารเคลือบผิว	25
4.1 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ทำการทดลองในสภาวะต่างๆ	26
4.2 ลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ในสภาวะต่าง	27
4.3 ค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับ ( $k\Omega\text{ cm}^2$ ) ที่ความถี่ 0.01 เฮิรตซ์ สำหรับตัวอย่าง C-00 และ MY-XX วัดโดยใช้เทคนิค EIS	38



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้งานเครื่องจักรที่ทำจากโลหะอยู่มากมาย ปัญหาที่พบบ่อยคือปัญหาจากการกัดกร่อน ซึ่งนำไปสู่มูลค่าความเสียหายอย่างสูงที่จะใช้ในการซ่อมแซมความเสียหาย จึงมีการนำสารเคลือบผิวมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อน และนับว่าเป็นวิธีการป้องกันที่ดีเนื่องจากราคาไม่สูงมากนัก อีกทั้งยังสะดวกต่อการใช้งาน แต่ข้อเสียคือ เมื่อเวลาผ่านไปสารเคลือบผิวทั่วไปมักจะเกิดรอยขีดข่วน และทำให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนลดลง จึงเกิดความคิดว่าคงจะดีไม่น้อย หากสารเคลือบผิวสามารถตรวจสอบส่วนที่เสียหาย และซ่อมแซมตัวเองได้ทันเวลา ผลที่ได้คือ สามารถรักษาประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของสารเคลือบผิวไว้ได้ อีกทั้งยังยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักรอีกด้วย จึงเกิดการพัฒนาสารเคลือบผิวที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้ โดยกลไกการซ่อมแซมนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สิ่งกระตุ้นจากภายนอก เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาวะความเป็นกรด-ด่าง หรืออุณหภูมิเข้าช่วยในการซ่อมแซมที่เกิดจากความเสียหายเชิงกล และความเสียหายจากสารเคมี แต่วิธีการนี้กลับใช้ความเสียหายที่เกิดขึ้น เช่น รอยขีดข่วน หรือแรงฉีกขาดของวัสดุเองเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการซ่อมแซม ซึ่งจะสามารถแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่พบได้ และยังสามารถตอบสนองความเสียหายที่เกิดจากความเสียหายเชิงกล และจากสารเคมีได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสารเคลือบผิวที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ เมื่อเกิดรอยแตก รอยขีดข่วน รอยถลอก ของชั้นเคลือบบนผิวโลหะ โดยเลือกใช้สารเคลือบผิวชนิดอีพอกซี จากนั้นนำไปผสมกับไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากยูเรีย และฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งภายในบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อนคือ น้ำมันเมล็ดฝ้าย หากมีรอยขีดข่วนเกิดขึ้นที่ชั้นเคลือบผิว ไมโครแคปซูลที่บรรจุอยู่ในอีพอกซีจะแตกออก พร้อมปล่อยสารที่บรรจุออกมาก่อให้เกิดชั้นฟิล์มเคลือบผิวของโลหะ ซึ่งสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ทันเวลา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาสารเคลือบผิว ให้สามารถซ่อมแซมตัวเองได้หากเกิดความเสียหายบนชั้นฟิล์มของสารเคลือบผิวโลหะ
- 1.2.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน และเพิ่มอายุการใช้งานของโลหะ

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 สังเคราะห์อนุภาคทรงกลมขนาดเล็กด้วยวิธีการโฮโมจีไนซ์เซชัน
- 1.3.2 ศึกษาความเข้มข้นของไมโครแคปซูลที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้
- 1.3.3 ทดสอบค่าความต้านทานการกัดกร่อน และประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวที่พัฒนาขึ้น
- 1.3.4 ศึกษาลักษณะทางกายภาพ และลักษณะทางเคมีของไมโครแคปซูล

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสารเคลือบผิว การสังเคราะห์ไมโครแคปซูล และการกัดกร่อน
- 1.4.2 ออกแบบการทดลอง และกำหนดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
- 1.4.3 ทำการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล และผสมไมโครแคปซูลเข้ากับสารเคลือบผิวชนิดอีพอกซี
- 1.4.4 ทดสอบค่าความต้านทานการกัดกร่อน และประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวที่พัฒนาขึ้น
- 1.4.5 วิเคราะห์ผลจากการทดลอง และสรุปผลการดำเนินงาน

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถสังเคราะห์อนุภาคทรงกลมขนาดเล็กด้วยวิธีการโฮโมจีไนซ์เซชันได้
- 1.5.2 สามารถพัฒนาประสิทธิภาพของสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองด้วยวิธีการโฮโมจีไนซ์เซชัน

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สารเคลือบผิว [1]

วัตถุประสงค์ของสารเคลือบผิวมี 2 ประการ คือ

1. เพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุจากมลภาวะต่างๆ สารเคลือบผิวจะช่วยให้ผิวหน้าวัสดุที่ถูกเคลือบมีความทนทานต่ออากาศ น้ำ สารเคมีต่างๆ นอกจากนี้ สารเคลือบผิวยังช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุมีความแข็งแรงขึ้น ทนทานต่อการขีดสีมากขึ้น และเพิ่มอายุการใช้งานอีกด้วย ตัวอย่างของการป้องกันพื้นผิววัสดุ เช่น การใช้สีทาไม้เพื่อป้องกันการผุพังของไม้อันเนื่องมาจากความชื้น การเคลือบผิวภายในกระป๋องโลหะเพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อนจากอาหารหรือสารเคมีที่บรรจุอยู่ภายใน การเคลือบพื้นผิวชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อไม่ให้สัมผัสกับความชื้น สารเคลือบผิวประเภทสีหน่วงการติดไฟ (Fire retardant paint) ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการลุกไหม้บนผิวหน้า เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารเคลือบผิวบางประเภทใช้ทาผิวหน้าที่มีรูพรุน เช่น ผิวคอนกรีต และพลาสติก เพื่อช่วยให้ทำความสะอาดได้ง่ายขึ้น

2. เพื่อตกแต่งให้แลดูสวยงาม ความสวยของวัสดุหลังการเคลือบผิวหน้าด้วยสารเคลือบผิวอาจมาจากสี (Color) ความเงา (Gloss) ลวดลายตกแต่ง (Texture) ความสว่าง (Lighting) หรือทั้งหมดรวมกัน สีของผิวหน้ามีผลต่อการสะท้อนแสงของผิวหน้านั้นๆ ซึ่งสีผิวจะสะท้อนแสงได้สูงสุดในขณะที่สีดำจะสะท้อนแสงได้ต่ำสุด

### 2.2 การกัดกร่อน [2]

โลหะเป็นวัสดุที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง สมบัติโดยทั่วไปคือ ทึบแสง ผิวของโลหะที่ขัดเรียบจะมันวาว แข็งแกร่ง และสามารถถูกแปรรูปไปใช้งานโครงสร้างได้ เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี ซึ่งเหล็กเป็นโลหะที่มนุษย์นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีความแข็งแรง และราคาถูก อย่างไรก็ตามข้อบกพร่องที่สำคัญที่สุดคือ การเกิดสนิม (Rusting) โดยประมาณการได้ว่าจะเกิดการสูญเสียเหล็กไปในรูปของสนิมเหล็กถึง 1 ใน 7 ของปริมาณเหล็กที่ผลิตได้ต่อปี ซึ่งนอกจากจะสร้างความสูญเสียในเชิงเศรษฐกิจอย่างมหาศาลแล้ว บางครั้งการเกิดสนิมยังก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงต่อชีวิต และทรัพย์สินอย่างประเมินค่าไม่ได้ ดังนั้นการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเอาไว้ล่วงหน้าจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นตามมาในภายหลัง

#### 2.2.1 การป้องกันการเกิดสนิมโดยเคลือบผิวโลหะด้วยสารเคลือบผิว

การเคลือบผิวเหล็ก เพื่อป้องกันไม่ให้เนื้อเหล็กสัมผัสกับน้ำ และอากาศโดยตรง สามารถทำได้หลายวิธีเช่น การทาสี การชุบด้วยโลหะ มักใช้กับชิ้นงานขนาดเล็ก หรือกลาง อย่างไรก็ตามข้อเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้นคือ ผิวเคลือบสามารถหลุดออกได้ง่ายทั้งทางกายภาพ และเคมี ซึ่งทำให้มีโอกาสที่เนื้อเหล็กจะสัมผัสกับน้ำ หรืออากาศ และเกิดสนิมขึ้นในที่สุด

## 2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุ [3]

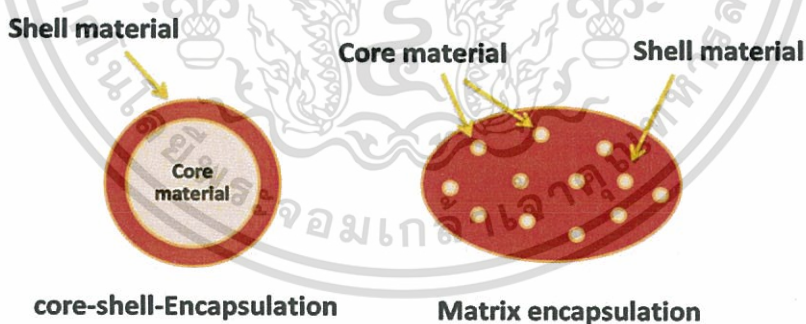
มนุษย์รู้จักคิดค้น และสร้างวัสดุขึ้นใช้แทนวัสดุจากธรรมชาติมาตั้งแต่อดีต แม้ว่าในปัจจุบันวิทยาศาสตร์จะเจริญก้าวหน้า และล้ำยุคจนสามารถพัฒนาวัสดุให้มีประสิทธิภาพได้ดีแค่ไหนก็ตาม แต่มีอยู่สิ่งหนึ่งที่มนุษย์ยากที่จะเลียนแบบวัสดุให้เหมือนกับวิถีของธรรมชาติได้ สิ่งนั้นคือ กลไกในการซ่อมแซมตัวเองได้ของสิ่งมีชีวิต และนี่คือที่มาของวัสดุซ่อมแซมตัวเองได้ (Self-Healing Material)

ในปี ค.ศ. 2001 เมื่อผลงานจากทีมวิจัยของมหาวิทยาลัยอิลลินอยส์ วิทยาเขต เออร์บานาแชมเปญ ถูกตีพิมพ์ลงในวารสารเนเจอร์ (Nature) พวกเขาเสนอวิธีการใช้ไมโครแคปซูล (Microcapsule) ขนาดเล็กจำนวนมากใส่เข้าไปในเนื้อของวัสดุชั้นเมทริกซ์ (Matrix) ซึ่งภายในเม็ดแคปซูลจะบรรจุสารซ่อมแซม (Healing agent) เอาไว้ เรียกว่า ไมโครเอนแคปซูล (Microencapsule) ซึ่งจะถูกปล่อยออกมาเมื่อวัสดุนั้นได้รับความเสียหาย

### 2.3.1 ส่วนประกอบ และรูปแบบของไมโครเอนแคปซูล [4]

ตามปกติแล้วจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ

- ก. สารสำคัญที่บรรจุอยู่ภายในแคปซูล ซึ่งเรียกว่า คอร์ (Core)
- ข. ผนังที่ห่อหุ้มซึ่งอยู่รอบนอกสารสำคัญ เรียกว่า วอลล์ (Wall) หรือ เซลล์ (Shell)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบ และรูปแบบของไมโครแคปซูล [4]

นอกจากนี้จากรูปที่ 2.1 ยังพบอีกว่ารูปแบบของไมโครเอนแคปซูล มี 2 รูปแบบ คือ

- ก. คอร์ทั้งหมดถูกห่อหุ้มด้วยเซลล์ (Core-Shell-Encapsulation)
- ข. คอร์กระจายตัวอยู่ภายในสารที่เป็นเซลล์ (Matrix Encapsulation)

ซึ่งส่วนของเซลล์นั่นเองจะเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของไมโครเอนแคปซูลให้มีคุณสมบัติตามที่เรากำลังต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 คุณสมบัติที่ดีของเซลล์ [5]

1. สามารถแผ่เป็นฟิล์มบางๆ ได้
2. มีความยืดหยุ่น และมีความแข็งแรงเพียงพอ
3. มีคุณสมบัติในการทำให้เกิดอิมัลชัน (Emulsion)
4. ยึดติดกับคอร์ได้ดีโดยไม่มีการทำปฏิกิริยา
5. มีความหนืดต่ำเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นของแข็ง และไม่ขึ้นง่าย
6. มีความคงตัวสูง ป้องกันคอร์จากสภาพแวดล้อมภายนอก
7. ปลดปล่อยคอร์ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

### 2.3.3 วิวัฒนาการของวัสดุซ่อมแซมตัวเองได้ [6]

วิธีการสังเคราะห์วัสดุซ่อมแซมตัวเองได้ในอดีตคือ การผสมสารซ่อมแซมไว้ภายในท่อขนาดเล็กระดับไมโครที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งมีความเปราะ ก่อนที่จะนำท่อเหล่านี้ไปผสมรวมกับพอลิเมอร์อื่นๆ เพื่อใช้เป็นสารเคลือบผิว โดยท่อเหล่านี้จะแตกออกเมื่อได้รับแรงกระแทก หรือแรงดันสูงที่กระทำต่อสารเคลือบผิว จากนั้นสารซ่อมแซมที่มีความหนืดต่ำจะถูกปล่อยออกมาในบริเวณที่ได้รับความเสียหาย และเกิดปฏิกิริยาเพื่อซ่อมแซมจุดๆ นั้น

จากแนวคิดข้างต้น จึงเกิดวิธีการท่อหุ้มสารซ่อมแซมด้วยไมโคร หรือนาโนแคปซูล โดยจะทำการท่อหุ้มสารซ่อมแซมตัวเองเอาไว้ภายในไมโคร หรือนาโนแคปซูล และนำไปผสมกับพอลิเมอร์ซึ่งมีตัวเร่งกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว เมื่อได้รับความเสียหายจนทำให้เกิดรอยฉีกขาดบนชั้นฟิล์ม ไมโคร หรือนาโนแคปซูลจะแตกออกนำไปสู่การปล่อยสารซ่อมแซมภายในออกมาด้วยแรงดึงน้ำในช่องขนาดเล็ก (Capillary force) หรือที่เรียกว่าปรากฏการณ์แคปิลลารี (Capillary action) ผลที่ตามมาคือเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารซ่อมแซมกับตัวเร่งที่ถูกฝังเอาไว้ และเกิดการซ่อมแซมวัสดุ ก่อนที่รอยแตกนั้นจะขยายใหญ่ขึ้น

ต่อมาได้มีการสังเคราะห์แคปซูลโดยใช้ไดไซโคลเพนเตไดอิน (Dicyclopentadiene; DCPD) เป็นสารซ่อมแซม และใช้พอลิยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ (Polyurea-formaldehyde; PUF) เป็นเซลล์ จึงเป็นแนวคิดในการสังเคราะห์สารเคลือบผิวโลหะซ่อมแซมตัวเองได้ ซึ่งจะทำการหาสารซ่อมแซมอื่น ที่สามารถบรรจุภายในแคปซูล ที่สังเคราะห์จากพอลิยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ได้ และมีประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อน แห่งได้รวดเร็วโดยปราศจากสารตัวเร่งช่วย ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ในหัวข้อถัดไป

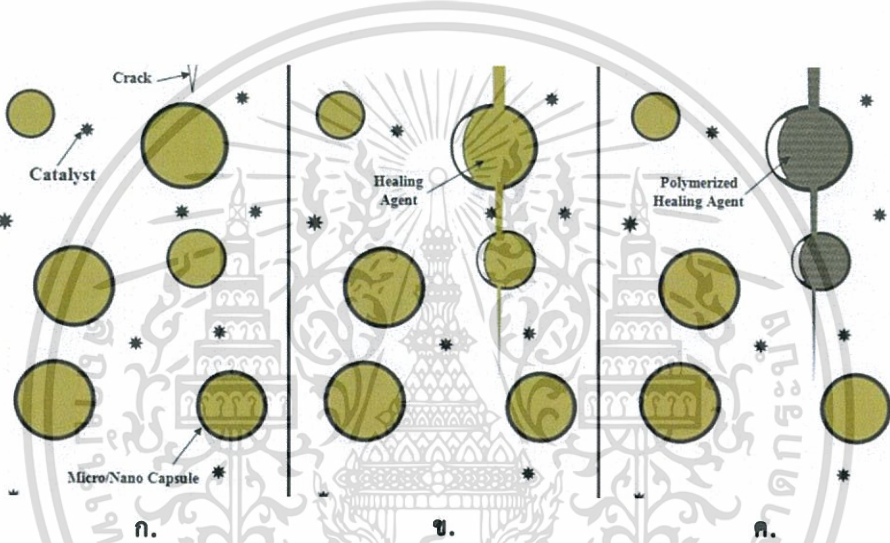
## 2.4 สารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ [1]

การซ่อมแซมตัวเองสามารถนิยามได้ว่า เป็นความสามารถของตัววัสดุที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้จากการที่ถูกทำให้เสียหายโดยปราศจากการแทรกแซงจากภายนอก ปกติในเรื่องของการซ่อมแซมตัวเองจะพิจารณาเพียงสมบัติทางกลในส่วนของความแข็งแรงหลังจากการซ่อมแซมตลอดจนการผุกร่อนแตก การซ่อมแซมตัวเองต้องเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของผิวเคลือบ และสิ่งแวดล้อมรอบข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 กลไกการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุ

สารซ่อมแซม เช่น มอนอเมอร์ สี ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวทำให้แข็ง ที่จะบรรจุอยู่ในไมโครแคปซูล โดยปกติระบบการซ่อมแซมตัวเองนี้จะประกอบไปด้วยไมโครแคปซูล 2 ชนิดชนิดแรกทำหน้าที่เป็นสารซ่อมแซม ซึ่งภายในบรรจุไว้ด้วยวัสดุพอลิเมอร์ ส่วนไมโครแคปซูลอีกชนิดบรรจุสารเร่งปฏิกิริยาเอาไว้แคปซูลทั้งสองนี้จะกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ เมื่อเมทริกซ์เกิดการขูดขีดหรือเกิดการแตกหักจะทำให้สารซ่อมแซมชนิดพอลิเมอร์ที่อยู่ภายในแคปซูลไหลออกมาทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาเกิดการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแหตาข่าย (Cross-linked polymer) เชื่อมต่อรอยแตกนั้น



รูปที่ 2.2 การรักษาตัวเองแบบอัตโนมัติโดยไมโครแคปซูลที่หุ้มสารซ่อมแซมถูกฝังไว้ในเมทริกซ์ที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการสร้างพอลิเมอร์ของสารซ่อมแซม (ก) เมทริกซ์เกิดความเสียหายขึ้น (ข) ไมโครแคปซูลที่บรรจุสารซ่อมแซมตัวเองแตกออกและไหลออกมายังรอยแตกด้วยแรงแคพิลลารี (ค) สารซ่อมแซมสัมผัสกับสารเร่งปฏิกิริยาเกิดการกระตุ้นให้มีการสร้างพันธะโดยกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน [1]

### 2.4.2 น้ำมันเมล็ดฝ้าย

น้ำมันถูกนำมาใช้เป็นสารยึดในอุตสาหกรรมเคลือบผิวมานานแล้ว แต่ในปัจจุบันการนำน้ำมันเพียงอย่างเดียวมาใช้เป็นสารยึดมีอยู่น้อยมาก อย่างไรก็ตามยังมีการใช้น้ำมันเป็นส่วนผสมของวาร์นิช หรือสารเคลือบผิวบางชนิด เพื่อจุดประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป เช่น ช่วยเพิ่มความอ่อนตัวของฟิล์ม ทำให้ไม่เปราะ หรือเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของการละลาย เป็นต้น

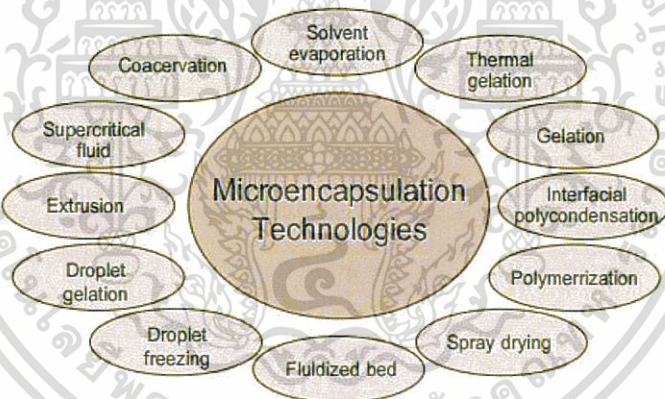
น้ำมันเมล็ดฝ้าย (Linseed oil or Flaxseed oil) มีลักษณะสีเป็นน้ำมันใสไปจนออกสีเหลือง ทำจากเมล็ดฝ้ายโดยการบีบ หรือการสกัดจากตัวทำละลาย คุณสมบัติที่ดีของน้ำมันเมล็ดฝ้ายคือมีความยืดหยุ่น เนื่องจากมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง และมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกโทซิเดชัน (Autoxidation) ส่งผลให้แห้งเร็ว กล่าวคือ เปลี่ยนจากสภาพของเหลวเป็นฟิล์มที่แห้งแข็งได้ดีไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ละลายในตัวทำละลายที่สามารถละลายน้ำมัน และไม่ยอมให้ความชื้นซึมผ่านได้ อีกทั้งยังมีความทนต่อสารเคมี เนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้ น้ำมันเมล็ดฝ้ายจึงเหมาะที่จะนำมาทำเป็นสารเคลือบผิว

โดยสารซ่อมแซมของงานวิจัยนี้คือ น้ำมันเมล็ดฝ้ายที่ถูกบรรจุไว้ภายในไมโครแคปซูล ซึ่งเรียกว่าคอร์ (Core) ซึ่งจะกล่าวถึงกระบวนการสังเคราะห์แคปซูลที่ห่อหุ้มสารซ่อมแซมนี้ในหัวข้อต่อไป

### 2.4.3 กระบวนการสังเคราะห์ไมโครเอนแคปซูล [1,5,7,8,9,10,11]

ไมโครเอนแคปซูลเลชัน (Microencapsulation) เป็นกระบวนการห่อหุ้มอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กๆ หรือหุ้มหยดของของเหลว หรือเป็นการหุ้มแก๊ส ซึ่งจะช่วยแยก และป้องกันอนุภาคที่ถูกห่อหุ้มออกจากสิ่งแวดล้อม สิ่งที่ได้จากกระบวนการห่อหุ้มเรียกว่าไมโครแคปซูล ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนคอร์กับเชลล์ ดังที่อธิบายไว้ข้างต้น อาจเป็นรูปทรงกลมหรือไม่ก็ได้ และอาจมีขนาดตั้งแต่นาโนเมตรถึงไมโครเมตร ซึ่งเทคนิคในการสังเคราะห์ไมโครเอนแคปซูลมีอยู่มากมายหลายวิธีการ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารภายในแคปซูล และวิธีการนำไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



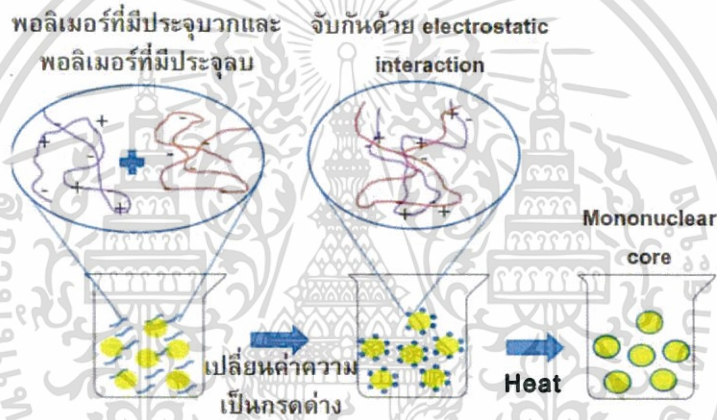
รูปที่ 2.3 เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตไมโครแคปซูล [5]

