

การเตรียมและการตรึงนาโนแคปซูลไคโตซานบรรจุ
n-Octadecane บนเส้นใยเซลลูโลสสำหรับการประยุกต์ใช้เป็น
แผ่นกรองหน้ากากอนามัย

PREPARATION AND IMMOBILIZATION OF CHITOSAN
NANOCAPSULES LOADING N-OCTADECANE ON
CELLULOSE FIBER FOR MEDICAL FACE MASK
APPLICATIONS

ณัฐนิชา อินทรแพทย์
ปิยวัฒน์ มالاเวช
พัฒนิตา กว้างนอก

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2565
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องยกย่องเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION AND IMMOBILIZATION OF CHITOSAN
NANOCAPSULES LOADING N-OCTADECANE ON
CELLULOSE FIBER FOR MEDICAL FACE MASK
APPLICATIONS



NATNICHA INTARAPHAT
PIYAWAT MALAWET
PANNITA KWANGNOK

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

ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและการตรึงนาโนแคปซูลไคโตซานบรรจุ n-Octadecane บนเส้นใยเซลลูโลสสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นแผ่นกรองหน้ากากอนามัย
PREPARATION AND IMMOBILIZATION OF CHITOSAN NANOCAPSULES LOADING N-OCTADECANE ON CELLULOSE FIBER FOR MEDICAL FACE MASK APPLICATIONS

ชื่อนักศึกษา นางสาวณัฐนิชา อินทรแพทย์ รหัสนักศึกษา 62050281
นายปิยวัฒน์ มาลาเวช รหัสนักศึกษา 62050305
นางสาวพัฒนิตา กว้างนอก รหัสนักศึกษา 62050313

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปยุตมา ศิริพันธ์โนน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ กรรมการ	
รศ.ดร.ปยุตมา ศิริพันธ์โนน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมและการตรึงนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Octadecane บนเส้นใยเซลลูโลสสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นแผ่นกรองหน้ากากอนามัย	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐนิชา อินทรแพทย์	รหัสนักศึกษา 62050281
	นายปิยวัฒน์ มาลาเวช	รหัสนักศึกษา 62050305
	นางสาวพัฒนิตา กว้างนอก	รหัสนักศึกษา 62050313
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2565	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ปยุตต์มา ศิริพันธ์โนน	

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ศึกษาการสังเคราะห์นาโนแคปซูลบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะเอ็น-ออกตะเดเคน (n-Oc) ห่อหุ้มด้วยโคโตซานโดยใช้เทคนิคโซนิเคชัน (Sonication) ร่วมกับการสร้างนาโนแคปซูลด้วยตนเอง (Self-assembly nanoencapsulation) ในการสร้างนาโนแคปซูลได้ปรับเปลี่ยนสภาวะ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS; 10 30 และ 50 mM) ความเข้มข้นของโคโตซาน (CS; 0.5 1 และ 1.5 %w/v) และระยะเวลาในการ Sonication (10 20 และ 30 นาที) จากการทดลองพบว่าขนาดอนุภาคของนาโนแคปซูลมีค่าลดลง โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้น SDS จาก 10 mM เป็น 30 mM และ 50 mM ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของนาโนแคปซูลจะลดลงจาก 4293 nm เป็น 1086 และ 1064 nm ตามลำดับ ในขณะที่ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโคโตซานจาก 0.5 เป็น 1.0 และ 1.5 %w/v โดยที่ความเข้มข้นของ SDS คงที่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของนาโนแคปซูลที่เตรียมได้จะเพิ่มขึ้นจาก 334.9 nm เป็น 4293 และ 7678 nm ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโคโตซานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชั้นเปลือกของนาโนแคปซูลหนาขึ้น เมื่อปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการ Sonication โดยให้ความเข้มข้นของ SDS และโคโตซานคงที่ พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการ Sonication ไม่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคของนาโนแคปซูลที่เตรียมได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการห่อหุ้มแคปซูล (Encapsulation efficiency) โดยประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 59.91 % เป็น 72.85 และ 80.35 % เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการ Sonication จาก 10 นาที เป็น 20 และ 30 นาที ตามลำดับ นอกจากนี้การมีชั้นเปลือกโคโตซานส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของ n-Oc ค่าสูงขึ้น เมื่อนำนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมได้ไปตรึงบนเส้นใยเซลลูโลสทั้งที่มีและไม่มีเคลือบผิวเส้นใยด้วยสารละลายพอลิไสตรีนซัลโฟเนต พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางสถาบัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใยเซลลูโลสที่มีการตรึงนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc แสดงความสามารถในการรักษาระดับ
อุณหภูมิได้ดีกว่าเส้นใยเซลลูโลสปกติ

คำสำคัญ : วัสดุเปลี่ยนสถานะ, นาโนแคปซูล, เลเยอร์-บาย-เลเยอร์, การรักษาระดับอุณหภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	PREPARATION AND IMMOBILIZATION OF CHITOSAN NANOCAPSULES LOADING N-OCTADECANE ON CELLULOSE FIBER FOR MEDICAL FACE MASK APPLICATIONS	
Students	Miss Natnicha Intaraphat	Student ID 62050281
	Mr. Piyawat Malawet	Student ID 62050305
	Miss Pannita Kwangnok	Student ID 62050313
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
School	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2022	
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Punnama Siriphannon	

Abstract

This special project studied on the synthesis of nanocapsules containing n-Octadecane (n-Oc) phase change materials encapsulated with chitosan using sonication technique in collaboration with self-assembly nanoencapsulation. The nanoencapsulation conditions were modified, i.e. concentration of sodium dodecyl sulfate surfactant (SDS; 10, 30 and 50 mM), concentration of chitosan (CS; 0.5 and 1.5 %w/v) and sonication treatment time (10, 20 and 30 min). It was found that the particle size of the nanocapsules decreased with the increase of SDS concentration. When the SDS concentration was increased from 10 mM to 30 mM and 50 mM, the average particle size of the nanocapsules decreased from 4293 nm to 1086 and 1064 nm, respectively. When the chitosan concentration was increased from 0.5 to 1.0 and 1.5%w/v with constant SDS concentration, the average particle size of the as-prepared nanocapsules increased from 334.9 nm to 4293 and 7678 nm, respectively. The increased chitosan content led to a thicker shell layer of the nanocapsules. The increase of sonication time with the constant SDS and chitosan concentrations showed no effect on the particle size of the resultant nanocapsules. However, it has an impact on encapsulation efficiency. The efficiency increased from 59.91% to 72.85 and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

80.35%, when the sonication time was increased from 10 min to 20 and 30 min, respectively. In addition, the presence of a chitosan shell resulted in higher melting temperature of n-Oc. When the as-prepared chitosan nanocapsules containing n-Oc were immobilized on cellulose fibers with and without polystyrene sulfonate coating, it was found that the chitosan nanocapsules containing n-Oc immobilized cellulose exhibited superior thermoregulation than normal cellulose fibres.

Keywords: Phase change materials, Nanocapsules, Layer-by-Layer, Thermoregulation



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และความกรุณาจากคณะอาจารย์และบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ตลอดระยะเวลาในการจัดทำโครงการได้รับความช่วยเหลือและชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ตลอดจนถ่ายทอดประสบการณ์ในการทำงานของท่านเพื่อเป็นประโยชน์ในการคิดวิเคราะห์ การวางแผน โดยให้คำปรึกษาตั้งแต่การค้นข้อมูลจนการดำเนินงานสำเร็จ รวมถึงตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษเล่มนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ภัทธวุธ มนต์วิเศษ และผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษ อีกทั้งยังให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในโครงการพิเศษนี้ได้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่อาคารวิทยาศาสตร์ ชั้น 5 และศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้ข้อมูล ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวก และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการดำเนินโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้กำลังใจช่วยเหลือเป็นแรงผลักดัน และคอยสนับสนุนเสมอมา

ณัฐนิชา อินทรแพทย์

ปิยวัฒน์ มาลาเวช

พัฒนิตา กว้างนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฌ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	3
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase change material: PCM)	4
2.1.1 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนสถานะ	6
2.1.2 สมบัติทางความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ	6
2.2 ไคโตซาน (Chitosan)	8
2.2.1 สมบัติของไคโตซาน	8
2.2.2 ประโยชน์ของไคโตซาน	10
2.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)	11
2.4 เทคนิคการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูล	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	18
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	18
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	18
3.3 วิธีการทดลอง	19
3.3.1 การเตรียมวัสดุประกอบนาโนแคปซูล	19
3.3.2 การเตรียมนาโนแคปซูลบรรจุเอ็น-ออกตะเดคเคน	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3.3.3 การตรึงนาโนแคปซูลบนเส้นใยเซลลูโลสไม่ถาวรภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมด้วย 25 คำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.34 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์.....	27
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	29
4.1 การเตรียมนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer.....	29
4.1.1 การเกิดนาโนแคปซูลโดยอาศัยสีย้อมละลายในน้ำมัน.....	29
4.1.2 โครงสร้างทางเคมีและหมู่ฟังก์ชันสำคัญ.....	31
4.1.3 สันฐานวิทยาของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc.....	37
4.1.4 ผลของความเข้มข้นของ SDS ต่อนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc (สภาวะที่ 1).....	38
4.1.5 ผลของความเข้มข้นของโคโตซานต่อนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc (สภาวะที่ 2).....	42
4.1.6 ผลของระยะเวลา Sonication นาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc (สภาวะที่ 3).....	45
4.1.7 การทดสอบเสถียรภาพของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t30.....	
4.2 การตรึงนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc บนเส้นใยเซลลูโลส.....	49
4.2.1 สมบัติของเส้นใยเซลลูโลสตรึงด้วยนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc.....	49
4.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพการรักษาระดับอุณหภูมิของเส้นใยเซลลูโลสตรึงนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
เอกสารอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก.....	59
ภาคผนวก ก การกระจายตัวของสีย้อมในสารละลายโคโตซาน.....	60
ภาคผนวก ข สันฐานวิทยาของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc.....	61
ภาคผนวก ค ขนาด ดัชนีการกระจายตัว และศักย์ซีต้า.....	62
ภาคผนวก ง สมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc.....	74
ภาคผนวก จ การคำนวณค่าร้อยละประสิทธิภาพในการห่อหุ้มนาโนแคปซูล.....	75
ภาคผนวก ฉ การสลายตัวของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc.....	76

เอกสารนี้ ภาคผนวก ก-ฉ การคำนวณค่าร้อยละน้ำหนักคงเหลือของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ปรากฏที่หน้า 77 คำ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางความร้อนของ PCM ประเภทสารอินทรีย์ทั่วไป	7
2.2 สมบัติทางความร้อนของ PCM ประเภทสารอินทรีย์ทั่วไป	7
2.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโซเดียมโอดีเดคซิลซัลเฟต	11
3.1 ตัวอย่างการเตรียมนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc	24
4.1 ตำแหน่งเลขคลื่นที่สำคัญของวัสดุประกอบนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียม ในสภาวะที่ 1 สภาวะที่ 2 และสภาวะที่ 3	36
4.2 สมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ในสภาวะ Cap1-S10-Oc50-t30 ในแต่ละรอบของการให้ความร้อนและเย็น	48
4.3 ภาพถ่ายทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ตรึงบนเส้นใยเซลลูโลส ในสภาวะที่ 1	51
4.4 ภาพถ่ายทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ตรึงบนเส้นใยเซลลูโลส ในสภาวะที่ 2	52
4.5 ภาพถ่ายทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ตรึงบนเส้นใยเซลลูโลส ในสภาวะที่ 3	52
4.6 ตารางที่ 4.6 ภาพถ่ายทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลสเคลือบ PSS ตรึง นาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc	53
ค.1 ขนาด ดัชนีการกระจายตัว (PDI) และค่าศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมในสภาวะที่ 1 สภาวะที่ 2 และสภาวะที่ 3	62
ง.1 เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียม ในรูปแบบที่ 1 รูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 3	74
ฉ.1 การสลายตัวของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่แตกต่างกัน	76
ฉ.2 การสลายตัวของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่แตกต่างกัน	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แนวคิดการสร้างนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc.....	2
2.1 หลักการทำงานของวัสดุเปลี่ยนสถานะ	4
2.2 อัตราการกักเก็บพลังงานในวัสดุเปลี่ยนสถานะ	5
2.3 ปฏิกริยาการจำกัดหมู่อะซิทิลเปลี่ยนโครงสร้างโคตินเป็นโคโตซาน	8
2.4 (a) โครงสร้างทางเคมีของโซเดียมโตนีโคเตคซิลซัลเฟต และ (b) โครงสร้างไมเซลล์ของ โซเดียมโตนีโคเตคซิลซัลเฟต.....	11
2.5 การสร้างพื้นผิวด้วยการจัดเรียงตัวเองที่ละชั้นโดยการจุ่ม.....	12
2.6 การสร้างพื้นผิวด้วยการจัดเรียงตัวที่ละชั้นโดยการปั่น.....	13
3.1 การเตรียมนาโนอิมัลชัน	19
4.1 ลักษณะทางกายภาพของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ในสภาวะที่แตกต่างกัน	30
4.2 ลักษณะทางกายภาพการอยู่ของ n-Oc ละลายสีขุ่นและโคโตซาน (ก) CS0.5 %w/v และ (ข) CS1.5 %w/v.....	31
4.3 สเปกตรัม FT-IR ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc (ก) Protonated CS และ (ข) ไมเซลล์ของ Oc-SDS	32
4.4 สเปกตรัม FT-IR ของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้น โคโตซาน 0.5 %w/v และความเข้มข้นของ SDS 10 30 และ 50 mMตามลำดับ.....	33
4.5 สเปกตรัม FT-IR ของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมโดยใช้โคโตซาน เข้มข้น 1 %w/v และ SDS เข้มข้น 10 30 และ 50 mM ตามลำดับ.....	34
4.6 สเปกตรัม FT-IR ของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมโดยใช้โคโตซานเข้มข้น 1.5 %w/v และ SDS เข้มข้น 10 30 และ 50 mM ตามลำดับ.....	35
4.7 ภาพถ่าย TEM micrograph ของอนุภาคนาโนแคปซูล (ก) Cap0.5-S10-Oc50 (ข) Cap1-S10-Oc50 และ (ค) Cap1.5-S10-Oc50	37
4.8 ขนาดและศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 1 โดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่ 10 30 และ 50 mM.....	38
4.9 ภาพแสดงแบบจำลองการก่อตัวของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc	39
4.10 ภาพแสดงแบบจำลองแผนผังของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc โดยใช้ ความเข้มข้น SDS ที่แตกต่างกัน	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 DSC Thermogram ของ n-Oc และนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 1 โดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่ 10 30 และ 50 mM.....	40
4.12 TGA thermogram แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 1 โดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่ 10 30 และ 50 mM.....	42
4.13 ขนาดและศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 2 โดยใช้ความเข้มข้น ของโคโตซานที่ 0.5 1 และ 1.5 %w/v	42
4.14 ภาพแสดงแบบจำลองแผนผังของนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc โดยใช้ความเข้มข้น ของโคโตซานที่แตกต่างกัน.....	43
4.15 DSC Thermogram ของ n-Oc และนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่ 0.5 1 และ 1.5 %w/v	44
4.16 TGA thermogram แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่ 0.5 1 และ 1.5 %w/v	45
4.17 ขนาดและศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 3 โดยใช้เวลา Sonication ที่ 10 20 และ 30 นาที.....	46
4.18 DSC thermogram ของ n-Oc และนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 3 โดยใช้เวลา Sonication ที่ 10 20 และ 30 นาที.....	47
4.19 DSC thermogram ของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t30 ภายใต้การให้ ความร้อนและความเย็น 3 รอบ.....	47
4.20 FE-SEM กำลังขยาย 500X และ 5000X ของ (ก),(จ) เส้นใยเซลลูโลสที่ไม่มี การเคลือบของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc (ข),(ฉ) เส้นใยเซลลูโลสที่มีการเคลือบ ของ Cap0.5-S10-Oc1.5 (ค),(ช) เส้นใยเซลลูโลสที่มีการเคลือบของ Cap1- S10-Oc1.5 และ (ง),(ซ) เส้นใยเซลลูโลสที่มีการเคลือบ PSS/Cap1-S10-Oc1.5	49
ก.1 ลักษณะทางกายภาพการอยู่ของสีย้อมและโคโตซาน (ก) CS0.5/SR และ (ข) CS1.5/SR.....	60
ข.1 ภาพ TEM micrographs ของนาโนแคปซูล (ก),(จ) Cap0.5-S10-Oc50 (ข),(ค) Cap1-S10-Oc 50 (ค) Cap1.5-S10-Oc1.5 (ง) Cap0.5-S50-Oc50 (จ) Cap1-S50-Oc50 และ (ฉ) Cap1.5-S50-Oc50.....	61
ค.1 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50	63
ค.2 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S30-Oc50 เท่านั้น ไม่พบขนาดในภาพที่ใช้ประโยชน์ด้าน ไม่พวกรค.3 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S50-Oc50 แล้วจึงถึงแล้วของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข	63
ค.3 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S50-Oc50 แล้วจึงถึงแล้วของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข	64

ค.4 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap0.5-S10-Oc50.....	64
ค.5 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50.....	65
ค.6 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1.5-S10-Oc50.....	65
ค.7 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t10.....	66
ค.8 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t20.....	66
ค.9 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t30.....	67
ค.10 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50.....	67
ค.11 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S30-Oc50.....	68
ค.12 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S50-Oc50.....	68
ค.13 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap0.5-S10-Oc50.....	69
ค.14 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50.....	69
ค.15 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1.5-S10-Oc50.....	70
ค.16 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t10.....	70
ค.17 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t20.....	71
ค.18 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t30.....	71
ค.19 แผนภูมิแสดงศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ในสภาวะที่ 1.....	72
ค.20 แผนภูมิแสดงศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ในสภาวะที่ 2.....	72
ค.21 แผนภูมิแสดงศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ในสภาวะที่ 3.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
n-Oc	n-Octadecane
CS	Chitosan
SDS	Sodium dodecyl sulfate
PSS	Poly(Styrene sulfonate)
SR	Sudan red
FT-IR	Fourier transform infrared spectrophotometer
DSC	Differential scanning calorimeter
TEM	Transmission electron microscopy
TGA	Thermogravimeter analysis
FE-SEM	Field Emission scanning electron microscopy
T _m	Melting temperature
T _c	Crystallization temperature
ΔH _m	The Latent heat of melting
ΔH _c	The Latent heat of crystallization
J/g	จูลต่อกรัม
°C	องศาเซลเซียส
ml	มิลลิลิตร
mM	มิลลิโมลลาร์
%w/v	เปอร์เซ็นต์มวลต่อปริมาตร
%v/v	เปอร์เซ็นต์ปริมาตรต่อปริมาตร
mL/L	มิลลิลิตรต่อลิตร
nm	นาโนเมตร
μm	ไมโครเมตร
cm	เซนติเมตร
PDI	ค่าการกระจายตัว (Polydispersibility index)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

