

การเคลือบผิวซ่อมแซมตนเอง

SELF - HEALING COATING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

สารเคลือบผิวซ่อมแซมตนเอง

SELF – HEALING COATING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SELF – HEALING COATING



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

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาานิพนธ์เรื่อง สารเคลือบผิวซ่อมแซมตนเอง
โดย นางสาวบุศรินทร์ เนตรสว่าง
นายมัตตัญญู แจ้งโงะ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์
ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



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



.....กรรมการ
(ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)



.....กรรมการ
(รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	สารเคลือบผิวซ่อมแซมตนเอง
โดย	นางสาวบุศรินทร์ เนตรสว่าง นายมัตต์ัญญู แจ้งโงง
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์ณ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสารเคลือบผิว โดยเติมไมโครแคปซูลลงในสารเคลือบอีพอกซีเรซิน และนำของผสมที่ได้ไปเคลือบบนผิวของแผ่นเหล็กโดยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง ชั้นเคลือบที่ศึกษาจะมีความสามารถในการซ่อมแซมตนเองเมื่อเกิดรอยขีดข่วน และเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะที่ถูกเคลือบอีกด้วย ในการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบบนผิวเหล็ก ทดสอบโดยการกรีดรอยบนชั้นเคลือบเพื่อให้มีพื้นผิวสัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูล และขนาดของไมโครแคปซูล ตรวจสอบ และสังเกตจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของไมโครแคปซูลคืออัตราการกวน และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการกวน และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว จะเป็นการลดขนาดของไมโครแคปซูล ค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ คือ 0.25, 1 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้มีช่วงของขนาดอนุภาค คือ 50-600, 50-550 และ 50-450 μm ตามลำดับ

Report Title	Self-healing Coating
By	Miss Budsarin Netsawang Mr. Mattanyu Jaengthong
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2014
Advisor	Asst. Prof. Dr. Apinan Namkanisorn

ABSTRACT

This project aims to develop a smart coating material by incorporating Poly(urea-formaldehyde) (PUF) microcapsules into epoxy resins. The resulting solution was then coated onto a surface of steel by a spin coating. The coating has a unique property such that it can repair itself under the damage by abrasion, as well as enhancing corrosion resistance. The corrosion resistance of coating on steel surface was evaluated by exposing the coated surface to NaCl solution. The morphology of microcapsules and microcapsule's size were observed using optical microscopy (OM). The factors affecting the size of microcapsules, namely, agitation rate and surfactant concentration were studied. It was found that increasing both agitation rate and surfactant concentration reduced the size of microcapsules. Varying the concentration of surfactant at 0.25, 1 and 1.5 yielded microcapsules with a range of particle size between 50-600, 50-550 and 50-450 μm , respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคลากรหลายฝ่าย ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณ

ผศ.ดร.อภิวัฒน์ นัมคณิสสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และแนวทางแก้ไขปรับปรุงโครงงาน ทำให้โครงงานฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ และรศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขโครงงาน ทำให้โครงงานฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ผศ. รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ และดร.ธีรพร สุธีวงศ์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ คำแนะนำเพิ่มเติม ทำให้โครงงานนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

คุณเอกราช บำรุงไทยไชยชาญ และคุณพิสันต์ ผลโพธิ์ และเจ้าหน้าที่วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล เจ้าหน้าที่วิจัย และเจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์ และอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงงานนี้

บิดาและมารดา และเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้กำลังใจ และความช่วยเหลือในการดำเนินงานตลอดการทำปริญญาานิพนธ์

อนึ่งยังมีผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนาม ถ้าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้วิจัยขอน้อมรับและกราบขออภัยมา ณ ที่นี้

บุศรินทร์ เนตรสว่าง

มัตตัญญู แจ้งโอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุ	3
2.1.1 การปลดปล่อยสารซ่อมแซมออกจากไมโครแคปซูล	3
2.1.2 น้ำมันเมล็ดฝ้าย	4
2.1.3 การฝังตัวของไมโครแคปซูล	4
2.2 การกัดกร่อน	5
2.3 การเคลือบผิว	5
2.3.1 สารเคลือบผิว	5
2.3.2 พอลิเมอร์ และเรซินสังเคราะห์	6
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
บทที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน	
3.1 ขั้นตอนการศึกษา	9
3.2 วิธีดำเนินงาน	9
3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	9
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	10
3.3.1 กระบวนการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล	10
3.3.2 การเตรียม Carbon Steel เพื่อใช้ในการทดสอบ	11
3.3.3 กระบวนการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อน	11
3.3.4 การวิเคราะห์หาขนาด และลักษณะของอนุภาค	12
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 การสร้างตัวของไมโครแคปซูล	14
4.2 ขนาดของไมโครแคปซูล	15
4.3 ลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูล	17
4.4 ความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อน	19
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	21
5.2 ข้อเสนอแนะ	21
เอกสารอ้างอิง	23
ภาคผนวก ก.	25
ภาคผนวก ข.	28

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบของการเตรียมไมโครแคปซูล ในแต่ละตัวอย่าง	11
ตารางที่ ก.1 แสดงขนาดของไมโครแคปซูลในแต่ละตัวอย่าง	26



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการรักษาตัวเองแบบอัตโนมัติโดยไมโครแคปซูลที่หุ้มสารซ่อมแซม ถูกฝังไว้ในเมทริกซ์ที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการสร้าง พอลิเมอร์ของสารซ่อมแซม	3
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง	12
รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาขนาด และลักษณะของอนุภาค	13
รูปที่ 4.1 ไมโครแคปซูลที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์เมล็ดฝ้าย	14
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะพื้นผิวไมโครแคปซูล ระหว่างไมโครแคปซูลที่สมบูรณ์ และไม่สมบูรณ์	15
รูปที่ 4.3 ภาพไมโครแคปซูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	15
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว(PVA) ต่อขนาดของ ไมโครแคปซูล	16
รูปที่ 4.5 ผลของอัตราการกวนต่อขนาดของไมโครแคปซูล	16
รูปที่ 4.6 ภาพแสดงลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูล ที่ปริมาณสารลดแรงตึงผิว แตกต่างกัน	17
รูปที่ 4.7 ภาพแสดงลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูลที่อัตราการกวนต่างกัน	17
รูปที่ 4.8 ผลการยับยั้งการเกิดสนิมเมื่อเร่งการเกิดสนิมด้วยNaCl 5%wt เป็นเวลา 7 วัน	19
รูปที่ 4.9 รอยขีดที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของสารเคลือบผิวจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	20
รูปที่ ข.1 ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว(PVA) 0.25 %wt ต่อขนาดของ ไมโครแคปซูล ที่อัตราการกวน 600 rpm	29
รูปที่ ข.2 ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว(PVA) 1 %wt ต่อขนาดของ ไมโครแคปซูล ที่อัตราการกวน 600 rpm	30
รูปที่ ข.3 ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว(PVA) 1.5 %wt ต่อขนาดของ ไมโครแคปซูล ที่อัตราการกวน 600 rpm	31
รูปที่ ข.4 ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว(PVA) 1.5 %wt ต่อขนาดของ ไมโครแคปซูล ที่อัตราการกวน 400 rpm	32

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารเคลือบผิวที่ใช้งานในปัจจุบันนั้นเป็นทางเลือกที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย และเป็นที่นิยมอย่างสูง เพราะมีราคาที่ถูก และใช้งานได้ง่าย ซึ่งสารเคลือบผิวนี้จะถูกนำมาใช้ในการเคลือบผิวโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยประสิทธิภาพในการป้องกันของชั้นสารเคลือบผิวที่เคลือบผิวหน้าของโลหะนั้นจะขึ้นอยู่กับ ความทนทานของสารเคลือบผิว ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำ และการยึดเกาะของสารเคลือบบนผิวหน้าโลหะ ในสภาวะที่เกิดการกัดกร่อน ผิวโลหะที่อยู่ภายใต้ชั้นเคลือบผิวนั้นจะถูกกัดกร่อนจากการซึมผ่านของน้ำ และประจุไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนเข้าไปทำลายความทนทานของชั้นเคลือบผิว ซึ่งบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนอาจจะขยายเป็นวงกว้างได้ และเกิดการสะสมเข้าทำลายลึกลงในชั้นโลหะ ทำให้เกิดการพอง การลอก ของชั้นเคลือบผิว อีกหนึ่งสาเหตุที่สำคัญคืออันตรายจากภายนอกบนชั้นเคลือบผิว เช่น การแตก การขีด การข่วน ที่ก่อให้เกิดรอยถลอกบนชั้นเคลือบผิว ซึ่งผิวหน้าของโลหะจะถูกเปิดออกสู่สภาวะภายนอก ทำให้บริเวณนั้นเกิดปัจจัยที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้เร็วยิ่งขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพของชั้นเคลือบผิวลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการใช้งานสารเคลือบผิวที่มีอยู่ในปัจจุบัน อาจก่อให้เกิดปัญหาในการใช้งานเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในระยะยาวได้

งานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาสารเคลือบผิวที่ใช้ในปัจจุบัน ให้มีความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุเมื่อเกิดรอยแตก รอยขีดข่วน รอยถลอก ของชั้นเคลือบบนผิวโลหะ โดยสารเคลือบผิวที่เลือกมาใช้คือ ชนิดอีพอกซี จากนั้นจะมีการผสมไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ขึ้นมา ซึ่งภายในบรรจุสารยับยั้งการกัดกร่อน และไมโครแคปซูลที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ หากมีรอยขีดข่วนเกิดขึ้นที่ชั้นเคลือบผิว ไมโครแคปซูลที่บรรจุอยู่ใน อีพอกซีจะแตกออก พร้อมปล่อยสารที่บรรจุออกมา ก่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไลเซชันซึ่งจะทำให้เกิดการผสมตัวเองของวัสดุในชั้นผิวเคลือบบนผิวหน้าของโลหะ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาสารเคลือบผิว ให้สามารถซ่อมแซมตัวเองได้หากเกิดความเสียหายภายนอกบนชั้นของสารเคลือบผิวโลหะ
- 1.2.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ และเพิ่มอายุการใช้งานให้ยาวนานขึ้น

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 พัฒนาสารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติในการซ่อมแซมตัวเอง
- 1.3.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้
- 1.3.3 ทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของสารเคลือบผิวที่พัฒนาขึ้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสารเคลือบผิว การสังเคราะห์ไมโครแคปซูล และการกัดกร่อน
- 1.4.2 ออกแบบการทดลอง และกำหนดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
- 1.4.3 ทำการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล และผสมไมโครแคปซูลเข้ากับสารเคลือบผิวชนิดอีพอกซี
- 1.4.4 ทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเอง และการป้องกันการกัดกร่อน
- 1.4.5 วิเคราะห์ผลจากการทดลอง และสรุปผลการดำเนินงาน

บทที่ 2

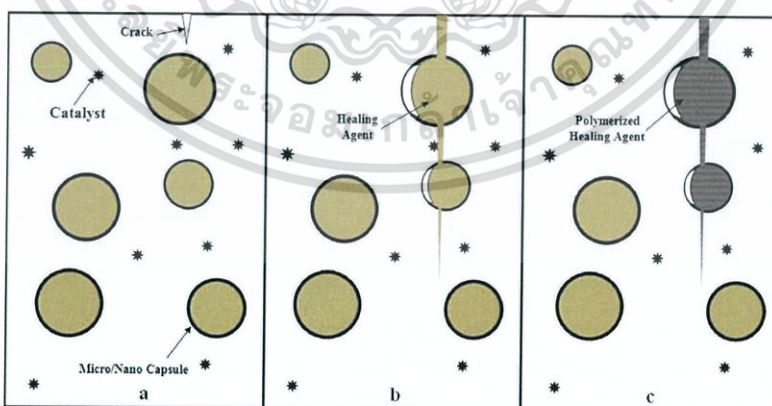
ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุ [3]

การซ่อมแซมตัวเองสามารถนิยามได้ว่าเป็นความสามารถของตัววัสดุที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้จากการที่ถูกทำให้เสียหายโดยปราศจากการแทรกแซงจากภายนอก ปกติในเรื่องของการซ่อมแซมตัวเองจะพิจารณาเพียงสมบัติทางกลในเรื่องของความแข็งแรงหลังจากการซ่อมแซมตลอดจนถึงการผสานรอยแตก การซ่อมแซมตัวเองต้องรวดเร็วหลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของผิวเคลือบและสิ่งแวดล้อมรอบข้าง

2.1.1 การปลดปล่อยสารซ่อมแซมออกจากไมโครแคปซูล

สารซ่อมแซม เช่น มอนอเมอร์ สี ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวทำให้แข็ง ที่จะบรรจุอยู่ในไมโครแคปซูล โดยปกติระบบการซ่อมแซมตัวเองนี้จะประกอบไปด้วยไมโครแคปซูล 2 ชนิดชนิดแรกทำหน้าที่เป็นสารซ่อมแซมภายในบรรจุไว้ด้วยวัสดุพอลิเมอร์ ส่วนไมโครแคปซูลอีกชนิดบรรจุสารเร่งปฏิกิริยาเอาไว้แคปซูลทั้งสองนี้จะกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ เมื่อเมทริกซ์เกิดการขูดขีด หรือเกิดการแตกหักจะทำให้สารซ่อมแซมชนิดพอลิเมอร์ที่อยู่ภายในแคปซูลไหลออกมาทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาเกิดการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแหตาข่าย (cross-linked polymer) เชื่อมต่อรอยแตกนั้น



รูปที่ 2.1 การรักษาตัวเองแบบอัตโนมัติโดยไมโครแคปซูลที่หุ้มสารซ่อมแซมถูกฝังไว้ในเมทริกซ์ที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการสร้างพอลิเมอร์ของสารซ่อมแซม (a) เมทริกซ์เกิดความเสียหายขึ้น (b) ไมโครแคปซูลที่บรรจุสารซ่อมแซมตัวเองแตกออก สารจะไหลออกมายังรอยแตกด้วยแรง capillary (c) สารซ่อมแซมสัมผัสกับสารเร่งปฏิกิริยา เกิดการกระตุ้นให้มีการสร้างพันธะโดยการ polymerization [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 น้ำมันเมล็ดฝ้าย

น้ำมันถูกนำมาใช้เป็นสารยึดในอุตสาหกรรมเคลือบผิวมานานแล้ว แต่ในปัจจุบันการนำน้ำมันเพียงอย่างเดียวมาใช้เป็นสารยึดมีอยู่น้อยมาก อย่างไรก็ตามยังมีการใช้น้ำมันเป็นส่วนผสมของ วาร์นิชหรือสารเคลือบผิวบางชนิดเพื่อจุดประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป เช่น ช่วยเพิ่มความอ่อนตัวของฟิล์ม ทำให้ไม่เปราะ หรือเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของการละลาย เป็นต้น น้ำมันเมล็ดฝ้ายมีลักษณะเป็น น้ำมันใสไปจนออกสีเหลืองที่ทำจากเมล็ดฝ้ายโดยการบีบหรือการสกัดจากตัวทำละลาย คุณสมบัติที่ดีของน้ำมันเมล็ดฝ้ายคือมีความยืดหยุ่น และ แห้งเร็ว คือเปลี่ยนจากสภาพของเหลวเป็นฟิล์มที่แห้งแข็ง ไม่ทำละลายในตัวทำละลายที่สามารถละลายน้ำมันได้ และไม่ยอมให้ความชื้นซึมผ่านได้ รวมไปถึงมีความทนต่อสารเคมี ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ น้ำมันเมล็ดฝ้ายจึงเหมาะที่จะนำมาทำเป็นสารเคลือบผิว

2.1.3 การฝังตัวของไมโครแคปซูล [3]

ไมโครเอนแคปซูล (Microencapsulation) เป็นกระบวนการหุ้มอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กๆ หรือหุ้มหยดของของเหลว หรือเป็นการหุ้มแก๊ส ซึ่งจะช่วยแยก และป้องกันอนุภาคที่ถูกห่อหุ้มออกจากสิ่งแวดล้อม สิ่งที่ได้จากกระบวนการห่อหุ้มเรียกว่าไมโครแคปซูล ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วน core กับ shell อาจเป็นรูปทรงกลมหรือไม่ก็ได้ และอาจมีขนาดตั้งแต่นาโนเมตร ถึง ไมโครเมตร

ปัจจัยสำคัญในการพัฒนาวัสดุซ่อมแซมตัวเองได้

- ก. ไมโครแคปซูล : สารซ่อมแซมตัวเองควรมีความเฉื่อย(ไม่ทำปฏิกิริยา) กับเปลือกหุ้มควรมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน ผนังเปลือกต้องอ่อนเพื่อการแตกออกที่ง่าย กระจายตัวอยู่ใกล้กับตัวเร่งปฏิกิริยา แรงดึงดูดที่แข็งแรงของผิวสัมผัสระหว่างเมทริกซ์กับแคปซูล
- ข. มอนอเมอร์ : ควรมีความหนืดต่ำๆ เพื่อที่สารจะไหลไปยังรอยแตกได้ง่าย มีอัตราการระเหยต่ำหลังจากแตกออกจากแคปซูลแล้วเพื่อให้มีเวลาเพียงพอในการสร้างร่างแหแบบตาข่าย
- ค. พอลิเมอร์เรซิน : ควรมีความรวดเร็ว ทำในอุณหภูมิห้องได้ ไม่มีการหดตัวตอนที่กำลังผลานกัน
- ง. ตัวเร่งปฏิกิริยา : สามารถละลายเข้ากับมอนอเมอร์ได้ ไม่มีการรวมตัวกับเมทริกซ์
- จ. การเคลือบ : การใส่แคปซูลลงในเมทริกซ์ควรส่งผลต่อคุณสมบัติของเมทริกซ์น้อยมาก ความหนาของสารเคลือบควรจะมากกว่าขนาดของแคปซูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ควรมีการจับกลุ่มกันของตัวเร่ง หรือแคปซูล (ควรมีการกระจายตัว) กระบวนการผลิตต้องมีราคาไม่แพง

ฉ. การซ่อมแซม : มีความรวดเร็วในการผสานตนเอง

2.2 การกัดกร่อน [4]