วัตถุประสงค์ในการใช้เทคนิคไมโครเอนแคปซูลเลชันมี 4 ประการ คือ

1. เนื่องจากสารบางชนิดมีความไวต่อสภาวะแวดล้อมภายนอก เช่น แสงแดด ออกซิเจน น้ำ เป็นต้น ทำให้มีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไป
2. เนื่องจากสารบางชนิดระเหยได้ง่าย หากไม่มีแคปซูลมาป้องกันอาจจะระเหยหมด
3. ช่วยให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน เช่น การเปลี่ยนสารที่เป็นของเหลวให้อยู่ในรูปแคปซูลที่เป็นของแข็ง ง่ายต่อการนำไปผสมกับสารอื่น และไม่จับตัวเป็นก้อน
4. สามารถควบคุมการทำงานของสารให้มีการปลดปล่อยสารในบริเวณที่เหมาะสม และยังลดความสิ้นเปลืองในการใช้สาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสังเคราะห์แคปซูลในงานวิจัยนี้เป็นวิธีการที่ผสมผสานระหว่างฟิสิกส์ และเคมี (Physical Processes; Physico-chemical) ที่มีชื่อว่า Complex Coacervation หรือ Coacervation-Phase Separation (รูปที่ 2.4) เป็นกระบวนการที่เริ่มจากนำคอร์ (สีเหลือง) ที่ต้องการเคลือบไปกระจายตัวในสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเชลล์ (สีน้ำเงิน) โดยใช้แรงกล จากนั้นอาศัยความสามารถในการแตกตัวของประจุของพอลิเมอร์ จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดต่าง ทำให้เกิดการจับกันของพอลิเมอร์ที่มีประจุแตกต่างกันด้วยแรงทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) และทำให้ชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบแข็งตัวโดยอาศัยอุณหภูมิ เกิดเป็น Cuacervative Wall ลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้นเป็นแบบแกนกลางเดี่ยว จากนั้นสามารถแยกแคปซูลออกมาโดยการกรอง ล้างด้วยสารละลายที่เหมาะสม หรือทำให้แห้ง ซึ่งกระบวนการนี้มักใช้กับสารที่บรรจุภายในแคปซูล เป็นของเหลว หรืออนุภาคขนาดเล็กที่ไม่ละลายน้ำ



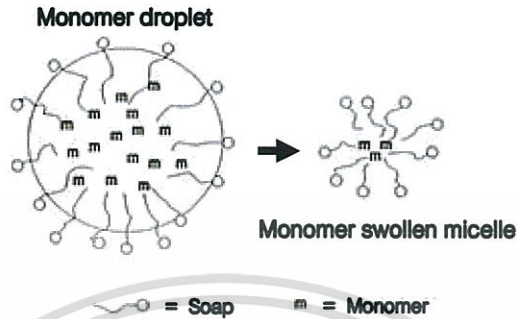
รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตไมโครแคปซูลด้วยวิธีโคแอกเคอร์เวชัน (Cuacervation) [8]

กระบวนการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลสามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอนที่สำคัญ ดังนี้

1. การสร้างสารละลายอิมัลชัน (Emulsion Solution) โดยอิมัลชัน (Emulsion) หมายถึงระบบคอลลอยด์ (colloid) ที่ประกอบด้วยของเหลวตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งปกติไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (แยกชั้นกันอยู่ในระบบแขวนลอย) เช่น น้ำกับน้ำมัน ซึ่งจะสามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันและไม่แยกชั้น โดยอยู่ในรูปของของเหลวส่วนหนึ่งแตกตัวเป็นหยดเล็กๆ เรียกว่า ภูมิภาคภายใน หรือส่วนที่กระจายตัว (Internal or Dispersed phase) ซึ่งจะกระจายตัวแทรกอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า ภูมิภาคภายนอก หรือส่วนที่ต่อเนื่อง (External or Continuous phase) โดยสามารถทำให้เกิดระบบนี้ได้โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant หรือ Emulsifier หรือ Soap) ลงไปด้วยเพื่อช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ และช่วยทำให้ขนาดของอนุภาคของหยดไมโนเมอร์ (ในงานวิจัยนี้คืออนุภาคของหยดน้ำมันเมล็ดฝ้าย) ที่เกิดขึ้นในระบบอิมัลชันมีขนาดเล็กกว่าของระบบแขวนลอย อาจทำให้มีขนาดของหยดไมโนเมอร์ประมาณ 1-10 ไมโครเมตร (ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของสารในระบบและอัตราเร็วการกวนด้วย) ซึ่งถือว่าเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของหยดไมโนเมอร์ประมาณ 10-1000 ไมโครเมตร ที่เกิดขึ้นในระบบแขวนลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิ่งไปกว่านั้นการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในปริมาณที่มากพอจนกระทั่งเลยจุดความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration, CMC) จะทำให้มีการรวมตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวเกิดเป็นไมเซลล์ ซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่มีความสำคัญสำหรับการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไป

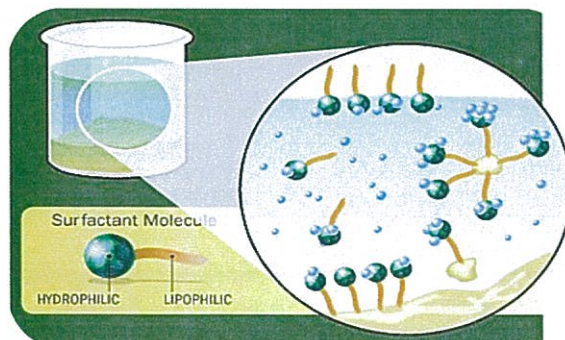


รูปที่ 2.5 องค์ประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน [9]

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าหากเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในปริมาณที่มากพอ จะทำให้เกิดไมเซลล์ และส่งผลให้หยดโมโนเมอร์มีขนาดเล็กมาก ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล เพื่อห่อหุ้มหยดโมโนเมอร์ หรือสารซ่อมแซมนี้เอาไว้ ซึ่งจะกล่าวถึงกระบวนการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลไว้ในกระบวนการถัดไป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ โดยจะขอกกล่าวถึงข้อมูลเกี่ยวกับสารลดแรงตึงผิวซึ่งมีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล ดังนี้

สารลดแรงตึงผิว หรือ Surface Active Agent มีชื่อเรียกโดยทั่วไปทางวิทยาศาสตร์ว่า “Surfactant” สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic group) หรือลิโฟฟิลิก (Lipophilic) คือส่วนของโมเลกุลของสารประกอบที่ไม่มีขั้ว และละลายได้ดีในน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำมักจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือมีธาตุคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่จะมาจากไขมัน และน้ำมันตามธรรมชาติ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และพอลิเมอร์สังเคราะห์ สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ซึ่งแบ่งตามลักษณะ หรือประจุของส่วนที่ชอบน้ำ ได้แก่ ประจุบวก ประจุลบ ไม่มีประจุ และมีทั้งประจุบวก และลบ ซึ่งสารลดแรงตึงผิวแต่ละประเภทจะมีค่า Hydrophilic-Lipophilic Balance (HLB) ต่างกัน



รูปที่ 2.6 ลักษณะรูปร่างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้เฉพาะการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

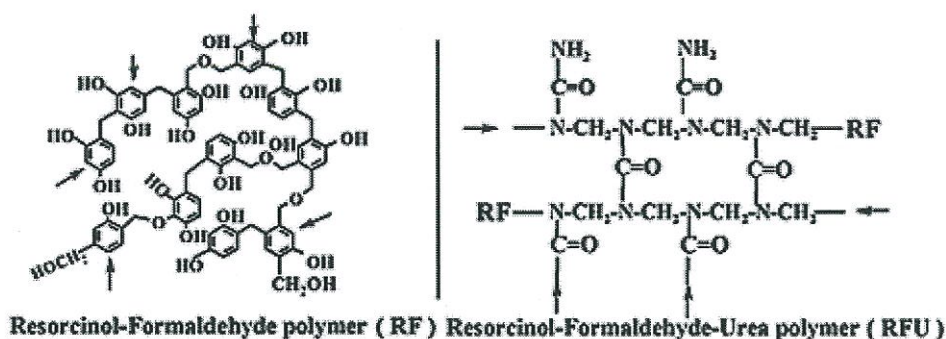
2. พอลิเมอร์แบบขั้น หรือแบบควบแน่น (Step or Condensation polymerization) โดยทั่วไปใช้โมโนเมอร์ 2 ชนิด ที่มีหมู่ฟังก์ชัน (หมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว) สองหมู่ ในโมเลกุล กลไกการเกิดปฏิกิริยาไม่แตกต่างกับการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นของโมเลกุลเล็กๆ เช่น ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) โมโนเมอร์กลุ่มสำคัญที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น กลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก กลุ่มเอมีน และกลุ่มแอซิดแอนไฮไดรต์ เป็นต้น พอลิเมอร์ที่สำคัญทางการค้า เช่น พอลิเอสเทอร์จากเททรีนไกลคอล และไดเมทิลทาเรพทาเลต และเส้นใยไนลอน ซึ่งเป็นพอลิเอไมด์ เป็นต้น แต่ถ้าเป็นมอนอเมอร์ที่แสดงสมบัติเฉพาะตัวมากกว่า 2 หมู่ โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ได้จะเกิดเป็นกิ่งก้านสาขา และกิ่งก้านสาขานั้นอาจเกิดการเชื่อมโยงภายในโมเลกุล หรือกับโมเลกุลอื่นเกิดเป็นพอลิเมอร์เชื่อมโยง (Crosslinked polymer) หรือ พอลิเมอร์แบบร่างแห (network polymer) เกิดจากมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ ทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นพอลิเมอร์ และได้สารโมเลกุลขนาดเล็กเป็นผลพลอยได้ เช่น น้ำ แก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ แอมโมเนีย หรือเอทานอล เช่น ปฏิกิริยาระหว่างกรดอะดิปิกกับเฮกซะเมทิลีนไดเอมีน ได้พอลิเมอร์ที่มีชื่อสามัญว่า ไนลอน 6,6

โดยในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์พอลิรีโซซินอลยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (Polyresorcinol-urea-formaldehyde) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์แบบร่างแห มีคุณสมบัติที่แข็ง เปราะ ทนความร้อนที่อุณหภูมิสูง ทนต่อสารเคมี และใช้เป็นไมโครแคปซูลเพื่อทำการห่อหุ้มสารซ่อมแซม โดยเตรียมได้จากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization reaction) ระหว่างโมโนเมอร์คือ ยูเรีย กับฟอร์มัลดีไฮด์ในสภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม ซึ่งขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ไมโครเอนแคปซูลมีดังนี้

- ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นขั้นต้น: เริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างยูเรีย และฟอร์มัลดีไฮด์ที่ผิวของหยดน้ำมันโดยมีสารลดแรงตึงผิวเป็นตัวประสาน ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีในสภาวะกรดได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ ดังรูปที่ 2.7
- ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นขั้นกลาง: เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไประยะหนึ่ง จนกระทั่งปริมาณของฟอร์มัลดีไฮด์เหลือน้อยกว่ารีโซซินอล จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างรีโซซินอล และฟอร์มัลดีไฮด์ ในสภาวะกรดโดยมีตัวเร่งเป็นเฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน มีสูตรโมเลกุลดังนี้  $(\text{CH}_2\text{O})_6\text{N}_4$  ซึ่งสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.8 ได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิรีโซซินอลฟอร์มัลดีไฮด์ ดังรูปที่ 2.9
- ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นขั้นสุดท้าย: ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนการรวมกันระหว่างพอลิยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ และพอลิรีโซซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เข้าด้วยกัน เกิดเป็นพอลิเมอร์แบบร่างแหที่ประกอบไปด้วยพันธะเมทิลีนบริดจ์ (Methylene bridge) กับอีเทอร์ลิงค์เกจ (Ether linkage) เรียกผลิตภัณฑ์ หรือไมโครเอนแคปซูลที่ได้ผลสุดท้ายนี้ว่า พอลิรีโซซินอลยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิรีโซซินอล-ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ [15]

3. การกรอง (Filtration) หลังจากทำการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลที่หุ้มน้ำมันเมล็ดฝ้ายไว้ในเสร็จแล้ว กระบวนการที่สำคัญก่อนนำไมโครแคปซูลไปใช้คือ กระบวนการกรองเพื่อขจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออก คือ ของเสีย (waste) และคราบน้ำมันเมล็ดฝ้ายที่ไม่อยู่ภายในแคปซูล โดยใช้กระดาษกรอง และเครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum pump) ในการกรอง ใช้น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ผสมกับไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้เพื่อทำการล้างสิ่งเจือปนออกจากไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้ และใช้ไซลีน (Xylene) เป็นตัวทำละลายสำหรับล้างคราบน้ำมันเมล็ดฝ้ายที่ไม่อยู่ภายในแคปซูลออก โดยจะกล่าวถึงข้อมูลเกี่ยวกับตัวทำละลายในหัวข้อต่อไป

#### 2.4.4 ตัวทำละลาย [2]

ตัวทำละลาย คือ ของเหลวที่ระเหยได้ซึ่งใช้ในสารเคลือบผิว เพื่อละลายสารยึดที่เป็นของแข็งหรือมีความหนืดสูงให้ได้เป็นเนื้อเดียวกัน ตัวทำละลายหมู่ไฮโดรคาร์บอนส่วนมากได้จากน้ำมันปิโตรเลียม สำหรับตัวทำละลายอะโรมาติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น เบนซีน โทลูอีน และไซลีน สมัยก่อนได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบเป็นส่วนมาก แต่เนื่องจากปัจจุบันความต้องการใช้ตัวทำละลายดังกล่าวในอุตสาหกรรมเคลือบผิวสูงมาก โรงงานอุตสาหกรรมเคมีจึงได้คิดค้นวิธีการผลิตตัวทำละลายดังกล่าวจากน้ำมันปิโตรเลียม และทำให้ปัจจุบันตัวทำละลายดังกล่าวได้มาจากน้ำมันปิโตรเลียมมากกว่าน้ำมันดิบ ซึ่งการเปลี่ยนพาราฟิน และแนฟทีน เป็นอะโรมาติกเรียกว่าอะโรมาไทเซชัน

เบนซีนไม่เหมาะที่จะเป็นตัวทำละลาย เนื่องจากระเหยง่าย มีจุดวาบไฟต่ำ เป็นสารไวไฟ ติดไฟง่าย และเป็นพิษ ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้เบนซีนในอุตสาหกรรมเคลือบผิว ในส่วนของโทลูอีนจะมีพิษน้อยกว่าเบนซีน แต่มีจุดวาบไฟต่ำเช่นกัน สำหรับเฮกเซนนั้นถือเป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุดในการละลายน้ำมันพืช แต่เนื่องด้วยเป็นสารเคมีที่มีจุดวาบไฟต่ำมาก ในงานวิจัยนี้จึงใช้ไซลีนชนิดไซลีนผสม (Mixed-Xylene) เป็นตัวทำละลาย เนื่องจากจากมีจุดวาบไฟที่สูงกว่าตัวทำละลายทั้งสามตัวข้างต้น เพื่อป้องกันการติดไฟ และการระเหิดนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลครบทุกขั้นตอนแล้ว นำไปอบให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งสูญญากาศ (Vacuum drier) แล้วจึงนำไปผสมกับเรซินสังเคราะห์ที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ โดยการกวนที่อัตราเร็วต่ำๆ ซึ่งรายละเอียดของเรซินสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

#### 2.4.5 พอลิเมอร์ และเรซินสังเคราะห์ [1]

เรซินสังเคราะห์แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. เมลามีนเรซิน (Melamine Resin)
2. อะคริลิกเรซิน (Acrylic Resin)
3. ซิลิโคนเรซิน (Silicone Resin)
4. อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin)

โดยในงานวิจัยนี้ใช้อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) เป็นเมทริกซ์ หรือที่เรียกว่าอีพอกไซด์เรซิน (Epoxy Resins) หรือในยุโรปเรียกว่า อีพอกซีลีนเรซิน (Epoxy Resins) แต่ในสหรัฐอเมริกา นิยมเรียกว่า อีพอกซีเรซิน อีพอกซีเรซินเป็นเรซินที่ใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดในอุตสาหกรรม ประมาณ 60% ที่ผลิตขึ้นใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิว พี คาสตัน (P.Caston) ชาวสวิสเซอร์แลนด์เป็นผู้จดทะเบียนสิทธิบัตรอีพอกซีเรซินไว้ในปีค.ศ. 1938 หลังจากนั้นบริษัทซีบา (CIBA) ในสวิสเซอร์แลนด์ และบริษัทเดอโรแอนด์เรย์โนลด์ (Deroe & Reynolds) ในสหรัฐอเมริกาได้ผลิตเรซินชนิดนี้ออกจำหน่ายในชื่อทางการค้าว่า Epon และได้ผลิตส่งออกนอกสหรัฐอเมริกาในนาม Epikite

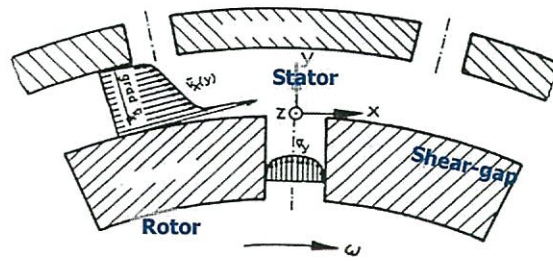
ต่อมาในปี ค.ศ. 1948 บริษัทซีบาได้ผลิตอีพอกซีเรซินออกจำหน่ายในนาม Araldite อีพอกซีเรซิน เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างได หรือพอลิไฮดรอกซีฟีนอล และอีพิคลอโรไฮดรินที่สำคัญในทางการค้า คือ อีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) อีพอกซีเรซินมีข้อเสียคือ ไม่ละลาย และไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับตัวทำละลาย และเรซินบางชนิด นอกจากนี้ฟิล์มที่ได้จากอีพอกซีเรซินอาจจะร้อนเมื่ออยู่ภายนอกเป็นระยะเวลาหลายๆ และความทนน้ำจะด้อยลงด้วย ตัวทำละลายอีพอกซีเรซิน ได้แก่ เมทิลเอธิลคีโตน ไกลคอลอีเทอร์ และไดเอซีโตน เนื่องจากตัวทำละลายเหล่านี้ราคาแพง ดังนั้นจึงมักเติมแอลกอฮอล์ หรือตัวทำละลายอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนผสมไปด้วยเพื่อลดต้นทุน

เนื่องจากอีพอกซีเรซินมีสมบัติคือ เป็นฉนวน ทนต่อสารเคมี ทนความร้อน ป้องกันน้ำ และแบคทีเรีย จึงนิยมใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารเคลือบผิวในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นสารยึดเหนี่ยวสำหรับอุตสาหกรรมสียานพาหนะต่างๆ บนพื้นผิวโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน นอกจากนี้อีพอกซีเรซินสามารถทำให้ยืดหยุ่น หรือแข็ง ทำให้โปร่งแสง หรือทึบแสงได้อีกด้วย จึงเป็นเหตุผลที่ใช้อีพอกซีเรซินเป็นเมทริกซ์ในงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งหากผสมจนกระทั่งได้สารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองแล้ว จึงนำสารตัวอย่างนี้ไปเคลือบบนผิวโลหะเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานการกัดกร่อน และความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 หลักการและเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์แคปซูล

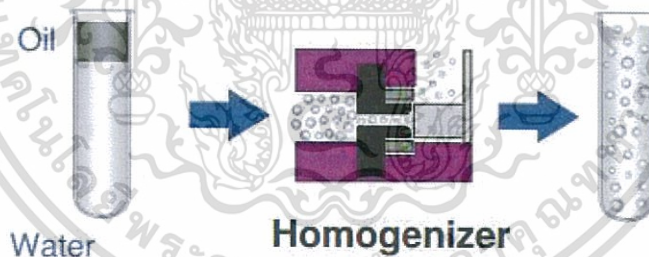
### 2.5.1 High Shear Disperser [16]



รูปที่ 2.11 ระบบแบบโรเตอร์ - สเตเตอร์ ของเครื่อง High Shear Disperser [16]

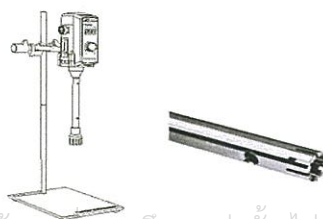
High Shear Disperser (HSD) หรือ Ultra-Turrax เป็นระบบแบบโรเตอร์ - สเตเตอร์ ของเหลวจะเข้าไปตรงกลางของระบบ และถูกเร่งความเร็วด้วยใบพัด (Rotor) ดังรูปที่ 2.11 ขณะที่ของเหลวผ่านระบบจะถูกเร่ง และลดความเร็วหลายๆ ครั้ง ทำให้เกิดแรงมหาศาลในแนวเส้นสัมผัส (High Tangential forces) ส่งผลให้พรีอิมัลชันไหลผ่านช่องตามแนวรัศมีของใบพัดของระบบ และผสมกับของเหลวในช่องว่างระหว่างใบพัด และส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ (Stator) ทำให้เกิดแรงเฉือนสูง และการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกตัวของหยดอิมัลชันเป็นหยดเล็กๆ โดยอัตราการปั่นกววนของเครื่อง High Shear Disperser นี้ อาจมีอัตราการปั่นกววนที่สูงได้ถึง 20,000 รอบต่อนาที

### 2.5.2 โฮโมจีไนเซอร์ (Homogenizer)



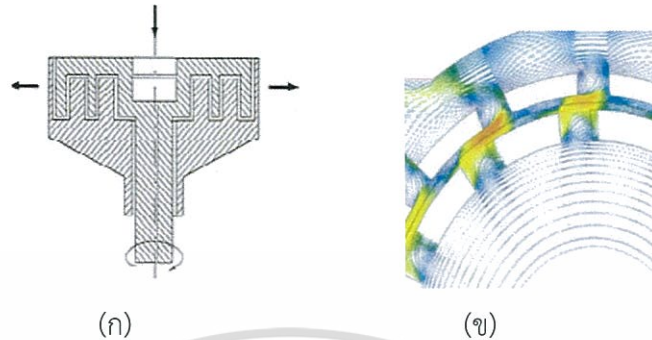
รูปที่ 2.12 ระบบอิมัลชันของสารละลายเมื่อผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน [16]

การกระจายตัวของอนุภาค (รุ่น AD300S-H) ดังรูปที่ 2.13 โดยผ่านระบบแบบโรเตอร์ - สเตเตอร์ ซึ่งถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์สารอิมัลชัน เช่น น้ำมัน และน้ำ ดังรูปที่ 2.12 วัสดุภายในหรือส่วนที่กระจายตัวซึ่งคือ น้ำมัน ถูกส่งผ่านช่องตามแนวรัศมีของระบบใบพัดผสมกับของเหลวในช่องว่างระหว่างใบพัด และส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ซึ่งประกอบด้วยรูเล็กๆอยู่จำนวนมาก ในสารละลายยูเรียฟอรัมาลดีไฮด์ รูปที่ 2.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ร่วมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.13 ลักษณะเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ [16]  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเหลวจะเข้าไปตรงกลางของระบบและถูกเร่งความเร็วโดยใบพัดดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ก) ขณะที่ผ่านระบบของเหลวจะถูกเร่งความเร็ว และลดความเร็วหลายๆครั้งทำให้เกิดแรงมหาศาลในแนวเส้นสัมผัสดังรูป 2.14 (ข)



รูปที่ 2.14 (ก) ทิศทางการไหลของสารละลายเมื่อไหลผ่านเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (ข) Velocity profile ของสารละลายเมื่อไหลผ่านเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ [16]

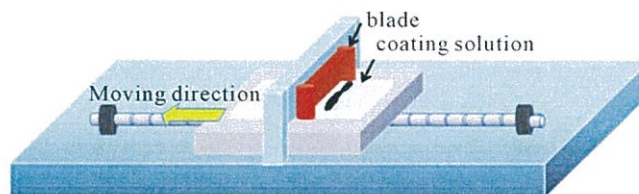
## 2.6 กระบวนการที่เกิดขึ้นของสารเคลือบผิว [2]