เนื่องด้วยการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส COVID-19 รวมถึงปัญหาจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate matters : PM2.5) เป็นเหตุให้ผู้คนตระหนักถึงการสวมใส่หน้ากากอนามัยเพื่อป้องกันตนเอง หน้ากากอนามัยจึงมีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตเป็นอย่างมาก อีกทั้งเป็นส่วนหนึ่งของการทำงานในหลายๆอาชีพ เช่น บุคลากรทางการแพทย์ นักดับเพลิง เป็นต้น ในอุตสาหกรรมการผลิตหน้ากากอนามัยส่วนใหญ่ใช้พอลิโพรพิลีน (Polypropylene : PP) เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต สำหรับหน้ากากอนามัยมีลักษณะโครงสร้างของแผ่นกรองเป็นเส้นใยขนาดเล็ก ในลักษณะเส้นใยแบบไม่ถักทอ (Non-woven fiber) สามารถยึด-หดรัดตัวได้ดี ทำให้กรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กหรือหยดละอองของเหลวได้ในระดับไมโครเมตร โดยมีวัตถุประสงค์หลักของแผ่นกรองเพื่อป้องกันสารคัดหลั่งจากร่างกายออกสู่สิ่งแวดล้อมและป้องกันเชื้อไวรัส ฝุ่นละอองจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ร่างกาย นอกจากนี้การหายใจภายใต้หน้ากากอนามัยจะทำให้ผู้สวมใส่รู้สึกอึดอัด เนื่องจากการหายใจออกไม่ได้เพียงนำก๊าซคาร์บอนไดร็อกไซด์ออกมา แต่มีไอน้ำจากร่างกายออกมาด้วย ทำให้พบว่าพอลิโพรพิลีนมีข้อจำกัดของการระบายความร้อนภายใต้หน้ากากอนามัยค่อนข้างต่ำ มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ ในขณะที่เดียวกันสามารถดูดความชื้นได้ เนื่องจากภายในโครงสร้างมีช่องว่างขนาดเล็กให้โมเลกุลน้ำสามารถแทรกเข้าไปได้ แต่ไม่สามารถให้ไอรระเหยออกมาได้ ทำให้เกิดความอับชื้นกลายเป็นแหล่งสะสมเชื้อแบคทีเรียในปริมาณมาก จากข้อจำกัดข้างต้นส่งผลให้เกิดความไม่สะดวกสบายต่อการสวมใส่หน้ากากอนามัยเป็นเวลานานและสามารถเกิดการอักเสบ ผื่นแพ้ต่อร่างกาย ทั้งนี้ยังลดประสิทธิภาพการกรอง ทำให้เชื้อไวรัสและฝุ่นละอองจากสิ่งแวดล้อมสามารถเข้าสู่ระบบหายใจภายในร่างกาย

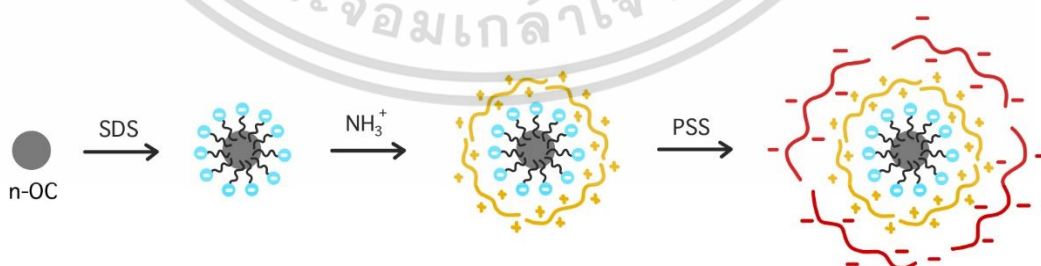
โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาแนวทางและพัฒนาความสามารถของชั้นกรองผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase change material : PCM) โดยการนำนาโนแคปซูลที่ห่อหุ้ม PCM ตรึงบนเส้นใย ซึ่ง PCM มีสมบัติเปลี่ยนสถานะ เมื่อได้รับความร้อนจากสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง จะทำให้วัสดุเกิดการดูดพลังงานความร้อนและสามารถคายพลังงานความร้อน เมื่อวัสดุอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ดังนั้นจึงสามารถรักษาอุณหภูมิในบริเวณใกล้เคียงให้คงที่ได้ เรียกว่า “Thermoregulating” การตรึงแคปซูล PCM ที่มีขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตรจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและพื้นที่ผิวในการถ่ายโอนพลังงาน แคปซูล PCM จึงช่วยถ่ายเทความร้อนภายใต้หน้ากากอนามัย เมื่อนำไปตรึงเข้าไปในเส้นใยเสริมชั้นกรองจะทำให้สามารถลดความร้อนที่เกิดขึ้นภายใต้หน้ากากอนามัย เพื่อไม่ให้บริเวณใบหน้าที่มีการสวมใส่หน้ากากอนามัยเกิดการสะสมความร้อน และสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นเพื่อลดการอับชื้น สำหรับโครงการพิเศษนี้ได้เลือก

สารที่มีสมบัติของ PCM ประเภทสารอินทรีย์ คือ เอ็น-ออกตะเดเคน (n-Octadecane : n-OC) มีสมบัติของการหลอมเหลวทั่วไปใกล้เคียงกับอุณหภูมิร่างกาย และนำไปบรรจุลงในนาโนแคปซูลผ่านเทคนิค Layer-by-Layer ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถสร้างชั้นเปลือกระดับนาโนเมตรและมีการกระจายตัวในระดับนาโนที่ดี โดยการสร้างชั้นเปลือกแคปซูลอาศัยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารที่มีประจุไฟฟ้าต่างกัน 2 ชนิดด้วยตนเอง เรียกว่า “self-assembly” จากการเตรียมนาโนแคปซูลในส่วนของเปลือกที่ห่อหุ้ม PCM ต้องอาศัยสารลดแรงตึงผิว เพื่อเป็นตัวกลางระหว่าง n-OC ที่ไม่มีขั้วกับชั้นเปลือกที่มีขั้ว โดยโครงการนี้ได้เลือกใช้โคโตซาน เนื่องจากเป็นโคโตซานสามารถถูกโปรโตเนตในตัวทำละลายกรดให้มีประจุบวกจึงสามารถที่จะเกิดอันตรกิริยากับไมเซลล์ n-OC ที่มีประจุลบได้ นอกจากนี้โคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ปลอดภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม มีสมบัติในการดูดซับน้ำ เพิ่มความคงตัวในการกักเก็บความชื้น

นอกจากนี้ปัญหาของการอัดขึ้นที่ก่อให้เกิดการสะสมของเชื้อแบคทีเรียบนหน้ากากอนามัยระหว่างสวมใส่ในโครงการนี้จึงมีการนำเส้นใยเซลลูโลสมาใช้ในการตรึงนาโนแคปซูลที่บรรจุ n-OC ข้างต้น เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น โดยเส้นใยเซลลูโลสมีสมบัติในการดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี ทำให้ไม่เกิดการสะสมความร้อน รวมทั้งน้ำและความชื้นสามารถระเหยได้ง่ายจึงซึมระเหยความชื้นร่วมกับการระบายความร้อนของ n-OC

ทั้งนี้ได้มีการศึกษาเพิ่มเติมจากการเพิ่มชั้นเปลือกที่ห่อหุ้มนาโนแคปซูลด้วยสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ คือ พอลิสไตรีนซัลโฟเนต (Poly(styrene Sulfonate) : PSS) เป็นสารพอลิเมอร์ประจุลบจึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับโคโตซานด้วยเทคนิค Layer-by-Layer จากการนำเส้นใยเซลลูโลสเคลือบด้วย PSS เพื่อเพิ่มสมบัติการคงตัวของนาโนแคปซูล

ดังนั้น ในโครงการพิเศษจึงมีความสนใจในการศึกษาและพัฒนาการเตรียมวัสดุนาโนแคปซูลบรรจุ n-OC เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้เสริมชั้นแผ่นกรองภายในหน้ากากอนามัย ให้ผู้สวมใส่ไม่รู้ร้อนจากความสามารถของการระบายความร้อนบริเวณใบหน้าและรักษาอุณหภูมิด้วยเทคนิค Layer-by-Layer



รูปที่ 1.1 แนวคิดการสร้างนาโนแคปซูลบรรจุ n-OC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc โดยมีโคโตซานเป็นเปลือกด้วยเทคนิค Layer-by-Layer
2. เพื่อศึกษาการตรึงนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc บนเส้นใยเซลลูโลส
3. เพื่อศึกษาการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc และเส้นใยเซลลูโลสที่ได้รับการตรึงนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

1. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการเตรียมนาโนแคปซูลจากการบรรจุ n-Oc ผ่านเทคนิค Layer-by-Layer ได้แก่
 - 1.1 ผลของความเข้มข้น SDS 10 30 และ 50 mM
 - 1.2 ผลของความเข้มข้นโคโตซาน 0.5 1 และ 1.5%w/v
 - 1.3 ผลของ Sonication time 10 20 และ 30 นาที
2. ศึกษาการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc บนเส้นใยเซลลูโลส เพื่อประเมินการประยุกต์ใช้งานของชั้นกรอง
 - 2.1 เปรียบเทียบนาโนแคปซูลที่ความเข้มข้นโคโตซานแตกต่างกัน
 - 2.2 เปรียบเทียบเส้นใยเซลลูโลสที่เคลือบ/ไม่เคลือบ PSS
3. ศึกษาสมบัติและลักษณะทางกายภาพของนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc ได้แก่
 - 3.1 ศึกษาสัณฐานวิทยาของนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc
 - 3.2 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้การเตรียมนาโนแคปซูลบรรจุ PCM ที่สามารถรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่
2. ได้องค์ความรู้เป็นแนวทางในการพัฒนา PCM เพื่อประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น เสริมชั้นกรองหน้ากากอนามัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

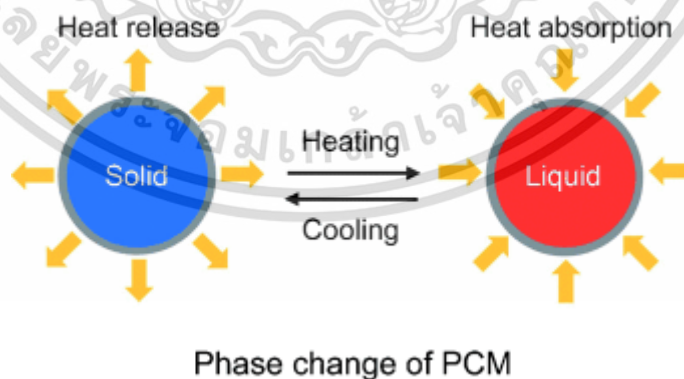
ในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุเปลี่ยนสถานะและวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ทำเปลือกห่อหุ้มนาโนแคปซูล โดยอาศัยการเชื่อมโยงโมเลกุลจากสารลดแรงตึงผิว ซึ่งมีเทคนิคการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลผ่านเทคนิค Layer-by-Layer เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิจากการดูดและคายพลังงาน รวมถึงงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase change material : PCM)

วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase change material : PCM) เป็นวัสดุที่สามารถดูดพลังงานและคายพลังงานความร้อน เมื่อวัสดุอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะวัสดุ เรียกว่า “Transition temperature” ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสถานะจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง และมีค่าที่แตกต่างกันในการเลือกใช้สารแต่ละประเภท ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

โดย PCM เมื่อมีการดูดพลังงานความร้อนจากสภาพแวดล้อมโดยรอบ จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งสู่ของเหลว ขณะเดียวกันเมื่อวัสดุคายพลังงานความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนสถานะกลับไปเป็นของแข็งเช่นเดิม เรียกว่า “วัฏจักรการละลายและการแข็งตัว” (melting-solidification cycle) (รูปที่ 2.1) ซึ่งพลังงานที่ดูดและคายความร้อนในอุณหภูมิหนึ่งที่วัสดุเกิดการเปลี่ยนสถานะที่แตกต่างกัน เรียกว่า ความร้อนแฝง (Latent heat storage)

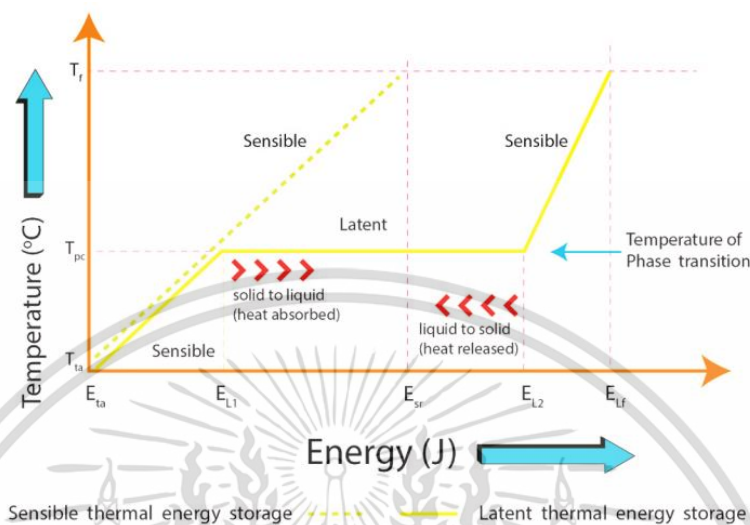
ทั้งนี้ ค่าความร้อนแฝงของวัสดุจะสามารถกำหนดปริมาณจากการดูดหรือคายพลังงานความร้อนในการเปลี่ยนสถานะไปกลับของวัสดุ โดยมีหน่วยเป็นกิโลจูล/กิโลกรัม (kJ/kg) [1]



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของวัสดุเปลี่ยนสถานะ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PCM มีประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานสูง ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อสถานะของวัสดุเปลี่ยนไป ปริมาณพลังงานที่กักเก็บใน PCM จะมากกว่า PCM ที่ผ่านกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม



รูปที่ 2.2 อัตราการกักเก็บพลังงานในวัสดุเปลี่ยนสถานะ [3]

ในการประยุกต์เลือก PCM จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการใช้งาน โดยในสารบริสุทธิ์พบว่า อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะของสารไปกลับมีค่าเท่ากัน เช่น เมื่อสารอยู่ในสถานะของแข็งไปเป็นของเหลวที่จุดหลอมเหลว (Melting point) จะมีค่าเท่ากับจุดเยือกแข็ง (Freezing point) ที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ในขณะที่สารผสมหรือสารละลายจะมีการเปลี่ยนสถานะไปกลับไม่เท่ากัน นอกจากนี้ ต้องคำนึงถึงปริมาณความจุความร้อน หรือความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ จำเป็นต้องมีค่ามากกว่าค่าความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิ [4] ทำให้การเลือกใช้สารต้องตรวจสอบสมบัติของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ เพื่อให้ใกล้เคียงการนำมาใช้งาน

ในปัจจุบันเริ่มมีการพัฒนา PCM ระดับนาโนแคปซูล (NPCMS) เพื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากขึ้น อนุภาคนาโนเกิดการกระจายตัวใน PCM ได้ดี ทำให้เกิดแรงดันที่มีต่อกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ [5] โดยทั่วไปนาโนแคปซูลจะมีองค์ประกอบโครงสร้างของแกน-เปลือก ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์อินทรีย์และอนินทรีย์ จะถูกนำมาใช้ทำเปลือกห่อหุ้มจากการเชื่อมของประจุขั้วบวก-ลบระหว่างวัสดุพอลิเมอร์และสารลดแรงตึงผิว ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการทำ PCM ให้อยู่ในระดับนาโน นอกจากนี้ อนุภาคนาโนส่งผลต่อด้านดีและด้านเสียของการนำความร้อนและความร้อนแฝงอย่างมาก จากการมีอยู่ของอนุภาคนาโนที่ช่วยเพิ่มความร้อนแฝง แต่ขณะเดียวกันอนุภาคนาโนจะลดปริมาตรของ PCM และทำให้ค่าความร้อนแฝงลดลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนสถานะ [1]

วัสดุเปลี่ยนสถานะ หรือ PCM แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารอนินทรีย์ (Inorganic compounds) และสารอินทรีย์ (Organic compounds)

1. สารอนินทรีย์ (Inorganic compounds)

PCM ชนิดสารอนินทรีย์ คือ เกลือ (salts) และเกลือไฮเดรต (Hydrated salts) ซึ่งมีสมบัติของจุดหลอมเหลว หรืออุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะในช่วงกว้าง ตั้งแต่ 10-900 องศาเซลเซียส เช่น $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ เป็นต้น สารอนินทรีย์มีอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนสถานะที่รวดเร็ว เนื่องจากมีค่าความร้อนแฝงใกล้เคียงกับสารอินทรีย์ แต่ในขณะเดียวกันสารอนินทรีย์มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่า

นอกจากนี้ สารอนินทรีย์มีข้อเสียความไม่เสถียรของเกลือไฮเดรตจากองค์ประกอบของโมเลกุลน้ำ ทำให้การสลายตัวของสารอนินทรีย์ในระหว่างที่มีการนำความร้อน จะเกิดการคายน้ำ และมีผลต่อเกลือที่สามารถแตกตัวได้ ประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนจึงลดลงเช่นเดียวกัน

2. สารอินทรีย์ (Organic compounds)

PCM ชนิดสารอินทรีย์ สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มพาราฟิน (Paraffin) มีลักษณะโครงสร้างที่เชื่อมโมเลกุลด้วยพันธะแอลเคน (Alkane) ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) โดยที่ $n = 5-17$ จะอยู่ในสถานะของเหลวและมากกว่า 17 ขึ้นไปอยู่ในสถานะของแข็ง และกลุ่มไม่ใช่พาราฟิน แต่อยู่ในรูปของกรดไขมัน (Fatty acid) ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$) [6]

สารอินทรีย์กลุ่มพาราฟินเป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านการจัดการความร้อนหรือใช้เป็นวัสดุเก็บความร้อนแฝง เนื่องจากมีค่าความจุความร้อนที่ค่อนข้างสูง อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะหรือจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 35-70 องศาเซลเซียส โดยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอน ในทางกลับกันสารอินทรีย์กลุ่มพาราฟินจะมีสมบัติของการนำความร้อนที่ค่อนข้างต่ำเป็นอย่างมาก

สำหรับการประยุกต์ใช้งานของ PCM ในการจัดเก็บความร้อนแฝงต้องการสมบัติของพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ ทำให้การนำมาห่อหุ้มในลักษณะของแคปซูลจะช่วยให้เพิ่มพื้นที่ผิวและประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น

2.1.2 สมบัติทางความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

PCM จะเก็บพลังงานความร้อนในลักษณะความร้อนแฝง โดยที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจากการหลอมเหลวต้องเหมาะสมกับการใช้งานและอุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนสถานะจะคงที่จนกระทั่งเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนสถานะสมบูรณ์ ซึ่งค่าความร้อนแฝงและค่าความจุความร้อนยิ่งมาก จะส่งผลต่อการสะสมพลังงานความร้อนได้มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางความร้อนของ PCM ประเภทสารอนินทรีย์ทั่วไป

ชื่อ	จุดหลอมเหลว (°C)	ความร้อนแฝง (KJ/Kg)	การนำความร้อน (W/mk)	Ref.
Calcium chloride hexahydrate	29	170-192	0.561 (liq) 1.008 (solid)	[7]
Glauber's salts	32	251	0.544	[7]
Sodium chloride	804	492	5.0	[7]
Potassium fluoride	857	452	NA	[7]

ที่มา : [7] Zalba B, Marin JM, Cabeza LF, Mehling H (2003)

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางความร้อนของ PCM ประเภทสารอินทรีย์ทั่วไป

ชื่อ	จุดหลอมเหลว (°C)	ความร้อนแฝง (KJ/Kg)	การนำความร้อน (W/mk)	Ref.
Octadecane	28.4	244	0.148	[8]
Heneicosane	41	294.9	0.145	[9]
Tricosane	48.4	302.5	0.124	[9]
Tetracosane	51.5	207.7	0.137	[9]