เมื่อโลหะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือถูกออกซิไดซ์ (โลหะที่มีค่า E^0 ครึ่งเซลล์รีดักชันสูงจะถูกออกซิเดชันยากกว่าโลหะที่มีค่า E^0 ครึ่งเซลล์รีดักชันต่ำกว่า) จะมีการกร่อนของโลหะนั้นๆ เกิดขึ้น ดังนั้นหลักของการป้องกันการกร่อนก็คือ การป้องกันไม่ให้โลหะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และวิธีการเคลือบผิวเป็นวิธีการป้องกันการกร่อนที่สะดวกที่สุด

2.3 การเคลือบผิว [1]

2.3.1 สารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวมีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ

1. เพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุจากมลภาวะต่างๆ สารเคลือบผิวจะช่วยให้ผิวหน้าวัสดุที่ถูกเคลือบมีความทนทานต่ออากาศ น้ำ สารเคมีต่างๆ นอกจากนี้ สารเคลือบผิวยังช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุมีความแข็งแรงขึ้น ทนทานต่อการขีดสีมากขึ้น และอายุการใช้งานนานขึ้น

ตัวอย่างของการป้องกันพื้นผิววัสดุ เช่น การใช้สีทาไม้เพื่อป้องกันการผุพังของไม้ อันเนื่องมาจากความชื้น หรือการเคลือบผิวภายในกระป๋องโลหะ เพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อนจากอาหารหรือสารเคมีที่บรรจุอยู่ภายใน หรือการเคลือบพื้นผิวชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อไม่ให้สัมผัสกับความชื้น หรือ สารเคลือบผิวประเภทสีหน่วงการติดไฟ (Fire retardant paint) ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการลุกไหม้บนผิวหน้าเป็นต้น สารเคลือบผิวบางประเภท ใช้ทาผิวหน้าที่มีรูพรุน เช่น ผิวคอนกรีต และพลาสติก เพื่อช่วยให้ทำความสะอาดได้ง่ายขึ้น

2. เพื่อตกแต่งให้แลดูสวยงาม ความสวยของวัสดุหลังการเคลือบผิวหน้าด้วยสารเคลือบผิว อาจมาจากสี (color) จากความเงา (gloss) จากลวดลายตกแต่ง (texture) หรือจากความสว่าง (lighting) หรือจากทั้งหมดรวมกัน

ประเภทของสารเคลือบผิว สำหรับสารเคลือบผิวออกเป็น 3 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สี (Paint) หมายถึง สารผสมของผงสี (pigment) สารยึด (binder) หรือสิ่งนำสี (vehicle) และสารเติมแต่ง (additives)

- I. ผงสีเป็นสารที่ให้สีและมีความสามารถในการปิดบังพื้นผิวหรือกำลังซ่อนแสง (Hiding power) ผงสีอาจเป็นสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ก็ได้
 - II. สารยึดหรือสิ่งนำสี คือสารที่ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคของสารประกอบในสีเข้าไว้ด้วยกันให้เกิดเป็นฟิล์มของสีติดแน่นกับพื้นผิวที่ถูกเคลือบ ตัวอย่างของสารยึด ได้แก่ น้ำมันแห้งเร็ว (Drying oil), เรซินธรรมชาติ, เรซินสังเคราะห์ เป็นต้น
 - III. ตัวทำละลาย มีหน้าที่ช่วยปรับความหนืดของสี เพื่อให้เหมาะต่อการผลิตหรือสะดวกต่อการใช้งาน ตัวทำละลายส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์
 - IV. สารเติมแต่งเป็นสารที่เติมลงไปสีเพียงเล็กน้อย เพื่อช่วยให้สีมีสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น ทำให้สีแห้งเร็วขึ้น ทำให้สีไม่ขึ้นรา เป็นต้น
2. วานิช (Varnish) คือ สารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยสารยึดเพียงอย่างเดียว (ใสไม่มีสี)
3. แล็กเกอร์ (Lacquer) ได้แก่ สารละลายซึ่งได้จากการนำเรซิน หรือสารยึดมาละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ (มีสีหรือสีออกขาวขุ่น)

2.3.2 พอลิเมอร์ และเรซินสังเคราะห์ [1,2]

เรซินสังเคราะห์แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

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

โดยในงานวิจัยนี้ใช้อีพอกซีเรซิน(Epoxy Resin) เป็นเมทริกซ์ เพราะเป็นเรซินที่ใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดในอุตสาหกรรม ซึ่งถูกใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิว และอีพอกซีมีสมบัติ คือ เป็นฉนวน ทนต่อสารเคมี ทนความร้อน ป้องกันน้ำและแบคทีเรีย นิยมใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารเคลือบผิวในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ยานพาหนะต่างๆ และบนพื้นผิวโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ เรียกว่า พอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization reaction) คือปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่เกิดจากมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ ทำปฏิกิริยากันเป็นพอลิเมอร์และสารโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำ ก๊าซ แอมโมเนีย ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ เมทานอล เกิดขึ้นด้วย

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Hatami Boura และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการรักษาตนเอง และความแข็งแรงในการยึดเกาะของแคปซูลในสารเคลือบ โดยแคปซูลขนาดไมโครและนาโน บรรจุด้วย น้ำมันเมล็ดฝ้าย โดยภายในบรรจุน้ำมันเมล็ดฝ้ายที่มีฤทธิ์ต้านทานการกัดกร่อนเอาไว้ และทำการสังเคราะห์ทั้งขนาดไมโคร และนาโน จากนั้นนำไปรวมเข้ากับสารเคลือบผิวอีพอกซี แล้วนำไปเคลือบบนโลหะคาร์บอน เพื่อทดสอบการต้านทานการกัดกร่อน ความแข็งแรงในการยึดเกาะ และความทนทานของการฝังตัวในสารเคลือบ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า อัตราการกวนในการผลิตไมโครแคปซูลนั้นเป็นสิ่งสำคัญ ที่อัตราการกวนสูงจะได้แคปซูลขนาดเล็ก ซึ่งจะเกิดปัญหาน้อยในการนำไปรวมกับสารเคลือบ และแคปซูลขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพในการรักษาตนเองได้สูง และความเข้มข้นของสารที่บรรจุภายในแคปซูล หากมีปริมาณที่มากพอ ก็จะทำให้มีประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนได้สูง แคปซูลชนิดนาโนแคปซูลจะสามารถลดการซึมผ่านของสารที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ดีกว่าไมโครแคปซูล แต่นาโนแคปซูลนั้นจะเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการใช้งานในการป้องกันการกัดกร่อนในระยะสั้น

Li Yuan และคณะ [8] ได้ทำการศึกษา การเตรียมและวิเคราะห์คุณสมบัติของไมโครแคปซูลที่บรรจุลงในสารอีพอกซี โดยกล่าวถึงการเตรียมไมโครแคปซูลโดยที่เปลือกของไมโครแคปซูลจะใช้เป็นยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ส่วน core จะใช้ DGEBA และ BGE ผสมกันในอัตราส่วนของน้ำหนักของ BGE ต่อ DGEBA เป็น 0.2 การทดลองจะทำการเปลี่ยนสัดส่วนโดยน้ำหนักของ ยูเรีย ต่อฟอร์มาลดีไฮด์ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ core ต่อ shell อัตราการกวน ความคงทนในการเก็บรักษาของไมโครแคปซูลที่เวลาและอุณหภูมิที่แตกต่างกันแล้วทำการตรวจสอบคุณสมบัติของไมโครแคปซูลผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนสัดส่วนโดยน้ำหนักของ core ต่อ shell ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ค่าตั้งแต่ 0.5 – 2.0 ส่วนสัดส่วนโดยน้ำหนักของ ยูเรีย ต่อ ฟอร์มาลดีไฮด์ กำหนดให้คงที่ไว้ที่ 0.5 และอัตราการกวนกำหนดให้คงที่ไว้ที่ 380 rpm อัตราส่วนของ core-shell ที่ได้ผลิตกันมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ 1.25 เมื่อเปลี่ยนสัดส่วนโดยน้ำหนักของ ยูเรีย ต่อ ฟอรัมาลดีไฮด์ ตั้งแต่ 0.375 – 0.75 โดยให้ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ core ต่อ shell อยู่ที่ 1.00 และ อัตราการกวนกำหนดให้คงที่ไว้ที่ 325 rpm สัดส่วนโดยน้ำหนักของ ยูเรีย ต่อ ฟอรัมาลดีไฮด์ที่ได้ผลิตภัณฑ์มากที่สุดคือ 0.5 ความคงทนของไมโครแคปซูลได้จากการสูญเสียน้ำหนัก ซึ่งพบว่าระยะเวลาในการรักษาไมโครแคปซูลที่สามารถรักษา น้ำหนักที่อุณหภูมิห้องให้คงที่ก่อนที่จะมีการสูญเสียเพิ่มมากขึ้นคือ 50 วัน เหตุผลหลักในการสูญเสีย น้ำหนักของไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิต่างกันคือความเสียหายของ free-formaldehyde และการแพร่ของสารที่อยู่ใน core ออกจากเปลือกไมโครแคปซูล