### 2.6.1 การเตรียมสารเคลือบผิว

นำไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการข้างต้นไปผสมกับอีพอกซีเรซิน โดยอาศัยแรงปั่นกวน และอุณหภูมิ นอกจากนี้เพื่อให้ง่ายต่อการผสมเป็นเนื้อเดียวกันจึงทำการบดไมโครแคปซูลให้ละเอียด ด้วยวิธีการนี้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของไมโครแคปซูลได้มากขึ้น สารเคลือบผิวที่ได้จะประกอบไปด้วยชั้นเมทริกซ์ของอีพอกซีเรซิน ซึ่งมีไมโครแคปซูลกระจายตัวอยู่ใน

### 2.6.2 วิธีการเคลือบผิว

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเคลือบผิวโดยใช้ใบมีด (Doctor blade method) โดยการนำชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวติดไว้บนแท่นวางชิ้นงาน จากนั้นค่อยๆ หยดสารเคลือบผิวลงบนชิ้นงาน พร้อมกับเลื่อนชิ้นงานไปในทิศทางที่สัมผัสกับใบมีดดังรูปที่ 2.15 ซึ่งควบคุมค่าความหนาของชั้นฟิล์มไว้ที่ 50-150 ไมโครเมตร และควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มโดยการวัดด้วยไมโครมิเตอร์



รูปที่ 2.15 วิธีการเคลือบผิวโดยใช้ใบมีด [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 การเกิดฟิล์ม

การเปลี่ยนสภาพจากสารเคลือบผิวในภาชนะบรรจุไปเป็นฟิล์มที่ยึดติดแน่นกับพื้นผิว และทำให้พื้นผิวมีความทนทานเพิ่มขึ้นคือ กระบวนการการเกิดฟิล์ม ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. แอปพลิเคชัน (Application) เป็นการนำสารเคลือบผิวไปเคลือบผิวหน้า หรือทำให้ผิวหน้าของวัสดุเกิดเป็นฟิล์มบางๆ ขึ้น การทำอาจใช้แปรง ลูกกลิ้ง การพ่น หรือการจุ่มก็ได้
2. ฟิกเซชัน (Fixation) เป็นการทำให้ฟิล์มติดแน่นไม่ให้หลุดออกจากผิวหน้าของวัสดุ และไม่เกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่ไม่ต้องการ เช่น กรณีที่เป็นสารเคลือบผิวที่มีตัวทำละลายอินทรีย์เป็นส่วนประกอบ การเกิดฟิล์มในขั้นตอนฟิกเซชัน จะเกิดโดยการระเหยของตัวทำละลาย หรือถ้าสารเคลือบผิวเป็นแบบลาเท็กซ์ (Latex System) ขั้นตอนการฟิกเซชันจะเกิดโดยอาศัยการระเหยของน้ำ
3. การบ่ม (Curing) เป็นการทำให้ฟิล์มที่ผ่านขั้นตอนฟิกเซชันแล้วมีความทนทานดีขึ้น ซึ่งอาจทำโดยการใช้แสง ความร้อน หรืออากาศ เช่น สีน้ำมันทาบ้านจะเกิดการบ่ม เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ หรือการนำเคลือบที่ทำจากพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตไปอบ ก็เป็นการบ่มอีกวิธีหนึ่ง

กระบวนการเกิดฟิล์มของสารเคลือบผิวบางชนิด ไม่จำเป็นต้องมี 3 ขั้นตอนเสมอไป เช่น แล็กเกอร์มีขั้นตอนฟิกเซชัน และการบ่มรวมกัน โดยอาศัยการระเหยของตัวทำละลายระหว่างการเกิดแอปพลิเคชัน เป็นต้น

### 2.6.4 การแห้งของสารเคลือบผิว

โดยทั่วไปสารเคลือบผิวจะแห้งโดยกรรมวิธีต่างๆ กัน 2 แบบ คือ

#### 1. การแห้งโดยกรรมวิธีทางกายภาพ (Physical Drying)

การแห้งด้วยวิธีนี้เกิดจากการระเหยของตัวทำละลายกลายเป็นฟิล์มยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะทุติยภูมิอย่างอ่อนๆ ดังนั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นจึงยังคงละลายได้ในตัวทำละลายของมัน ตัวอย่างของสารเคลือบผิวแห้งโดยกรรมวิธีทางกายภาพได้แก่ แล็กเกอร์ และสีที่ทำจากยางคลอรีเนต เป็นต้น

#### 2. การแห้งโดยกรรมวิธีทางเคมี (Chemical Drying)

ฟิล์มที่ได้จากการแห้งตัวโดยวิธีนี้จะยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะปฐมภูมิ จากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นฟิล์มที่ได้จะแข็งแรง และทนทานต่อตัวทำละลาย การแห้งโดยกรรมวิธีทางเคมีอาจจะเกิดได้โดย

ก. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) สารเคลือบผิวประเภทนี้จะดูออกซิเจนในอากาศเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ขนาดของอนุภาคของสารเคลือบผิวใหญ่ขึ้น จนรวมตัวเป็นฟิล์มแห้งตามต้องการ เช่น การแห้งของน้ำมันเมล็ดฝ้ายซึ่งมีคุณสมบัติที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นต้น การแห้งโดยวิธีนี้อาจเร่งให้แห้งเร็วขึ้นโดยการใส่สารเร่งแห้ง

ข. ปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) สารเคลือบผิวประเภทนี้ส่วนใหญ่บรรจุในภาชนะแยกกัน ก่อนใช้จึงนำมาผสมกันตามอัตราส่วนที่ผู้ผลิตแนะนำ ซึ่งเมื่อผสมแล้วจะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นฟิล์มที่แห้งแข็งเรียกสารเคลือบผิวชนิดนี้ว่า สารเคลือบผิวชนิดบ่มเย็น เช่น อีพอกซีเรซินที่แบ่งออกเป็นชนิดเอ (A) โดยส่วนมากจะเป็นส่วนของเนื้ออีพอกซี และชนิดบี (B) เป็นส่วนของสารทำให้แข็งหรือสารเร่งแข็ง (Hardener) เป็นต้น แต่ถ้การเกิดปฏิกิริยาต้องใช้อุณหภูมิสูงจะเรียกสารเคลือบผิวชนิดนี้ว่า สารเคลือบผิวชนิดอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว [6,12,18,19]

### 2.7.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวในลำดับต้นๆ มีดังนี้คือ

1. ค่าแรงยึดเกาะระหว่างสารเคลือบผิวกับผิวโลหะที่เคลือบ (Adhesion strength)
2. ค่าความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance)

ซึ่งทั้งสองค่านี้จะมีค่ามาก หรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับขนาด และความเข้มข้นของแคปซูลที่นำมาผสมกับอีพอกซีเรซิน เพื่อใช้เป็นสารเคลือบผิว หากขนาด และความเข้มข้นของแคปซูลในสารเคลือบผิวมีความเหมาะสม ปัจจัยที่กล่าวไว้ข้างต้นก็จะมีค่ามากพอที่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวมีค่าสูงด้วยเช่นกัน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานาโน และลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูล อีกทั้งยังทำการทดสอบค่าความต้านทานการกัดกร่อน โดยรายละเอียดจะขอกกล่าวในหัวข้อต่อไป

### 2.7.2 การศึกษานาโน และลักษณะทางกายภาพ

ทำการศึกษานาโน และลักษณะทางกายภาพของพอลิโรซินอลยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์แคปซูล โดยใช้เครื่อง EVO๑๐ HD ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) นวัตกรรมล่าสุดจาก Carl Zeiss จากนั้นทำการวัดขนาดอนุภาคจากข้อมูลที่ได้โดยผ่านโปรแกรม ImageJ และทำการพล็อตกราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแคปซูลโดยใช้ Microsoft Excel

### 2.7.3 การวิเคราะห์พันธะเคมีของไมโครแคปซูล

ทำการวิเคราะห์พันธะเคมีของไมโครแคปซูลโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR Spectroscopy) เพื่อให้ทราบองค์ประกอบของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้ และเพื่อตรวจสอบว่าแคปซูลประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ น้ำมันเมล็ดฝ้ายอยู่ภายใน (Core) และพอลิโรซินอลยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เป็นเปลือกนอก (Shell)

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่เป็นประโยชน์ต่อนักเคมีช่วง  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  พลังงานของรังสีอินฟราเรดจะอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับการสั่น (vibration) ของพันธะภายในโมเลกุล หากการสั่นของพันธะใดเกิดที่ความถี่ที่ตรงกับความถี่ของรังสีอินฟราเรด ก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนขึ้น ซึ่งการสั่นของโมเลกุลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ การยืด-หด หรือสเตรชซิง (stretching) ของพันธะ และการงอ หรือเบนดิง (bending) ของพันธะ สเตรชซิงเป็นการเคลื่อนที่อย่างเป็นจังหวะตามแนวแกนพันธะของอะตอมที่ต่อกันอยู่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความยาวพันธะ ซึ่งมีได้สองรูปแบบย่อยคือ สเตรชซิงแบบสมมาตร (symmetric) และแบบอสมมาตร (asymmetric) ส่วนเบนดิงเป็นการเคลื่อนที่ที่ทำให้ เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมพันธะ และทั้งหมดนี้อาจเกิดการเคลื่อนที่อยู่ในระนาบเดียวกัน (in-plane) หรือต่างระนาบ (out-of-plane) ก็ได้

การสั่นในลักษณะต่างๆเหล่านี้ จะมีการดูดกลืนพลังงานที่เป็นค่าเฉพาะของมัน ซึ่งมักอยู่ในช่วงคลื่นอินฟราเรด แต่เนื่องจากในโมเลกุลหนึ่งๆ มีพันธะได้หลายแบบ และพันธะแต่ละพันธะก็มีรูปแบบการสั่นได้อีกหลายแบบ ทำให้โมเลกุลหนึ่งๆ จะแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้หลายช่วง

เอกสคลื่นพร้อมๆ กัน ลักษณะการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดจะเป็นแถบ (band) หรือพีค (peak) หลายๆค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา หรือเผยแพร่ข้อมูลไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

แถบ หรือพีก ที่แสดงถึงค่าปริมาณรังสีอินฟราเรดที่ถูกดูดกลืน ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์ (% Transmittance) ซึ่งหมายถึงปริมาณรังสีที่สามารถทะลุผ่านตัวอย่างออกไปได้ เทียบกับเวฟนัมเบอร์ ซึ่งมักอยู่ในช่วง  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  กราฟที่ได้จะเรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม ซึ่งแต่ละแถบการดูดกลืนสามารถบ่งบอกลักษณะเฉพาะลงไปได้อีก เช่นหากตัวเลขทรานสมิตแตนซ์มีค่ามาก เรียกว่าสัญญาณนั้นอ่อน (weak ใช้ตัวย่อ w) ในทางกลับกัน หากตัวเลขทรานสมิตแตนซ์มีค่าน้อย เรียกว่าสัญญาณนั้นเข้ม (strong ใช้ตัวย่อ s) สัญญาณที่มีความเข้มปานกลางจะเรียกว่า (medium ใช้ตัวย่อ m) นอกจากนี้แถบการดูดกลืนยังอาจมีลักษณะกว้าง (broad) หรือแคบ (sharp) โดยการสั้นของพันธะแต่ละแบบก็จะมีลักษณะเฉพาะของพีกที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งนำมาใช้ประกอบการพิจารณาโครงสร้างของโมเลกุล นอกเหนือจากการพิจารณาจากค่าเวฟนัมเบอร์ ที่เกิดการดูดกลืนแต่เพียงอย่างเดียวได้

#### 2.7.4 การทดสอบค่าความต้านทานการกัดกร่อน

การเตรียมตัวอย่างเพื่อการนำไปวัดค่าความต้านทานการกัดกร่อนนั้น เริ่มจากนำเหล็กที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวจนแห้งเรียบร้อยแล้วไปกรีดให้เกิดรอยแตกบนชั้นฟิล์มของสารเคลือบผิวโดยใช้ใบมีด จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการกัดกร่อน จากนั้นจึงนำเหล็กไปตรวจวัดค่าความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเครื่องอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS) โดยใช้ความถี่ในการวิเคราะห์เท่ากับ 0.01-10,000 เฮิร์ตซ์ และแรงดันไฟฟ้า 0.01 โวลต์

#### 2.7.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว

นอกจากการวิเคราะห์ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวเพิ่มเติมอีกด้วย

### 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Hatami Boura และคณะ [6] ได้ศึกษาความสามารถในการรักษาตนเอง และความแข็งแรงในการยึดเกาะของแคปซูลในสารเคลือบ โดยแคปซูลขนาดไมโครและนาโน โดยภายในบรรจุน้ำมันเมล็ดฝ้ายที่มีฤทธิ์ต้านทานการกัดกร่อนเอาไว้ และทำการสังเคราะห์ทั้งขนาดไมโคร และนาโน จากนั้นนำไปรวมเข้ากับสารเคลือบผิวอีพอกซี แล้วนำไปเคลือบบนโลหะคาร์บอน เพื่อทดสอบการต้านทานการกัดกร่อน ความแข็งแรงในการยึดเกาะ และความทนทานของการฝังตัวในสารเคลือบ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า อัตราการกวนในการผลิตไมโครแคปซูลนั้นเป็นสิ่งสำคัญ ที่อัตราการกวนสูงจะได้แคปซูลขนาดเล็ก ซึ่งจะเกิดปัญหาน้อยในการนำไปรวมกับสารเคลือบ และแคปซูลขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพในการรักษาตนเองได้สูง และความเข้มข้นของสารที่บรรจุภายในแคปซูล หากมีปริมาณที่มากพอ ก็จะทำให้มีประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนได้สูง แคปซูลชนิดนาโนแคปซูลจะสามารถลดการซึมผ่านของสารที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ดีกว่าไมโครแคปซูล แต่นาโนแคปซูลนั้นจะเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการใช้งานในการป้องกันการกัดกร่อนในระยะสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Patrik Scholz และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาการผลิตนาโนอิมัลชันด้วยเครื่องปั่นกวนความเร็วสูงโดยใช้เครื่อง ART MICCRA D27 ระบบใบพัด จะทำให้ได้ขนาดของหยดนาโนอิมัลชันเฉลี่ยประมาณ 135 นาโนเมตร โดยโครงสร้างของระบบอิมัลชันจะเสถียรนั้นต้องใช้เวลาอย่างน้อย 3 เดือน ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการผลิตที่มีความเหมาะสมคือ ใช้อัตราในการกวนด้วยอัตราเร็ว 36,000 รอบต่อนาที (ค่าความเร็วสูงสุด) และใช้เวลาในการปั่นกวน 5 นาที ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เวลาน้อยลงในการทำให้เกิดหยดนาโนอิมัลชันเมื่อใช้ใบพัดที่มีขนาดช่องว่าง (slit) เล็กมามากๆ ยกตัวอย่างเช่น ช่องว่างของหัวใบพัดกว้าง 0.5 มิลลิเมตร เป็นต้น โดยขนาดของหยดนาโนที่ได้จากเครื่องปั่นกวนความเร็วสูงจะใหญ่กว่าขนาดหยดนาโนที่ได้จากเครื่องโฮโมจีไนเซอร์แรงดันสูง อย่างไรก็ตามเครื่องปั่นกวนความเร็วสูงยังคงเป็นวิธีการสังเคราะห์นาโนอิมัลชันที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์ที่รวดเร็ว ต้นทุนเหมาะสมกับประสิทธิภาพ และสามารถเพิ่มขนาดกำลังการผลิตได้ง่าย

Li Yuan และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาการเตรียม และวิเคราะห์คุณสมบัติของไมโครแคปซูลที่บรรจุลงในสารอีพอกซี โดยกล่าวถึงการเตรียมไมโครแคปซูลโดยที่เปลือกของไมโครแคปซูลจะใช้เป็นยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ ส่วนคอร์ จะใช้ DGEBA และ BGE ผสมกันในอัตราส่วนของน้ำหนักของ BGE ต่อ DGEBA เป็น 0.2 การทดลองจะทำการเปลี่ยนสัดส่วนโดยน้ำหนักของ ยูเรีย ต่อ พอร์มาลดีไฮด์ สัดส่วนโดยน้ำหนักของคอร์ ต่อ เซลล์ อัตราการกวน ความคงทนในการเก็บรักษาของไมโครแคปซูลที่เวลาและอุณหภูมิที่แตกต่างกันแล้วทำการตรวจสอบคุณสมบัติของไมโครแคปซูล ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนสัดส่วนโดยน้ำหนักของคอร์ ต่อ เซลล์ ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ค่าตั้งแต่ 0.5-2.0 ส่วนสัดส่วนโดยน้ำหนักของ ยูเรีย ต่อ พอร์มาลดีไฮด์ กำหนดให้คงที่ไว้ที่ 0.5 และอัตราการกวน กำหนดให้คงที่ไว้ที่ 380 รอบต่อนาที อัตราส่วนของคอร์ ต่อ เซลล์ ที่ได้ผลิตภัณฑ์มากที่สุดคือ 1.25 เมื่อเปลี่ยนสัดส่วนโดยน้ำหนักของ ยูเรีย ต่อ พอร์มาลดีไฮด์ ตั้งแต่ 0.375-0.75 โดยให้สัดส่วนโดยน้ำหนักของคอร์ ต่อ เซลล์ อยู่ที่ 1.00 และ อัตราการกวนกำหนดให้คงที่ 325 รอบต่อนาที สัดส่วนโดยน้ำหนักของ ยูเรีย ต่อ พอร์มาลดีไฮด์ที่ได้ผลิตภัณฑ์มากที่สุดคือ 0.5 ความคงทนของไมโครแคปซูลสามารถดูได้จากการสูญเสียน้ำหนัก ซึ่งพบว่าระยะเวลาในการรักษาไมโครแคปซูลที่สามารถรักษา น้ำหนักให้คงที่ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนที่จะมีการสูญเสียเพิ่มมากขึ้นคือ 50 วัน เหตุผลหลักในการสูญเสีย น้ำหนักของไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ ความเสียหายของพอร์มาลดีไฮด์อิสระ และการแพร่ของสารที่อยู่ในคอร์ออกจากเปลือกไมโครแคปซูล

M. Behzadnasab และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาการเตรียมไมโครแคปซูลซึ่งสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอลิเมอร์ไรเซชันของยูเรีย และพอร์มาลดีไฮด์ โดยภายในบรรจุน้ำมันเมล็ดฝ้ายเอาไว้ โดยรูปทรงของไมโครแคปซูลที่ได้จะเป็นทรงกลมทั่วไป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-300 ไมโครเมตร และบรรจุน้ำมันเมล็ดฝ้าย 63-77 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งจะศึกษาผลจากการสังเคราะห์โดยเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนคอร์ ต่อ เซลล์ และอัตราการปั่นกวน ซึ่งจะศึกษาในส่วนของคุณสมบัติไมโครแคปซูลเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคปซูลที่สังเคราะห์ได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้บนสารเคลือบผิวโดยใช้อีพอกซีผสมกับไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้ จากนั้นทำการศึกษาผลต่างๆ ของสารเคลือบผิวคือ สมบัติการต้านทานแรงดึง ประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเอง ผลที่ได้คือสารเคลือบผิวที่มีปริมาณไมโครแคปซูลผสมอยู่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีขนาดแคปซูลเฉลี่ยเท่ากับ 53 ไมโครเมตร จะมีประสิทธิภาพการต้านทานการกัดกร่อน และการซ่อมแซมตัวเองดีที่สุด

Aijuan Gu และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาค่าเตรียม และวิเคราะห์คุณสมบัติของไมโครแคปซูลที่บรรจุลงในสารอีพอกซี โดยกล่าวถึงตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูล ซึ่งประกอบไปด้วย ชนิดของสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นของของสารลดแรงตึงผิว และอัตราการให้ความร้อน ในบทความนี้จะนำตัวแปรต่างๆ มาวิเคราะห์เกี่ยวกับขนาดและลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูล แล้วทำการทดสอบ ความเสถียรในการเก็บรักษา ความต้านทานตัวทำละลาย และความแข็งแรงทางกายภาพของไมโครแคปซูล ผลที่ได้แสดงออกมาให้เห็นว่า การสร้างไมโครแคปซูล เป็นผลมาจากชนิดของสารลดแรงตึงผิว ขนาดของไมโครแคปซูลสามารถควบคุมได้โดยความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยมีความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญ ไมโครแคปซูลที่ถูกเตรียมโดยใช้สารลดแรงตึงผิว SDBS แสดงให้เห็นว่ามีความเสถียรในการเก็บรักษา ความต้านทานตัวทำละลาย และความแข็งแรงทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่ดี

Ashok Kumar และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการรักษาตนเองของสารเคลือบผิวป้องกันการกัดกร่อนสำหรับใช้กับงานอุปกรณ์ที่เป็นโลหะต่างๆไป และจะทำการทดสอบโดยใช้แคปซูลชนิดยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ โดยมีการบรรจุสารที่อยู่ภายในแคปซูลที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงใส่ลงไปในสารเคลือบผิวที่มีขายกันโดยทั่วไป ในการทดสอบจะใช้สารภายในแคปซูลที่แตกต่างกัน 5 ชนิด และเทคนิคในการเคลือบที่แตกต่างกัน 3 วิธี การทดสอบแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของไมโครแคปซูลขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการเคลือบ

## บทที่ 3

# ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

### 3.1 ขั้นตอนการศึกษา

- 3.1.1 รวบรวม และศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2 ออกแบบการทดลอง และจัดหาสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
- 3.1.3 ทำการทดลอง
- 3.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

### 3.2 วิธีดำเนินงาน

#### 3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water ; DI water)
2. ยูเรีย (Urea)
3. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)
4. แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride)
5. รีโซซินอล (Resorcinol)
6. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol ; PVA)
7. น้ำมันเมล็ดฝ้าย (Linseed Oil ; LO)
8. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid ; HCl)
9. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride ; NaCl)
10. อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)
11. ไซลีน (Xylene)

#### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ปีกเกอร์
2. เครื่อง Homogeneous Dispensing (Homogenizer)
3. เครื่องปั่นกวน (Magnetic stirrer) และแท่งแม่เหล็กปั่นกวน (Magnetic bar)
4. เครื่องปั่นกวนด้วยใบพัด (High speed rotor)
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก
6. กระจกบอทดวง
7. แท่งแก้วคนสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ขาดั่ง และตัวหนีบปิวยเรต
9. เทอร์โมมิเตอร์
10. หลอดหยดสาร
12. ซ้อนตักสาร
13. นาฬิกาจับเวลา
14. กรวยแยก
15. กระจกทรง
16. เครื่องกรองสุญญากาศ
17. ตู้อบ
18. กระจกทรายเบอร์ 600 และเบอร์ 200
19. ดินน้ำมัน
20. เครื่องขัดเหล็ก (Finishing sander)
21. แผ่นเหล็กกล้า ขนาด 1×1 นิ้วหนา 1 มิลลิเมตร
22. เครื่องตัดเตอร์เบลต และใบมีด

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งขั้นตอนการทดลองได้ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล (หัวข้อ 3.3.1-3.3.2) เพื่อหาสภาวะในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ ในส่วนที่สองเป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ (หัวข้อ 3.3.3 -3.3.4) โดยจะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ ไปจนถึงขั้นตอนการวัดค่าต่างๆ

#### 3.3.1 กระบวนการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล

1. นำน้ำปราศจากไอออนจำนวน 260 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) 0.9826 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร ภายใต้อัตราเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง
2. เติมนูเรีย 5 กรัม แอมโมเนียมคลอไรด์ 0.5 กรัม และโซซิซิมอล 0.5 กรัมลงไปในสารละลายที่ได้เตรียมไว้ในข้อ 1
3. ปรับค่า pH ให้ได้ประมาณ 3.5 โดยใช้ สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในน้ำปราศจากไอออน
4. จากนั้นเริ่มใส่น้ำมันเมล็ดฝ้ายซำๆ ในรูปแบบของอิมัลชันปริมาณ 60 มิลลิลิตร จากนั้นรอ 10 นาที เพื่อให้สารมีความเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เติมสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณ 34 มิลลิลิตร และเพิ่มความร้อนซ้ำๆ เพื่อรักษาอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส ภายใต้การกวน 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
6. ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จะได้ไมโครแคปซูลที่ได้จะอยู่ในรูปของสารแขวนลอย นำใส่กรวยแยกทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง
7. จากนั้นกรองภายใต้ความดันสุญญากาศ แล้วล้างไมโครแคปซูลด้วยน้ำปราศจากไอออน และไซลีนตามลำดับ เพื่อขจัดคราบไขมันที่เกาะอยู่
8. ไมโครแคปซูลที่ได้จะถูกเก็บไว้ในเตาอบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
9. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-8 โดยเปลี่ยนสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ตามหัวข้อ 3.3.2