ที่มา : [8] Sohani A (2021), [9] Connor W, Warzoha R, Weigand R, Fleischer A, Wemhoff A (2014)

นอกจากนี้ สมบัติทางความร้อนของ PCM เมื่อห่อหุ้มแคปซูลด้วยสารพอลิเมอร์ อาจจะมีค่าความร้อนแฝงลดลง เนื่องจากสารพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำและสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเชื่อมระหว่าง PCM กับสารพอลิเมอร์ที่เกิดการแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นเปลือกพอลิเมอร์ ทำให้วัสดุเปลี่ยนสถานะไม่เกิดการห่อหุ้ม ประสิทธิภาพของพลังงานการเปลี่ยนสถานะจึงลดลง [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม (Value Added Product) ต่าง ๆ และสารอนุพันธ์อื่น ๆ ได้มากมาย
ปลอดภัยต่อการใช้กับมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม

โคโตซานเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก (Positive charge) สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยากับของแข็งอินทรีย์ (Organic Solid) และพื้นผิวเซลล์ (Cell surface) ที่มีประจุลบ จึงนิยมประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสีย และโคโตซานยังสามารถขึ้นรูปได้หลายแบบ เช่น เจล (Gel) เม็ด (Bead) เส้นใย (Fiber) สารละลาย (Solution) คอลลอยด์ (Colloid) फिल्म (Film) และสารเคลือบ (Coat) เป็นต้น ทำให้การประยุกต์ใช้งานแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีสมบัติอื่น ๆ ได้แก่

การละลาย (Solubility)

โคโตซานจะไม่ละลายน้ำ ต่าง และตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์บางชนิด ภายใต้อุณหภูมิปานกลาง โดยมีลักษณะเข้มข้น เหนียวใสคล้ายวุ้น ยืดหยุ่นเล็กน้อย บางครั้งอาจมีตะกอนขาวคล้ายเจล ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การแตกตัว (pKa) ของโคโตซานขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุพอลิเมอร์ที่อยู่ในช่วง 6.2-6.8

ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายโคโตซานขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น มวลโมเลกุล ความเข้มข้น และอุณหภูมิ เป็นต้น โดยโคโตซานที่มีมวลโมเลกุลสูงจะมีสายโซ่ยาวและสารละลายมีความหนืดมากกว่า โคโตซานที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ความหนืดของสารละลายจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้และการเปลี่ยนแปลงค่าความเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่างของสารละลายให้ความหนืดที่ต่างกัน

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

น้ำหนักโมเลกุลบ่งบอกสมบัติทางกายภาพและทางเคมี โดยทั่วไปโคตินในธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากกว่า 1×10^6 ในขณะที่โคโตซานจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1×10^5 ถึง 1.2×10^6 ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการสังเคราะห์

ระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (Degree of Deacetylation, %DD)

ระดับการกำจัดหมู่อะซิทิลเป็นตัวบ่งชี้ความเป็นโคติน-โคโตซาน เนื่องจากโคติน-โคโตซานเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างสองมอนอเมอร์ของ N-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ถ้าสัดส่วนที่อยู่รวมกันของมอนอเมอร์แรกมากกว่าจะมีค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิทิลต่ำแสดงสมบัติเด่นของโคติน ในทางกลับกันสัดส่วนที่รวมกันของมอนอเมอร์หลังมากกว่าจะมีค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิทิลสูงแสดงสมบัติเด่นของโคโตซาน

การจับตัว (Coagulating ability)

โคโตซานสามารถเป็นตัวสร้างตะกอนและตกตะกอน (Flocculant and Coagulating agent) ที่ดี เนื่องจากการมีหมู่เอมีโนจำนวนมาก ที่สามารถแตกตัวเป็นประจุบวกและจับกับสารที่มีประจุลบได้ เช่น โปรตีน สีย้อม และพอลิเมอร์อื่น ๆ หมู่เอมีโนของโคโตซานมีประสิทธิภาพในการจับ
เอกสารนี้กับไอออนของโลหะได้ดีกว่าหมู่อะซิทิลในโคติน ดังนั้น โคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่อะซิทิลต่ำ (%DD) ก็
ไม่ว่าการสูงจะมีอัตราการดูดซับหรือความสามารถในการจับกับไอออนของโลหะสูง สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการกักเก็บสาร

ไคโตซานมีความสามารถในการห่อหุ้มและกักเก็บสารบางชนิด เพื่อเพิ่มความคงตัวของสารที่ถูกกักเก็บและสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารในสภาวะที่ต้องการ ไคโตซานสามารถเก็บได้ทั้งสารที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ สารจะกักเก็บภายในเนื้อหรือถูกดูดซับบนพื้นผิวของไคโตซาน ประสิทธิภาพในการกักเก็บสารของไคโตซานจะขึ้นอยู่กับกระบวนการเตรียม

2.2.2 ประโยชน์ของไคโตซาน [10]

ด้านอุตสาหกรรมยาและวัสดุการแพทย์

- การผลิตผิวหนังเทียมที่ย่อยสลายเองได้ไม่ต้องลอกออกสำหรับผู้ป่วยไฟไหม้ น้ำร้อนลวก ทำให้เกิดแผลเป็นน้อยไม่น่าเกลียด

- การผลิตไหมเย็บแผลที่ละลายเองได้และไม่มีปฏิกิริยากับภูมิคุ้มกันของร่างกายมนุษย์
- ใช้เป็นสารตัวกลางในขบวนการโครมาโทกราฟี
- ใช้เป็นสารหล่อลื่นชนิดผงแห้งในขบวนการผลิตถุงมือยางที่ใช้ทางการแพทย์

ด้านอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

- อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ดูแลเส้นผม เช่น แชมพู ครีมนวดผม ยาย้อมผมที่ทำให้สีติดผมทนนาน เจลแต่งผม

- อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ดูแลผิว เช่น ครีมอาบน้ำ เจลล้างหน้า ลิปสติก ครีมบำรุงผิว

- อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ดูแลช่องปาก เช่น ยาสีฟัน น้ำยาบ้วนปาก น้ำยากำจัดคราบหินปูนในปาก

- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำหอมเพื่อให้ น้ำหอมมีกลิ่นทนนาน

ด้านอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์

- การผลิตผ้าที่ย้อมสีติดทนนาน ไม่หลุดง่ายมีความนุ่มนวลสูง

- การผลิตผ้าที่สามารถต้านทานแบคทีเรียและเชื้อราได้ เช่น เสื้อผ้าที่ใช้ในโรงพยาบาล

ชุดคนไข้

- การเคลือบเส้นใยผ้าเพื่อลดกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นเหม็น กลิ่นอับชื้น มักใช้กับชุดชั้นใน ถุงเท้า รองเท้า

ด้านอุตสาหกรรมการทำกระดาษ

- การผลิตกระดาษที่มีคุณสมบัติทางกายภาพสูง เช่น เหนียวแน่นขึ้น แข็งแรงขึ้น

ทนต่อการฉีกขาด

- การผลิตกระดาษที่สามารถดูดซับหมึกได้ดีเพื่อความคมชัดของการพิมพ์ที่ต้องการ

คุณภาพการพิมพ์สูง

- ใช้เคลือบกระดาษเพื่อยืดอายุการเก็บและคงสภาพของเนื้อกระดาษได้นาน ๆ เช่น เอกสารนี้ใช้เคลือบหนังสือในห้องสมุด การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

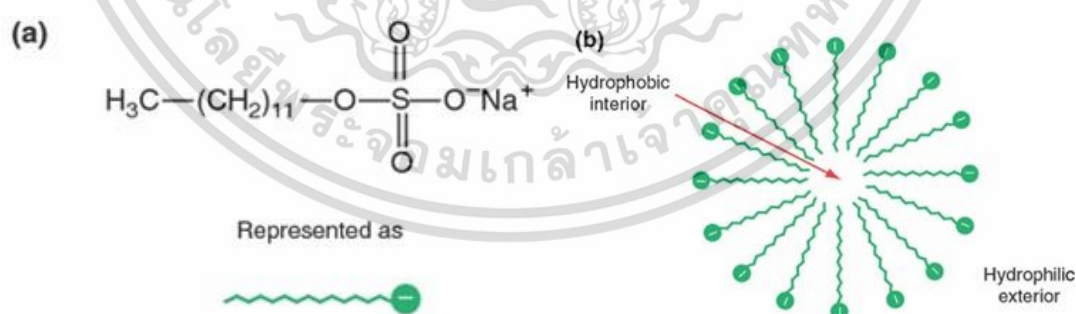
สารลดแรงตึงผิวมีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนหัวมีขั้ว (hydrophilic head) สามารถรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำได้ดีและส่วนหางไม่มีขั้ว (hydrophobic tail) สามารถรวมตัวกับน้ำมันได้ดี

โครงการพิเศษนี้ได้เลือกโซเดียมเดคซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulphate ; SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบ (Nonionic surfactant) นิยมในอุตสาหกรรมที่ผลิตผลิตภัณฑ์ประเภททำความสะอาด เช่น ผงซักฟอง น้ำยาล้างจาน เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโซเดียมเดคซิลซัลเฟต [4]

ชื่อทางเคมี	Sodium dodecyl sulfate : SDS
สูตรทางเคมี	$\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$
น้ำหนักโมเลกุล	288.372 g/mol
ลักษณะ	ของแข็ง สีขาวหรือครีม
ความหนาแน่น	1.01 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	206°C (479 K)

โซเดียมเดคซิลซัลเฟตเกิดการรวมตัวเป็นไมเซลล์ (micelle) เนื่องจากเมื่อโซเดียมเดคซิลซัลเฟตละลายน้ำหรือละลายในสารที่มีขั้ว จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกของโซเดียม และแตกตัวเป็นไอออนลบของเดคซิลซัลเฟต ซึ่งมีหมู่ซัลโฟเนตเป็นส่วนหัว และมีสายโซ่สายคาร์บอนเป็นส่วนหางที่ไม่มีขั้ว ส่วนหัวที่มีขั้วจะจับการสารละลายที่มีขั้ว และทำให้ส่วนหางที่ไม่มีขั้วจะหันหากัน ซึ่งการหันของส่วนหัวและหางที่หันทิศทางตรงข้ามกันนี้จะเกิดเป็นโครงสร้างแบบไมเซลล์ (Micelle)



รูปที่ 2.4 a) โครงสร้างทางเคมีของโซเดียมเดคซิลซัลเฟต,
b) โครงสร้างไมเซลล์ของโซเดียมเดคซิลซัลเฟต [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เทคนิคการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูล

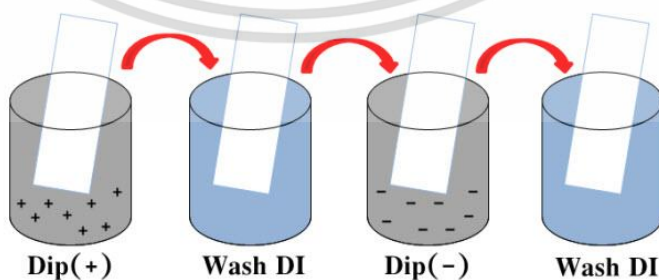
การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลที่ใช้พอลิเมอร์เป็นเปลือก (Shell) ซึ่งพอลิเมอร์ที่นำมาใช้เป็นเปลือกแคปซูลสามารถเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยมี PCM เป็นวัสดุที่กักเก็บความร้อนแฝงทั้งในสถานะของเหลวหรือสถานะของแข็งเป็นแกน (Core) โดยจะขึ้นอยู่กับวัสดุประสงค์ของการใช้งาน จากโครงการงานพิเศษนี้ใช้เทคนิคการจัดเรียงตัวเองทีละชั้น (Layer-by-Layer self-assembly) ในการสร้างชั้นเปลือกแคปซูล

2.4.1 การจัดเรียงตัวเอง (Self-assembly) [14]

การจัดเรียงตัวเอง (Self-assembly) คือ กระบวนการจัดเรียงโมเลกุลได้ด้วยตนเองอย่างเป็นระเบียบจากการประกอบตัวของโมเลกุลหน่วยย่อย ซึ่งเป็นวิธีการผลิตโครงสร้างนาโนจากเล็กไปใหญ่ (Bottom-up) โดยมีหลักการจัดเรียงตัวเองแบบเลือกเฉพาะ (selective stickiness) เมื่อโมเลกุล 2 โมเลกุลมีสมบัติของประจุไฟฟ้าที่สามารถดึงดูดเข้าหากันจนกระทั่งยึดติดเกิดเป็นโครงสร้าง นอกจากนี้ การสร้างพื้นผิวที่เรียบจากการจัดเรียงตัวเองของอนุภาคนาโนสามารถทำได้ด้วยเทคนิคการจัดเรียงตัวเองทีละชั้นโดยการจุ่ม (Dip-assisted Layer-by-Layer self-assembly) และการจัดเรียงตัวเองทีละชั้นโดยการปั่น (Spin-assisted Layer-by-Layer self-assembly)

การจัดเรียงตัวเองทีละชั้นโดยการจุ่ม (Dip-assisted Layer-by-Layer self-assembly)

การจัดเรียงตัวเองทีละชั้นโดยการจุ่มเพื่อสร้างพื้นผิว เริ่มจากการนำวัสดุที่ต้องการสร้างพื้นผิวแช่ในสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกหรือประจุลบและทำการล้างในครั้งแรกก่อนถูกนำมาแช่พื้นผิวในการละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามกับในการแช่ครั้งแรกและทำการล้างเช่นเดียวกัน ทำให้ได้พื้นผิวที่มีโครงสร้างเรียกว่า Bilayer หากทำกระบวนการดังกล่าวซ้ำจะทำให้จำนวนชั้นของ Bilayer มีมากขึ้นและมีความหนาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ การจัดเรียงตัวเองทีละชั้นโดยวิธีการจุ่มเป็นวิธีที่สามารถควบคุมโครงสร้าง ความหนา ของชั้นผิวรวมถึงสมบัติเชิงกล ในขณะเดียวกันวิธีอาศัยการจุ่มทำให้เกิดข้อจำกัดในด้านรูปร่าง ขนาดและและสิ้นเปลืองสารละลายสำหรับจุ่มเคลือบวัสดุ

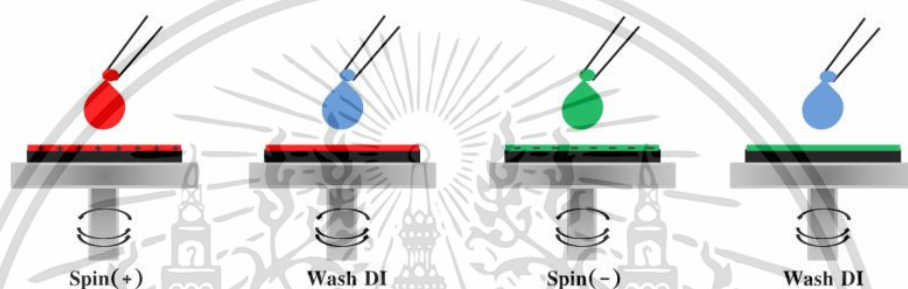


รูปที่ 2.5 การสร้างพื้นผิวด้วยการจัดเรียงตัวเองทีละชั้นโดยการจุ่ม [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดเรียงตัวเองทีละชั้นโดยการปั่น (Spin-assisted Layer-by-Layer self-assembly)

การจัดเรียงตัวเองทีละชั้นโดยการปั่นเพื่อสร้างพื้นผิวเรียบโดยเฉพาะ เริ่มจากการหยดของเหลวของสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์ลงไปยังจุดศูนย์กลางของแกนหมุนเหวี่ยงจากการปั่นที่มีวัสดุที่ต้องการสร้างพื้นผิว ซึ่งความเร็วของการหมุนเหวี่ยงจะขึ้นกับสมบัติของสารละลาย และทำการล้างเพื่อกำจัดสารละลายที่เป็นส่วนเกินออก ต่อมาทำการหยดสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามกับครั้งแรก และทำการล้างเพื่อกำจัดสารละลายส่วนเกิน ทั้งนี้จะได้วัสดุที่มีพื้นผิวเรียบที่ความหนา 1 ชั้น การจัดเรียงตัวเองทีละชั้นโดยการปั่นเป็นวิธีที่สามารถควบคุมความหนาของชั้นพื้นผิวได้จากความเร็วในการหมุนเหวี่ยง แต่มีข้อจำกัดในด้านสารตั้งต้นที่ใช้จะไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ รวมถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ของสารตั้งต้นอาจทำให้สมบัติของสารตั้งต้นเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.6 การสร้างพื้นผิวด้วยการจัดเรียงตัวเองทีละชั้นโดยการปั่น [14]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ J. C. Antunes และคณะ (2011) [15] ได้ศึกษาการเคลือบชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคการจัดเรียงตัวเองทีละชั้น (Layer-by-Layer Self-assembly) ของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ด้วยวิธีจุ่มแช่ เริ่มจากการนำซับสเตรทที่มีชั้นฟิล์มไคโตซาน (Chitosan : CS) ประจุบวกจุ่มลงในสารละลายพอลิแกมมา-กลูตามิก (poly(γ -glutamic acid : γ -PGA) ที่มีประจุลบ และจุ่มลงในสารละลาย CS ที่มีประจุบวกอีกครั้งนับเป็น 1 รอบ การปรับปรุงพื้นผิวโดยทำกระบวนการดังกล่าวซ้ำจำนวน 1-6 รอบ จนกระทั่งเกิดการสะสมของชั้นเคลือบที่เพิ่มขึ้นจากการจับกันของประจุตรงข้าม ซึ่งเมื่อนำมาตรวจวิเคราะห์พบว่า เมื่อมีปริมาณของชั้นฟิล์มที่เพิ่มขึ้นจากการเคลือบ ส่งผลให้ความหนาที่เพิ่มขึ้น ทำให้แผ่นฟิล์มที่มีการเคลือบมีความคงทนมากขึ้น ทั้งนี้ จากการไปวิเคราะห์ AFM พบว่าพื้นผิวของแผ่นฟิล์มมีความหยาบเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการเคลือบ

งานวิจัยของ Y. Iamphaojeen และ P. Siriphannon (2014) [16] ได้ทำการศึกษาการสร้างนาโน-แคปซูลบรรจุเอ็น-ออกตะเดคเคนที่ใช้การจัดเรียงตัวเองของพอลิอิเล็กโทรไลต์ ในสภาวะสารละลายอย่างอ่อน เริ่มจากการทำอิมัลชันของเอ็น-ออกตะเดคเคนกับสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate ; SDS) โดยใช้การโซนิเคชันที่ความถี่สูง แล้วทำการผสมกับสารละลาย PDDA ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันได้แก่ 1, 2, 4 และ 6 mM เกิดเป็นนาโนแคปซูล PDDA-en-Oc พบว่าความเข้มข้น PDDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดและความหนาของอนุภาคนาโนแคปซูลเพิ่มขึ้น รวมถึงมีค่าศักย์ไฟฟ้าของ PDDA-en-Oc เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ขณะเดียวกันนาโนแคปซูลเอ็น-ออกตะเดเคน PDDA ที่เปลือกมีความหนาน้อยกว่าจะเกิดการปล่อยพลังงานความร้อนและการดูดซึมความร้อนออกมาได้เร็วกว่านาโนแคปซูลที่มีชั้นเปลือกหนามากกว่า ทั้งนี้ จากผลการวิจัยพบว่าการสร้างนาโนแคปซูล PDDA-en-Oc ที่ความเข้มข้นของ PDDA 4 mM มีความร้อนแฝง 124.4 J/g.