Aijuan Gu และคณะ [9] ได้ทำการศึกษา การเตรียมและวิเคราะห์คุณสมบัติของไมโครแคปซูลที่บรรจุลงในสารอีพอกซี โดยกล่าวถึงตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูล ซึ่งประกอบไปด้วย ชนิดของสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นของของสารลดแรงตึงผิว และอัตราการให้ความร้อน ในบทความนี้จะนำตัวแปรต่างๆมาวิเคราะห์เกี่ยวกับ ขนาดและลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูล แล้วทำการทดสอบ ความเสถียรในการเก็บรักษา ความต้านทานตัวทำละลาย และความแข็งแรงทางกายภาพของไมโครแคปซูล ผลที่ได้แสดงออกมาให้เห็นว่า การสร้างไมโครแคปซูลเป็นผลมาจากชนิดของสารลดแรงตึงผิว ขนาดของไมโครแคปซูลสามารถควบคุมได้โดยความเข้มข้นของของสารลดแรงตึงผิว ลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยมีความเข้มข้นของของสารลดแรงตึงผิว และอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญ ไมโครแคปซูลที่ถูกเตรียมโดยใช้สารลดแรงตึงผิว SDBS แสดงให้เห็นว่ามีความเสถียรในการเก็บรักษา ความต้านทานตัวทำละลาย และความแข็งแรงทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่ดี

Ashok Kumar และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการรักษาตนเองของสารเคลือบผิวป้องกันการกัดกร่อนสำหรับใช้กับงานอุปกรณ์ที่เป็นโลหะต่างๆไป และจะทำการทดสอบ โดยการใช้แคปซูลชนิดยูเรีย – ฟอรัมาลดีไฮด์ โดยมีการบรรจุสารที่อยู่ภายในแคปซูลที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงใส่ลงในสารเคลือบผิวที่มีขายกันโดยทั่วไป ในการทดสอบจะใช้สารภายในแคปซูลที่แตกต่างกัน 5 ชนิด และเทคนิคในการเคลือบที่แตกต่างกัน 3 วิธี การทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อสารเคลือบถูกทำให้เป็นรอยขีดข่วน ไมโครแคปซูลจะทำการปลดปล่อยสารที่อยู่ภายในออกมา รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นจะถูกยับยั้งการขยายตัวเนื่องจากมีการรักษาตนเองของสารเคลือบ นำตัวอย่างทั้งหมดที่แตกต่างกันมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของไมโครแคปซูลขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการศึกษา

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

3.2 วิธีดำเนินงาน

3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำกลั่น
2. ยูเรีย
3. ฟอรั่มอดีไฮด์
4. แอมโมเนียม คลอไรด์
5. รีโซซินอล
6. โพลีไวนิล แอลกอฮอล์
7. น้ำมันลินสีด
8. ไฮโดรคลอริก
9. โซเดียม คลอไรด์
10. อีพอกซี เรซิน

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บีกเกอร์
2. เครื่อง Magnetic Stirrer + Heater
3. ขาดั่ง และตัวหนีบปิเปต
4. เทอร์โมมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. หลอดหยดสาร
6. ปิเปต
7. ซ้อนตักสาร
8. นาฬิกาจับเวลา
9. กรวยแยก
10. กระดาษกรอง
11. เครื่องกรองสุญญากาศ
12. ตู้อบ
13. แผ่นเหล็กหนา 1 มิลลิเมตร
14. ดินน้ำมัน

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 กระบวนการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล

1. นำน้ำกลั่นจำนวน 260 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) 0.1487 กรัม ใส่ลงใน บีกเกอร์ขนาด 500 ml ภายใต้การกวนในอัตรา 600 rpm ที่อุณหภูมิห้อง
2. เติมนูเรีย 5 กรัม แอมโมเนียมคลอไรด์ 0.5 กรัม และรีโซซินอล 0.5 กรัม ลงไปในสารละลายที่ได้เตรียมไว้ในข้อ 1
3. ปรับค่า pH ให้ได้ประมาณ 3.0 โดยใช้ 1wt% ของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ในน้ำกลั่น
4. จากนั้นเริ่มใส่น้ำมันเมล็ดฝ้าย ซ้ำๆ ในรูปแบบของอิมัลชัน รอ 10 นาที เพื่อให้สารมีความเสถียร
5. เติม สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ ความเข้มข้น 37wt% ปริมาณ 34 มิลลิลิตร และเพิ่มความร้อนซ้ำๆ เพื่อรักษาอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส ภายใต้การกวน 600 rpm เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
6. จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จะได้ไมโครแคปซูลที่ได้จะอยู่ในรูปของสารแขวนลอย นำใส่กรวยแยกทิ้งไว้ 1 ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จากนั้นทำการกรองภายใต้ความดันสุญญากาศ แล้วล้างไมโครแคปซูลด้วยน้ำกลั่น และโซลีน ตามลำดับ เพื่อขจัดคราบน้ำมันที่เกาะอยู่
8. ทำให้แห้งภายใต้ความดันสุญญากาศอีกครั้ง
9. ไมโครแคปซูลที่ได้จะถูกเก็บไว้ในเตาอบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
10. ทำการทดลองซ้ำ ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-10 โดยเปลี่ยนปริมาณของสารลดแรงตึงผิว ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบของการเตรียมไมโครแคปซูล ในแต่ละตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ปริมาณของสารลดแรงตึงผิว	อัตราการกวน
	(กรัม)	(rpm)
M - 1	0.1487	600
M - 2	0.5950	600
M - 3	0.8925	600
M - 4	0.8925	400

3.3.2 การเตรียม Carbon Steel เพื่อใช้ในการทดสอบ

1. ตัดแผ่น Carbon Steel ที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร ให้มีขนาด 80 × 80 มิลลิเมตร และขนาด 20 × 20 มิลลิเมตร
2. ขัดผิวแผ่น Carbon Steel ด้วยกระดาษทราย จากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาด และเช็ดให้แห้ง

3.3.3 กระบวนการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อน

1. นำไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ได้ผสมลงใน epoxy resin ภายใต้อัตราการกวนที่ 200 rpm เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
2. นำแผ่นเหล็ก Carbon Steel ที่เตรียมไว้ มาเคลือบด้วยสาร epoxy resin ในข้อที่ 1 โดยการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) เพื่อให้ผิวเคลือบมีความสม่ำเสมอเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อบแผ่นเหล็กที่เคลือบด้วย epoxy resin ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. หลังจากทำการบ่มแผ่นเหล็กที่ถูกเคลือบที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 วันแล้ว จากนั้นกรีดผิวของสารเคลือบให้ลึกลงไปจนถึงผิวของโลหะ โดยใช้มีดคัดเตอร์กรีดเป็นรูปกากบาท ให้มีความยาว 60 mm x 60 mm ในแนวทแยง และการกรีดให้กรีด 2 ครั้งซึ่งแต่ละครั้งให้กรีดลงในรอยเดิมและไปในทางเดียวกัน
5. แผ่นเหล็กที่มีรอยกรีดเกิดขึ้นบนผิวของสารเคลือบจะเก็บไว้ 24 ชั่วโมง ภายใต้ อุณหภูมิห้อง
6. นำดินน้ำมันมาใช้เพื่อจำกัดขอบเขตการทดสอบของแผ่นเหล็ก
7. จากนั้นนำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 wt% หยดลงบนแผ่น C-sheet ที่เคลือบด้วย Epoxy resin ทั้งที่ใส่ไมโครแคปซูล และ Epoxy resin แบบปกติทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วันแล้วตรวจสอบการเกิดสนิม

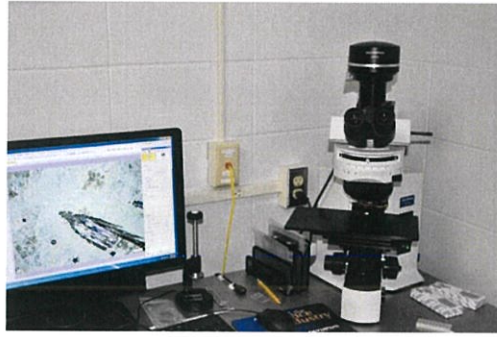


รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin Coating)

3.3.4 การวิเคราะห์หาขนาด และลักษณะของอนุภาค

การวิเคราะห์ขนาด และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ จะทำการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopes)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาขนาด
และลักษณะของอนุภาค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการเคลือบแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) ด้วยอีพอกซี และอีพอกซีที่ผสมกับไมโครแคปซูล เพื่อทดสอบความสามารถในการป้องกันการเกิดสนิม และวิเคราะห์ไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อใช้ผสมในอีพอกซี โดยในการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลแต่ละตัวอย่างมีองค์ประกอบแตกต่างกันดังแสดงในตาราง 3.1 ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะแบ่งตามการทดสอบคือ ความสามารถในการยับยั้งการเกิดสนิม อัตราการเกิดการกัดกร่อน และการวิเคราะห์หาขนาดและลักษณะของไมโครแคปซูล

4.1 การสร้างตัวของไมโครแคปซูล

จากกระบวนการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลที่กล่าวมาในบทที่ 3 เมื่อการสังเคราะห์เป็นไปอย่างสมบูรณ์ และไมโครแคปซูลที่ได้จะถูกนำมาพิจารณาลักษณะผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) จะเห็นไมโครแคปซูลทรงกลม ที่ภายในบรรจุน้ำมันเมล็ดฝ้าย (Linseed Oil) และมีเปลือกหุ้มเป็นโพลียูเรียฟอร์มอลดีไฮด์ (Poly-urea formaldehyde) ดังแสดงในรูปที่ 4.1