### 3.3.2 สภาวะที่ทำการทดลองในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล

ตัวแปรต้น:

1. วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล
2. อัตราเร็วในการปั่นกวน

ตัวแปรตาม:

ขนาดอนุภาค การกระจายตัว และลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูล

ตัวแปรควบคุม:

1. เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ (4 ชั่วโมง)
2. อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ (55 องศาเซลเซียส)
3. ปริมาตรของบีกเกอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ ควบคุมรัศมีของบีกเกอร์ (600 มิลลิลิตร)

ตารางที่ 3.1 สภาวะต่างๆ ที่ทำการทดลองในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล

ตัวอย่าง	เครื่องที่ใช้ในการสังเคราะห์	อัตราเร็วการปั่นกวน (รอบต่อนาที)	รายละเอียด
1	โฮโมจีไนเซอร์	300	-
2	โฮโมจีไนเซอร์	400	-
3	โฮโมจีไนเซอร์	500	-
4	เครื่องปั่นกวนด้วยใบพัด	400	-
5	เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก	400	-
6	เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก	1,000	-
7	โฮโมจีไนเซอร์ และ เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก	400 (30 นาที) และ 1,000 (3 ชั่วโมง 30 นาที)	สังเคราะห์โดยใช้โฮโมจีไนเซอร์ 30 นาที จากนั้นใช้เครื่องปั่นกวนแม่เหล็กในการสังเคราะห์ต่ออีก 3 ชั่วโมง 30 นาที
8	โฮโมจีไนเซอร์ (ปรับปรุง)	400	ปริมาณสารตั้งต้นทั้งหมดลดลงครึ่งหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 กระบวนการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว

1. ตัดแผ่นเหล็กกล้าที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร ให้มีขนาด 1X1 นิ้ว และทำความสะอาดพื้นผิวของเหล็กกล้า
2. เตรียมสารเคลือบผิวเหล็กกล้าโดยผสมสารเคลือบผิวอีพอกซีเรซิน A : B ในอัตราส่วน 4 : 1
3. นำไมโครแคปซูลมาผสมกับสารเคลือบผิวอีพอกซีในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ลงในบีกเกอร์ภายใต้อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง
4. จากนั้นนำสารเคลือบผิวที่ผสมไมโครแคปซูลมาเคลือบบนพื้นผิวของเหล็กกล้า โดยกระบวนการด็อกเตอร์เบลต (Doctor Blade Process) โดยควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มด้วยไมโครมิเตอร์ให้อยู่ที่ประมาณ 50-150 ไมโครเมตร
5. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 4 โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของไมโครแคปซูลจาก 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็น 0, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
6. หลังจากเคลือบผิวเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ตั้งทิ้งไว้ 1 อาทิตย์ที่อุณหภูมิห้อง
7. นำเหล็กกล้าที่เคลือบสารเคลือบผิวแล้วไปกรีดให้เกิดรอยแตกบนชั้นฟิล์ม และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1, 7 และ 21 วัน ตามลำดับ ก่อนนำไปวัดค่าความต้านทานการกัดกร่อน
8. วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนโดยเครื่องอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (Electrochemical Impedence Spectroscopy; EIS) ในช่วงความถี่ 0.01 – 10,000 เฮิร์ตซ์ และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ คือ 0.01 โวลต์
9. วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของไมโครแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopes; OM)
10. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2-9 โดยเปลี่ยนสภาวะที่ใช้ในการทดลองตามหัวข้อที่ 3.3.4

### 3.3.4 สภาวะที่ทำการทดลองในการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว

- ตัวแปรต้น:
1. อัตราการปั่นกวนในกระบวนการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล (รอบต่อนาที)
  2. อัตราส่วนของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิวอีพอกซี
  3. เวลาที่ใช้ในการแช่ตัวอย่าง (เหล็กกล้า) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์
- ตัวแปรตาม: ค่าความต้านทานการกัดกร่อน และประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวแปรควบคุม: 1. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)  
2. ความหนาชั้นฟิล์มของสารเคลือบผิว (50-150 ไมโครเมตร)

ตารางที่ 3.2 สภาวะต่างๆ ที่ทำการทดลองในการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว

ตัวอย่าง	อัตราการปั่นกวนในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล (รอบต่อนาที)	อัตราส่วนความเข้มข้นของไมโครแคปซูลในสารเคลือบผิว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	จำนวนวันในการแช่สารละลายน้ำเกลือ
1			1
2	-	0 (C-00)	7
3			21
4			1
5		10 (M4-10)	7
6			21
7			1
8	400 (M4-XX)	15 (M4-15)	7
9			21
10			1
11		20 (M4-20)	7
12			21
13			1
14		10 (M5-10)	7
15			21
16			1
17	500 (M5-XX)	15 (M5-15)	7
18			21
19			1
20		20 (M5-20)	7
21			21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลอง

##### 4.1.1 ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่ทำการทดลองในสถานะต่างๆ

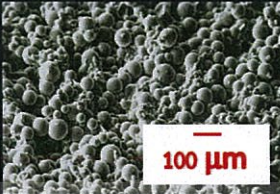

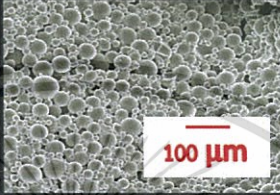

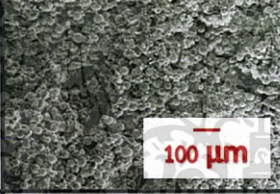





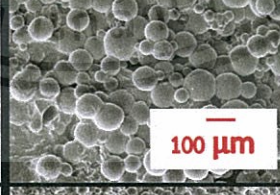
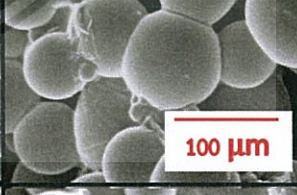
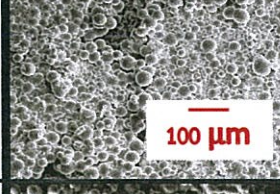
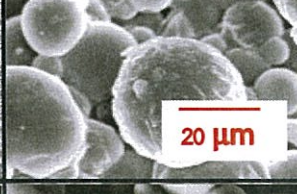


ตัวอย่าง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูล (ไมโครเมตร)
1	50.09
2	18.62
3	11.97
4	90.42
5	100.09
6	57.03
7	18.58
8	20.50

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูลที่เปลี่ยนแปลงไปตามสถานะที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยตัวอย่างที่ 1 ถึง 3 เป็นการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลโดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราเร็วในการปั่นกววนจาก 300 ถึง 500 ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้คือเมื่ออัตราการเร็วในการปั่นกววนเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูลเล็กลงจาก 50.09 เป็น 11.97 ไมครอน ตามลำดับ

นอกจากอัตราเร็วในการปั่นกววนจะส่งผลต่อขนาดของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้แล้ว ปัจจัยที่สำคัญต่อการกำหนดขนาดไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้นั้นยังขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์อีกด้วย จากตารางที่ 4.1 ได้ทำการเปลี่ยนแปลงวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ ผลที่ได้คือขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้นั้นเปลี่ยนไป นอกจากนี้วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์และอัตราเร็วในการปั่นกววนยังส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้อีกด้วย ซึ่งจะขอก้าวไปในหัวข้อต่อไป

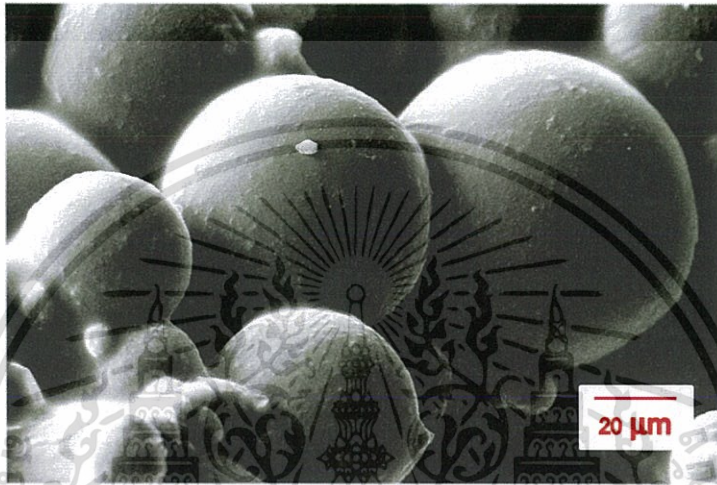
## 4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูล

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ในสภาวะต่างๆ

ตัวอย่าง	วิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ และอัตราเร็วในการปั่นกวน (รอบต่อนาที)	การกระจายตัวของ ไมโครแคปซูล	พื้นผิวของ ไมโครแคปซูล
1	โซโม่จีนเซอร์ (300)		
2	โซโม่จีนเซอร์ (400)		
3	โซโม่จีนเซอร์ (500)		
4	เครื่องปั่นกวนด้วยใบพัด (400)		
5	เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (400)		
6	เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (1,000)		
7	โซโม่จีนเซอร์ (400) และ เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (1,000)		
8	โซโม่จีนเซอร์ (ปรับปรุง) (400)		

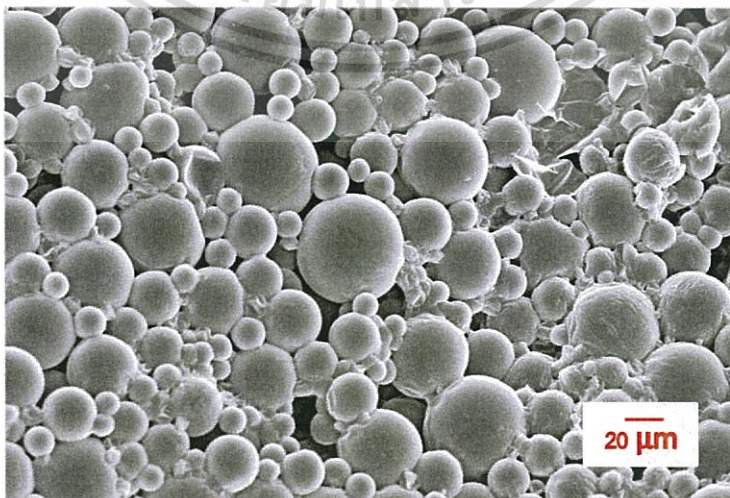
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาหรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญเตเห็นาเบเซบระเขยนต่านการค้ำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าวิธีการ และอัตราเร็วในการปั่นกวนที่ใช้ในการสังเคราะห์ ไมโครแคปซูล ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพ ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูล โดยหากเลือกวิธีการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยเครื่องไฮโมจิเนเซอร์จะทำให้ได้ไมโครแคปซูลที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด นอกจากนี้ยังได้ไมโครแคปซูลที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นทรงกลม ไม่ติดกันเป็นแผ่น แต่หากอัตราเร็วในการปั่นกวนมากเกินไปอาจส่งผลให้ไมโครแคปซูลสูญเสียรูปร่างจนกระทั่งกลายเป็นแผ่น (ไม่เป็นทรงกลม) ซึ่งอาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวที่จะนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปได้



รูปที่ 4.1 ขนาดอนุภาค และลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ด้วยเครื่องไฮโมจิเนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที

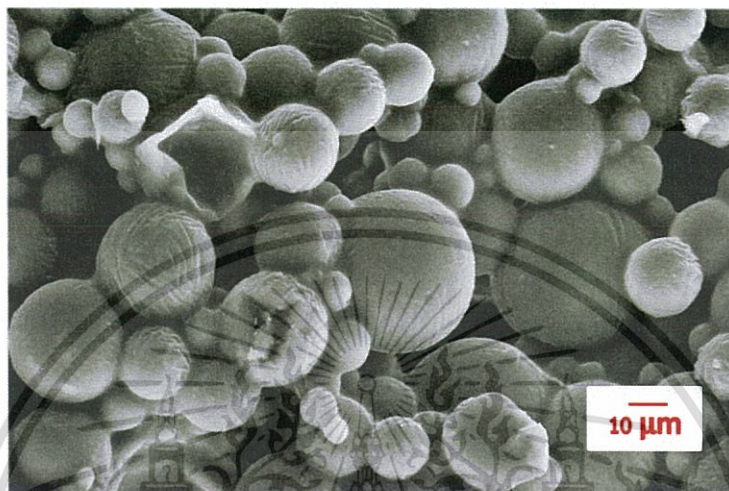
การสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยเครื่องไฮโมจิเนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลค่อนข้างใหญ่ และมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างหนา หรือแข็ง รูปร่างทรงกลม และมีบางส่วนที่ติดกันเป็นแผ่นเล็กน้อย อาจเป็นผลของอัตราเร็วในการปั่นกวนที่น้อยเกินไปทำให้เกิดการผสมที่ไม่เข้ากันของสารละลาย



รูปที่ 4.2 ขนาดอนุภาค และลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ด้วยเครื่องไฮโมจิเนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลค่อนข้างเล็ก และมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างบาง รูปร่างทรงกลม และไม่ติดกันเป็นแผ่น แต่มีบางส่วนที่แตกออก อาจเกิดจากความไม่เสถียรของเปลือกพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ หรืออัตราเร็วในการปั่นกวนที่สูงขึ้น ซึ่งหมายถึงการควบคุมปฏิกิริยาจะยากขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.3 ขนาดอนุภาค และลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 500 รอบต่อนาที

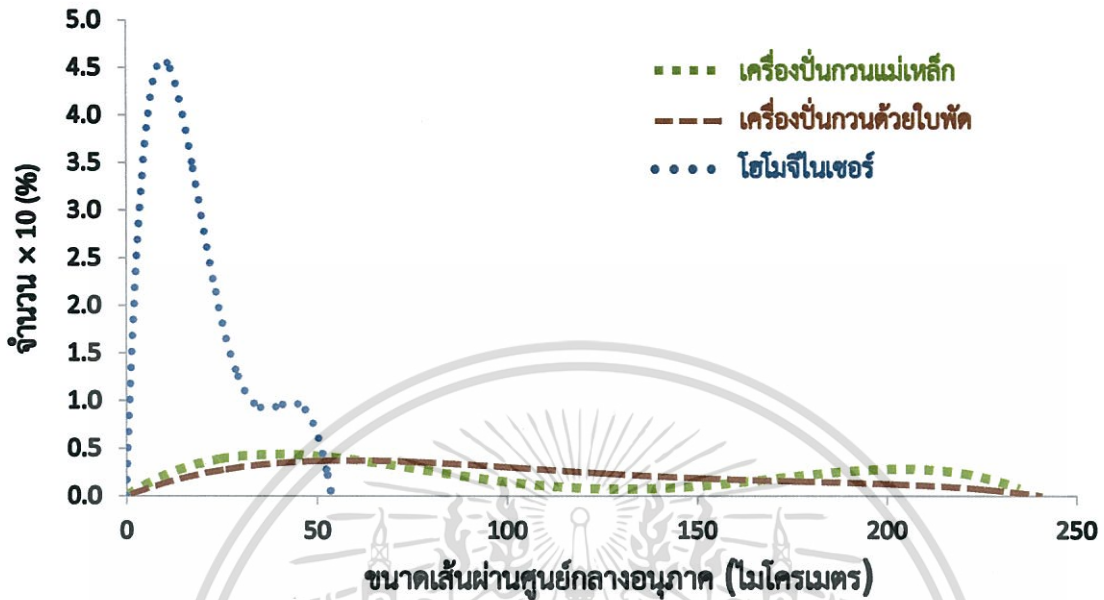
ในส่วนของการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 500 รอบต่อนาที จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลค่อนข้างเล็ก และมีลักษณะพื้นผิวบางมาก ขรุขระ และมีบางส่วนที่แตกออกเป็นแผ่น อาจเป็นผลมาจากอัตราเร็วในการปั่นกวนที่สูงเกินไปจนทำให้เกิดการผสมของสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งหากเพิ่มอัตราเร็วในการปั่นกวนมากกว่าค่านี้ อาจทำให้สังเคราะห์ได้เป็นแผ่นพอลิเมอร์ที่ภายในมีส่วนผสมของน้ำมัน เมล็ดฝ้ายเจือปนอยู่

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 300, 400 และ 500 รอบต่อนาที เท่านั้น

ในส่วนของวิธีการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยเครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก และเครื่องปั่นกวนด้วยใบพัดนั้น ได้ทำการศึกษา และทดลองเพิ่มเติมเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ และเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับวิธีในการสังเคราะห์อนุภาคทรงกลมในอนาคตที่เหมาะสมต่อไป

#### 4.1.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูล

- ผลของวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ (400 รอบต่อนาที)

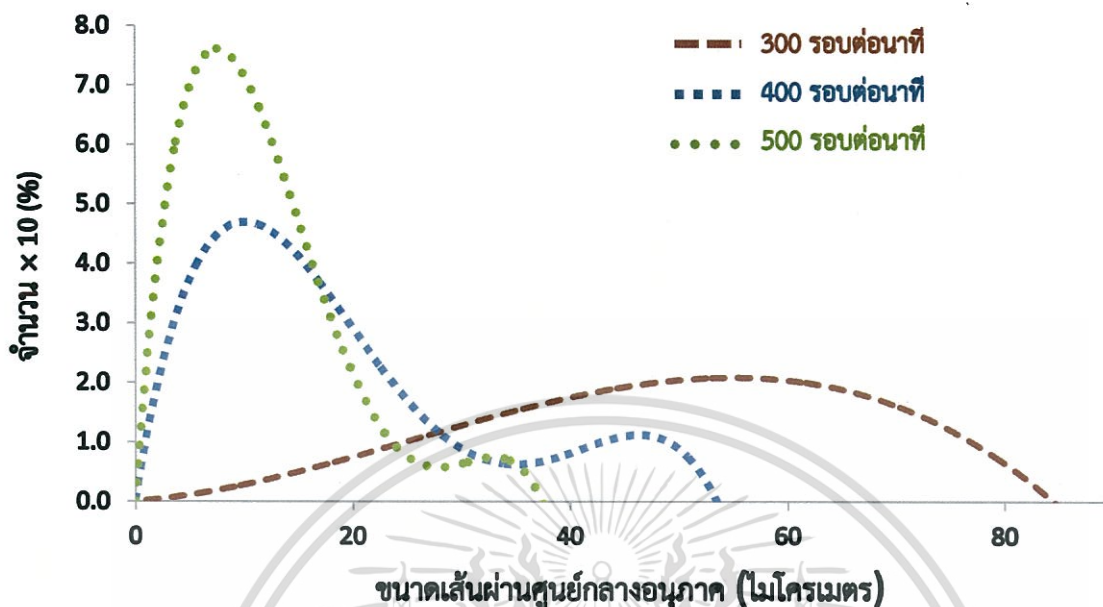


รูปที่ 4.4 ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน โดยควบคุมอัตราเร็วที่ 400 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าการเลือกใช้วิธีการในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลที่ต่างกัน ส่งผลให้การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลต่างกัน ซึ่งวิธีการสังเคราะห์เพื่อให้ได้ไมโครแคปซูลที่มีขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่ดีที่สุดคือ การสังเคราะห์ไมโครแคปซูลโดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ซึ่งทำให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูลที่เล็กที่สุดเท่ากับ 18.62 ไมโครเมตร ดังข้อมูลตารางที่ 4.1

ในขั้นตอนต่อไปจึงเลือกที่จะศึกษาผลของอัตราเร็วในการปั่นกวนโดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ในการสังเคราะห์แคปซูล

● ผลของอัตราเร็วในการปั่นกววน (โฮโมจีไนเซอร์)

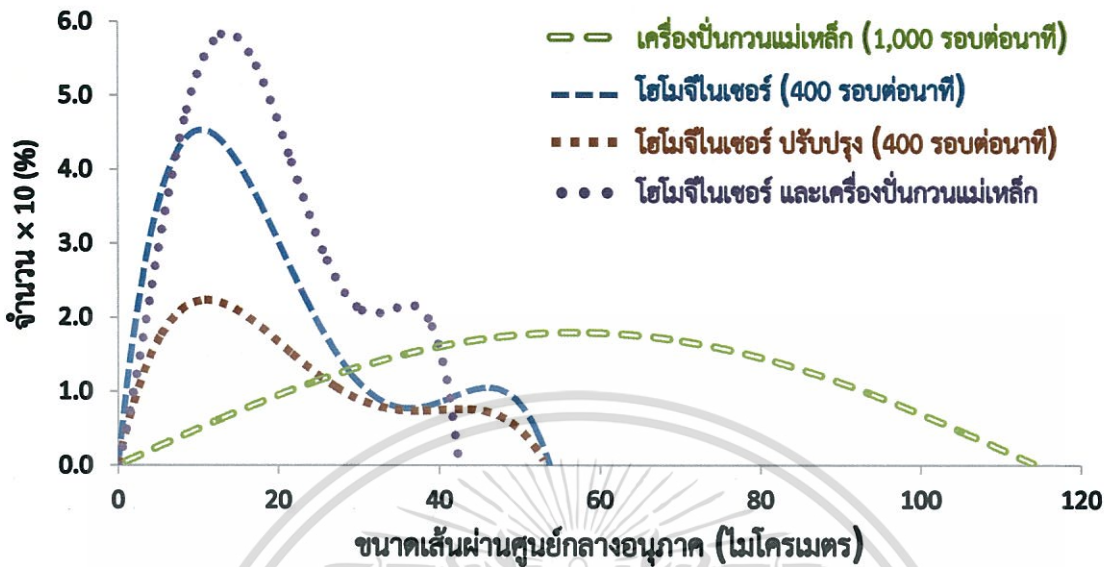


รูปที่ 4.5 ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์โดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกววนต่างกัน

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้วิธีการในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลเหมือนกันโดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ซึ่งการเพิ่มอัตราเร็วในการปั่นกววนนั้น มีผลทำให้ขนาดของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้เล็กลง อีกทั้งยังมีการกระจายตัวที่แคบลงอีกด้วย โดยที่อัตราเร็ว 500 รอบต่อนาทีสามารถสังเคราะห์ไมโครแคปซูลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูลที่เล็กที่สุดเท่ากับ 11.97 ไมโครเมตร แต่จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ด้วยอัตราเร็วในการปั่นกววนเท่ากับ 500 รอบต่อนาทีนั้น มีลักษณะพื้นผิวที่เป็นทรงกลมแบบไม่สมบูรณ์คือ มีลักษณะดังตารางที่ 4.2

จากข้อมูลดังกล่าวมาข้างต้นจึงตั้งสมมุติฐานว่าสภาวะการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลที่ดีที่สุดด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์คือ การสังเคราะห์ที่อัตราเร็วในการปั่นกววนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที โดยจะนำไปเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์แคปซูลด้วยวิธีอื่นที่สภาวะที่ดีที่สุดของแต่ละวิธีในหัวข้อต่อไป