งานวิจัยนี้ของ S.Fan และคณะ (2015) [17] ได้ศึกษาการกักเก็บความร้อนของนาโนแคปซูลออกตะเดเคน (n-octadecane) ที่มีพอลิอะนิลีน (Polyaniline) เป็นเปลือก เนื่องจากพอลิอะนิลีนเป็นสารที่มีความเสถียร และมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในการทำนาโนแคปซูลออกตะเดเคนในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชันเพื่อสร้างนาโนแคปซูลบรรจุเอ็น-ออกตะเดเคนห่อหุ้มด้วยเปลือกพอลิอะนิลีน โดยเริ่มจากการผสมสไตรีนมาเอลิกแอนไฮไดด์ และ โซเดียมไฮดรอกไซด์พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 80°C จากนั้นทำการเติมอะนิลีนและเอ็น-ออกตะเดเคนในปริมาณอัตราส่วนที่แตกต่างกันได้แก่ 1.5/1 g, 1.25/1.25 g และ 1/1.5 g โดยแทนด้วย S1, S2 และ S3 ตามลำดับ จากนั้นทำพรีอิมัลชันไฟต์ (Pre-emulsified) ด้วยโฮโมจีไนเซอร์ (Homogenizer) เป็นเวลา 10 นาที ที่ 1000 rpm จากนั้นทำโซนิเคชัน (Ultrasonication) เป็นเวลา 10 นาที ที่แอมพลิจูด 70% ที่ 45 °C ทำการละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตในน้ำปราศจากไอออน ในปริมาตร 10 ml และทำการหยดลงในสารละลาย จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 0 - 5 °C แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC (Differential scanning calorimetry) เพื่อดูความสามารถในการดูดความร้อนและคายความร้อน ในงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์นาโนแคปซูลบรรจุเอ็น-ออกตะเดเคนที่ห่อหุ้มด้วยเปลือกพอลิอะนิลีน จากวิธีพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนแคปซูลอยู่ที่ช่วง 500 - 700 นาโนเมตร โดยในสูตร S1, S2 และ S3 มีค่าปริมาณความร้อนที่สามารถกักเก็บได้อยู่ในช่วง 63.3-105.4 J/g ซึ่งในสูตร S3 ที่มีอัตราส่วนพอลิอะนิลีนต่อเอ็น-ออกตะเดเคนเป็น 1/1.5 g สามารถกักเก็บปริมาณความร้อนได้สูงที่สุด คือ 105.4 J/g

งานวิจัยของ Y. Konuklu และคณะ (2015) [18] ได้ศึกษาการสังเคราะห์นาโนแคปซูล 4 รูปแบบ โดยใช้ PCMs แบบเอ็น-อัลเคน (n-alkane) ได้แก่ เตตระเดเคน (Tetradecane :TD) เพนตะเดเคน (Pentadecane : PD) เฮกซะเดเคน (Hekzadecane : HD) และเฮปตะเดเคน (Heptadecane : HP) ที่มีเปลือกห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนโคเอทิลอะคริเลต (Poly (styrene-co-ethylacrylate : PScEA)) ด้วยวิธีอิมัลชันโคพอลิเมอไรเซชัน (Emulsion copolymerization) และศึกษาโครงสร้าง สมบัติทางความร้อน และผลของอัตราส่วนโดยมวลของวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCMs) ต่อเปลือกที่ห่อหุ้มของนาโนแคปซูล พบว่า ในงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์นาโนแคปซูลบรรจุ n-alkane ห่อหุ้มเปลือกด้วย PScEA โดยมีอนุภาคลักษณะทรงกลม และมีขนาดใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 50-200 นาโนเมตร อัตราส่วนโดยมวลของ n-alkane ต่อ PScEA ที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนการห่อหุ้มเอกสารนี้เพิ่มมากขึ้น และมีความสามารถในการดูดและคายความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่าเมื่อใช้ไม่ว่าอัตราส่วนมวลของ n-alkane ต่อ PScEA เป็น 4:1 และ 5:1 มีปริมาณของเปลือกห่อหุ้มไม่เพียงพอ

และไม่สามารถห่อหุ้ม n-alkane ทั้งหมดได้ ดังนั้นอัตราส่วนมวลของ n-alkane ต่อ PScEA ที่เหมาะสมที่สุด คือ 3:1 โดยมีประสิทธิภาพการห่อหุ้มที่ 79%, 69%, 87%, และ 81% สำหรับ TD, PD, HD และ HP ตามลำดับ และนาโน-แคปซูลบรรจุ n-alkane ห่อหุ้มเปลือก PScEA ยังสามารถคงความเสถียรของ n-alkane ไว้ได้

งานวิจัยของ Y.Zhu และคณะ (2015) [19] ได้ทำการศึกษาศึกษาการเตรียมและสมบัติของนาโน-แคปซูลเอ็น-ออกตะเดเคน (n-octadecane : n-Oc) ที่มีออกกาโนซิลิกาเป็นเปลือกเพื่อกักเก็บพลังงานความร้อน โดยเริ่มการทำนาโนแคปซูลออกตะเดเคนที่ใช้ออกกาโนซิลิกาเป็นเปลือกผ่านวิธีอินเตอร์เฟซ โค-ไฮโดรไลซิส (Interfacial co-hydrolysis) และวิธีโคพอลิคอนเด็นเซชัน (Co-polycondensation) ที่เป็นส่วนหนึ่งของพอลิเมอไรเซชันแบบมินิมัลชัน (Miniemulsion) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR และ XRD ที่ยืนยันโครงสร้างทางเคมีและการมีผลึกของแคปซูลเกิดขึ้น นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วย SEM และ TEM สามารถบ่งบอกได้ว่าอนุภาคแคปซูลมีขนาดอยู่ในช่วง 200 - 693 นาโนเมตร และจากกว่าวิเคราะห์ด้วย DSC และ TGA สามารถยืนยันประสิทธิภาพนาโนแคปซูล n-Oc ที่มีออกกาโนซิลิกาเป็นเปลือกที่สามารถกักเก็บความร้อนได้

งานวิจัยของ Y. lamphaojeen และ คณะ (2016) [20] ได้ทำการศึกษาศึกษาการใช้พอลิเอเล็กโตรไลต์ในการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุสาร PCM ประเภทน้ำมันลงบนเส้นใยคอตตอน ซึ่งใช้เทคนิคการจัดเรียงตัวเองที่ละชั้นโดยอาศัยการจุ่มเส้นใยในสารละลายอีเล็กโตรไลต์ที่มีประจุที่แตกต่างกัน โดยในลำดับแรกนำเส้นใยแช่ลงในสารละลาย PSS แล้วทำการล้าง จากนั้นจึงนำเส้นใยคอตตอนแช่ในสารที่มีนาโนแคปซูลบรรจุสาร PCM กระจายตัวอยู่ (PDDA-Oc-Cap) และทำการล้างอีกรอบ เมื่อเสร็จขั้นตอนดังกล่าวนำเส้นใยไปตรวจวิเคราะห์ด้วย FE-SEM พบว่า พื้นผิวของเส้นใยคอตตอนจะถูกเคลือบด้วยนาโนแคปซูล PDDA-Oc-Cap ทั้งนี้การตรึง PSS ลงบนเส้นใยคอตตอนด้วยวิธีจัดเรียงตัวเองที่ละชั้นเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย และการเพิ่มปริมาตรของ PDDA-Oc-Cap ในการตรึงลงบนเส้นใยเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวประจุบวกทำให้เกิดการดูดซับประจุลบได้ดี ซึ่งจะทำให้การตรึงบนเส้นใยนั้นมีประสิทธิภาพมาก

งานวิจัยของ Y.Zhu และคณะ (2019) [21] ได้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้าง สมบัติการนำไฟฟ้า และการกักเก็บความเย็นของนาโนแคปซูลออกตะเดเคน กราฟีน และซิลิกาไดออกไซด์ เริ่มจากการทำนาโนแคปซูลโดยสามารถเตรียมได้จากวิธีอินเตอร์เฟซไฮโดรไลซิส (Interfacial hydrolysis) พอลิคอนเด็นเซชัน (Polycondensation) และ มินิมัลชัน (Miniemulsion) โดยนำสารที่ได้จากการทดลองไปตรวจวัดด้วยเครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimetry) พบว่า สาร PCM ที่มีการห่อหุ้มจากนาโนหรือไมโครแคปซูลมีความร้อนจำเพาะที่สูง เนื่องจากความร้อนแฝงของ PCM ที่มีการเปรียบเทียบกับน้ำหรือของไหล สามารถยืนยันได้จากโครงสร้างผลึกและองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการตรวจวัดด้วยวิธี FT-IR , Raman XPS และสัณฐานวิทยาที่ได้จากเอกซเรย์วิธี XRD รวมถึงโครงสร้างจุลภาคของนาโนแคปซูลโดยการตรวจวัด SEM และ TEM ทั้งนี้จากการไม่มีการตรวจวัดด้วยวิธี DSC แสดงให้เห็นว่ากราฟีนเป็นสารที่สามารถยับยั้งพฤติกรรมการทำความเย็นยิ่งยวด

ได้มีประสิทธิภาพ และยังสามารถรักษาระดับความร้อนแฝงของนาโนแคปซูลให้คงที่ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในการกักเก็บพลังงานความร้อนในอุตสาหกรรมวัสดุสิ่งทอ

งานวิจัยของ D.G. Atinafu และคณะ (2020) [22] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะชนิดสารประกอบอินทรีย์ (PCMs) เช่น การนำความร้อน ความร้อนแฝง ความคงตัวของความร้อน เป็นต้น โดยออกแบบ PCMs ให้สามารถจัดเก็บพลังงานความร้อนด้วยการห่อหุ้มอยู่ในระดับไมโครเมตรและระดับนาโนเมตร ซึ่งการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล PCMs จะเป็นแกนหรือสารที่ต้องการห่อหุ้ม เพื่อใช้ในการกักเก็บพลังงานและมีพอลิเมอร์อินทรีย์หรือพอลิเมอร์อินทรีย์เป็นเปลือกผ่านเทคนิคทางกายภาพ ได้แก่ การทำแห้งโดยพ่นฝอย (Spray drying) หรือเทคนิคทางเคมี ได้แก่ โคอะเซอร์เวชัน (Coacervation) และโซลเจล (Sol-gel) การสังเคราะห์นาโนแคปซูลเป็นที่นิยมในปัจจุบัน โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ PCMs และพอลิเมอร์ที่ใช้ในการห่อหุ้ม รวมถึงเทคนิคการสังเคราะห์ เช่น มินิเอมัลชัน (Miniemulsion) พบว่านาโนแคปซูลมีประสิทธิภาพการห่อหุ้ม 48% ความสามารถในการกักเก็บความร้อนสูงถึง 100% และมีความทนทานซึ่งนาโนแคปซูลที่มีส่วนประกอบของไอโคซาน (Eicosane) และเฮกซะเดคเคน (Hexadecane) ที่ใช้พอลิเมอร์แบบแอมโฟเทอริกและไวต่ออุณหภูมิ เช่น ไคโตซาน-กรดโคพอลิเมทาคริลิก (Chitosan-copoly(methacrylic acid)) เป็นเปลือกห่อหุ้มจะพบว่ามีสมบัติความร้อนแฝง 169 J/g และมีประสิทธิภาพที่เสถียรหลังจากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน นอกจากนี้ ภายในงานวิจัยได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในหน้ากากอนามัยทางการแพทย์

งานวิจัยของ N. Zhang และ Y. Yuan (2020) [23] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุเปลี่ยนสถานะในระดับนาโน (NanoPCMs) ที่มีขนาดเล็กและความร้อนแฝงที่สูงขึ้น ศึกษาโครงสร้าง สันฐาน-วิทยา สมบัติทางความร้อนและประสิทธิภาพในการห่อหุ้มนาโนแคปซูล โดยเตรียมขึ้นด้วยกระบวนการอินซิทูพอลิเมอไรเซชัน (In-situ polymerization) ที่มีขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin wax : PW) เป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะที่ถูกเตรียมในอัตราส่วน PW ต่อ น้ำ และใช้เรซินเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamineformaldehyde : MF) เป็นเปลือกที่ห่อหุ้ม จากผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ พบว่าสันฐานวิทยาของ NanoPCMs มีรูปร่างทรงกลมผิวเรียบ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ NanoPCMs ลดลงในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเกิดพอลิเมอไรเซชันที่เพิ่มขึ้น โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 260 - 450 นาโนเมตร การทดสอบสมบัติทางความร้อน และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ NanoPCMs อยู่ที่ประมาณ 49 °C และ 54 °C ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับ PW และมีค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวและความร้อนแฝงของการกลายเป็นของแข็งของ NanoPCMs คือ 107.4 J/g - 135.3 J/g และ 109.8 J/g - 133.1 J/g ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วน PW ต่อ น้ำจะแปรผันตรงกับ PW และมีประสิทธิภาพในการห่อหุ้มสูงถึง 75% จากการทดสอบเพิ่มอุณหภูมิสลักับลดอุณหภูมิเพื่อประเมินความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสถานะของ PW ในนาโนแคปซูล พบว่า หลังการผ่านการเอกซเรย์เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิวัฏจักรความร้อน 2000 รอบ โดยที่อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิต่ำสุดของ NanoPCMs ไม่มีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 0.41 - 1.06 °C และ 0.27 - 1.16 °C ตามลำดับ ทำให้ค่าความร้อนแฝง

การหลอมเหลวและความร้อนแฝงของการกลายเป็นของแข็งลดลงประมาณ 1.26% – 6.08% และ 0.31% - 2.98% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้น NanoPCMs ที่เตรียมขึ้น มีความเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี สามารถพิจารณาว่าเป็นตัวเลือกสำหรับการใช้งานเก็บพลังงาน ความร้อนแฝง

งานวิจัยของ K. Zhang และคณะ (2021) [24] ได้ศึกษาการอัตราส่วนโดยมวลระหว่าง พอลิเพนตะฟลูโรสไตรีน (Poly(2,3,4,5,6-pentafluorostyrene) : PPFs) และเอ็น-ออกตะเดเคน (n-octadecane : n-OC) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บ การขนาดของแคปซูล และสมบัติทาง ความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะนาโนแคปซูล (Nanoencapsules phase change material : NEPCM) โดยเตรียมอัตราส่วนโดยมวลระหว่าง PPFs และ n-OC ทั้งหมด 6 อัตราส่วนที่แตกต่างกัน ได้แก่ 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ซึ่งเขียนแทนด้วยสูตร NECPCM1, NECPCM2, NECPCM3, NECPCM4, NECPCM5 และ NECPCM6 ตามลำดับ ท่อหุ้มผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization reaction) ในงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์นาโนแคปซูลบรรจุ n-OC ที่ท่อหุ้มด้วย เปลือก PPFs ในอัตราส่วนโดยมวล PPFs ต่อ n-OC ทั้ง 6 รูปแบบ โดยอัตราส่วนมวลมีผลต่อ ประสิทธิภาพการกักเก็บและการกักเก็บพลังงานความร้อน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยของนาโนแคปซูล ในช่วง 490 – 620 นาโนเมตร ซึ่ง NECPCM4(1:2) มีขนาดแคปซูลเฉลี่ยต่ำที่สุด แต่มีประสิทธิภาพในการ กักเก็บสูงสุด ($76.5 \pm 0.8\%$) ซึ่งมีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวประมาณ 171.8 ± 2.2 J/g ประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนแฝงสูงสุด ($76.1 \pm 1.0\%$) และประสิทธิภาพในการตกลึก สูงสุด ($169.3 \pm 1.4\%$) ส่วน NECPCM1(3:1) มีประสิทธิภาพในการกักเก็บ และประสิทธิภาพในการ กักเก็บความร้อนแฝงต่ำที่สุด แต่มีขนาดแคปซูลเฉลี่ยใหญ่เป็นอันดับสอง การนำความร้อนของ NEPCMs จะแปรผันตรงกับประสิทธิภาพในการกักเก็บของนาโน-แคปซูล เมื่ออัตราส่วนโดยมวลอยู่ใน ระหว่าง 1:2 และ 1:3 ค่าการนำความร้อนของ NEPCM ใกล้เคียงกับ n-OC โดยค่าการนำความร้อน ของ NECPCM4(1:2) ณ อุณหภูมิห้อง คือ 0.149 ± 0.006 W/(m·K) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าการนำ ความร้อนของ n-OC บริสุทธิ์ ที่ 0.150 ± 0.010 W/(m·K) และจากการวิเคราะห์ DSC พบว่าเปลือก PPFs สามารถท่อหุ้ม n-OC ได้โดยไม่มีการรั่วไหลในระหว่างกระบวนการเปลี่ยนสถานะ ไม่ได้รับ ความเสียหายเมื่อผ่านการเปลี่ยนสถานะทางความร้อนจำนวน 200 รอบ โครงสร้างและองค์ประกอบ ทางเคมีของ NEPCM ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากทดสอบความร้อนหมุนเวียนซ้ำ ดังนั้น จาก การศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์ นาโนแคปซูลบรรจุ n-OC ท่อหุ้มเปลือก PPFs ที่มีสมบัติ ทางความร้อนที่ดี และมีความเสถียรของรูปร่างและการเปลี่ยนสถานะที่น่าเชื่อถือสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เอ็น-ออกตะเดเคน (n-octadecane : n-Oc) บริษัท Sigma-Aldrich Co.,Ltd เกรตวิเคราะห์
2. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulphate : SDS) บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd. เกรตวิเคราะห์
3. ไคโตซาน (Chitosan) เกรตการค้า
4. พอลิสไตรีนซัลโฟเนต (Poly (Styrene sulfonate : PSS)) (PSS; M_w 75,000, 18 wt% in water) บริษัท Sigma-Aldrich Co.,Ltd เกรตวิเคราะห์
5. กรดอะซิติก (Acetic acid, CH_3COOH) บริษัท LAB-SCAN Co.,Ltd เกรตวิเคราะห์
6. ซูดานเรด 7B (Sudan red 7B) บริษัท Acros Organics เกรตวิเคราะห์
7. เส้นใยเซลลูโลส (Fiber) เกรตการค้า

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver รุ่น SI-234
2. เครื่องปั่นกวนสารด้วยแท่งแม่เหล็ก บริษัท IKA Werke Ro 5
3. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) บริษัท Sonics & Materials, Inc. รุ่น VC 505 Vibra-Cell™
4. เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ (Freeze Dryer) บริษัท ScanvacCoolsafe 110-4
5. เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยแสงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FT-IR) บริษัท SHIMADZU รุ่น IRTracer-100
6. เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร (Differential Scanning Calorimetry : DSC) บริษัท METTLER TOLEDO รุ่น DSC 3+
7. เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis : TGA) บริษัท METTLER TOLEDO รุ่น TGA/DSC 3+
8. กล้องถ่ายภาพความร้อน (Spot Thermal Camera) บริษัท Teledyne FLIR รุ่น FLIR C2
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง ชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope : FE-SEM) บริษัท Thermo Fisher Scientific Inc. รุ่น Apreo 2 SEM
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (Transmission Electron Microscope : TEM)
11. เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาคคอลลอยด์และน้ำหนักโมเลกุล (Zetasizer : ZE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานวิจัยและพัฒนาของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพและเกษตรกรรม โดยขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูล
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมวัสดุประกอบนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc

การเตรียมนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ของโครงการพิเศษนี้ เริ่มจากการเตรียมนาโนอิมัลชันจากสารลดแรงตึงผิว คือ สารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) ผสมกับ เอ็น-ออกตะเตเคน (n-Oc) และใช้การสั่นของคลื่นเสียงกำลังสูง (Sonication) เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคนาโนอิมัลชัน ซึ่งจะมีลักษณะโครงสร้างเป็นไมเซลล์ และใช้เทคนิค Layer-by-Layer สร้างชั้นเปลือก โดยมีโคโตซานที่ละลายในกรดอะซิติกเป็นโปรโตเนตเอมีนที่มีประจุบวก ทั้งนี้ โปรโตเนตเอมีนและไมเซลล์ของ SDS ซึ่งมีประจุตรงข้ามกัน 2 ชนิดจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล จนกระทั่งกลายเป็นชั้นเปลือกที่ห่อหุ้ม n-Oc หรือนาโนแคปซูล



รูปที่ 3.1 การเตรียมนาโนอิมัลชัน

3.3.2 การเตรียมนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc

การเตรียมวัสดุประกอบนาโนแคปซูลสามารถแบ่งออกเป็น 3 สภาวะ ได้แก่ สภาวะที่ 1 การเตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่แตกต่างกัน สภาวะที่ 2 การเตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่แตกต่างกัน สภาวะที่ 3 การเตรียมโดยใช้เวลา Sonication ที่แตกต่างกัน

สภาวะที่ 1 การเตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่แตกต่างกัน (แผนภาพที่ 3.1)

1. เตรียมสารละลาย SDS เข้มข้น 10 30 และ 50 mM
2. นำสารละลายในข้อ 1 ที่เตรียมได้ในแต่ละความเข้มข้นมา 20 ml
3. เตรียม n-Oc เข้มข้น 50 ml/L ใส่ในสารละลาย SDS ที่เตรียมได้จากข้อ 2 จากนั้นนำไปทำอิมัลชันโดยใช้ Sonication ที่กำลัง 500 W และความถี่ 20 kHz เป็นเวลา 10 นาที

4. สังเกตลักษณะของนาโนอิมัลชัน โดยสารละลายมีสีฟ้าขุ่น ไม่พบ n-Oc ซึ่งเป็นน้ำมันลอยอยู่บริเวณพื้นผิว

ไม่ว่าการผลิตนี้ยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เตรียมสารละลายโคโตซานความเข้มข้น 1 %w/v โดยละลายโคโตซานในกรดอะซิติกเข้มข้น 2 %v/v และปั่นกวนด้วยความร้อนอุณหภูมิประมาณ 70 °C จนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

6. นำสารละลายโคโตซานที่ความเข้มข้น 1 %w/v ปริมาตร 10 ml เติมลงในนาโน-อิมัลชันจากข้อ 4 ในขณะที่ปั่นกวน และทำการปั่นกวนต่อประมาณ 5 นาที

7. นำสารละลายนาโนแคปซูลที่เตรียมได้แช่แข็งในตู้ทำความเย็น อุณหภูมิ -40 °C เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งสารตัวอย่างแข็ง

8. นำสารละลายนาโนแคปซูลที่ผ่านการแช่แข็งมาทำให้แห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ (Freeze Dryer) เป็นเวลาประมาณ 48 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งสารตัวอย่างแห้ง

สภาวะที่ 2 การเตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่แตกต่างกัน (แผนภาพที่ 3.2)

1. เตรียมนาโนอิมัลชันจากรูปแบบที่ 1 (SDS 10 mM)

2. เตรียมสารละลายโคโตซานความเข้มข้น 0.5 1 และ 1.5 %w/v โดยละลายโคโตซานในกรดอะซิติกเข้มข้น 2 %v/v และปั่นกวนด้วยความร้อนอุณหภูมิประมาณ 70 °C จนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3. นำสารละลายโคโตซานที่ความเข้มข้น 0.5 1 และ 1.5 %w/v ปริมาตร 10 ml เติมลงในนาโนอิมัลชันจากข้อ 1 ที่เตรียมได้ ในขณะที่ปั่นกวน และทำการปั่นกวนต่อประมาณ 5 นาที

4. นำสารละลายนาโนแคปซูลที่เตรียมได้แช่แข็งในตู้ทำความเย็น อุณหภูมิ -40 °C เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งสารตัวอย่างแข็ง

5. นำสารละลายนาโนแคปซูลที่ผ่านการแช่แข็งมาทำให้แห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ (Freeze Dryer) เป็นเวลาประมาณ 48 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งสารตัวอย่างแห้ง

สภาวะที่ 3 การเตรียมโดยใช้เวลา Sonication ที่แตกต่างกัน (แผนภาพที่ 3.3)

1. เตรียมสารละลาย SDS เข้มข้น 1 mM ปริมาตร 20 ml

2. เตรียม n-Oc เข้มข้น 50 mL/L ใส่ในสารละลาย SDS ที่เตรียมได้จากข้อ 1 จากนั้นนำไปทำอิมัลชันโดยใช้ Sonication ที่กำลัง 500 W และความถี่ 20 kHz เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที

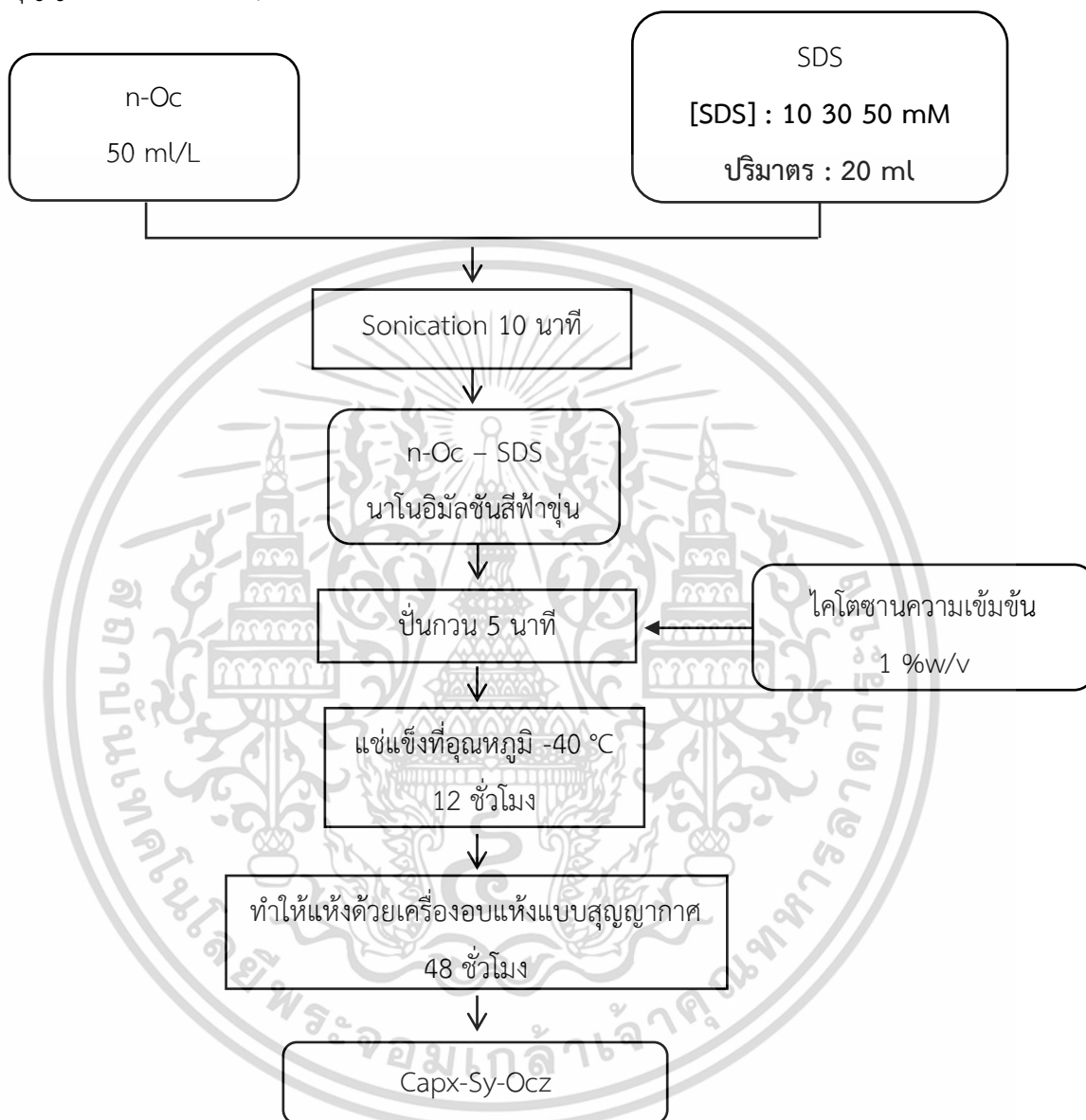
3. สังเกตลักษณะของนาโนอิมัลชัน โดยสารละลายมีสีฟ้าขุ่น ไม่พบ n-Oc ซึ่งเป็นน้ำมันลอยอยู่บริเวณพื้นผิว

4. เตรียมสารละลายโคโตซานความเข้มข้น 1 %w/v โดยละลายโคโตซานในกรดอะซิติกเข้มข้น 2 %v/v และปั่นกวนด้วยความร้อนอุณหภูมิประมาณ 70 °C จนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

5. นำสารละลายโคโตซานที่ความเข้มข้น 1 %w/v ปริมาตร 10 ml เติมลงในนาโน-อิมัลชันจากข้อ 4 ในขณะที่ปั่นกวน และทำการปั่นกวนต่อประมาณ 5 นาที

6. นำสารละลายนาโนแคปซูลที่เตรียมได้แช่แข็งในตู้ทำความเย็น อุณหภูมิ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งสารตัวอย่างแข็ง

7. นำสารละลายนาโนแคปซูลที่ผ่านการแช่แข็งมาทำให้แห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ (Freeze Dryer) เป็นเวลาประมาณ 48 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งสารตัวอย่างแห้ง



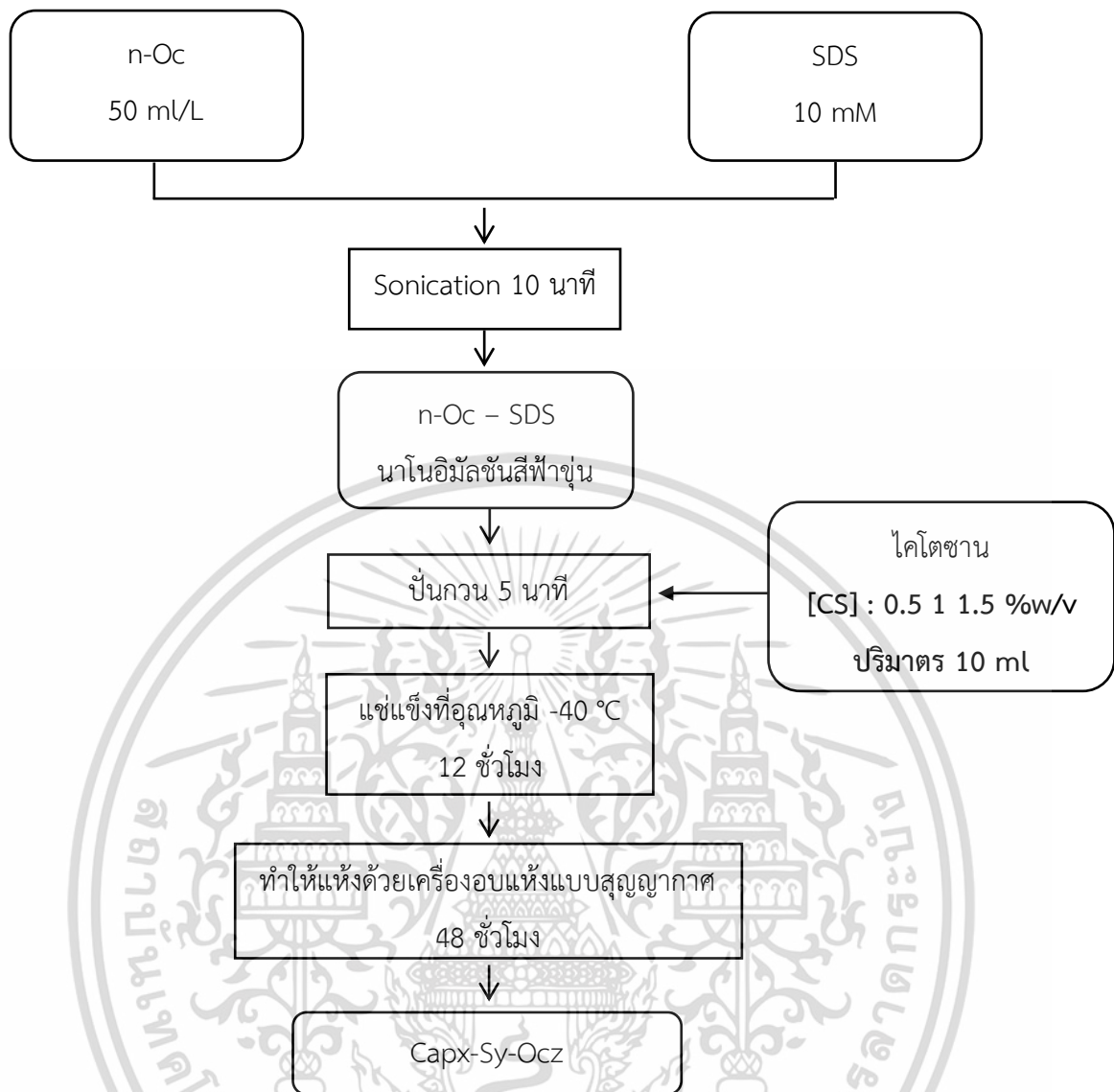
แผนภาพที่ 3.1 การเตรียมนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc รูปแบบที่ 1

หมายเหตุ : Capx-Sy-Ocz คือ นาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc

-x = ความเข้มข้นของโคโตซานที่ใช้ในการห่อหุ้มนาโนแคปซูล (%w/v)

-y = ความเข้มข้นของ SDS (mM) ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนแคปซูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนชื่อผู้แต่งและไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับนโยบายด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น -z = ความเข้มข้นของ n-Oc (mL/L) ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนแคปซูลที่มีการนำไปใช้

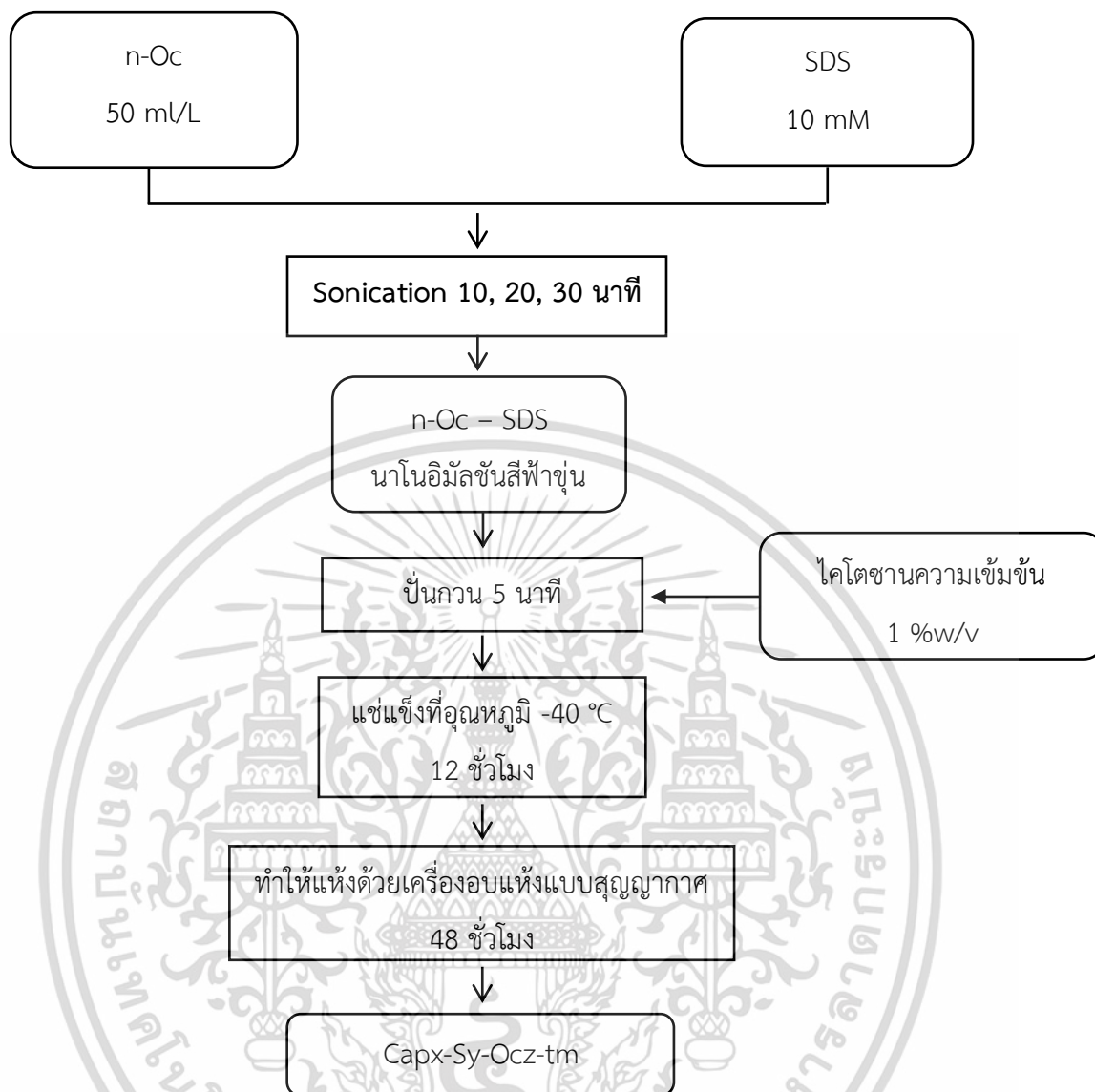


แผนภาพที่ 3.2 การเตรียมนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc รูปแบบที่ 2

หมายเหตุ : Capx-Sy-Ocz คือ นาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc

- x = ความเข้มข้นของโคโตซานที่ใช้ในการห่อหุ้มนาโนแคปซูล (%w/v)
- y = ความเข้มข้นของ SDS (mM) ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนแคปซูล
- z = ความเข้มข้นของ n-Oc (ml/L) ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนแคปซูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผนภาพที่ 3.3 การเตรียมนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc รูปแบบที่ 3

หมายเหตุ : Capx-Sy-Ocz คือ นาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc

-x = ความเข้มข้นของไคโตซานที่ใช้ในการห่อหุ้มนาโนแคปซูล (%w/v)

-y = ความเข้มข้นของ SDS (mM) ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนแคปซูล

-z = ความเข้มข้นของ n-Oc (ml/L) ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนแคปซูล

-m = เวลาที่ใช้ในการ Sonication (min) ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนแคปซูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการเตรียมนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc

ชื่อตัวอย่าง	ความเข้มข้นของ SDS (mM)	ความเข้มข้นของ n-Oc (mL/L)	ความเข้มข้นของ สารละลายโคโคซาน (%w/v)	เวลา Sonication (min)
Cap1-S10-Oc50	10	50	1	10
Cap1-S30-Oc50	30			
Cap1-S50-Oc50	50			
Cap0.5-S10-Oc50	10	50	0.5	10
Cap1-S10-Oc50			1	
Cap1.5-S10-Oc50			1.5	
Cap1-S10-Oc50-t10	10	50	1	10
Cap1-S10-Oc50-t20				20
Cap1-S10-Oc50-t30				30