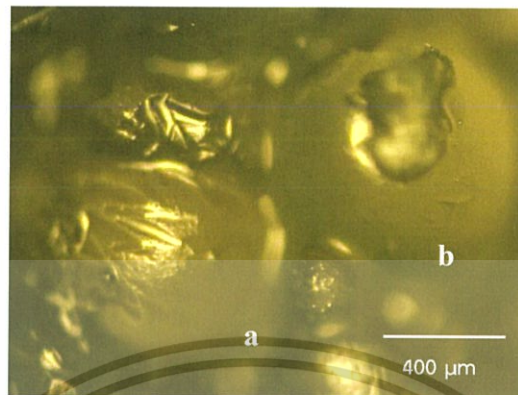


รูปที่ 4.1 ไมโครแคปซูลที่ภายในบรรจุน้ำมันเมล็ดฝ้าย (Linseed Oil)

ไมโครแคปซูลที่ได้จากการสังเคราะห์ เมื่อส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง จะเห็นถึงลักษณะ และรูปทรงของไมโครแคปซูล ที่มีความแตกต่างกันไป ไมโครแคปซูลที่ได้บางส่วนไม่สมบูรณ์ มีพื้นผิวที่เสียหาย เกิดการแตกทำให้เกิดการรั่วไหลของน้ำมันเมล็ดฝ้ายได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจากรูป ไมโครแคปซูล a มีสภาพสมบูรณ์ มีทรงกลม แต่ในรูป b จะสังเกตเห็นพื้นผิวที่ไม่สมบูรณ์ของไม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

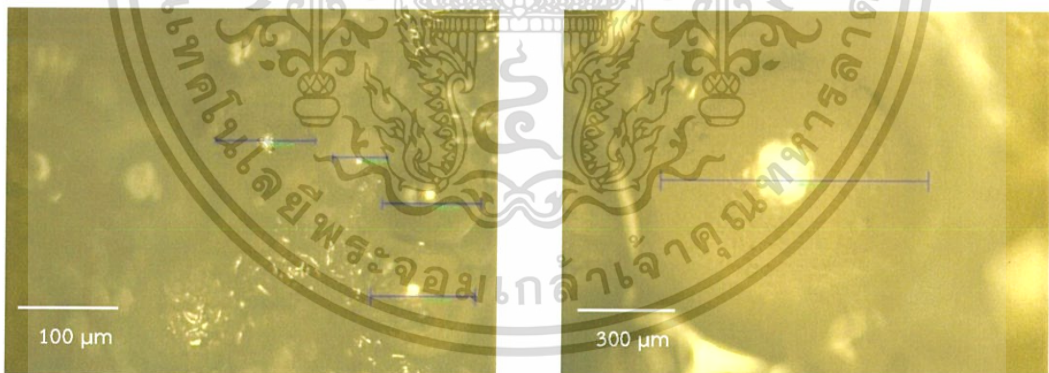
โครแคปซูล มีรอยแตกที่ผิวของไมโครแคปซูล ซึ่งต่อไปเม็ดไมโครแคปซูลที่เสียหาย จะฝ่อตัวลงและใช้งานไม่ได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ หรืออาจใช้งานไม่ได้เลย



รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวไมโครแคปซูลเปรียบเทียบระหว่างไมโครแคปซูลที่สมบูรณ์ และไม่สมบูรณ์

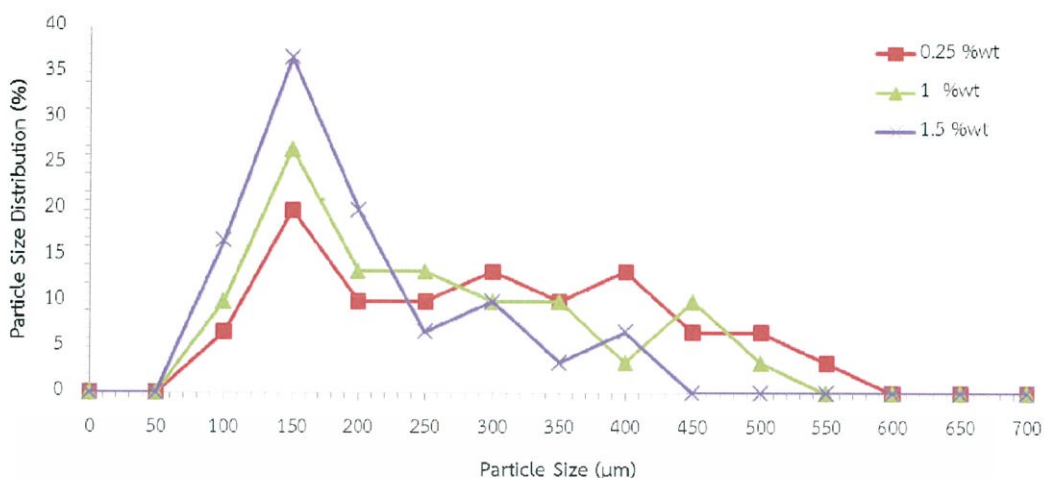
4.2 ขนาดของไมโครแคปซูล

หลังจากการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล นำไมโครแคปซูลที่ได้ไปส่องขยายผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopes) เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูล และวัดขนาดของไมโครแคปซูลเพื่อหาค่าเฉลี่ยของขนาดในแต่ละตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.3



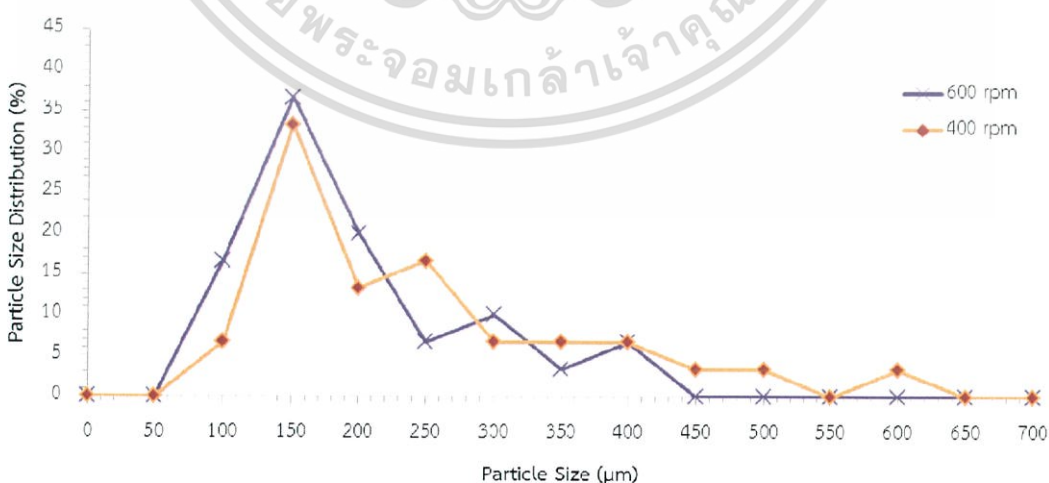
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopes)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว(PVA) ต่อขนาดของไมโครแคปซูล

จากรูปที่ 4.4 กราฟแสดงให้เห็นการกระจายตัวของขนาดไมโครแคปซูลในตัวอย่างที่ 1 2 และ 3 โดยมีความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (PVA) ที่แตกต่างกัน คือ 0.25, 1 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าที่ความเข้มข้น 0.25 %wt (กราฟเส้นสีแดง) มีการกระจายตัวของขนาดไมโครแคปซูลอยู่ในช่วง 50-600 μm และขนาดเฉลี่ย คือ 295 μm ที่ความเข้มข้น 1 %wt (กราฟเส้นสีเขียว) มีการกระจายตัวของขนาดจะอยู่ในช่วง 50-550 μm และขนาดเฉลี่ย คือ 255 μm ที่ความเข้มข้น 1.5 %wt (กราฟเส้นสีม่วง) มีการกระจายตัวของขนาดจะอยู่ในช่วง 50-450 μm และขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 198 μm ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดโดยเฉลี่ยของไมโครแคปซูลลดลง ซึ่งจะทำให้ช่วงของขนาดนั้นแคบลงไปด้วย



รูปที่ 4.5 ผลของอัตราการกวนต่อขนาดของไมโครแคปซูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลของอัตราการกวนต่อขนาดของไมโครแคปซูล เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราการกวนที่ 600 rpm (กราฟเส้นสีม่วง) และ 400 rpm (กราฟเส้นสีส้ม) ซึ่งมีปริมาณสารลดแรงตึงผิวเท่ากัน แต่มีอัตราการกวนที่แตกต่างกัน พบว่าที่อัตราเร็วการกวนสูงนั้นทำให้ขนาดของไมโครแคปซูลมีช่วงที่แคบ และมีขนาดเล็ก แต่ที่อัตราการกวนต่ำ ไมโครแคปซูลที่ได้จะมีช่วงของขนาดที่กว้าง และมีขนาดไมโครแคปซูลที่ใหญ่กว่า ดังนั้นการเพิ่มอัตราการกวนให้เร็วขึ้นจะเป็นการเพิ่มพลังงานกลให้กับสารละลาย จึงทำให้น้ำมันเมล็ดฝ้ายแตกตัวละเอียดเพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดการสร้างตัวของไมโครแคปซูลที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งอัตราการกวนนับว่าเป็นวิธีหลักที่ใช้ในการลดและเพิ่มขนาดของไมโครแคปซูล