- เปรียบเทียบแต่ละวิธีที่สภาวะที่ดีที่สุด

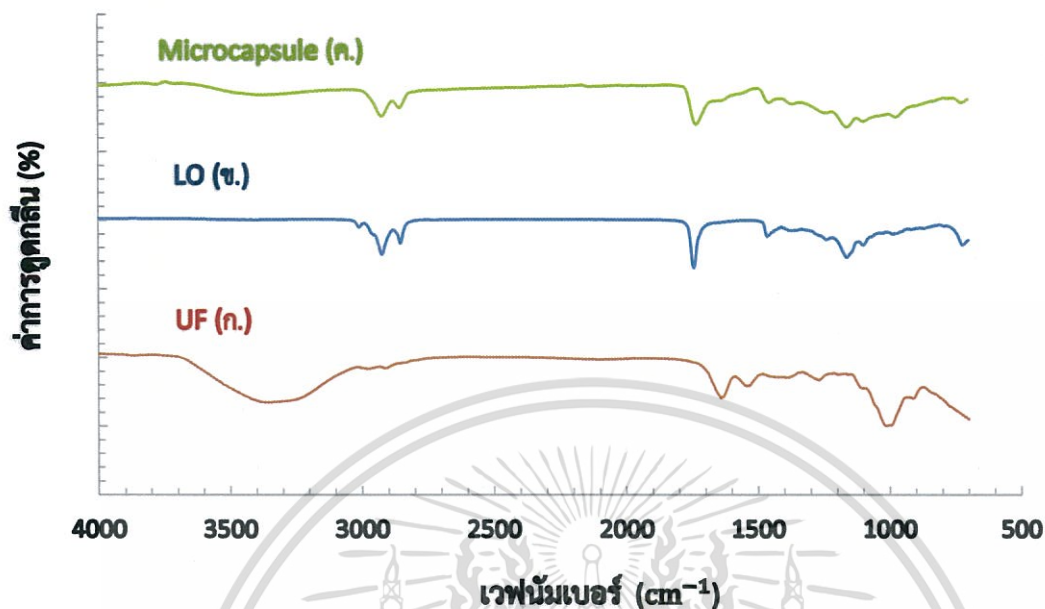


รูปที่ 4.6 ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์โดยใช้วิธีการต่างกัน ที่สภาวะที่ดีที่สุด (ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด และลักษณะทางกายภาพที่ดีที่สุด)

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าหากต้องการลดพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ สามารถใช้วิธีการสังเคราะห์โดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ในการทำปฏิกิริยาช่วง 30 นาทีแรก จากนั้นทำการเปลี่ยนเป็นเครื่องปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กในการทำปฏิกิริยาช่วงที่เหลืออีก 3 ชั่วโมง 30 นาที จากข้อมูลข้างต้นที่กล่าวมาการสังเคราะห์ด้วยวิธีการนี้สามารถพัฒนาต่อได้ เพื่อหาวิธีที่ประหยัดพลังงานมากที่สุด และได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้โดยใช้วิธีการโฮโมจีไนซ์เซชันด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ จากข้อมูลดังกล่าวทั้งหมดข้างต้น จึงเลือกที่จะทดสอบค่าประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวที่ผสมกับไมโครแคปซูลซึ่งสังเคราะห์ได้จากเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราการปั่นกวน 400 และ 500 รอบต่อนาที เนื่องจากเป็นวิธีการสังเคราะห์ทำให้ได้ไมโครแคปซูลที่ดีที่สุด (มีขนาดอนุภาคที่เล็ก การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแคบ และลักษณะทางกายภาพที่ยอมรับได้) เพื่อศึกษาว่าลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวอย่างไร

#### 4.1.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของไมโครแคปซูล



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของสารในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล (ก) ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (ข) น้ำมันเมล็ดฝ้าย (ค) ไมโครแคปซูล

ช่วงของรังสีอินฟราเรดของธาตุและองค์ประกอบเคมีมักจะสังเกตได้ในช่วง  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  พลังงานของรังสีอินฟราเรดจะอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับการสั่น (vibration) ของพันธะภายในโมเลกุล หากการสั่นของพันธะใดเกิดที่ความถี่ที่ตรงกับความถี่ของรังสีอินฟราเรดก็จะเกิดการดูดกลืนขึ้น อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์บริสุทธิ์ รูปที่ 4.7 (ก) การสั่นแบบยืดของพันธะ O-H ของพันธะไฮโดรเจนของหมู่ฟังก์ชัน -OH พีกของพันธะ O-H ดูดกลืนที่มีลักษณะกว้างที่  $3500-3200\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีจุดกึ่งกลางพีกที่ประมาณ  $3352\text{ cm}^{-1}$  พีกของการสั่นแบบงอของพันธะ N-H ของหมู่ฟังก์ชันเอมีนที่  $1546\text{ cm}^{-1}$  การสั่นแบบยืดของพันธะ C-H ของหมู่แอลเคนที่  $2951\text{ cm}^{-1}$  การสั่นแบบงอของพันธะ C-H ของหมู่ฟังก์ชัน -CH<sub>3</sub> ที่เวฟนัมเบอร์  $1361\text{ cm}^{-1}$  การสั่นแบบยืดของพันธะ C=O ของหมู่ฟังก์ชันอัลดีไฮด์ที่เวฟนัมเบอร์  $1643\text{ cm}^{-1}$  การสั่นแบบยืดของพันธะ C-N ของหมู่เอมีนที่  $1257\text{ cm}^{-1}$

อินฟราเรดสเปกตรัมของสารแกนกลางหรือน้ำมันเมล็ดฝ้าย รูปที่ 4.7 (ข) จะพบพีกการสั่นแบบยืดของพันธะ -C-H และหมู่ฟังก์ชัน -CH<sub>2</sub> ทำให้เกิดการดูดกลืนในช่วงเวฟนัมเบอร์  $2920\text{ cm}^{-1}$  และ  $2850\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ การสั่นแบบยืดแบบสมมาตรของหมู่ฟังก์ชัน C=C ที่  $1654\text{ cm}^{-1}$  สเปกตรัมการสั่นแบบยืดของหมู่เอสเทอร์ C=O ที่เวฟนัมเบอร์  $1743\text{ cm}^{-1}$  การสั่นแบบงอของพันธะ C-H ของหมู่ฟังก์ชัน CH<sub>2</sub> ที่เวฟนัมเบอร์  $1454\text{ cm}^{-1}$  และพันธะ C-O ของหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ที่  $1153\text{ cm}^{-1}$  และ  $1091\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ

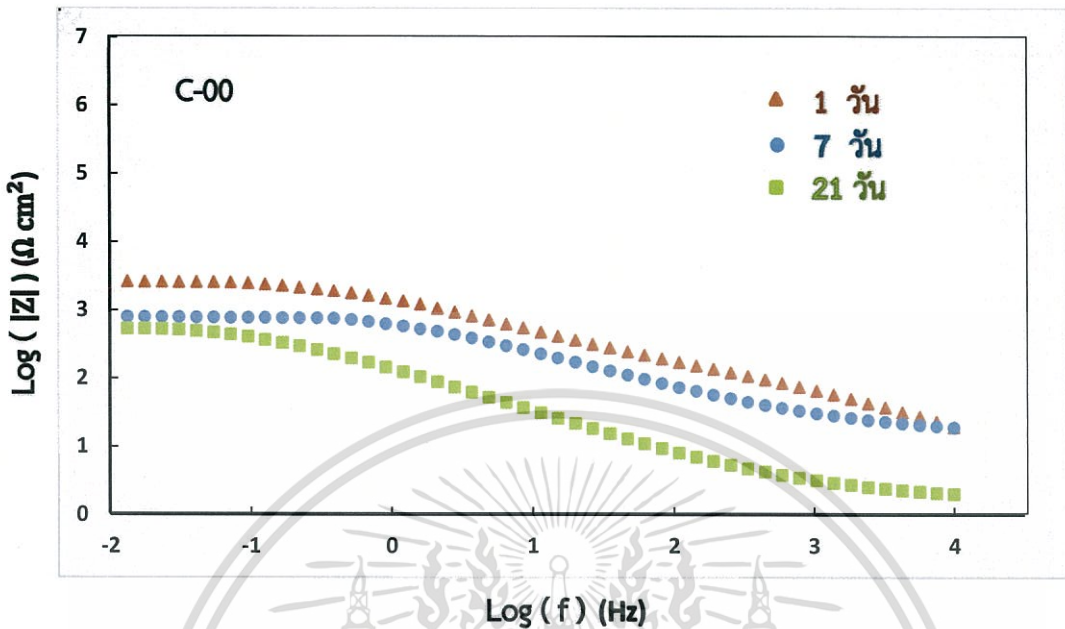
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 (ค) แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ไมโครแคปซูลที่บรรจุน้ำมัน เมล็ดฝ้ายภายใน จะสังเกตเห็นพีการสั่นแบบยืดของหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลกอฮอล์ O-H สามารถเห็นได้ในช่วง  $3600-3200\text{ cm}^{-1}$  โดยมีจุดกึ่งกลางสเปกตรัมการดูดกลืนลักษณะกว้างนี้อยู่ที่  $3377\text{ cm}^{-1}$  โดยพีคของสเปกตรัมจะขึ้นอยู่กับการสั่นของหมู่ฟังก์ชันอะลิฟาติกประมาณ  $3009\text{ cm}^{-1}$  เนื่องจากหมู่ฟังก์ชัน -CH และ -CH<sub>2</sub> ในกรดไขมันที่มีจำนวนมาก ซึ่งการสั่นแบบยืดของพันธะ -C-H และหมู่ฟังก์ชัน -CH<sub>2</sub> ทำให้เกิดการดูดกลืนในช่วงเวฟนัมเบอร์  $2922\text{ cm}^{-1}$  และ  $2855\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ สเปกตรัมการสั่นแบบยืดของหมู่เอสเทอร์ C=O ที่เวฟนัมเบอร์  $1730\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ฟังก์ชัน C-O ของเอสเทอร์ที่  $1157$  และ  $1094\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ

จากอินฟราเรดสเปกตรัมของยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ น้ำมันเมล็ดฝ้าย และไมโครแคปซูลดังแสดง ในรูปที่ 4.7 พบว่าพีคของไมโครแคปซูลตรงกับพีคของยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ และพีคของน้ำมันเมล็ดฝ้าย ซึ่งสามารถคาดเดาได้ว่าไมโครแคปซูลประกอบไปด้วยยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ และน้ำมันเมล็ดฝ้าย



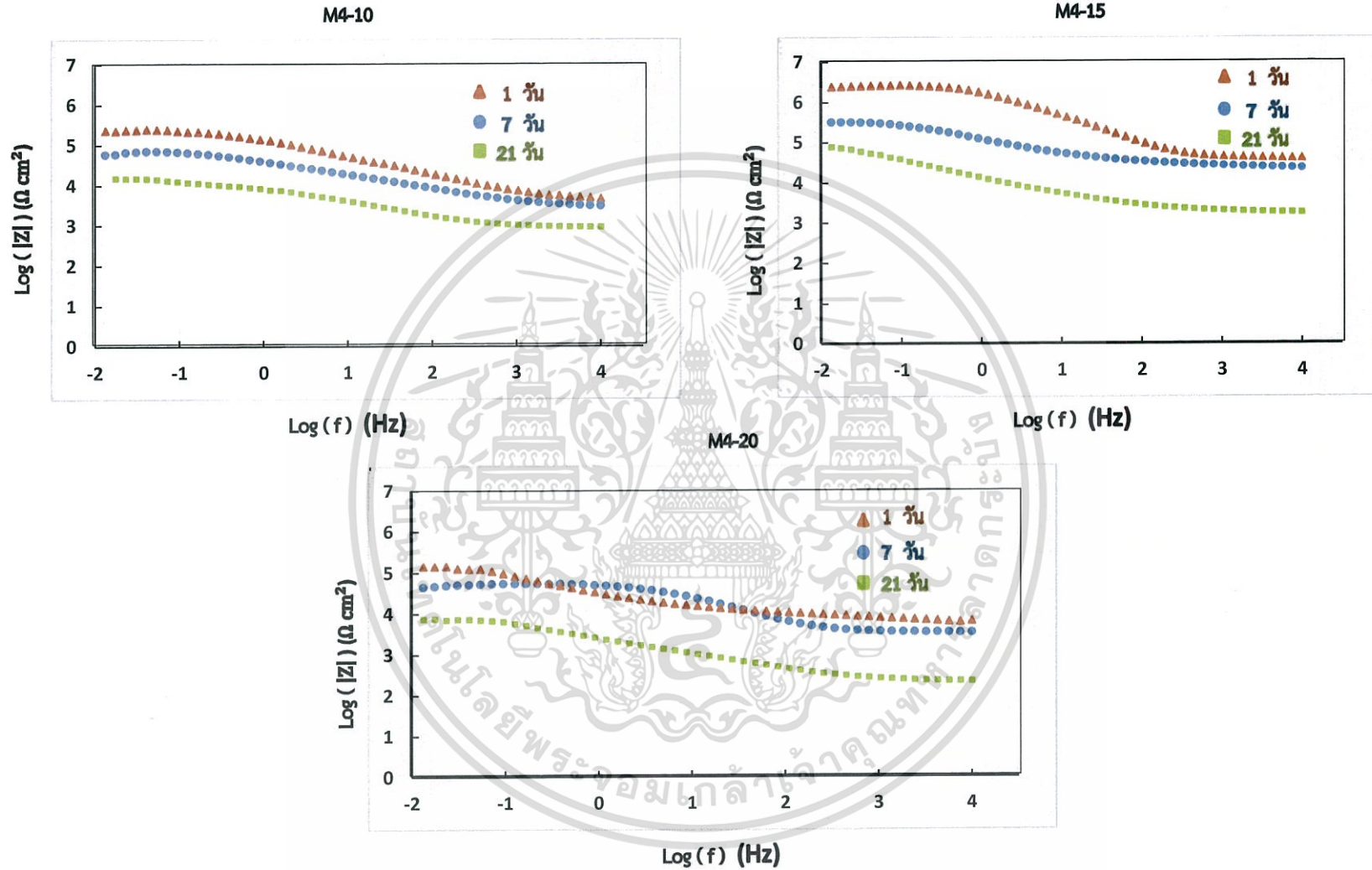
## 4.2 ผลการทดสอบค่าความต้านทานความถี่การกัดกร่อน



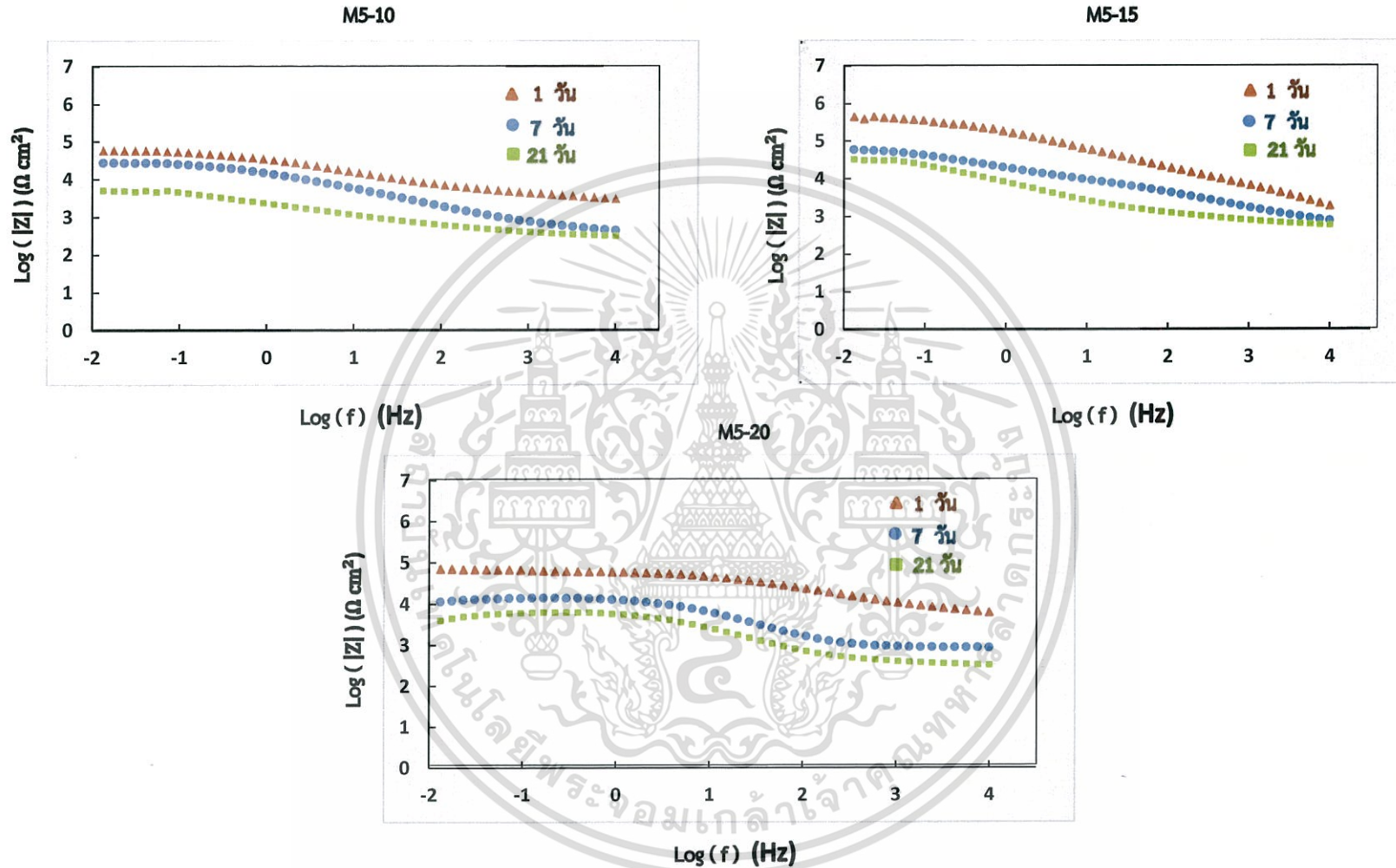
รูปที่ 4.8 กราฟ Bode โดยเทคนิค EIS ของสารเคลือบผิวอีพอกซี (C-00) ซึ่งถูกกรีดให้เกิดรอยแตกบนชั้นฟิล์ม และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 เราสามารถเปรียบเทียบค่าความต้านทานการกัดกร่อนของตัวอย่าง ได้จากแนวโน้มของกราฟ Bode ซึ่งความต้านทานการกัดกร่อนของตัวอย่างจะแปรผันตรงกับค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับ ( $|Z|$ ) กล่าวคือ หากค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับมีค่ามาก ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของตัวอย่างก็จะมีค่าสูงด้วยเช่นกัน

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าที่ความถี่  $\text{Log}(f)$  เท่ากับ -2 เฮิร์ตซ์ หรือความถี่เท่ากับ 0.01 เฮิร์ตซ์ ของกราฟนี้แสดงค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับตัวอย่าง C-00 ที่ทำการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ไว้ 1 วัน (สีแดง) 7 วัน (สีน้ำเงิน) และ 21 วัน (สีเขียว) โดยมีค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับเรียงกันจากมากไปน้อยตามลำดับ กล่าวคือ เมื่อนำตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์นานขึ้น การกัดกร่อนจะสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานการกัดกร่อนของตัวอย่างมีค่าลดลงนั่นเอง



รูปที่ 4.9 กราฟ Bode โดยเทคนิค EIS ของสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ M4-XX ซึ่งถูกกรีดให้เกิดรอยแตกบนชั้นฟิล์ม และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.10 กราฟ Bode โดยเทคนิค EIS ของสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ M5-XX ซึ่งถูกกรีดให้เกิดรอยแตกบนชั้นฟิล์ม และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับ ( $k\Omega\text{ cm}^2$ ) ที่ความถี่ 0.01 เฮิรตซ์ สำหรับตัวอย่าง C-00 และ MY-XX วัดโดยใช้เทคนิค EIS

ตัวอย่าง	หลังจากแช่ไว้ 1 วัน	หลังจากแช่ไว้ 7 วัน	หลังจากแช่ไว้ 21 วัน
C-00	2.63	0.79	0.52
M4-10	229.09	56.23	15.49
M5-10	58.88	20.89	5.25
M4-15	2,344.23	316.23	81.28
M5-15	398.11	61.66	32.36
M4-20	134.90	43.65	7.08
M5-20	69.18	10.96	3.80

จากรูปที่ 4.8-4.10 สามารถวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับของตัวอย่างที่สภาวะต่างๆ ได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยไมโครแคปซูล (MX-YY) สามารถเพิ่มค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับของตัวอย่างได้เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวธรรมดา (C-00) นั้นหมายถึงตัวอย่างที่เคลือบสารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยไมโครแคปซูล มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนดีกว่าตัวอย่างที่เคลือบสารเคลือบผิวธรรมดา (C-00)

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ขนาดอนุภาค ลักษณะทางกายภาพ และความเข้มข้นของไมโครแคปซูลที่ผสมอยู่ในสารเคลือบผิวนั้น ส่งผลต่อค่าความต้านทานการกัดกร่อนของตัวอย่างอีกด้วย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ โดยสนใจเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว จึงได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง M4-XX และ M5-XX เพื่อดูผลของลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่ผสมในสารเคลือบผิว ซึ่งส่งผลต่อค่าความต้านทานการกัดกร่อนของตัวอย่าง และประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว

#### 4.2.1 ผลของความเข้มข้นของไมโครแคปซูลที่ผสมในสารเคลือบผิว

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของไมโครแคปซูลที่ผสมในสารเคลือบผิวดังนี้คือ 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับของตัวอย่าง M4-15 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ  $2,344.23\text{ k}\Omega\text{ cm}^2$  รองลงมาคือตัวอย่าง M5-15 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $398.11\text{ k}\Omega\text{ cm}^2$  ตัวอย่างที่แช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 วัน

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดของไมโครแคปซูลที่ผสมในสารเคลือบผิว มีค่าเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากผลการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะนี้ ค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับของตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิว MY-15 จะมีค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับที่สูงที่สุด นั่นหมายถึงตัวอย่างที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวข้างต้น มีค่าความต้านทานการกัดกร่อนสูงสุด หรือถูกกัดกร่อนน้อยที่สุดนั่นเอง

#### 4.2.2 ผลของลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าอัตราเร็วในการปั่นกวนที่ใช้ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลดังนี้คือ 400 (M4-XX) และ 500 (M5-XX) รอบต่อนาที จากตารางที่ 4.1 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 18.62 และ 11.97 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันไม่มากนัก แต่ผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 4.3 พบว่าตัวอย่าง M4-15 และ M5-15 มีค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับเท่ากับ 2,344.23 และ 398.11  $k\Omega\text{ cm}^2$  ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันมาก กล่าวคือ ความแตกต่างของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้นั้น ไม่น่าจะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับของตัวอย่าง

จึงสามารถสรุปได้ว่า ลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่ผสมในสารเคลือบผิวเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการกัดกร่อนของตัวอย่างในงานวิจัยนี้

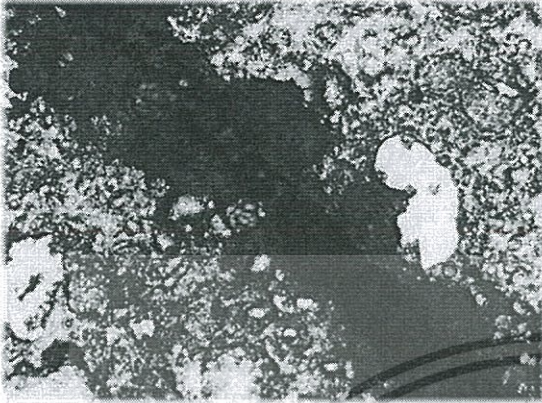
#### 4.2.3 ผลของระยะเวลาที่ตัวอย่างถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

นอกจากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้นจะส่งผลต่อค่าความต้านทานการกัดกร่อนของตัวอย่างแล้ว ยังพบอีกว่าระยะเวลาที่ตัวอย่างถูกกัดกร่อนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการกัดกร่อนของสารเคลือบผิวอีกด้วย

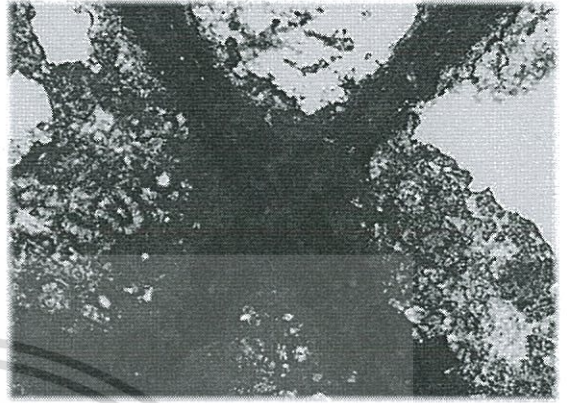
จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับของตัวอย่างที่ถูกกัดกร่อนเป็นระยะเวลาจนถึง 21 วัน จะมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก กล่าวคือประสิทธิภาพของสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีในระยะสั้น หากถูกกัดกร่อนเป็นระยะเวลาสั้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้นี้ ลดน้อยลงจนไม่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ในที่สุด