หมายเหตุ : Capx-Sy-Ocz-tm คือ นาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc

-x = ความเข้มข้นของโคโคซานที่ใช้ในการห่อหุ้มนาโนแคปซูล (%w/v)

-y = ความเข้มข้นของ SDS (mM) ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนแคปซูล

-z = ความเข้มข้นของ n-Oc (mL/L) ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนแคปซูล

-m= เวลาในการ Sonication (min) ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนแคปซูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การตรึงนาโนแคปซูลบนเส้นใยเซลลูโลส

การตรึงนาโนแคปซูลบนเส้นใยเซลลูโลสสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่
รูปแบบที่ 1 การตรึงสารละลายนาโนแคปซูลบนเส้นใยเซลลูโลส

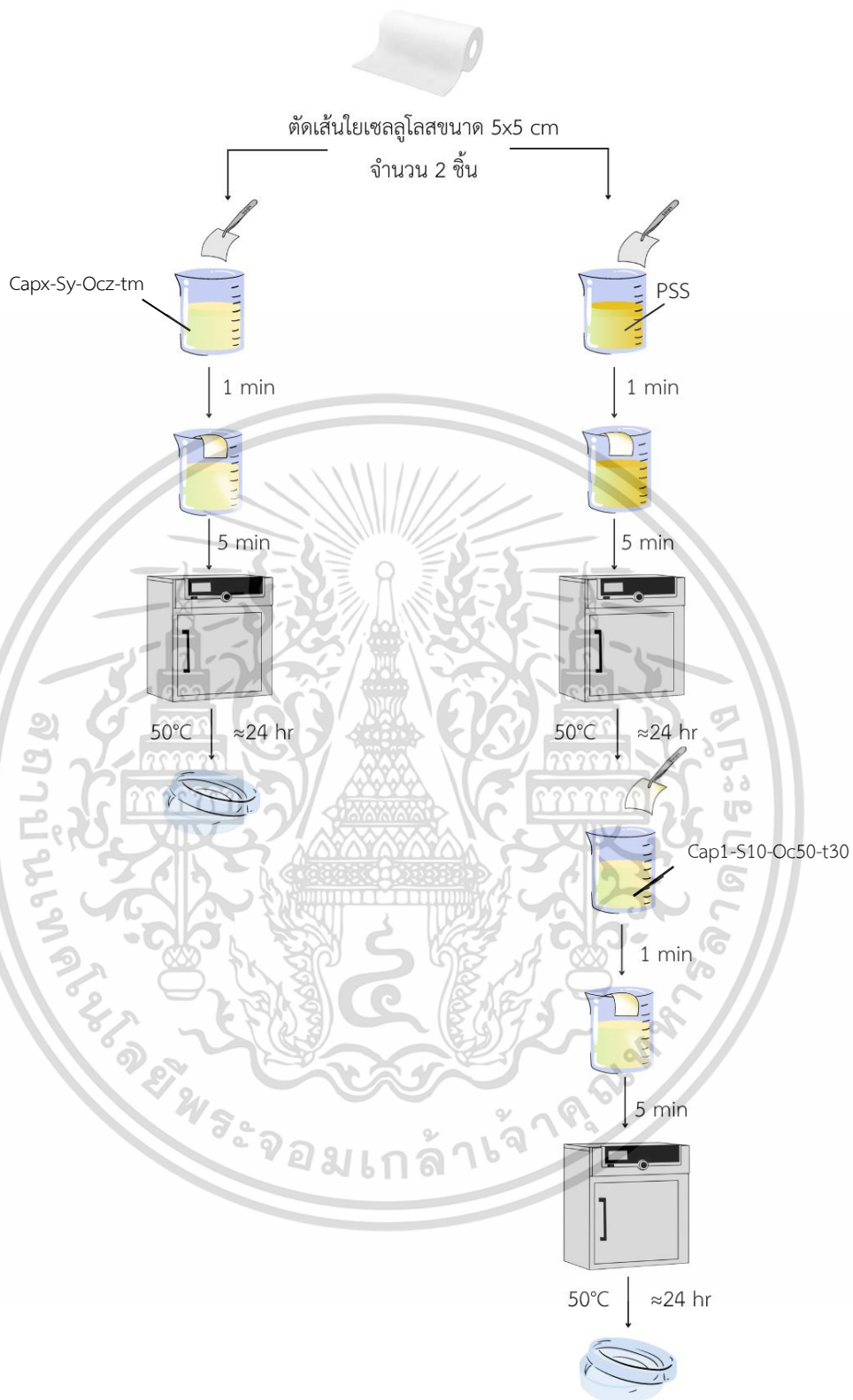
รูปแบบที่ 2 การตรึงสารละลายนาโนแคปซูลบนเส้นใยเซลลูโลสที่เคลือบพอลิสไตรีนซัลโฟเนต (PSS)

รูปแบบที่ 1 การตรึงสารละลายนาโนแคปซูลบนเส้นใยเซลลูโลส

1. นำเส้นใยเซลลูโลสสะอาดตัดให้อยู่ในขนาด 5x5 cm จำนวน 2 ชิ้น
2. แช่เส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมในข้อ 1 ลงในสารละลายที่เตรียมได้จาก ข้อ 3.3.2 (SDS 10 mM / n-Oc 50 ml/L / CS 1 %w/v) เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำขึ้นมาตากบริเวณปากบีกเกอร์ เพื่อให้สารละลายเกิดการซึมลงบนเส้นใยเซลลูโลส เป็นเวลา 5 นาที
3. นำเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการแช่สารละลายนาโนแคปซูลไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงหรือจนกระทั่งแห้ง

รูปแบบที่ 2 การตรึงสารละลายนาโนแคปซูลบนเส้นใยเซลลูโลสที่เคลือบพอลิสไตรีนซัลโฟเนต (PSS)

1. นำเส้นใยเซลลูโลสสะอาดตัดให้อยู่ในขนาด 5x5 cm จำนวน 2 ชิ้น
2. เตรียมสารละลาย PSS ที่ความเข้มข้น 1 %v/v ปริมาตร 10 ml
3. นำเส้นใยเซลลูโลสแช่ลงในสารละลาย PSS เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำขึ้นมาตากบริเวณปากบีกเกอร์เพื่อให้สารละลายเกิดการซึมลงบนเส้นใยเซลลูโลส เป็นเวลา 5 นาที
4. นำเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายนาโนแคปซูล PSS ไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงหรือจนกระทั่งแห้ง
5. นำเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการเคลือบ PSS แช่ลงในสารละลายนาโนแคปซูลที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.2 (SDS 10 mM / n-Oc 50 ml/L / CS 1 %w/v / Sonication 30 min) เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำขึ้นมาตากบริเวณปากบีกเกอร์เพื่อให้สารละลายเกิดการซึมลงบนเส้นใยเซลลูโลส เป็นเวลา 5 นาที
6. นำเส้นใยเซลลูโลสที่เคลือบ PSS และผ่านการแช่สารละลายนาโนแคปซูลไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงหรือจนกระทั่งแห้ง



แผนภาพที่ 3.4 การตรึงนาโนแคปซูลบนเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่เคลือบ/เคลือบ PSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์

1. การทดสอบความเป็นนาโนแคปซูลด้วยวิธีทางกายภาพ

การศึกษาการห่อหุ้มนาโนแคปซูลจากเปลือกพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ โดยใช้สีย้อม Sudan Red ซึ่งทำได้ดังนี้ ซึ่งสีย้อม Sudan Red 0.01 g ละลายในน้ำมัน n-Oc แล้วหยดลงในสารละลาย SDS ที่เตรียมได้จากในข้อ 3.3.2 และทำอิมัลชันโดย Sonication ที่กำลัง 500 W และความถี่ 20 kHz เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นหยดสารละลายที่ใช้ในการทำเปลือกห่อหุ้มนาโนแคปซูลตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อดูการกระจายตัวของสีย้อมและดูการเปลี่ยนแปลง

2. การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลจากการห่อหุ้มด้วยเปลือกพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับน้ำมันเอ็น-ออกตะเดเคน ทำได้โดย

การหาค่าการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสาร ด้วยเครื่องมือ Differential Scanning Calorimetry (DSC) เพื่อการรักษารูปร่าง การเปลี่ยนแปลงสถานะและค่าความร้อนในการเปลี่ยนแปลงสถานะ โดยนำนาโนแคปซูลที่เตรียมได้จาก 3.3.2 ในปริมาณ 3-5 mg วิเคราะห์ในสภาวะดังต่อไปนี้

ช่วงอุณหภูมิในการวิเคราะห์ 10 – 50 °C

อัตราเร็วในการให้ความร้อน 2.5 °C /min

จำนวนรอบการเพิ่ม - ลดอุณหภูมิ 3 รอบ

ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน

การคำนวณร้อยละประสิทธิภาพในการห่อหุ้มนาโนแคปซูล (Encapsulation efficiency) สามารถหาได้สูตร ดังนี้

$$\% \text{ Encapsulation efficiency} = \frac{\Delta H_{m,\text{capsule}} + \Delta H_{c,\text{capsule}}}{\Delta H_{m,\text{PCM}} + \Delta H_{c,\text{PCM}}} \times 100$$

กำหนดให้ $\Delta H_{m,\text{capsule}}$ = ค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของนาโนแคปซูล

$\Delta H_{c,\text{capsule}}$ = ค่าความร้อนแฝงการก่อผลึกของนาโนแคปซูล

$\Delta H_{m,\text{PCM}}$ = ค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของ n-Oc

$\Delta H_{c,\text{PCM}}$ = ค่าความร้อนแฝงการก่อผลึกของ n-Oc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าการสลายตัวเนื่องจากความร้อน ด้วยเครื่องมือ Thermogravimetric Analysis (TGA) เพื่อตรวจสอบปริมาณน้ำหนักของน้ำมัน n-Oc และปริมาณของสารที่เป็นองค์ประกอบภายในนาโนแคปซูล โดยนาโนแคปซูลที่เตรียมได้จาก 3.3.2 วิเคราะห์ในสภาวะดังต่อไปนี้

ช่วงอุณหภูมิในการวิเคราะห์	50 – 750 °C
อัตราเร็วในการให้ความร้อน	10 °C /min
ภายใต้สภาวะแก๊สออกซิเจน	

3. การทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อน

การทดสอบการรั่วซึมของอุณหภูมิหลังจากตรึงนาโนแคปซูลบนเส้นใยเซลลูโลสด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Spot Thermal Camera) เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อเวลาผ่านไป โดยนำเส้นใยเซลลูโลสเก็บไว้ในอุณหภูมิที่ต่ำมาให้ความร้อนและสังเกตอุณหภูมิบนเส้นใยเซลลูโลสที่เปลี่ยนไป โดยควบคุมอุณหภูมิในช่วง 35 - 40 °C

4. การทดสอบสมบัติและโครงสร้าง

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันและพันธะเคมีของนาโนแคปซูล เพื่อยืนยันโครงสร้างภายในด้วยเครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มนาโนแคปซูล โดยอาศัยหลักการดูดกลืนของรังสีอินฟราเรด ทำได้โดยนำนาโนแคปซูลที่เตรียมได้จาก 3.3.2 ผสมกับผงโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) แล้วนำไปอัดขึ้นแผ่นแล้วนำไปวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 400 – 4,000 cm^{-1}

5. การวิเคราะห์ขนาดและลักษณะพื้นฐานของอนุภาค

การศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของนาโนแคปซูล สามารถตรวจสอบด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) โดยนำเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการตรึงนาโนแคปซูล เคลือบด้วยแพลทินัม (Pt) ก่อนนำไปทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง

การศึกษาโครงสร้างจุลภาค พื้นฐานของอนุภาค โครงสร้างผลึก สามารถตรวจสอบด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscope (TEM) ซึ่งอาศัยการทะลุผ่านของอิเล็กตรอน โดยนำนาโนแคปซูลมาทำให้กระจายตัวในของเหลวตัวกลาง จากนั้นนำไปเขย่าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงประมาณ 15 นาที กำหนดตัวอย่างที่อนุภาคกระจายตัวได้ดีลงบนแผ่นรองรับตัวอย่าง (grid) แล้วจึงนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

การศึกษาขนาดอนุภาคนาโนแคปซูล และวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) สามารถตรวจสอบด้วยเครื่องมือ Zetasizer (ZE) โดยเตรียมสารละลายนาโนแคปซูลอย่างน้อย 5 ml ใส่ลงในหลอดสารตัวอย่าง (Cuvette) ที่ใช้สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปราย

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาแนวทางและพัฒนาสมบัติการรักษาระดับอนุภาคของแผ่นเยื่อกรองด้วยการตรึงนาโนแคปซูลวัสดุเปลี่ยนสถานะโคโตซานบรรจุเอ็น-ออกตะเดเคน (n-Octadecane : n-Oc) โดยการสังเคราะห์อนุภาคไมเซลล์ Oc-SDS โดยใช้เทคนิค Sonication ร่วมกับเทคนิค Layer-by-Layer (LbL) ที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อศึกษาหาสภาวะที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการสร้างชั้นเปลือกหุ้มด้วยโคโตซาน โดยมีปัจจัยศึกษา ได้แก่

- สภาวะที่ 1 เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่ 10 30 และ 50 mM ได้สารผลิตภัณฑ์ Cap1-S10-Oc50 Cap1-S30-Oc50 และ Cap1-S50-Oc50
- สภาวะที่ 2 เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่ 0.5 1 และ 1.5 %w/v ได้สารผลิตภัณฑ์ Cap0.5-S10-Oc50 Cap1-S10-Oc50 และ Cap1.5-S10-Oc50
- สภาวะที่ 3 เตรียมโดยใช้เวลาในการ Sonication ที่ 10 20 และ 30 นาที ได้สารผลิตภัณฑ์ Cap1-S10-Oc50-t10 Cap1-S10-Oc50-t20 และ Cap1-S10-Oc50-t30

ในส่วนที่สองศึกษาการนำนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ซึ่งตรึงบนเส้นใยเซลลูโลส และเส้นใยเซลลูโลสที่เคลือบด้วยสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุลบ ได้แก่ พอลิสไตรีนซัลโฟเนต (Poly (Styrene sulfonate) : PSS) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการรักษาระดับอนุภาค

4.1 การเตรียมนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer

การสังเคราะห์ไมเซลล์ Oc-SDS ของ n-Oc โดยใช้สารลดแรงตึงผิว ได้แก่ สารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulphate : SDS) ซึ่งมีค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration : CMC) ของสารละลาย SDS คือ 8.2 mM [25] ดังนั้น โครงการพิเศษนี้ ได้ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย SDS ที่ 10 30 และ 50 mM

4.1.1 การสร้างนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุเอ็น-ออกตะเดเคน

ในการศึกษาสภาวะการเตรียมนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เหมาะสมโดยไม่มีส่วนเกินของ n-Oc และไม่เกิดการแยกส่วนของ n-Oc กับโคโตซาน โดยใช้ระยะเวลาในการ Sonication เพื่อเตรียมนอนุภาคไมเซลล์ Oc-SDS เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อให้สังเกตการเกิดไมเซลล์ Oc-SDS ที่ชัดเจนในโครงการนี้จึงเลือกใช้สีย้อมชูดานเรดที่ละลายได้ใน n-Oc ทำให้สามารถสังเกตการกระจายตัวของ n-Oc ได้ ซึ่งบริเวณที่มี n-Oc การกระจายตัวอยู่จะสังเกตเห็นเป็นสีแดง ในขณะที่บริเวณสารละลายที่มีสีเหลืองแสดงถึงส่วนของโคโตซาน ดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 (ก) ในกลุ่มนาโนแคปซูลที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่ 0.5 %w/v เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า และปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ SDS พบว่า Cap0.5-S10-Oc50 เกิดการแยกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนบนไม่ผ่านการเติมสีเหลือง แต่ส่วนล่างมีสีเหลืองเข้มและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นสารละลายสีแดงบ่งบอกถึงบริเวณที่เกิดเป็นนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc ในขณะที่สารละลายส่วนล่างที่มีสีเหลืองแสดงถึงปริมาณของ SDS ไม่พอดีกับการสร้างนาโนแคปซูล ในขณะที่ Cap0.5-S30-Oc50 และ Cap0.5-S50-Oc50 ซึ่งมี SDS ในปริมาณที่สูงขึ้น จึงมีความสามารถในการเกิดไมเซลล์มากขึ้น เกิดนาโนแคปซูลในปริมาณมากขึ้น ไม่พบการแยกชั้น

เมื่อปรับเพิ่มความเข้มข้นของโคโตซานที่ 1 %w/v และปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ SDS ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) พบว่าในการใช้ SDS ทั้ง 3 ความเข้มข้นไม่เกิดการแยกชั้น ซึ่งแสดงถึงการเกิดนาโนแคปซูลที่มีความสามารถในการกระจายตัวในน้ำได้ดี

ส่วนในรูปที่ 4.1 (ค) นาโนแคปซูลที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่ 1.5 %w/v และปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ SDS พบว่า Cap1.5-S10-O50 และ Cap1.5-S30-O50 เกิดการแยกชั้น เช่นเดียวกับ Cap0.5-S10-Oc50 โดยกรณีนี้สันนิษฐานว่าเป็นผลจากการที่มีโคโตซานในปริมาณมาก ทำให้มีโคโตซานที่มากเกินไปแยกชั้นอยู่ ซึ่งสังเกตได้จากสีของสารละลายเมื่อเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่า Cap0.5-S10-Oc50 ในสารละลายส่วนล่างจะมีสีค่อนข้างใสและมีสีขาวขุ่นจาง ๆ ในขณะที่ Cap1.5-S10-Oc50 และ Cap1.5-S30-O50 พบสารละลายด้านล่างมีสีเหลืองจากโคโตซาน และพบว่า Cap1.5-S50-Oc50 ที่ใช้ SDS ความเข้มข้นสูงที่สุดมีความสามารถในการสร้างแคปซูลและมีกระจายตัวของนาโนแคปซูลได้โดยไม่สังเกตเห็นการแยกชั้น



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ในสถานะที่แตกต่างกัน Capx-Sy-Ocz โดยที่ x หมายถึง ความเข้มข้นโคโตซาน (%w/v) ที่ใช้ในการห่อหุ้ม เป็นชั้นเปลือก y หมายถึง ความเข้มข้นของ SDS (mM) ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไมเซลล์ และ z หมายถึงความเข้มข้นของ n-Oc (mL/L) ที่ใช้ในการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อ นำผลข้างต้นเปรียบเทียบกับสารผสม n-Oc กับสารละลายโคโตซาน โดยไม่มีไม่ว่าการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าสารผสมมีการแยกชั้นระหว่าง n-Oc ละลาย

สีย้อม ซึ่งเป็นชั้นน้ำมันลอยอยู่ด้านบนและสารละลายโคโตซาน ซึ่งเป็นชั้นน้ำที่อยู่ด้านล่าง อย่างไรก็ตามสังเกตเห็นว่าของเหลวชั้นล่างมีส่วนของสีย้อมผสมอยู่ ทั้งนี้ สันนิษฐานว่าสีย้อมอาจจะละลายในโคโตซานได้เล็กน้อย แต่ไม่สามารถเกิดสภาพของการเป็นไมเซลล์ได้ จึงยังสังเกตเห็นชั้นน้ำมันแยกตัวอย่างชัดเจน