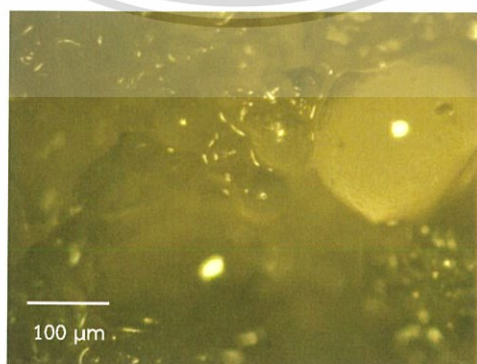
4.3 ลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูล

ไมโครแคปซูลที่ได้จากการสังเคราะห์ หลังพิจารณาขนาดที่ได้แล้ว ยังนำมาพิจารณาถึงลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูล เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของพื้นผิวอนุภาคในแต่ละตัวอย่าง ซึ่งจะพิจารณาจากภาพที่ได้จากการส่องขยายผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopes)

4.3.1 ผลของปริมาณสารลดแรงตึงผิว (PVA) ต่อลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูล

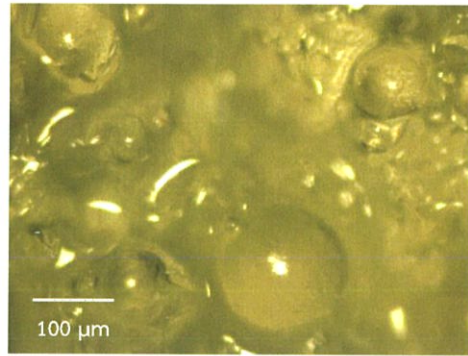


(M-1)



(M-2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

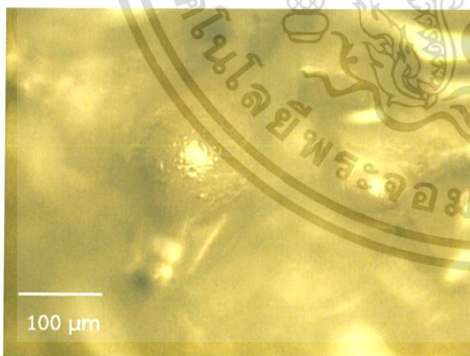


(M-3)

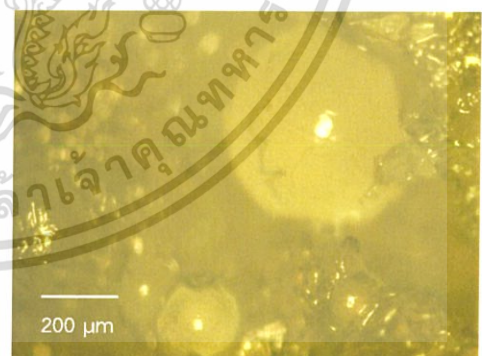
รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวไมโครแคปซูล ที่ปริมาณสารลดแรงตึงผิวแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.6 แสดงลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูลที่เตรียมโดยมีปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้นจะทำให้พื้นผิวไมโครแคปซูลมีลักษณะที่ขรุขระมากยิ่งขึ้น และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้การกระจายตัวของ น้ำมันเมล็ดฝ้ายทำให้เกิดแรงผลักระหว่างไมเซลล์(micelle) ที่สูงขึ้นจึงนำไปสู่การก่อตัวของสารผสม ไมเซลล์(micelle) จากนั้นจึงทำให้สารละลายมีความหนืดที่สูงขึ้น ซึ่งนั่นจะทำให้ไมโครแคปซูลเกิดพื้นผิวที่ขรุขระมากยิ่งขึ้น

4.3.2 ผลของอัตราการกวนต่อต่อลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูล



(M-3)



(M-4)

รูปที่ 4.7 ลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูลที่อัตราการกวนต่างกัน

จากรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูลตัวอย่าง M-3 และ M-4 ซึ่งมีอัตราการกวนที่ 600 rpm และ 400 rpm ตามลำดับ จะเห็นว่าตัวอย่าง M-3 มีพื้นผิวที่ขรุขระมากกว่าตัวอย่าง M-4 นั่นคือ เมื่อลดอัตราการกวนลงลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูลจะมีความขรุขระน้อยลง ในทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรงกันข้ามถ้าไมโครแคปซูลมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้การยึดกันระหว่างไมโครแคปซูลกับสารเคลือบ (อีพอกซี เรซิน) มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

4.4 ความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อน

การทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเกิดสนิมนั้น ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 wt% ในการเร่งการเกิดสนิม และทดสอบโดยใช้แผ่นเหล็กที่ทำการเคลือบผิวหน้าด้วยอีพอกซีปกติ เปรียบเทียบกับตัวอย่างแผ่นเหล็กที่เคลือบด้วย อีพอกซีผสมไมโครแคปซูลทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.8

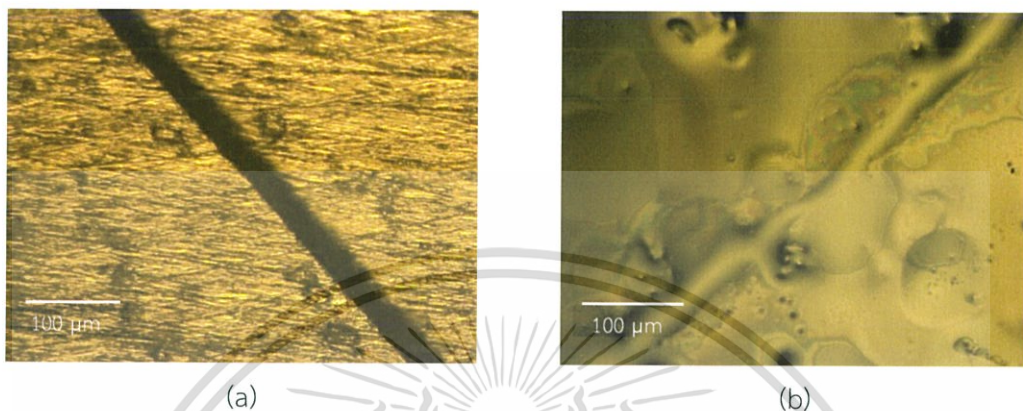


รูปที่ 4.8 ผลการยับยั้งการเกิดสนิมเมื่อเร่งการเกิดสนิมด้วย NaCl 5%wt เป็นเวลา 4 วัน (1) เคลือบด้วยอีพอกซีปกติ (2) เคลือบด้วยอีพอกซีผสมไมโครแคปซูล (M-1) (3) เคลือบด้วยอีพอกซีผสมไมโครแคปซูล (M-2) (4) เคลือบด้วยอีพอกซีผสมไมโครแคปซูล (M-3) (5) เคลือบด้วยอีพอกซีผสมไมโครแคปซูล(M-4)

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 4 วัน แผ่นเหล็กที่เคลือบผิวหน้าด้วยอีพอกซีปกติมีสนิมเกิดขึ้นบริเวณรอยตัด เนื่องจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีการสัมผัสกับแผ่นเหล็กโดยตรงจึงทำให้เกิดสนิมขึ้นแสดงดังรูป 4.9 (a) ส่วนแผ่นเหล็กที่เคลือบด้วย อีพอกซีผสมไมโครแคปซูลทั้ง 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างไม่เกิดสนิมขึ้น เนื่องจาก เมื่อเกิดรอยขีดข่วนขึ้นบนผิวของอีพอกซี หลังจากนั้นไมโครแคปซูล จะทำการปล่อยน้ำมันเมล็ดฝ้ายออกมาปกป้องรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.9 (b) จึงทำให้ ผิวหน้าของแผ่นเหล็กไม่สัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จึงไม่เกิดสนิมขึ้น



รูปที่ 4.9 รอยขีดที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของสารเคลือบผิวจากกล่องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM)

(a) แผ่นเหล็กเคลือบด้วยอีพอกซีปกติ (b) แผ่นเหล็กเคลือบด้วยอีพอกซีผสมไมโครแคปซูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

สารเคลือบผิวซ่อมแซมตนเอง เป็นการพัฒนาสารเคลือบผิวที่มีอยู่ในปัจจุบันให้สามารถทำงานได้ แม้เกิดความเสียหายบนพื้นผิววัสดุที่เคลือบ โดยการวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อน ภายในบรรจุน้ำมันเมล็ดฝ้าย (Linseed Oil) และมีเปลือกเป็นโพลียูเรียฟอร์มอร์ดีไฮด์ ไมโครแคปซูลที่ได้จะถูกผสมรวมกับสารเคลือบผิวชนิดอีพอกซี เรซิน และนำไปเคลือบบนผิวโลหะ (Carbon Steel) จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไมโครแคปซูล

ในการทดลองนี้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเคลือบผิวเมื่อมีการปรับปริมาณสารลดแรงตึงผิว และอัตราการกวน จากนั้นจึงพิจารณาขนาด ลักษณะทางสัมฐานวิทยาของไมโครแคปซูล รวมถึงประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อน เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่า อัตราการกวน และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีผลต่อขนาด และลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูล โดยถ้าอัตราการกวนที่สูงจะได้ขนาดไมโครแคปซูลที่เล็ก และมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระมากยิ่งขึ้น ส่วนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ขนาดของไมโครแคปซูลที่เล็ก และมีพื้นผิวที่ขรุขระมากยิ่งขึ้นเช่นกัน ดังนั้นเมื่อนำไมโครแคปซูลที่ได้เคลือบลงบนพื้นผิวโลหะ จึงพบว่าขนาดของไมโครแคปซูลที่เล็ก และขรุขระ มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองได้ดีกว่าขนาดไมโครแคปซูลที่ใหญ่ และเมื่อเปรียบเทียบกับสารเคลือบผิวด้วยอีพอกซีเรซินปกติ สารเคลือบผิวซ่อมแซมตนเองนี้มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล

อัตราเร็วในการกวนของเครื่องกวน ถึงแม้ว่าจะใช้อัตราเร็วเดียวกันแต่ต้องดูปริมาตรสารที่อยู่ในบีกเกอร์ด้วย เพราะถ้ามีปริมาตรน้อยๆ แต่ใช้อัตราการกวนเดียวกันจะทำให้เกิด vortex ขึ้น หรือถ้าอัตราการกวนที่น้อยมากๆอาจทำให้น้ำมันเมล็ดฝ้ายไม่แตกตัวเป็นเม็ดเล็กๆ จึงทำให้เกิดเป็นไมโครแคปซูลไม่ได้

หลังจากการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลแล้วนำไปอบเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นควรจะมีการผสมไมโครแคปซูลลงไปในอีพอกซีเรซินเลย ถ้าหากทิ้งเวลาไว้จากนั้น 1-2 วันจะทำให้ไมโครแคปซูลแข็งตัวและจับตัวกันเป็นก้อนแข็ง

5.2.2 การเตรียมแผ่นเหล็ก Carbon Steel

การขัดผิวเหล็กต้องขัดด้วยน้ำหนักรูที่เท่ากัน ทัวทั้งแผ่น และทดสอบโดยการเปิดน้ำไหลผ่าน สังเกตว่าเกิดม่านน้ำในทุกๆ จุด ทัวทั้งแผ่น จึงนำไปเคลือบได้

5.2.3 กระบวนการเคลือบผิวโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง

แม้ว่าอัตราเร็วของเครื่องปั่นเหวี่ยงจะมีอัตราเร็วเท่ากัน แต่การที่จะเคลือบให้มีความหนาเท่ากันได้นั้น ขึ้นอยู่กับความหนืดของสารเคลือบผิวด้วย ดังนั้นเมื่อกวนผสมสารเคลือบผิวเข้าด้วยกันเรียบร้อยแล้วควรปล่อยให้สารเคลือบผิวทิ้งระยะเวลาให้เท่ากันด้วย เพื่อที่จะควบคุมความหนืดของสารให้มีค่าใกล้เคียงกัน

5.2.4 การบ่มสารเคลือบ

อุณหภูมิในการอบมีความสำคัญมาก ถ้าหากใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้สารเคลือบเกิดรอยแตกเล็กๆ ขึ้นได้ จึงส่งผลต่อการการยึดติดระหว่างสารเคลือบกับแผ่นเหล็ก

5.2.5 การทดสอบการกัดกร่อน

การเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ลงบนแผ่นเหล็ก ควรทำการเติมให้มีปริมาณเท่ากัน จัดเก็บในที่เดียวกัน เนื่องจากเป็นการป้องกันการระเหยของสารละลายให้มีการระเหยในอัตราที่เท่าๆกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] อรุษา สรวารี. สารเคลือบผิว(สี วาร์นิช และแล็กเกอร์). กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539
- [2] Swaraj Paul. 1996. **Surface Coating**. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.
- [3] Swapan Kumar Ghosh. 2009. **Self-healing Materials**. Weinheim : WILEY-VCH
- [4] **Corrosion**. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/electrochem04.htm>
- [5] **Polymerization**. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Polymerization>
- [6] Hana Choi, Kyoo Young Kim, Jong Myung Park “Encapsulation of aliphatic amines into nanoparticles for self-healing corrosion protection of steel sheets” **Progress in Organic Coatings**. Vol.76, pp. 1316–1324, 2013
- [7] 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, pp. 292-300, 2012
- [8] 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, pp. 5338-5349, 2006
- [9] 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
- [10] Ashok Kumar, L.D. Stephenson, J.N. Murray. “Self-healing coatings for steel” **Progress in Organic Coatings**. Vol 55, pp. 244-253, 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.1 แสดงขนาดของไมโครแคปซูลในแต่ละตัวอย่าง

Number	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครแคปซูล (μm)			
	M - 1	M - 2	M - 3	M - 4
1	155.595	242.948	231.119	157.415
2	214.74	148.316	150.136	195.632
3	309.281	141.037	220.2	262.966
4	502.911	455.595	222.529	125.568
5	329.39	272.065	137.397	414.012
6	320.291	112.829	298.453	485.896
7	301.091	178.343	379.435	605.13
8	260.236	169.244	168.334	292.083
9	312.01	340.218	146.496	164.695
10	361.055	161.965	126.478	152.866
11	108.28	148.316	167.424	323.09
12	105.55	115.228	95.541	159.235
13	376.064	324.84	234.758	432.211
14	433.785	396.724	147.406	123.748
15	261.965	260.236	118.289	157.415
16	142.857	271.155	205.641	158.325
17	402.001	305.732	154.686	261.146
18	421.019	357.597	93.721	422.202
19	136.487	323.93	323.93	192.922
20	467.978	212.92	139.217	268.425
21	219.29	431.301	143.767	161.965
22	262.056	372.156	99.181	176.524
23	143.767	202.001	219.29	264.786
24	193.812	475.887	196.542	227.479
25	169.244	162.875	174.704	221.11
26	390.3544	125.568	110.1	349.408
27	359.009	452.229	189.252	170.154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Number	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครแคปซูล (μm) (ต่อ)			
	M - 1	M - 2	M - 3	M - 4
28	528.828	202.001	301.351	118.289
29	157.415	123.743	396.396	163.963
30	495.896	158.325	361.578	326.576



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

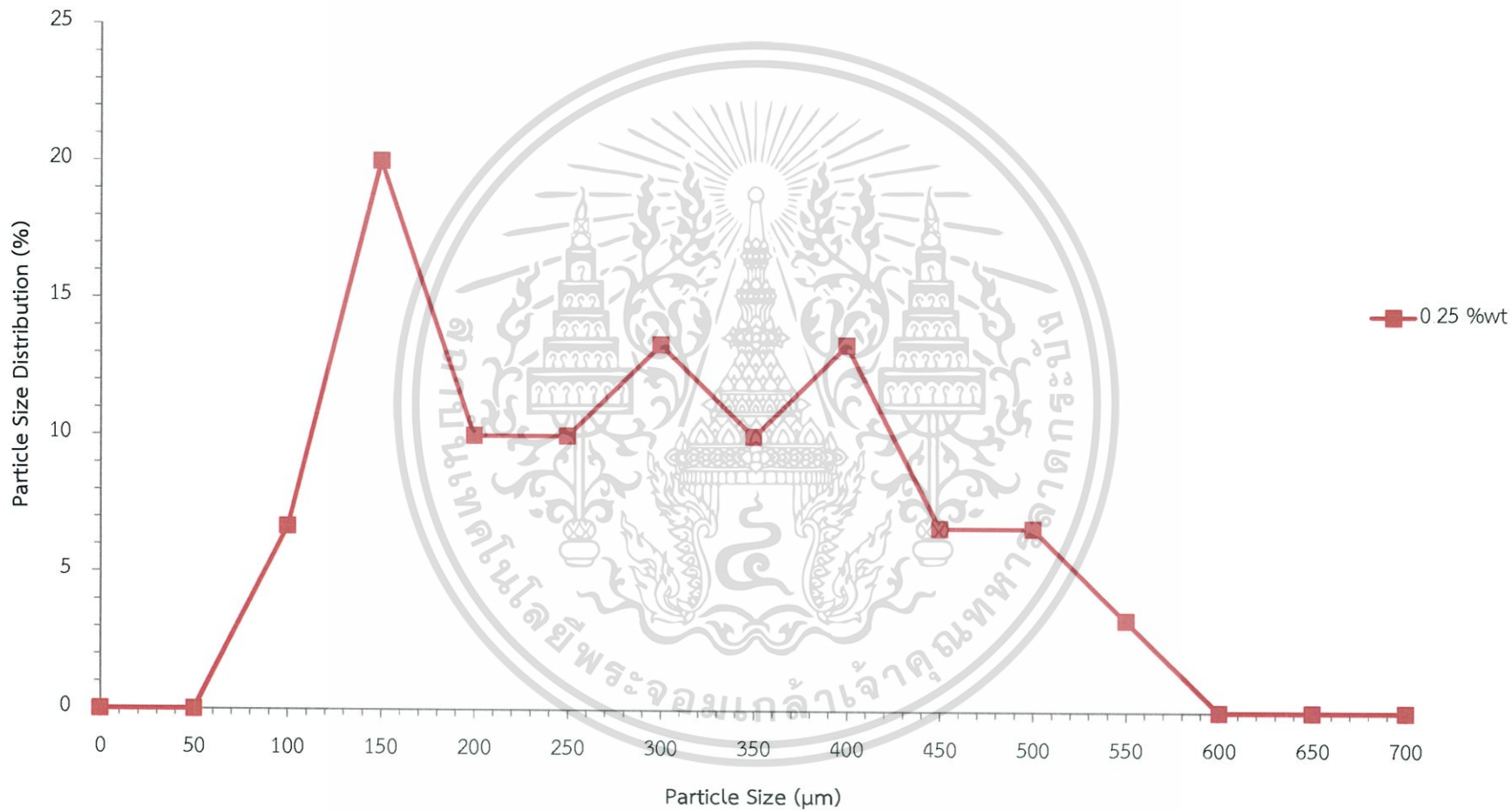


ภาคผนวก ข.