### 4.3 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว

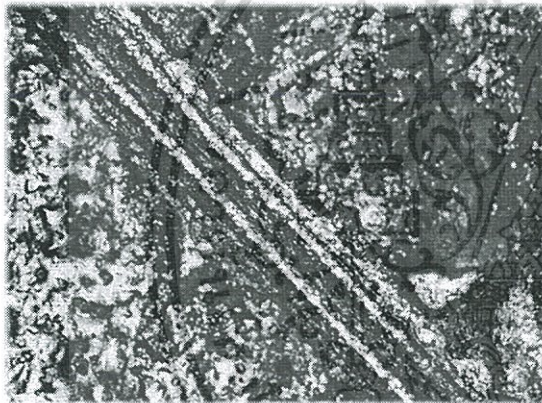
C-00 (ก)



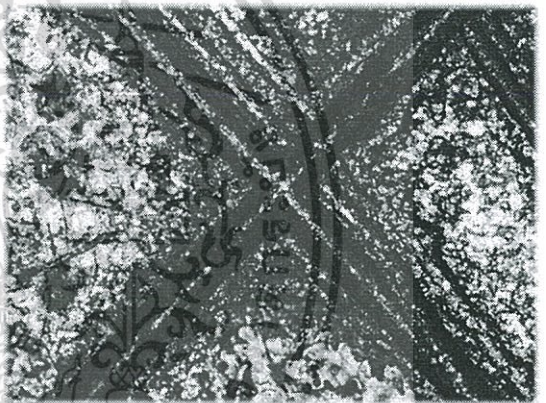
C-00 (ข)



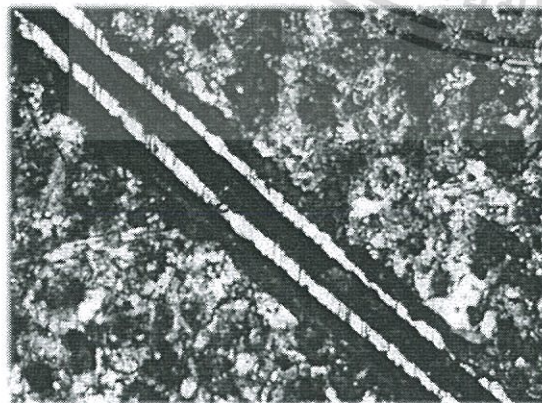
M4-15 (ก)



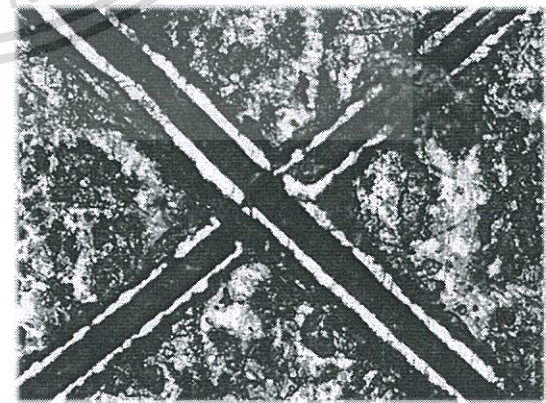
M4-15 (ข)



M5-15 (ก)



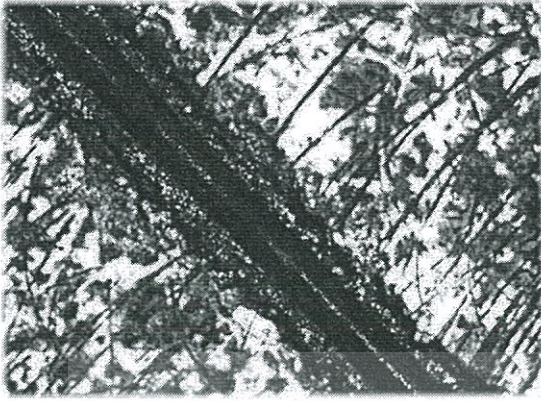
M5-15 (ข)



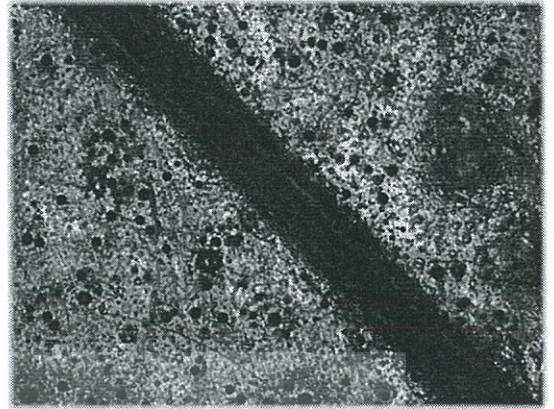
รูปที่ 4.11 ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิว หลังจากแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 วัน โดย(ก) รอยแตกด้านข้าง และ (ข) รอยแตกตรงกลาง ของพื้นผิวตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

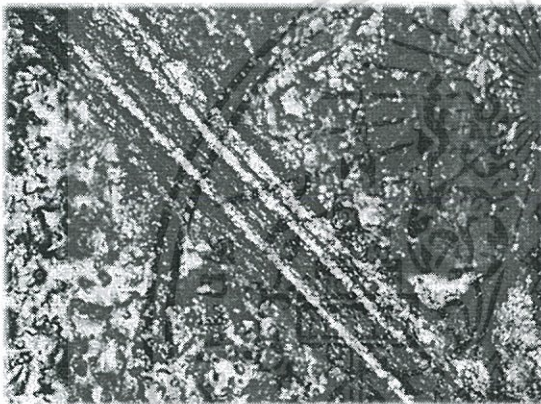
M4-15 (ก)



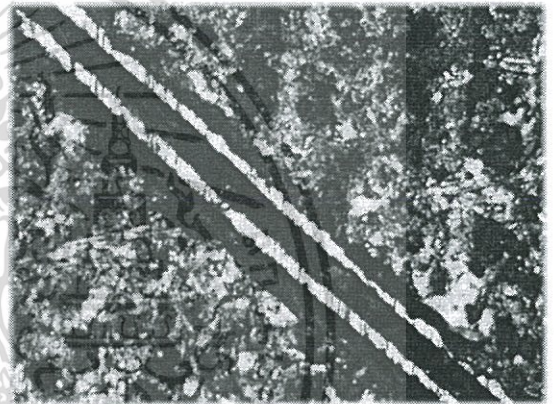
M5-15 (ก)



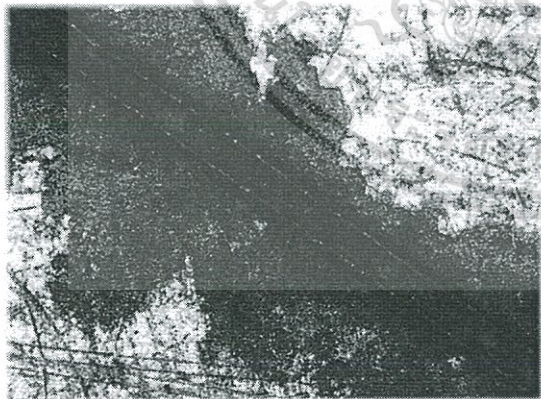
M4-15 (ข)



M5-15 (ข)



M4-15 (ค)



M5-15 (ค)



รูปที่ 4.12 ลักษณะรอยแตกด้านข้างของพื้นผิวตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเอง ได้ หลังจากแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา (ก) 1 วัน (ข) 10 วัน และ (ค) 21 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวธรรมดา (C-00) เมื่อถูกกรีดให้เกิดรอยแตกบนชั้นฟิล์ม และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งสารเคลือบผิวไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 10 วัน ทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนกระทั่งพื้นผิวของตัวอย่างเสียหายในที่สุด

ในขณะที่ตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยไมโครแคปซูล (M4-15 และ M5-15) เมื่อถูกกรีดให้เกิดรอยแตกบนชั้นฟิล์ม และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เช่นกัน สารเคลือบผิวกลับมีความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองได้ และสามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้ทันเวลา ทำให้ตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้นั้น ไม่ถูกกัดกร่อนเสียหายเหมือนกับตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวธรรมดา

นอกจากนี้จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ M4-15 และ M5-15 เมื่อถูกกรีดให้เกิดรอยแตกบนชั้นฟิล์ม และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 1, 10 และ 21 วัน สารเคลือบผิวนั้นเกิดการบวมและการซ่อมแซมตัวเอง โดยเมื่อแคปซูลซึ่งผสมอยู่ภายในสารเคลือบผิวเกิดการแตกออก และปลดปล่อยน้ำมันเมล็ดฝ้ายออกมาเคลือบผิวหน้าของตัวอย่าง (เคลือบบริเวณรอยแตก) จากนั้นน้ำมันเมล็ดฝ้ายจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และเกิดการแข็งตัวเป็นชั้นฟิล์ม ซึ่งสามารถยับยั้งการกัดกร่อนของตัวอย่างได้ในที่สุด

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลอง

### 5.1 ไมโครแคปซูลที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเอง

วิธีการสังเคราะห์เพื่อให้ได้ไมโครแคปซูลที่ดีนั้น ควรเป็นวิธีการที่สังเคราะห์ไมโครแคปซูล เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่เล็ก และมีการกระจายตัวของอนุภาคที่แคบ อีกทั้งมีลักษณะทางกายภาพ เป็นทรงกลม ผิวเรียบไม่ขรุขระ ไม่มีการแตกของแคปซูลมากเกินไป และมีองค์ประกอบทางพันธะเคมี ตรงกับสารตั้งต้นหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการโฮโมจีไนซ์ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถสังเคราะห์ไมโครแคปซูลได้ตรงตามปัจจัยดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

#### 5.1.1 ขนาดอนุภาค และการกระจายตัว

สามารถสังเคราะห์ไมโครแคปซูลได้สำเร็จ โดยการใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราเร็ว 300 400 และ 500 รอบต่อนาที และได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์เท่ากับ 50.09, 18.62 และ 11.97 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลที่แคบอีกด้วย

#### 5.1.2 ลักษณะทางกายภาพ

สำหรับลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องโฮโมจีไนเซอร์นั้นมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยอัตราเร็วในการปั่นกวนสูงขึ้นจะส่งผลต่อรูปร่างของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้ หากเร็วเกินไปจะทำให้แคปซูลสูญเสียรูปร่าง วิธีที่สามารถแก้ไขได้เบื้องต้นคือการตั้งค่าระดับความสูงของหัวปั่นกวนเพื่อลดแรงในการปั่นกวนลงได้เล็กน้อย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลโดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ในการปั่นกวนช่วงแรก จากนั้นใช้เครื่องปั่นแม่เหล็กต่อเพื่อลดพลังงานในระบบ (Homogenizer & Magnetic stirrer method) กล่าวคือลดแรงในการปั่นกวน ทำให้แคปซูลสามารถขึ้นรูปได้อย่างมีเสถียรภาพ ซึ่งผลที่ได้นั้นถือว่ายอมรับได้ ทั้งในเรื่องของขนาดอนุภาค การกระจายตัว และลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้ โดยในอนาคตอาจนำไปต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคทรงกลมในงานอื่นๆ ต่อไป

#### 5.1.3 องค์ประกอบทางเคมี

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าองค์ประกอบทางเคมีของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์จากเครื่องเอกสโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราเร็วในการปั่นกวน 400 รอบต่อนาที พบว่าไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้มีค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีองค์ประกอบพันธะเคมีที่ตรงตามสารตั้งต้นหลักที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ ยูเรีย พอร์มาลดีไฮด์ และ น้ำมันเมล็ดฝ้าย

จากที่กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นนี้สามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ในงานวิจัยนี้คือการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยวิธีการโฮโมจีไนซ์ โดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่มีอัตราเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 400 และ 500 รอบต่อนาที ทำให้ได้แคปซูลที่มีความสมบูรณ์ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคไมโครแคปซูลเท่ากับ 18.62 และ 11.97 ไมโครเมตร ตามลำดับ

## 5.2 สารเคลือบผิวที่มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองดีที่สุด

สารเคลือบผิวที่มีความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองนั้น ต้องเป็นสารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยไมโครแคปซูลอยู่ภายใน โดยปริมาณ หรือความเข้มข้นของไมโครแคปซูลที่ผสมในสารเคลือบผิว จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว

### 5.2.1 ความเข้มข้นของไมโครแคปซูลที่ผสมในสารเคลือบผิว

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับค่าความต้านทานการกัดกร่อนของตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้ที่มีความเข้มข้นของไมโครแคปซูลแตกต่างกันดังนี้คือ 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารเคลือบผิว เพื่อทำการหาความเข้มข้นของไมโครแคปซูลที่เหมาะสมในการพัฒนาสารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองได้

ผลการทดลองโดยใช้เทคนิค EIS พบว่าความเข้มข้นของไมโครแคปซูลที่เหมาะสมอยู่ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีสภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์สารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเองอยู่สองสภาวะ ที่ทำให้วัดค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับของตัวอย่างสูงสุดสองค่าเท่ากับ 2,344.23 (M4-15) และ 398.11 (M5-15)  $k\Omega cm^2$

### 5.2.2 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิว

นอกจากการวัดค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับ ยังใช้การสังเกต หรือส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง พบว่าตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวธรรมดา (C-00) นั้น สารเคลือบผิวไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ ในขณะที่ตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยไมโครแคปซูล (MY-XX) สารเคลือบผิวจะมีความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองได้

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า สารเคลือบผิวที่มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองที่ดีที่สุดคือ สารเคลือบผิว M4-15 หรือสารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์จากเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ที่มีอัตราเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที โดยมีความเข้มข้นของไมโครแคปซูลเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารเคลือบผิว เนื่องจากตัวอย่างที่เคลือบสารเคลือบผิว M4-15 มีค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับสูง และมีลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างหลังเกิดการกัดกร่อนที่ไม่เป็นสนิมอีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] บุศรินทร์ เนตรสว่าง, มัตตัญญู แจ่มโง. “สารเคลือบผิวซ่อมแซมตัวเอง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [2] อรุษา สรวารี. สารเคลือบผิว(สี วาร์นิช และแล็กเกอร์). กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539
- [3] เต็มสิริ หวังทวีทรัพย์. “สารเคลือบผิวอัจฉริยะ” ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. ฉบับที่ 59, เมษายน – มิถุนายน 2553. หน้า 33-36
- [4] Wilson, N. and \*Shah, N.P. “Microencapsulation of Vitamins.” School of Molecular Sciences Victoria University. 2007
- [5] เอกลักษณ์ ทวีโรจนกุล. “Microencapsulation : เทคโนโลยีจิ๋ว แต่แจ๋ว” Technology Focus, ปีที่ 36, ฉบับที่ 206, สิงหาคม – กันยายน 2552. หน้า 39-42
- [6] S. Hatami Bouraa, M. Peikaria, A. Ashrafib, M. Samadzadeha “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.
- [7] Swapan Kumar Ghosh. “Functional Coatings: By Polymer Microencapsulation.” Wiley-VCH, vol.44, no. 221, 2006. Pp. 14-15.
- [8] บัณฑิต พรหมรักษา. “เทคนิคไมโครเอนแคปซูลชันและบทบาททางการแพทย์” ศรีนครินทร์เวชสาร, ปีที่ 29, ฉบับที่ 1, มิถุนายน 2557. หน้า 90-97
- [9] S.L. Rosen. Fundamental Principles of Polymeric Materials. 2nd edition, John Wiley & Sons, Singapore, 1993.
- [10] วิสาขา ภูจินดา. “การใช้ประโยชน์สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดน้ำเสีย” การจัดการสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, 2548. หน้า 1-15
- [11] บุญรอด วงษ์สวาท. “พอลิเมอร์เซชันควบแน่น.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd\\_site/condense.htm](http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd_site/condense.htm). 2558.
- [12] T. Siva, S. Sathiyarayanan. “Self healing coatings containing dual active agent loaded urea formaldehyde (UF) microcapsules” Progress in Organic Coatings. Vol.82, 2015, pp. 57-67.
- [13] ปฏิกริยาการสังเคราะห์เฮกซะเมทิลีนเตตระเอมีน. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.chem.uiuc.edu/organic/Ketones/Chapter%208/sec8-11/8-11.htm>
- [14] ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิรีโซซินอลฟอร์มมาลดีไฮด์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.chem.uiuc.edu/organic/Ketones/Chapter%208/sec8-11/8-11.htm>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิรีโซซินอล-ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.chem.uiuc.edu/organic/Ketones/Chapter%208/sec8-11/8-11.htm>
- [16] Jochen Weiss. “Emulsion Processing – Homogenization –“ **Food Structure and Functionality Laboratories**. November 13-14, 2008.
- [17] วิธีการเคลือบผิวโดยใช้ไบมิด. [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://file.scrip.org/Html/13-3700244\\_27043.htm](http://file.scrip.org/Html/13-3700244_27043.htm)
- [18] Karan Thanawala, Nisha Mutneja, Anand S. Khanna and R. K. Singh Raman. “ Development of Self-Healing Coatings Based on Linseed Oil as Autonomous Repairing Agent for Corrosion Resistance” **Materials**. Vol.7, 2014, pp. 7324-7338.
- [19] ชีรยุทธ วิไลวัลย์, วรวรรณ พันธุมนาวิน. อินฟราเรด สเปกโตรสโคปี. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548
- [20] Patrik Scholz, Cornelia M. Keck “Nanoemulsions produced by rotor-stator high speed stirring” **International Journal of Pharmaceutics**, Vol.482, 2015, pp. 110-117.
- [21] Li Yuan, Guozheng Liang, JianQiang Xie, Lan Li, Jing Guo. “Preparation and characterization of poly(urea-formaldehyde) microcapsules filled with epoxy resins” **Polymer**, Vol 47, 2006, pp. 5338-5349.
- [22] M. Behzadnasab, M. Esfandeh, S.M. Mirabedini, M.J. Zohuriaan-Mehr, R.R. Farnood. “Preparation and characterization of linseed oil-filled urea-formaldehyde microcapsules and their effect on mechanical properties of an epoxy-based coating” **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects** 457 (2014) 16-26
- [23] Aijuan Gu, Guozheng Liang, Li Yuan. “Preparation and properties of poly (urea-formaldehyde) microcapsules filled with epoxy resins” **Material Chemistry and Physics**. Vol 110, pp. 417-425, 2008
- [24] Ashok Kumar, L.D. Stephenson, J.N. Murray. “Self-healing coatings for steel” **Progress in Organic Coatings**. Vol 55, pp. 244-253, 2006
- [25] หลักการทำงานของ FT-IR Spectroscopy. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/chemistry/23-2013-09-04-02-40-21>
- [26] FT-IR Spectroscopy. [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://web.yru.ac.th/~dolah/...2.../PRT\\_404841039-22.doc](http://web.yru.ac.th/~dolah/...2.../PRT_404841039-22.doc)
- [27] หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id\\_sub=42&id=39](http://www.mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=42&id=39)
- [28] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/31-2014-01-06-07-52-03>
- [29] กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/31-2014-01-06-07-52-03>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

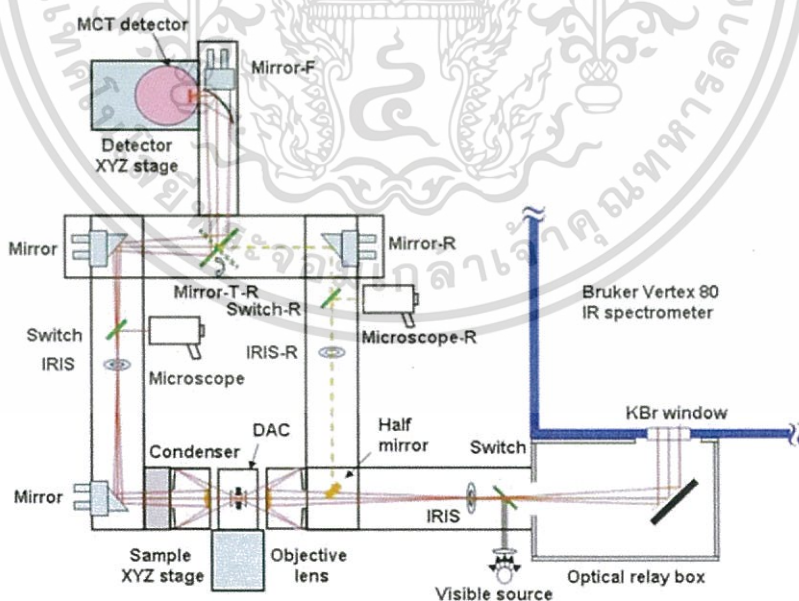
## ก.1 เครื่องวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของสารด้วยการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)

Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะ หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นลายพิมพ์โมเลกุล เทคนิคนี้มีความไว และใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ

### หลักการทำงาน

โดยทั่วไปรังสีจากแหล่งกำเนิดจะผ่านตัวอย่างและถูกกระจายออกในช่วงความถี่ต่างๆ ด้วยโมโนโครเมเตอร์ หลังจากนั้นลำรังสีจะตกลงบนเครื่องตรวจวัดซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วทำการบันทึกผลสัญญาณนั้น

IR Spectrometer แบบนี้จะมีทั้งชนิดลำแสงเดี่ยว (single beam) และลำแสงคู่ (double beam) แต่โดยส่วนมากที่พบเห็นจะเป็นแบบลำแสงคู่ เพราะ background ที่เกิดจากแก๊สในบรรยากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ จะหมดปัญหาไป การทำงานของเครื่องแบบนี้ ลำแสงสองลำจะผ่านไปยังตัวอย่าง และ chamber อ่างอิง จากนั้นใช้ตัวตัดแสง เช่น sector mirror แยกลำรังสีอ่างอิงและรังสีจากตัวอย่างให้ตกลงบนเครื่องตรวจวัด และตรวจวัดด้วย attenuated total reflectance (ATR) accessories



รูปที่ ก.1.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FT-IR Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

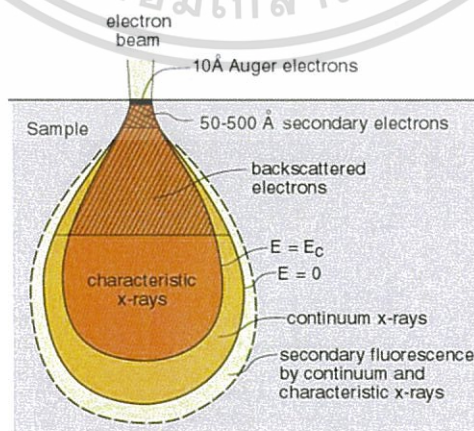
## ก.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง (ซึ่งต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่ใช้แสงขาวเป็นแหล่งกำเนิดแสง) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค จากคุณสมบัติของอิเล็กตรอนที่ประพุดตัวเป็นคลื่นได้ เมื่อเปรียบเทียบความยาวคลื่นของคลื่นอิเล็กตรอนกับคลื่นแสง พบว่าคลื่นอิเล็กตรอนมีความยาวคลื่นที่สั้นกว่า ทำให้สามารถแยกความแตกต่างและเก็บรายละเอียดของชิ้นงานได้ดีกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสง โดยมีปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) สร้างคลื่นอิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (High voltage) และถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก หรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็ก ทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน

### หลักการทำงาน

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจตั้งแสดงในรูปแบบที่ 1 ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างจากการตั้ง โดย Energy Dispersive Spectrometry (EDS) เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ ใน SEM ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้เพิ่มเติม ลักษณะของผลที่ได้: ได้ภาพ 3 มิติจาก Secondary Electron (SE) หรือได้ภาพ 2 มิติจาก Back Scattered Electron (BSE) และธาตุต่างๆที่อยู่ในสารตัวอย่าง



รูปที่ ก.2.1 หลักการทำงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

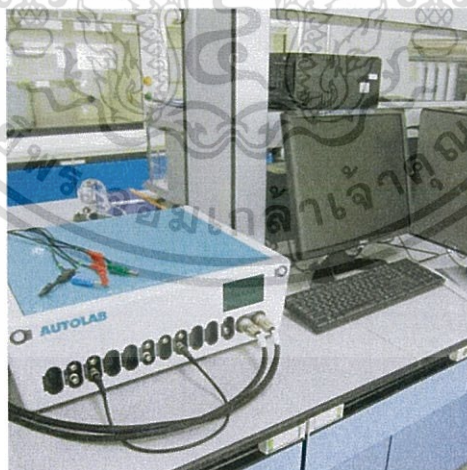
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### ก.3 เครื่องวัดการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิค Electrochemical impedance spectroscopy (EIS)