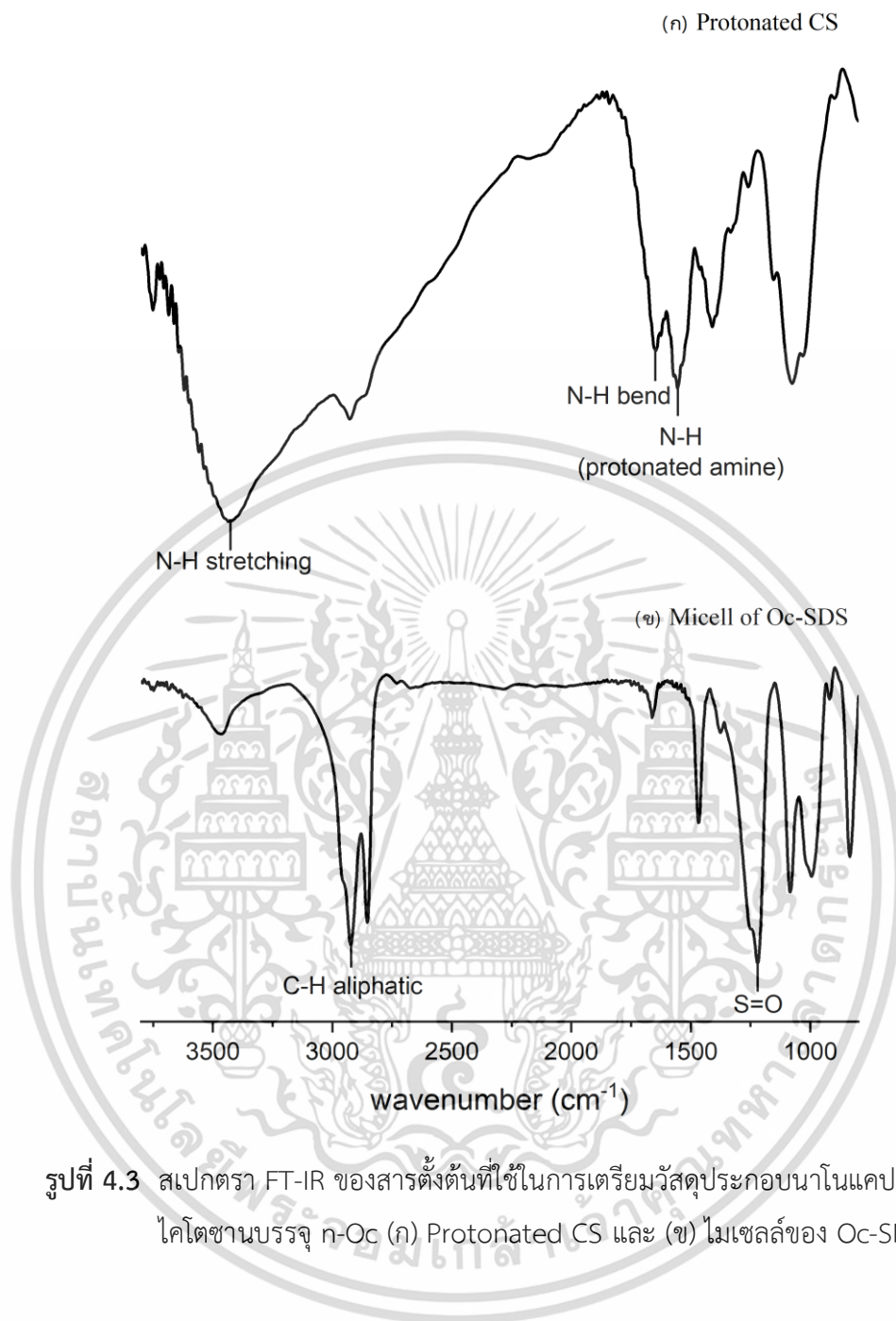
เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Cap0.5-S10-Oc50 (รูปที่ 4.1 (ก)) และ CS0.5-Oc50/SR (รูปที่ 4.2 (ก)) จะพบว่า CS0.5-Oc50/SR การไม่มีสารลดแรงตึงผิวทำให้บริเวณชั้นล่างมีลักษณะเป็นสารแขวนลอยสีขาวขุ่นจากโคโตซานที่มีสีแดงของสีย้อมผสมอยู่ เมื่อที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว SDS ในตัวอย่าง Cap0.5-S10-Oc50 จะเห็นว่าส่วนของสารแขวนลอยสีขาวขุ่นในของเหลวชั้นล่างหายไปอยู่รวมกับส่วนบนกลายเป็นนาโนแคปซูลเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง CS1.5-Oc50/SR (รูปที่ 4.2 (ข)) ที่พบว่ามีส่วนของโคโตซานที่แยกชั้นอยู่ด้านล่างที่มีสีออกเหลือง เนื่องจากมีโคโตซานที่เข้มข้นสูง เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว SDS ทำให้ส่วนของโคโตซานเข้าไปก่อตัวเป็นนาโนแคปซูล จึงทำให้ตัวอย่าง Cap1.5-S10-Oc50 และ Cap1.5-S30-Oc50 (รูปที่ 4.1(ค)) มีของเหลวชั้นล่างเป็นสารละลายสีเหลืองใส



รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของสารผสมระหว่าง n-Oc ละลายสีย้อมและสารละลายโคโตซานเข้มข้น (ก) 0.5 %w/v และ (ข) 1.5 %w/v

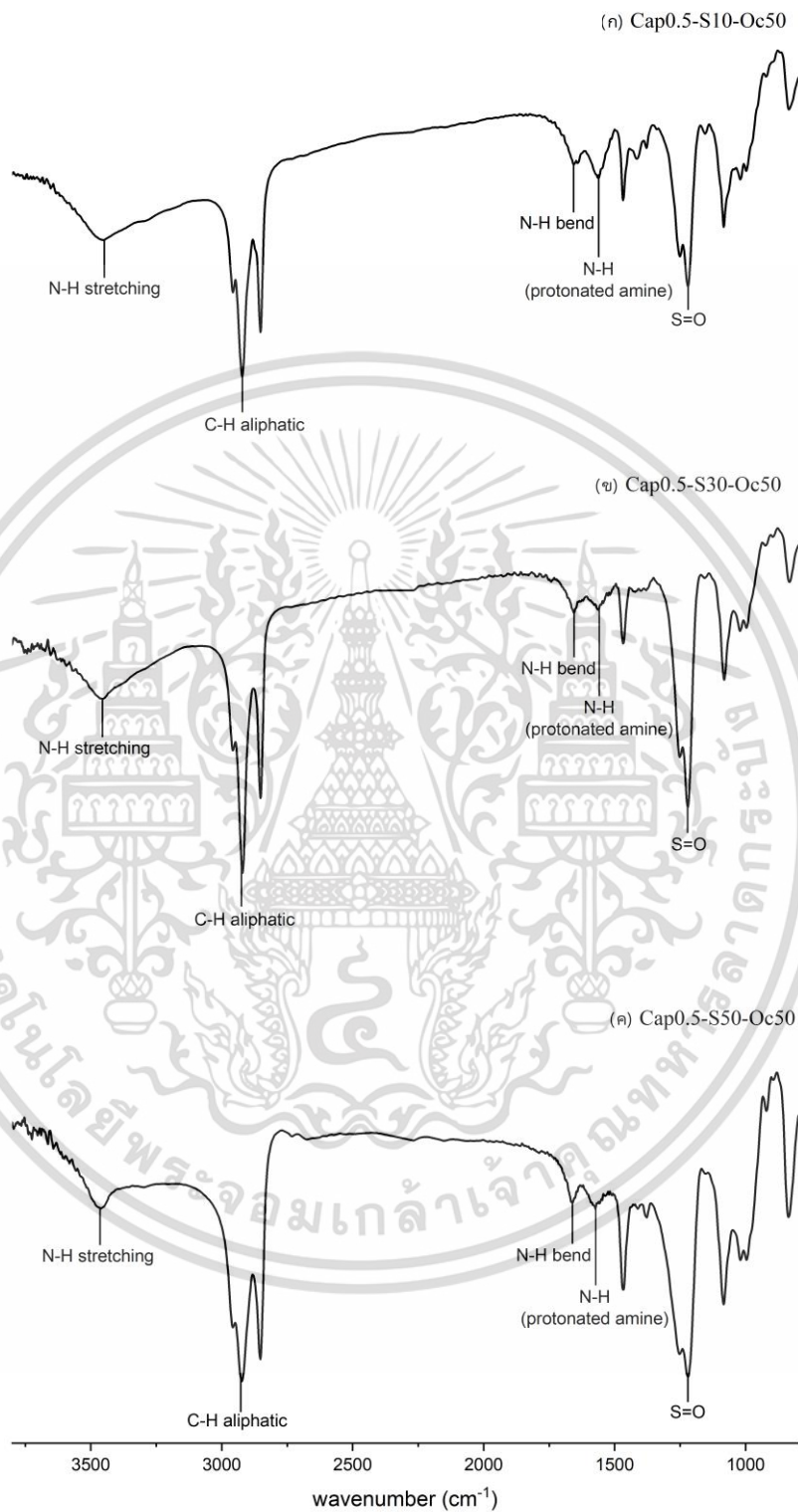
4.1.2 โครงสร้างทางเคมีและหมู่ฟังก์ชันสำคัญ

เมื่อนำสารตั้งต้นและนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc มาศึกษาโครงสร้างทางเคมีและหมู่ฟังก์ชันสำคัญ ด้วยเทคนิค FT-IR ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 ถึง 4.6



รูปที่ 4.3 สเปกตร้า FT-IR ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบนาโนแคปซูล
ไคโตซานบรรจุ n-Oc (ก) Protonated CS และ (ข) ไมเซลล์ของ Oc-SDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

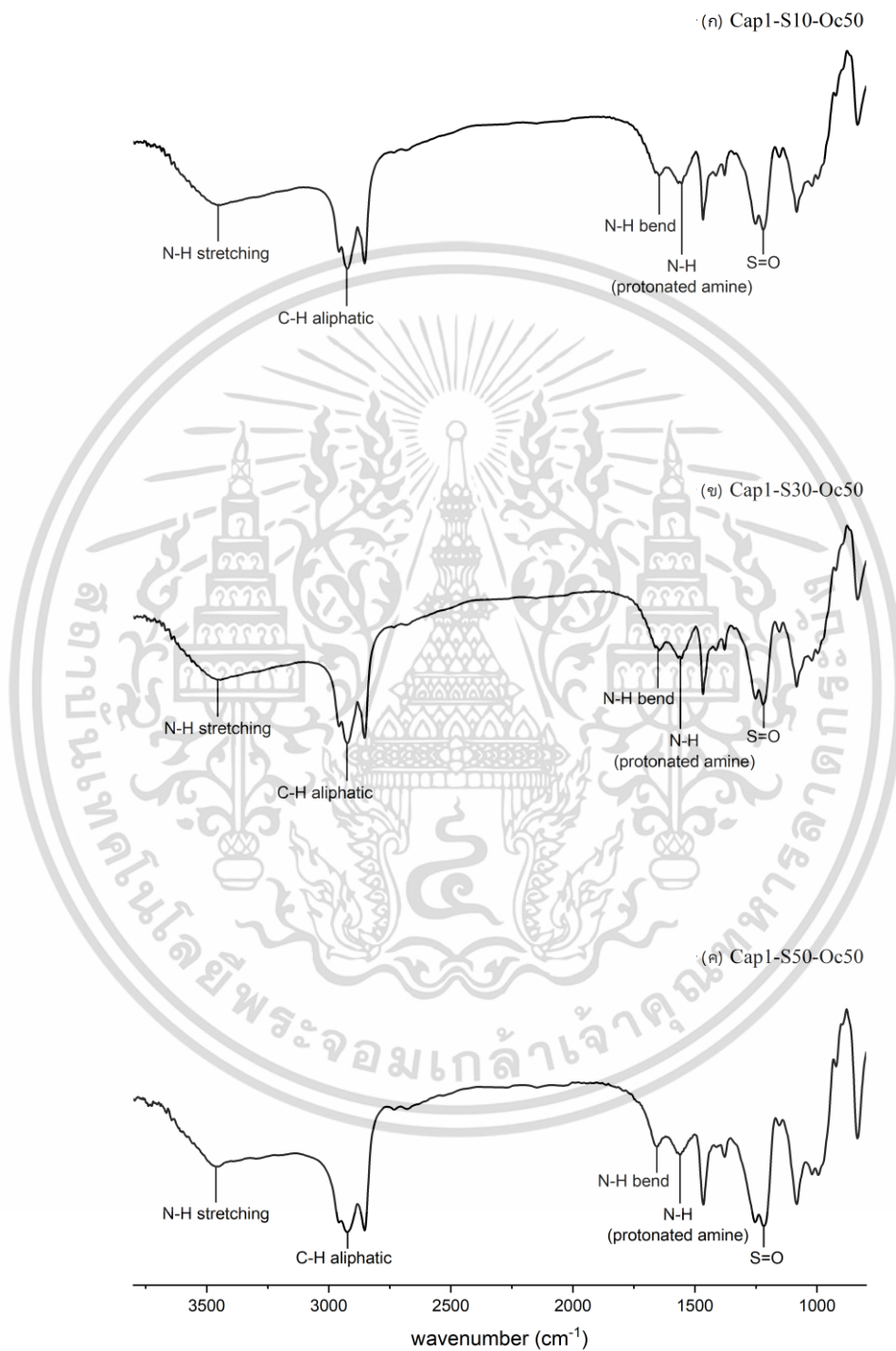


รูปที่ 4.4 สเปกตร้า FT-IR ของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมโดยใช้โคโตซานเข้มข้น

0.5 %w/v และ SDS เข้มข้น 10 30 และ 50 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

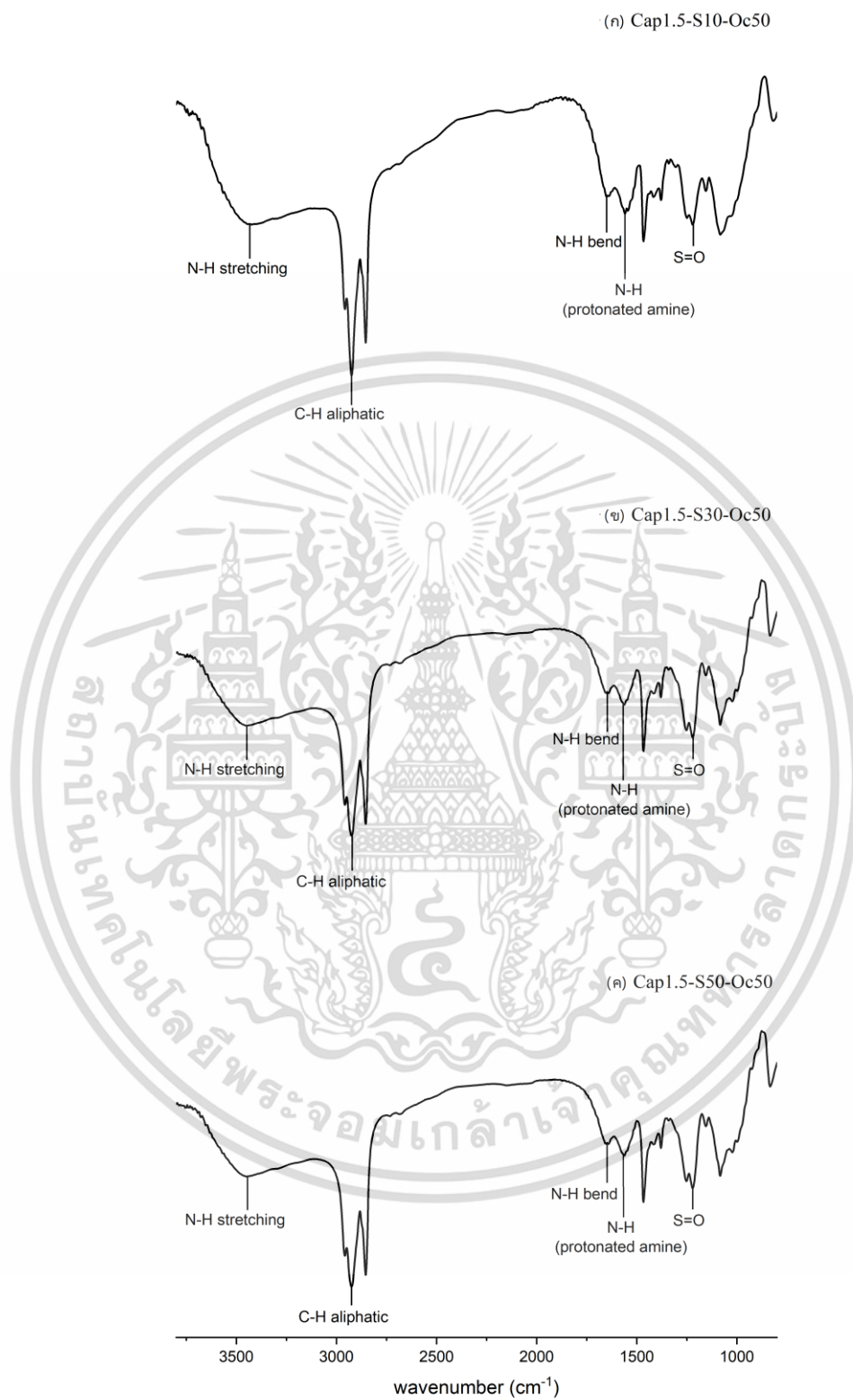
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 สเปกตรัม FT-IR ของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมโดยใช้โคโตซานเข้มข้น

1 %w/v และ SDS เข้มข้น 10 30 และ 50 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สเปกตรัม FT-IR ของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมโดยใช้โคโตซานเข้มข้น

1.5 %w/v SDS เข้มข้น SDS 10 30 และ 50 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งเลขคลื่นที่สำคัญของสารตั้งต้นไมเซลล์ Oc-SDS และนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมในสภาวะต่างๆ

ชื่อตัวอย่าง	เลขคลื่น (cm ⁻¹)				
	C-H aliphatic	S=O	N-H stretching	N-H bending	N-H Protonated amine
Oc-SDS	2920.72	1217.08	-	-	-
Protonate CS	-	-	3433.29	1654.92	1544.63
Cap0.5-S10-Oc50	2924.09	1220.08	3450.65	1648.78	1560.41
Cap0.5-S30-Oc50	2922.16	1220.94	3454.50	1646.43	1562.34
Cap0.5-S50-Oc50	2924.03	1222.58	3456.43	1640.71	1573.91
Cap1-S10-Oc50	2924.08	1219.01	3456.43	1645.28	1556.55
Cap1-S30-Oc50	2922.16	1220.94	3454.51	1647.21	1554.62
Cap1-S50-O50	2926.01	1219.07	3454.62	1646.86	1558.48
Cap1.5-S10-O50	2924.08	1220.48	3442.93	1649.14	1556.67
Cap1.5-S30-Oc50	2924.08	1220.83	3448.79	1643.35	1564.27
Cap1.5-S50-Oc50	2926.01	1222.86	3450.65	1641.62	1560.41

จากรูปที่ 4.4 พบว่าสเปกตรัม FT-IR ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ปรากฏพีกที่แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันสำคัญของสารตั้งต้น โดยสเปกตรัมของ n-Oc ซึ่งเป็นสารอินทรีย์จะพบ C-H aliphatic ที่เลขคลื่น 2920.72 cm⁻¹ และ SDS ปรากฏพีกของหมู่ซัลโฟเนต S=O ที่เลขคลื่น 1217.08 cm⁻¹ สำหรับ FTIR สเปกตรัมของโคโตซานที่ละลายในกรดอะซิติกสังเกตเห็นพีกของหมู่เอมีน โดยที่เลขคลื่น 3433.29 cm⁻¹ ปรากฏพีก N-H stretching และที่เลขคลื่น 1654.92 และ 1544.63 cm⁻¹ ปรากฏพีก N-H bending ของเอมีนในโมเลกุลของโคโตซานจากการถูกโปรโตเนต