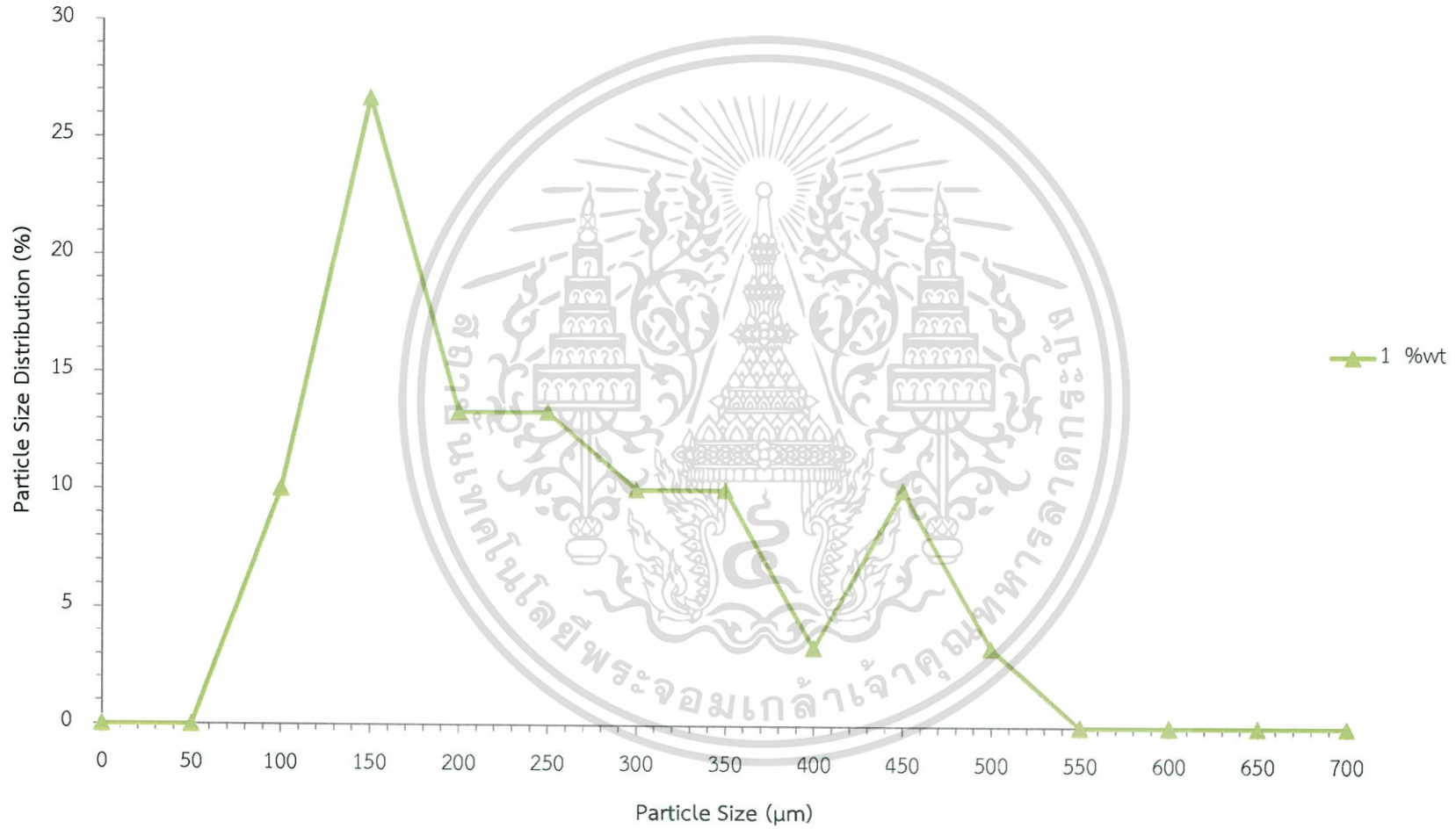
กราฟแสดงช่วงขนาดของไมโครแคปซูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

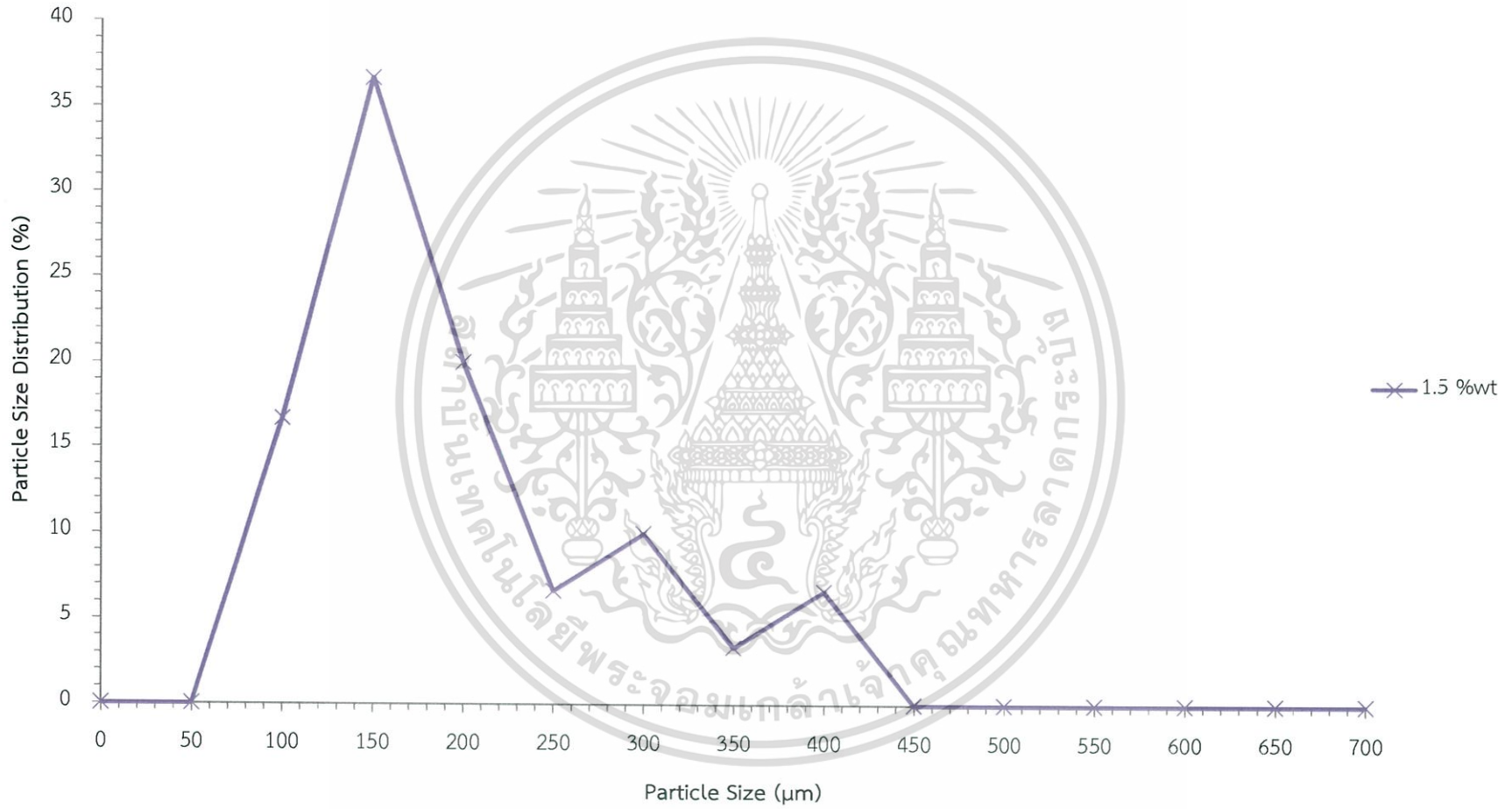
รูปที่ ข.1 ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว(PVA) 0.25 %wt ต่อขนาดของไมโครแคปซูล ที่อัตราการกวน 600 rpm



รูปที่ ข.2 ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว(PVA) 1 %wt ต่อขนาดของไมโครแคปซูล ที่อัตราการกวน 600 rpm



รูปที่ ข.3 ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว(PVA) 1.5 %wt ต่อขนาดของไมโครแคปซูล ที่อัตราการกวน 600 rpm



รูปที่ ข.4 ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว(PVA) 1.5 %wt ต่อขนาดของไมโครแคปซูล ที่อัตราการกวน 400 rpm