เป็นการทดสอบความเสื่อมภาพของชั้นฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบผิวเหล็กกล้า โดยให้ไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ แก่ชิ้นทดสอบ และจะแสดงข้อมูลในรูปของค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ ออกมาในรูปของกราฟโบเดย์ (Bode Plot) หรือกราฟไนควิสต์ (Nyquist Plot) ซึ่งความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับของตัวอย่างสามารถบอกแนวโน้มความต้านทานการกัดกร่อนของตัวอย่างได้ โดยใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat Autolab PGSTAT302N



รูปที่ ก.3.1 เครื่องวัดการกัดกร่อน Potentiostat/Galvanostat Autolab PGSTAT302N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ก.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OPTICAL MICROSCOPE ; OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงใช้ดูลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานในรูปแบบสองมิติโดยสามารถกำหนดกำลังขยายตามความต้องการได้

##### หลักการทำงาน

เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงรูปแบบหนึ่งที่ใช้แสงเป็นตัวช่วยในการทำให้มองเห็นภาพ โดยแสงจะวิ่งผ่านระบบเลนส์ต่างๆ และมีการส่องไปที่วัตถุ ก่อนที่แสงจะส่องผ่านเข้าสู่สายตาเรา ซึ่งแสงที่อยู่ภายในระบบที่สะท้อนกลับเข้าสู่สายตาเราจะทำให้เราเห็นภาพได้ โดยการมองผ่านเลนส์ Eyepiece ดังแสดงในรูปที่ ก.4.1



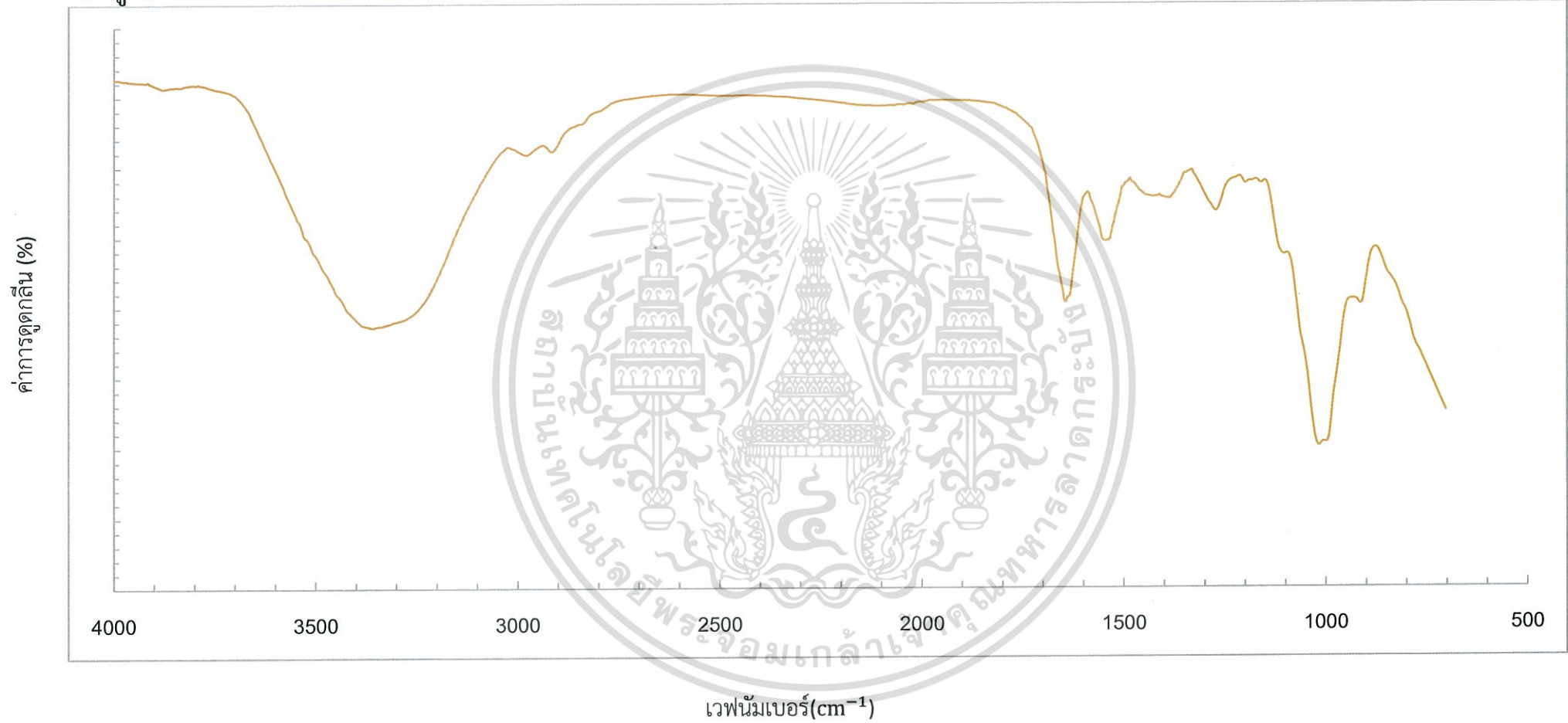
รูปที่ ก.4.1 ลักษณะกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Optical microscope (OM)



ภาคผนวก ข  
อินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารด้วยเครื่อง  
Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR Spectroscopy)

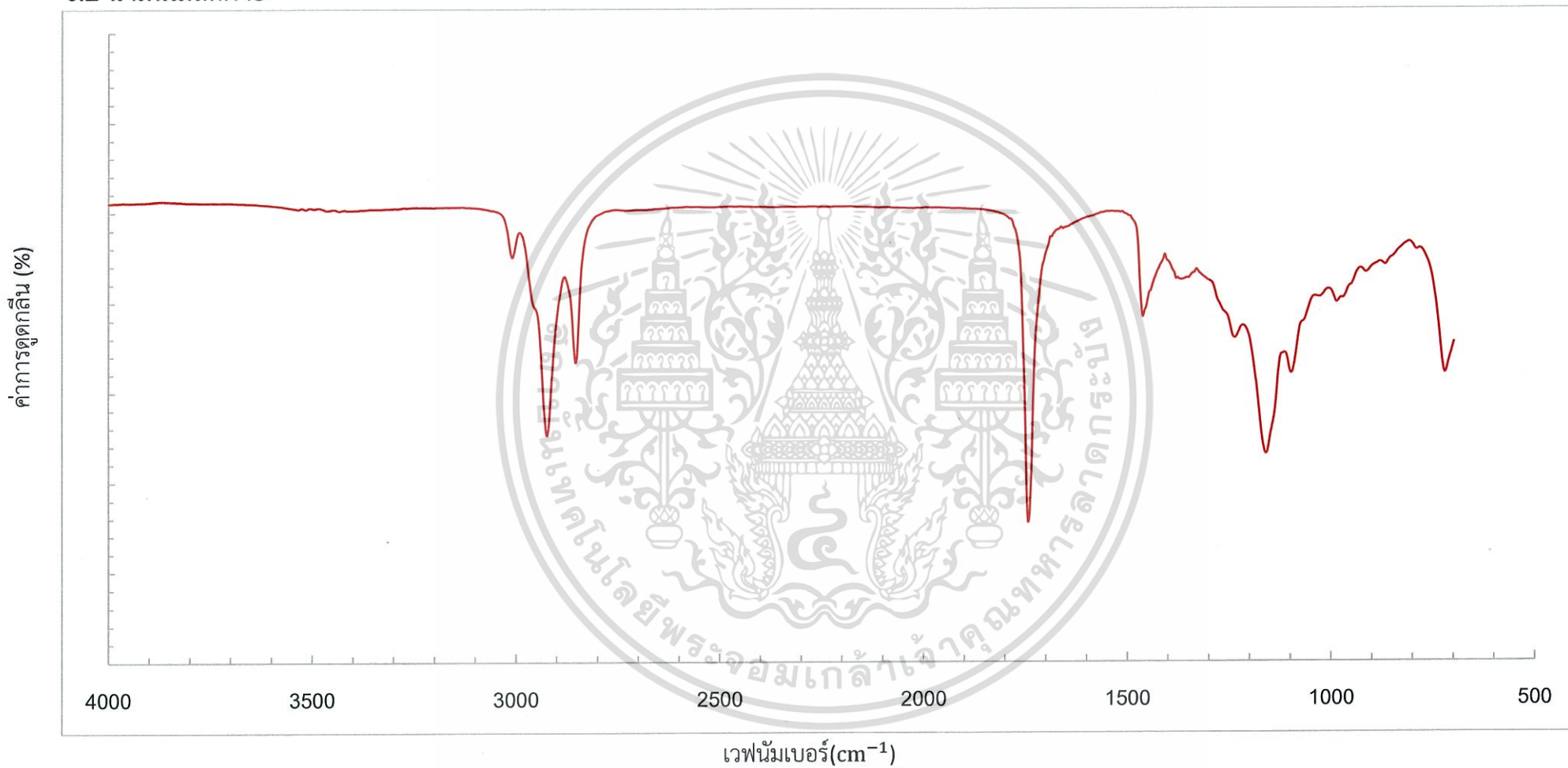
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 ยูเรีย-ฟอร์มมาลดีไฮด์



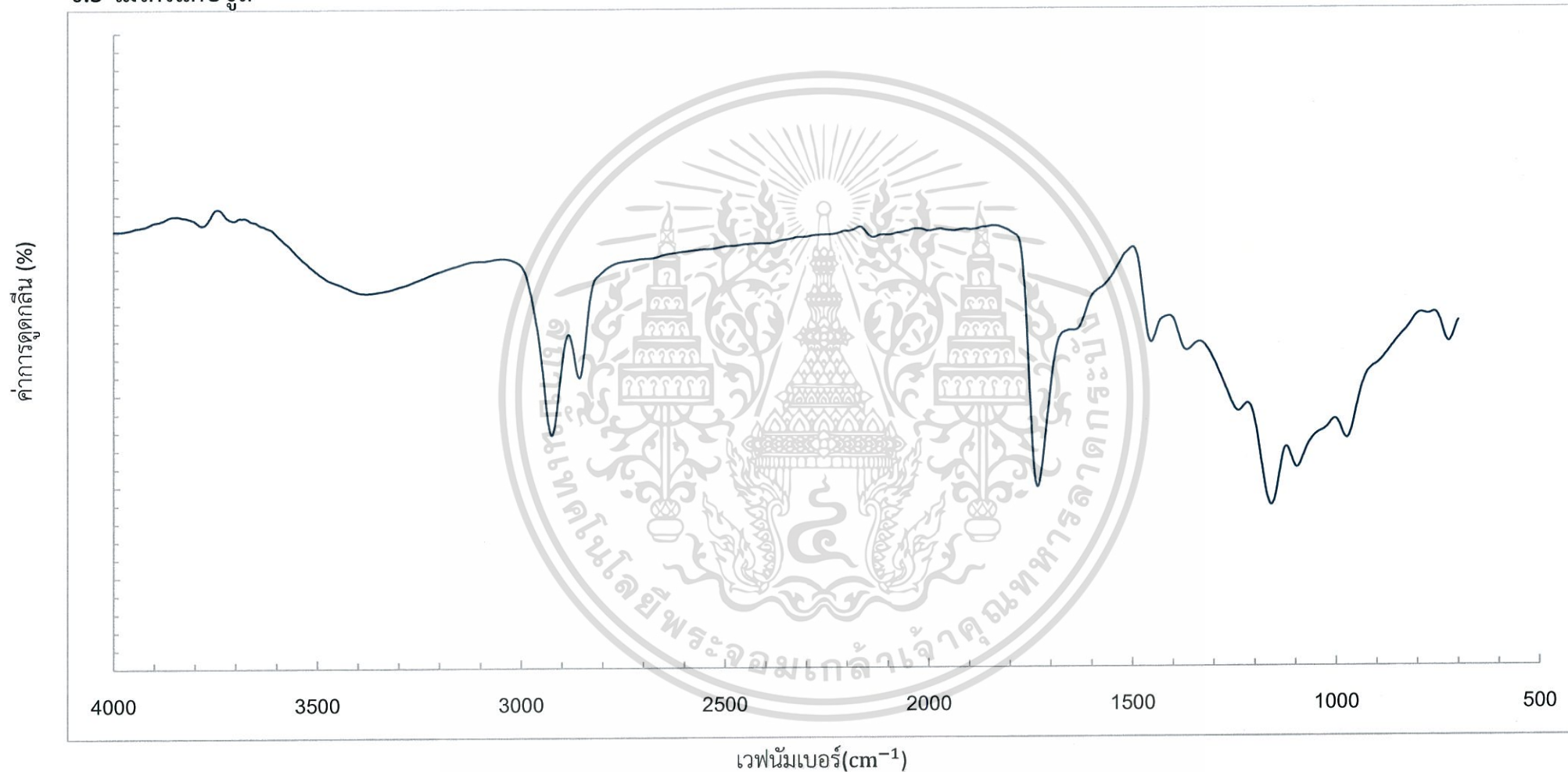
รูปที่ ข.1.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของยูเรีย-ฟอร์มมาลดีไฮด์

## ข.2 น้ำมันเมล็ดฝ้าย



รูปที่ ข.2.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันเมล็ดฝ้าย

### ข.3 ไมโครแคปซูล



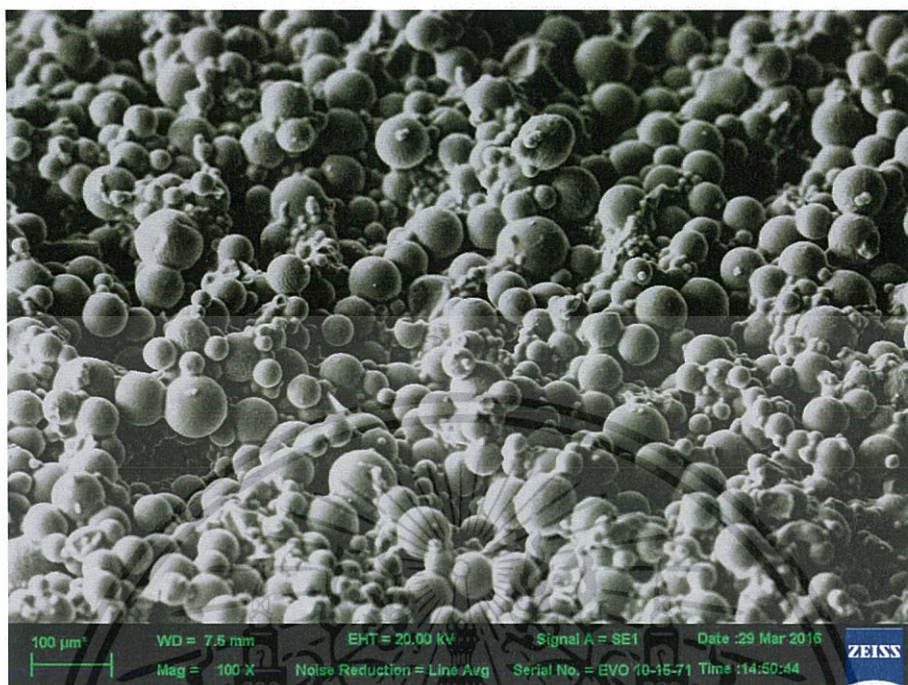
รูปที่ ข.3.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของไมโครแคปซูล



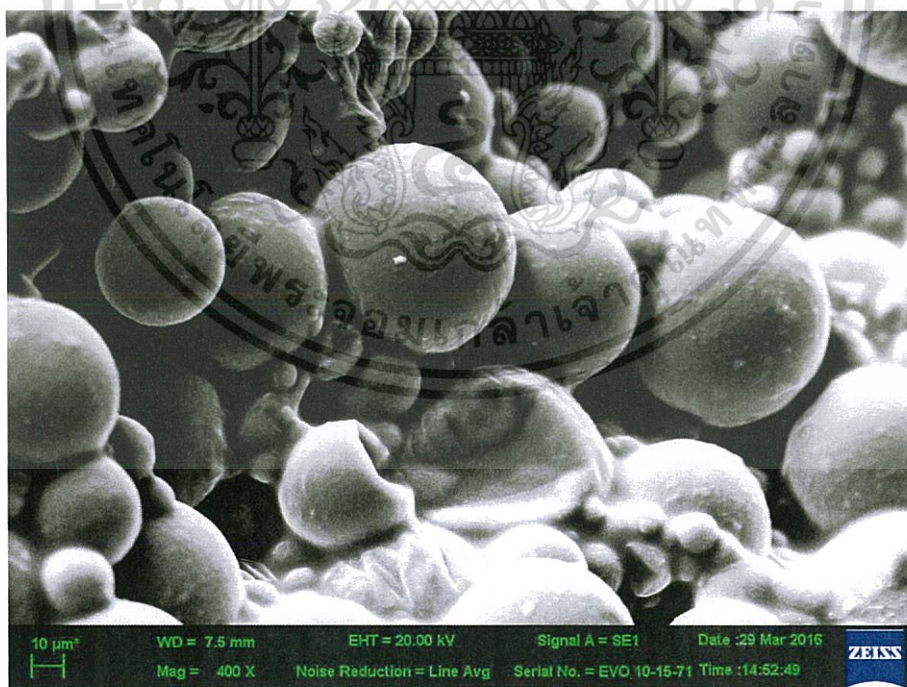
ภาคผนวก ค  
ลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลจากเครื่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด  
(Scanning Electron Microscopy; SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค.1 อัตราการปั่นกววน 300 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์



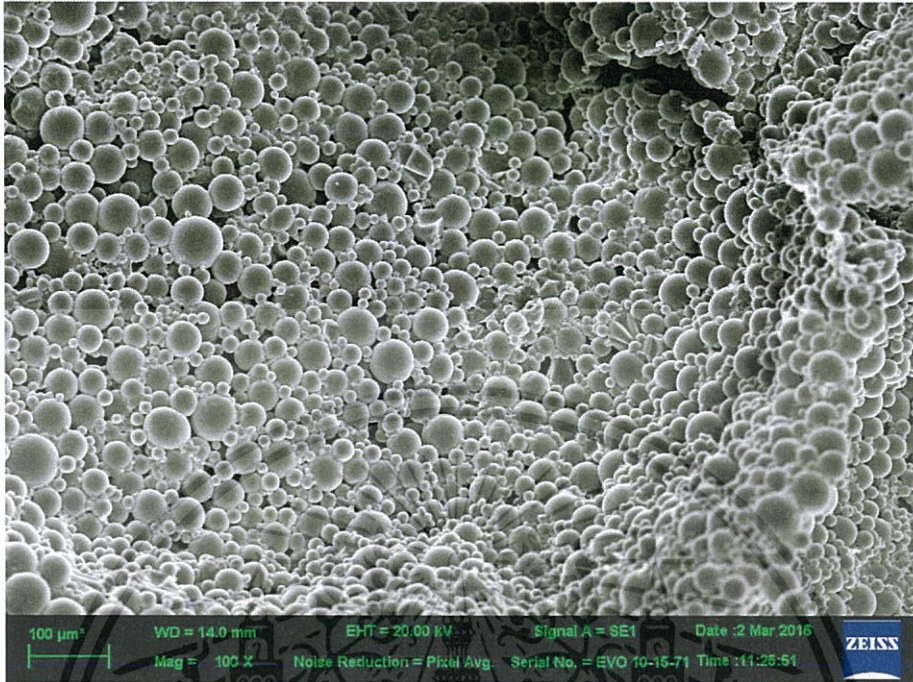
รูปที่ ค.1.1 อัตราการปั่นกววน 300 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ที่กำลังขยาย 100 เท่า



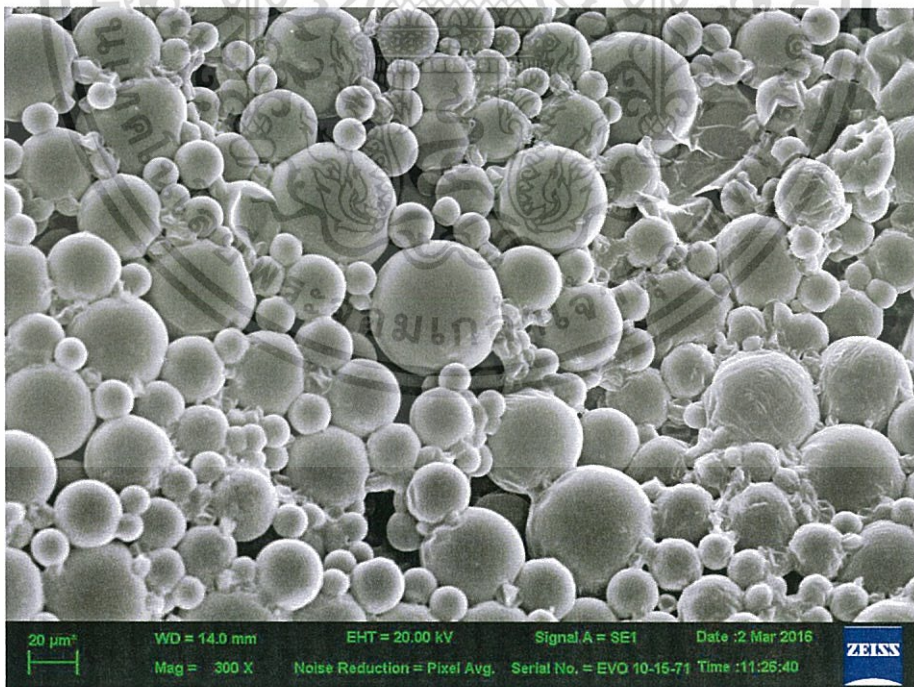
รูปที่ ค.1.2 อัตราการปั่นกววน 300 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ที่กำลังขยาย 400 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค.2 อัตราการปั่นกวน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์



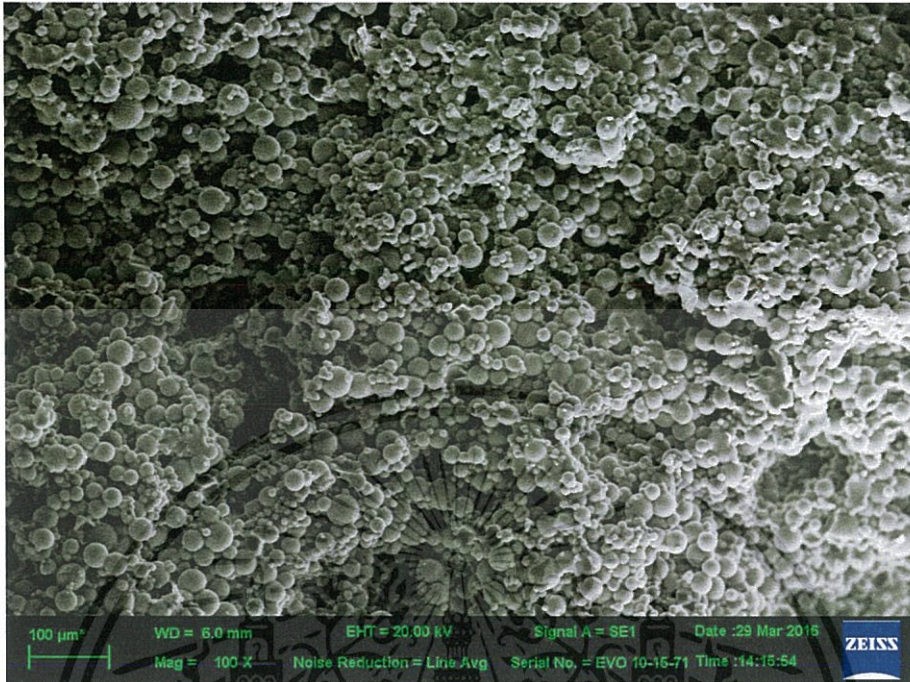
รูปที่ ค.2.1 อัตราการปั่นกวน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ที่กำลังขยาย 100 เท่า



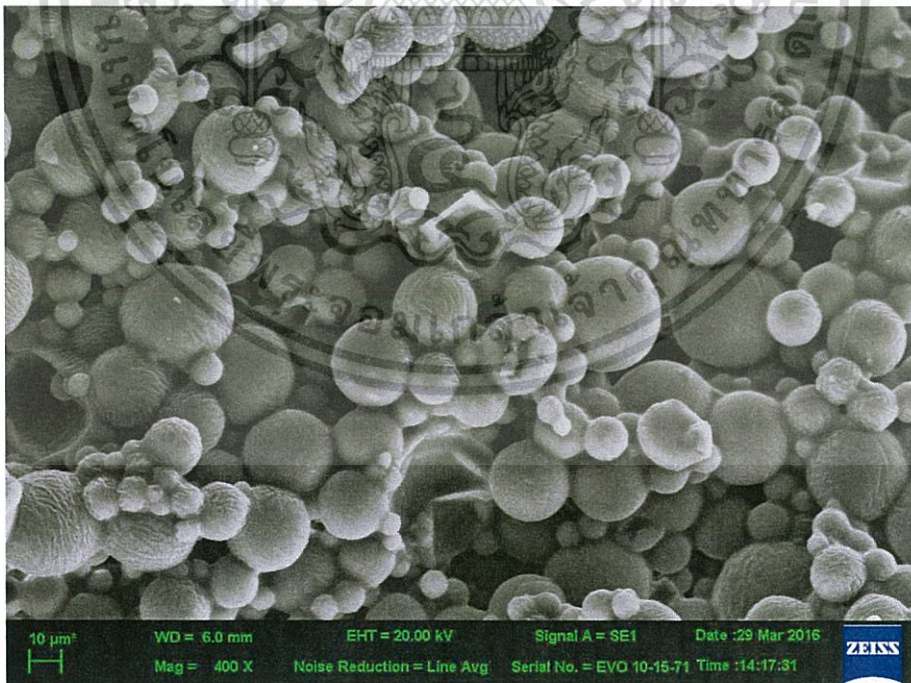
รูปที่ ค.2.2 อัตราการปั่นกวน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ที่กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค.3 อัตราการปั่นกววน 500 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์



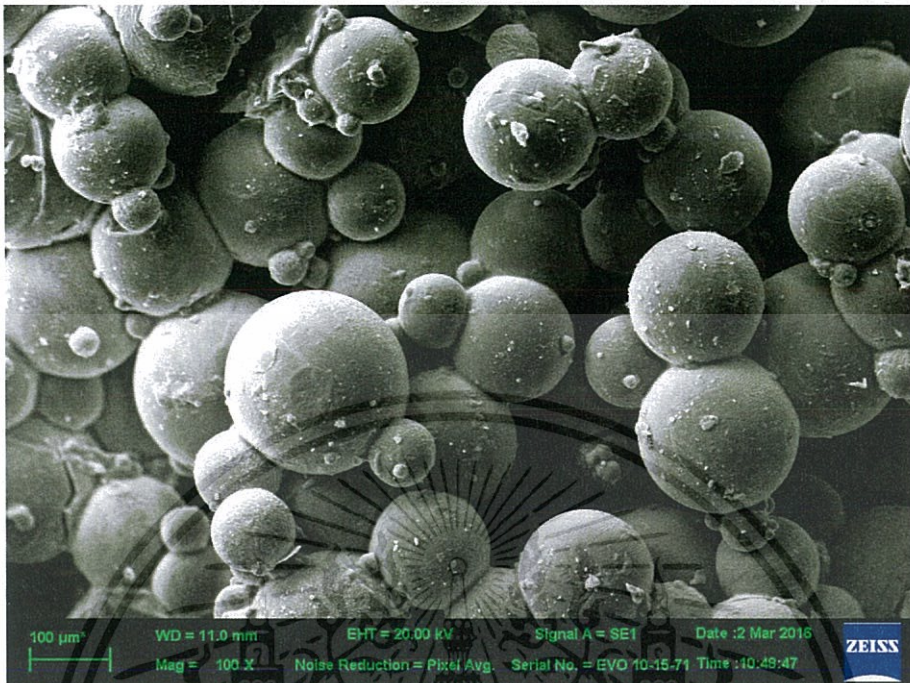
รูปที่ ค.3.1 อัตราการปั่นกววน 500 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ที่กำลังขยาย 100 เท่า



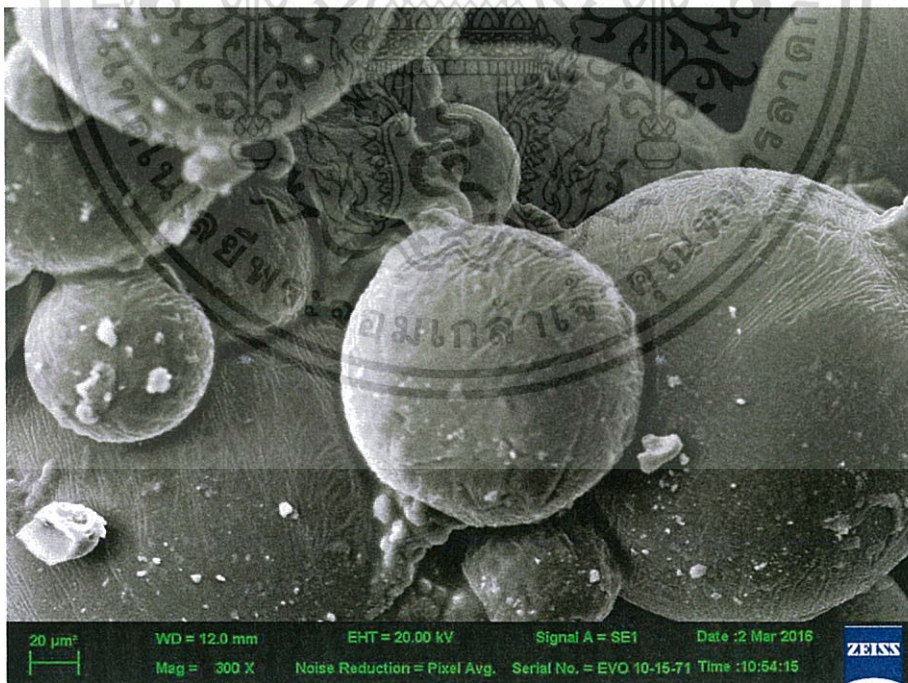
รูปที่ ค.3.2 อัตราการปั่นกววน 500 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ที่กำลังขยาย 400 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ค.4 อัตราการปั่นกวน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวนด้วยใบพัด



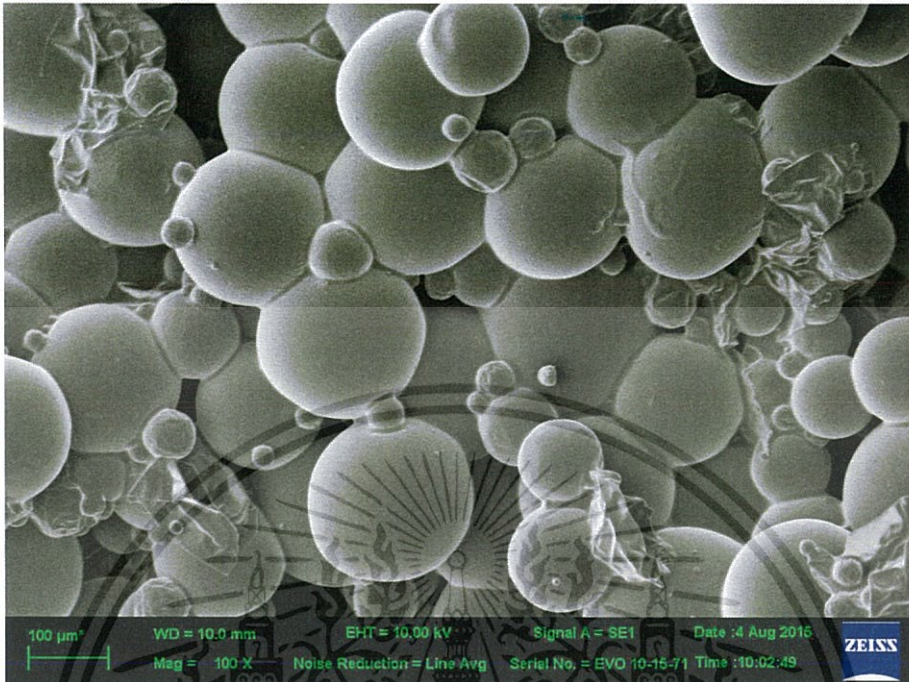
รูปที่ ค.4.1 อัตราการปั่นกวน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวนด้วยใบพัด ที่กำลังขยาย 100 เท่า



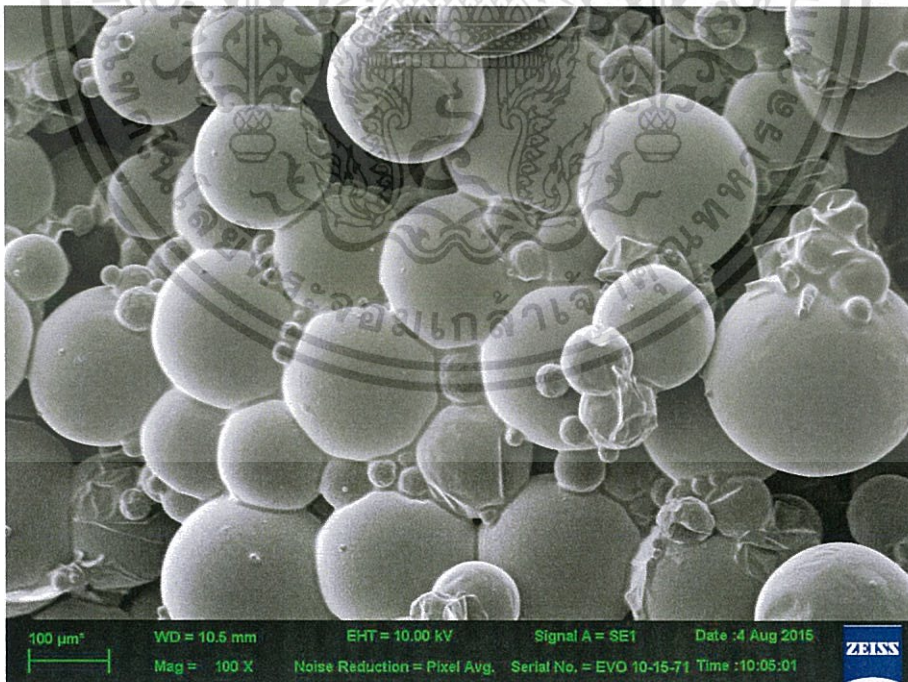
รูปที่ ค.4.2 อัตราการปั่นกวน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวนด้วยใบพัด ที่กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค.5 อัตราการปั่นกวาน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวานด้วยแท่งแม่เหล็ก



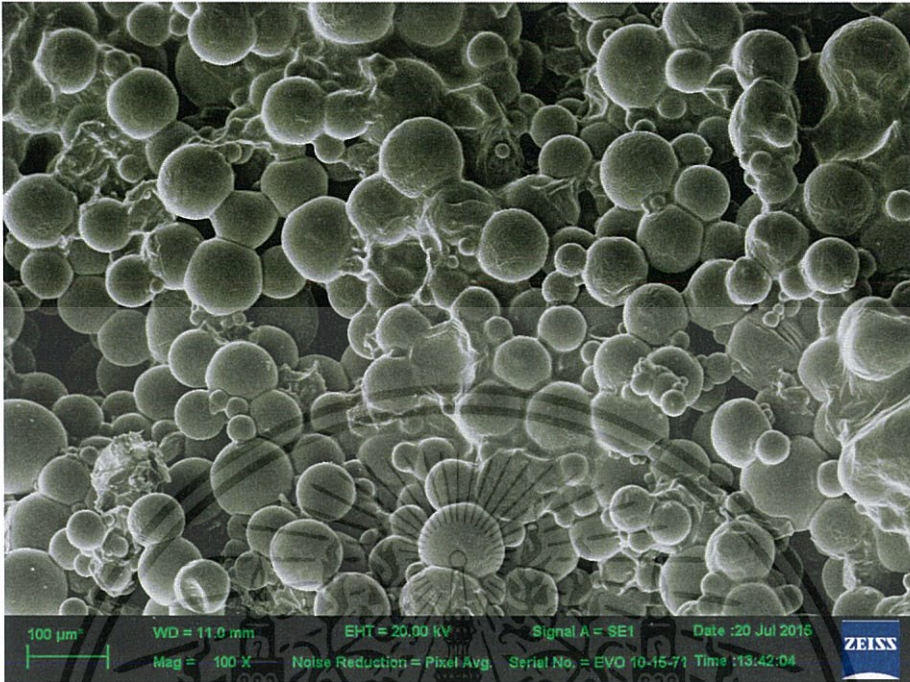
รูปที่ ค.5.1 อัตราการปั่นกวาน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวานด้วยแท่งแม่เหล็กที่กำลังขยาย 100 เท่า



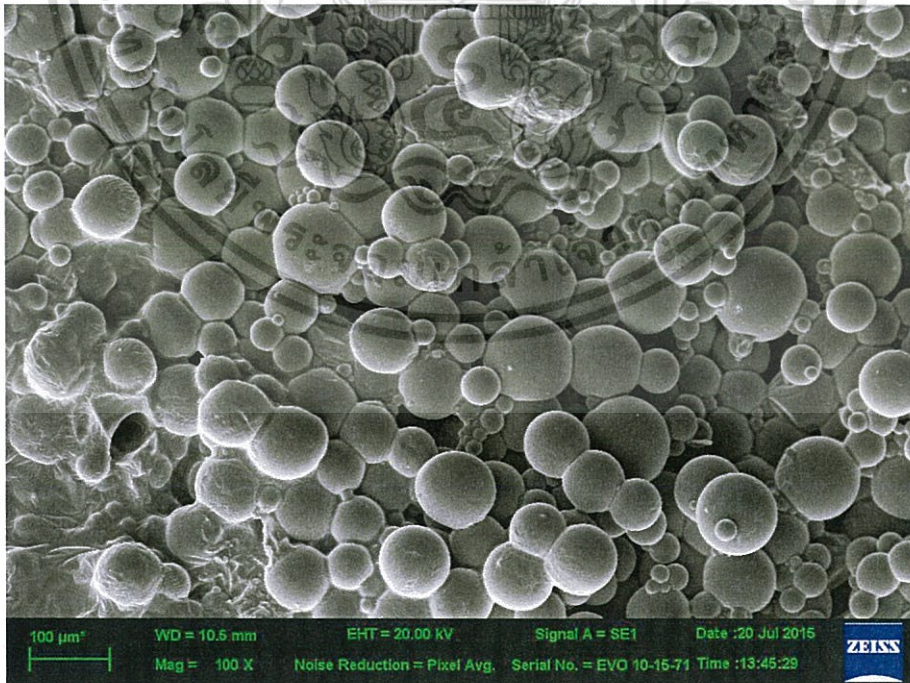
รูปที่ ค.5.2 อัตราการปั่นกวาน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวานด้วยแท่งแม่เหล็กที่กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค.6 อัตราการปั่นกวน 1,000 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก



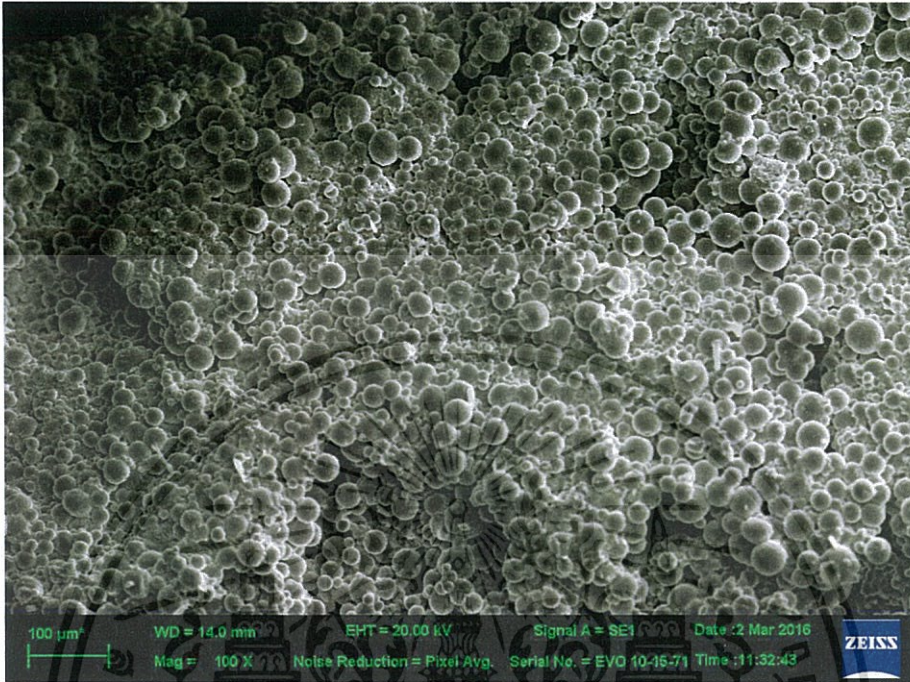
รูปที่ ค.6.1 อัตราการปั่นกวน 1,000 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กที่กำลังขยาย 100 เท่า



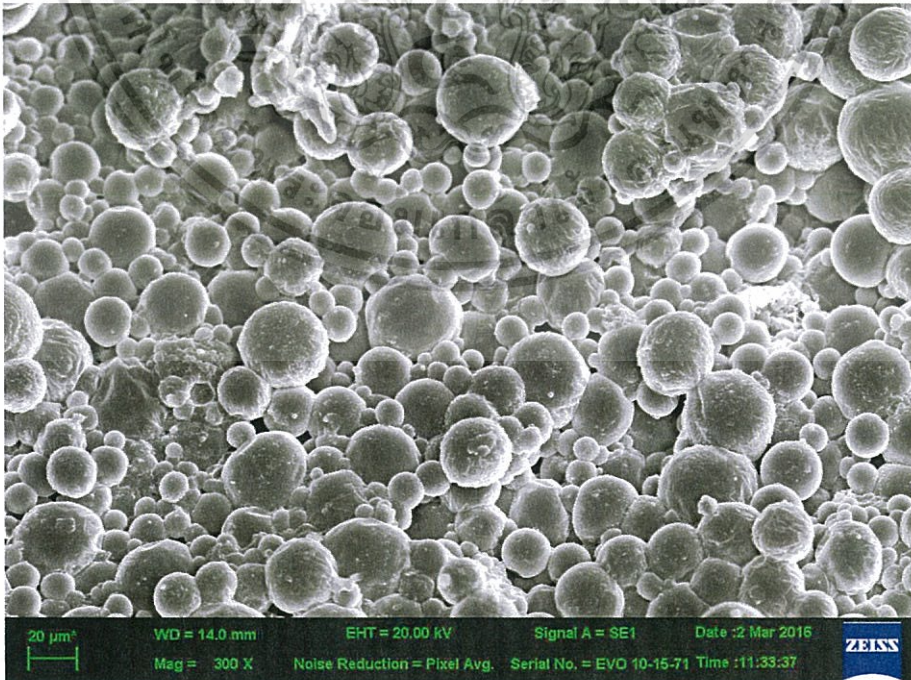
รูปที่ ค.6.2 อัตราการปั่นกวน 1,000 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กที่กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.7 อัตราการปั่นกว 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ และตามด้วย 1,000 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวด้วยแท่งแม่เหล็ก



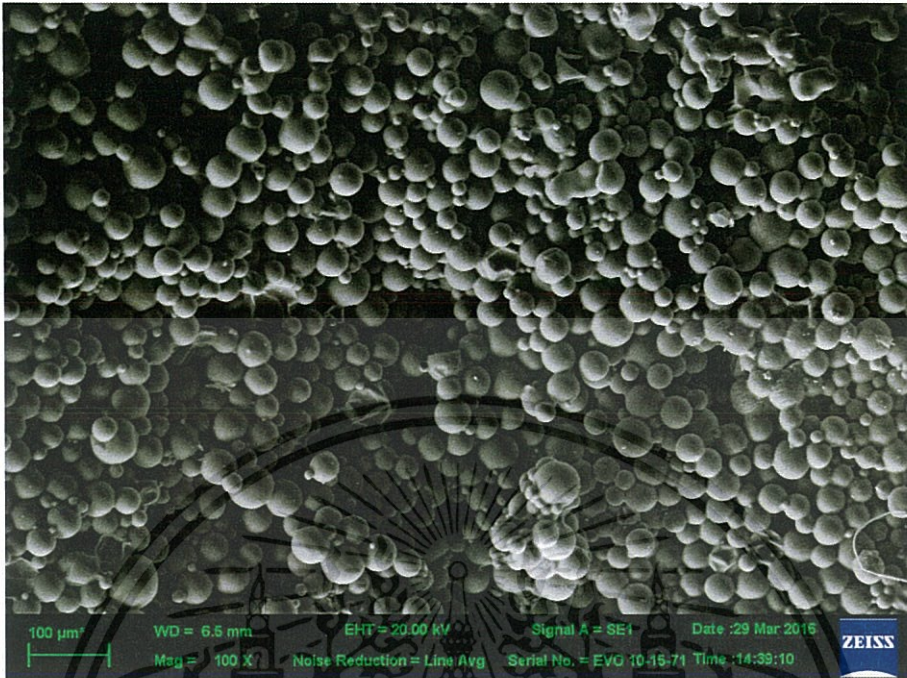
รูปที่ ค.7.1 อัตราการปั่นกว 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ และตามด้วย 1,000 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวด้วยแท่งแม่เหล็ก ที่กำลังขยาย 100 เท่า



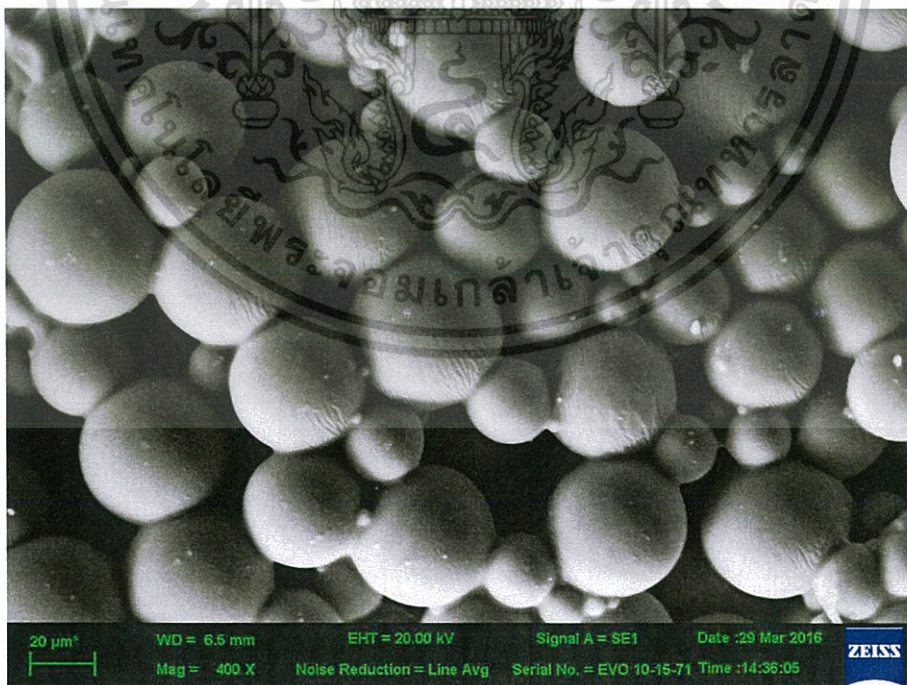
รูปที่ ค.7.2 อัตราการปั่นกว 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ และตามด้วย 1,000 รอบต่อนาทีของเครื่องปั่นกวด้วยแท่งแม่เหล็ก ที่กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติเนาไปเซประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค.8 อัตราการปั่นกววน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (ปรับปรุง)



รูปที่ ค.8.1 อัตราการปั่นกววน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (ปรับปรุง) ที่กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ ค.8.2 อัตราการปั่นกววน 400 รอบต่อนาทีของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (ปรับปรุง) ที่กำลังขยาย 400 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้