จากรูปที่ 4.4 – 4.6 และตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่านาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมได้ในสภาวะที่ใช้ความเข้มข้นของโคซานและ SDS แตกต่างกัน พบว่า สันนิษฐานว่าการก่อตัวเป็นนาโนแคปซูลทำให้หมู่โปรโตเนตเอมีนของโคโตซานที่ปรากฏพีก N-H stretching และ N-H จากการถูกโปรโตเนต มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเลขคลื่น โดยหมู่ N-H stretching และ N-H จากการถูกโปรโตเนต ได้เกิดที่ตำแหน่งสูงกว่าหมู่เอมีนของโคโตซานที่เป็นสารตั้งต้น (รูปที่ 4.3) ในขณะที่หมู่ N-H bending ของโคโตซานเริ่มต้น (รูปที่ 4.3) ได้เกิดที่ตำแหน่งสูงกว่าหมู่เอมีนของโคโตซานที่เป็น

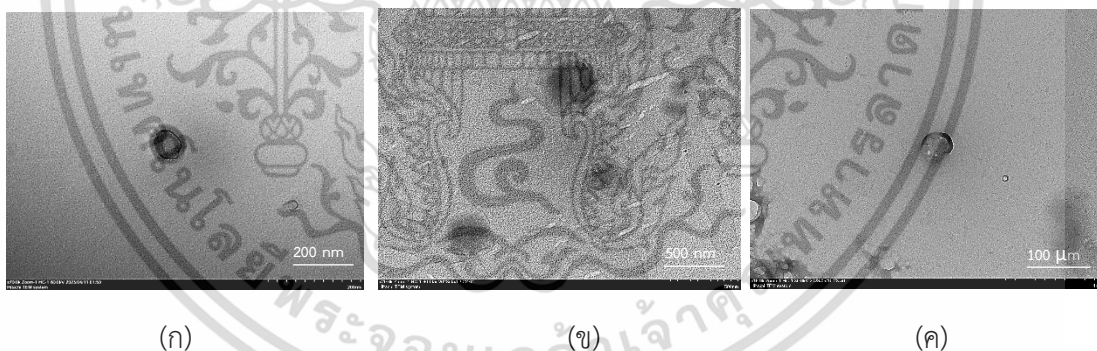
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เผยแพร่ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของนาโนแคปซูล นอกจากนี้ หมู่ซัลโฟเนตของ SDS จึงส่งผลให้ฟีกของ S=O มีการเลื่อนตำแหน่งไปยังเลขคลื่นที่ต่างไปจากสารตั้งต้น SDS (รูปที่ 4.4)

4.1.3 สันฐานวิทยาของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc

เมื่อนำนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจวิเคราะห์โดย Transmission Electron microscope (TEM) ได้ผล ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า นาโนแคปซูลมีรูปร่างค่อนข้างกลม ประกอบด้วยโครงสร้างของแกนกลาง (Core) n-Oc อยู่ด้านในถูกห่อหุ้มด้วยชั้นเปลือกที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง SDS กับโปรตีนโคโตซานซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นสีเข้มล้อมอยู่ด้านนอก

จากรูป 4.7 (ก) จะเห็นได้ว่า Cap0.5-S10-Oc50 มีลักษณะของชั้นเปลือกที่ค่อนข้างบางและพบโครงสร้างของแกนกลางจาก n-Oc อย่างเห็นได้ชัด เป็นผลจากการเตรียมโดยใช้โคโตซานความเข้มข้นต่ำ เมื่อวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคจากภาพถ่าย TEM พบว่า นาโนแคปซูล Cap0.5-S10-Oc50 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคประมาณ 80 nm เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.7 (ข) และ (ค) จะพบว่า Cap1-S10-Oc50 และ Cap1.5-S10-Oc50 มีโครงสร้างบริเวณชั้นเปลือกที่ห่อหุ้ม n-Oc ค่อนข้างหนา เนื่องจากเตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชั้นเปลือกมีความหนาเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้ จากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค พบว่า Cap1-S10-Oc50 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ 400 nm เช่นเดียวกับนาโนแคปซูล Cap1.5-S10-Oc50 พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ 100 nm อย่างไรก็ตาม ตัวอย่าง Cap1.5-S10-Oc50 อนุภาคที่ได้ไม่แสดงลักษณะเป็นแคปซูลที่ชัดเจน อนุภาคดังกล่าวอาจเป็นอนุภาคของโคโตซาน



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย TEM micrographs ของอนุภาคนาโนแคปซูล (ก) Cap0.5-S10-Oc50 (ข) Cap1-S10-Oc50 และ (ค) Cap1.5-S10-Oc50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

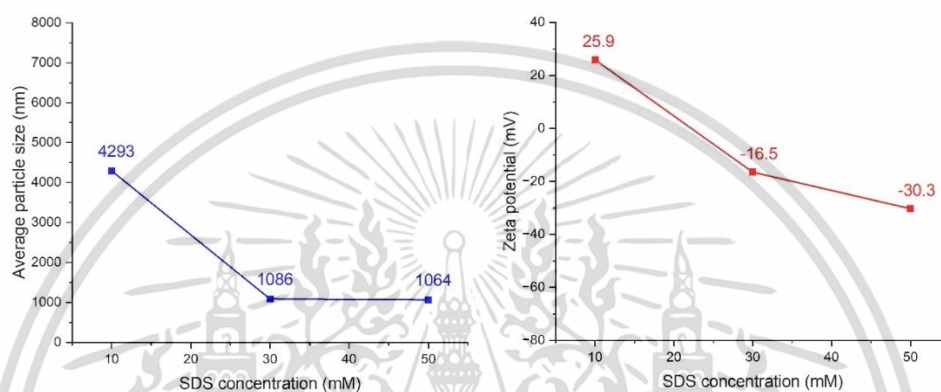
4.1.4 ผลของความเข้มข้นของ SDS ต่อนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc (สถานะที่ 1)

ก. ขนาดอนุภาคและศักย์ซีต้า

- สถานะที่ 1 เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่ 10 30 และ 50 mM

ก. ขนาดอนุภาคและค่าศักย์ซีต้า

ขนาดอนุภาคและศักย์ซีต้าบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมด้วยสถานะที่ 1 โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ SDS

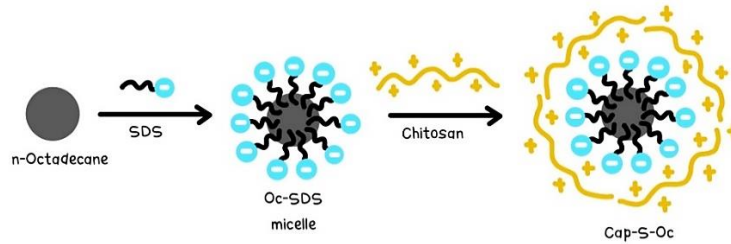


รูปที่ 4.8 ขนาดและศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลเตรียมในสถานะที่ 1 โดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่ 10 30 และ 50 mM

รูปที่ 4.8 แสดงขนาดและศักย์ซีต้าบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมได้จากสถานะที่ 1 ซึ่งใน SDS เข้มข้นแตกต่างกัน พบว่าขนาดลดลงจาก 4293 nm เมื่อใช้ SDS เข้มข้น 10 mM เป็น 1064 nm เมื่อเพิ่มความเข้มข้น SDS เป็น 50 mM ในขณะที่ค่าศักย์ซีต้ามีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าที่เป็น (+) 25.9 mV เป็นค่า (-) 16.5 และ (-) 30.3 mV เมื่อเพิ่มความเข้มข้น SDS จาก 10 mM เป็น 30 และ 50 mM ตามลำดับ จากค่าศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบมากขึ้นนี้ สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของประจุลบของ SDS ที่มากขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการก่อตัวของไมเซลล์ Oc-SDS ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ไมเซลล์มีขนาดเล็กลง เนื่องจากปริมาณ n-Oc มีค่าคงที่ ดังนั้น ขนาดอนุภาคนาโนแคปซูลจึงมีขนาดเล็กลงตามผลที่ได้

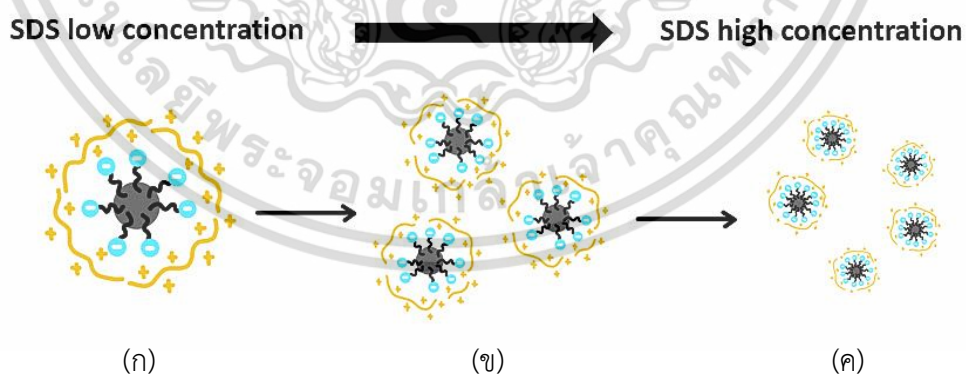
เมื่อนำผลของขนาดเฉลี่ยและค่าศักย์ซีต้าที่กล่าวข้างต้น มาเขียนแผนภาพกลไกการก่อตัวของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc (Cap-S-Oc) ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 4.9 โดยในการเตรียมนาโนแคปซูล เมื่อทำการ Sonication ของผสมระหว่าง n-Oc กับ สารละลาย SDS ทำให้ n-Oc แยกออกเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็กระดับนาโนที่ห่อหุ้มด้วยโมเลกุลของ SDS ก่อตัวเป็นไมเซลล์ในลักษณะของ oil in water ที่มีพื้นผิวของประจุลบจากหมู่ฟังก์ชันซัลเฟต เมื่อเติมสารละลายโคโตซานในกรด เอกสารนี้แอซิดตกลงในไมเซลล์ Oc-SDS ที่เตรียมได้ ประจุบวกจากหมู่ฟังก์ชันเอมีนของโคโตซานที่จะเกิดอันตรกิริยาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับไมเซลล์ประจุลบ ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของโมเลกุลโคโตซานเป็นชั้นเปลือกที่ห่อหุ้มไมเซลล์ Oc-SDS เกิดเป็นนาโนแคปซูล Cap-S-Oc



รูปที่ 4.9 ภาพแสดงแบบจำลองการก่อตัวของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc

เมื่อพิจารณาถึงผลของความเข้มข้นของ SDS ที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้ SDS ความเข้มข้นต่ำ จึงมีจำนวนโมเลกุลของ SDS ในปริมาณน้อย ดังนั้น ขนาดไมเซลล์ของ Oc-SDS ที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่ เนื่องจากมี SDS ในปริมาณจำกัด เมื่อไมเซลล์ถูกห่อหุ้มด้วยโคโตซานที่ทำหน้าที่เป็นชั้นเปลือก ไมเซลล์ที่มีขนาดใหญ่จึงต้องถูกล้อมด้วยโมเลกุลของโคโตซานในปริมาณมากเพื่อคลุมประจุก่อตัวเป็นชั้นเปลือก ดังนั้น อนุภาคจึงมีขนาดใหญ่และมีศักย์ซีต้าเป็นบวก ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) ตรงกันข้ามเมื่อความเข้มข้นของ SDS เพิ่มขึ้นจะพบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยและศักย์ซีต้าลดลงอย่างมาก เนื่องจากเมื่อปริมาณ SDS เพิ่มขึ้นจะทำให้ n-Oc เกิดการแตกตัวเป็นหยดขนาดเล็ก จึงเกิดไมเซลล์ในจำนวนมากขึ้น ดังนั้น โมเลกุลของโคโตซานที่มีปริมาณคงที่จึงต้องกระจายตัวเพื่อไปห่อหุ้มไมเซลล์ Oc-SDS ขนาดอนุภาคเฉลี่ยจึงมีค่าลดลง และด้วยปริมาณโคโตซานที่จำกัด สันนิษฐานว่า ชั้นโมเลกุลโคโตซานที่ห่อหุ้มไมเซลล์จะบางลง เป็นผลให้ศักย์ซีต้าเป็นลบมากขึ้น ดังแผนผังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 (ข) และ (ค)



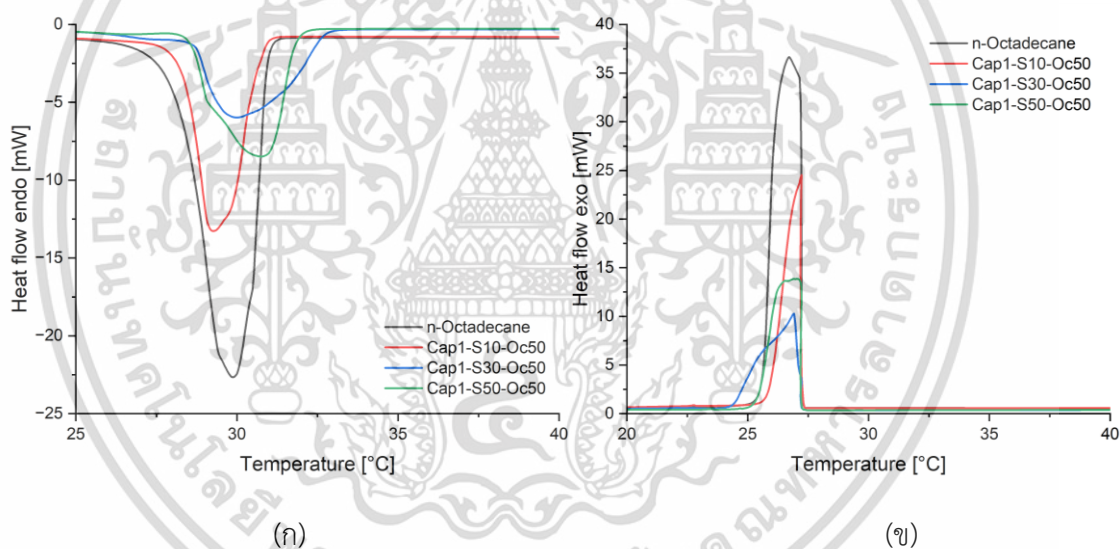
รูปที่ 4.10 ภาพแสดงแบบจำลองของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc โดยใช้ความเข้มข้น SDS ที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. สมบัติทางความร้อน

รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโคซานบรรจุ n-Oc กับสารตั้งต้น n-Oc พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิของการตกผลึก (T_c) ของ n-Oc อยู่ที่อุณหภูมิ 29 °C และ 26 °C ตามลำดับ

ในรูปที่ 4.11 (ก) สำหรับ n-Oc ที่บรรจุอยู่ในนาโนแคปซูลจะมีอุณหภูมิเริ่มหลอมและค่า T_m สูงกว่าสารตั้งต้น n-Oc ทั้งนี้ สันนิษฐานว่าเกิดจากผลของเปลือกหุ้มที่ทำให้การหลอมเหลวเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณา T_c ในรูปที่ 4.11 (ข) จะมีอุณหภูมิก่อนการตกผลึกที่อยู่ในช่วงเดียวกับสารตั้งต้น นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (ΔH_m) และค่าความร้อนแฝงของการตกผลึก (ΔH_c) ของ n-Oc พบว่า n-OC ที่ไม่ถูกห่อหุ้มด้วยชั้นเปลือกแสดงปริมาณความร้อนในการหลอมเหลวและการเกิดผลึกมีค่าประมาณ 255 และ 257 J/g ตามลำดับ แต่เมื่อเตรียมเป็นนาโนแคปซูลค่า ΔH_m และ ΔH_c จะมีค่าต่ำกว่าสารตั้งต้น เพราะผลจากการที่มีเปลือกโคโคซานและ SDS ห่อหุ้มอยู่



รูปที่ 4.11 DSC Thermogram ของ n-OC และนาโนแคปซูลเตรียมในสถานะที่ 1 โดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่ 10 30 และ 50 mM

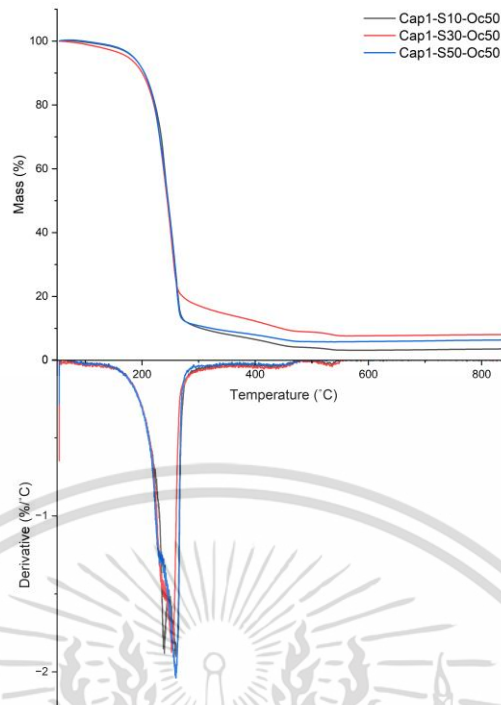
เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้น SDS ต่อสมบัติทางความร้อนของ n-OC ในกรณีที่เตรียมนาโนแคปซูลในสถานะที่ 1 โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้น SDS พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 10 เป็น 30 และ 50 mM ค่า T_m และ T_c อยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 29 – 30 °C และ 26 – 27 °C ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า T_m ของสารตั้งต้น n-Oc จึงสามารถพิสูจน์ได้ว่ามี n-OC ถูกบรรจุ

อยู่ในนาโนแคปซูล
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) Cap1-S10-Oc50 มีค่า T_m และ T_c ประมาณ 29 °C และ 27 °C ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับสารตั้งต้น n-Oc เมื่อพิจารณาถึงค่าความร้อนแฝง ΔH_m และ ΔH_c ของ n-Oc ใน Cap1-S10-Oc50 พบว่ามีค่าสูงถึง 155.15 และ 151.97 J/g ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการห่อหุ้มถึง 59.91 % และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ SDS พบว่าค่า T_m และ T_c ยังคงมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่าความร้อนแฝง ΔH_m และ ΔH_c ลดลง โดย Cap1-S30-Oc50 มีค่าความร้อนแฝงอยู่ที่ 124.30 และ 110.89 J/g และ Cap1-S50-Oc50 มีค่าความร้อนแฝงอยู่ที่ 138.86 และ 136.14 J/g ทั้งนี้ยังส่งผลต่อประสิทธิภาพการห่อหุ้มนาโนแคปซูลลดลงเช่นเดียวกัน โดยสันนิษฐานว่า เมื่อมีความเข้มข้น SDS ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไมเซลล์ Oc-SDS เพิ่มขึ้น ปฏิกริยาเชื่อมโยงระหว่างหมู่เอมีนของโคโดซานกับหมู่ซัลโฟเนตของ SDS ที่มีปริมาณมากทำให้เกิดไมเซลล์ Oc-SDS ที่มากเกินไป ส่งผลให้ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวและประสิทธิภาพการห่อหุ้มลดลง

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโดซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค TGA แสดงดังรูปที่ 4.12 การสลายตัวของนาโนแคปซูลโคโดซานบรรจุ n-Oc ถูกเตรียมด้วยสภาวะที่ 1 พบว่าการสลายตัวของนาโนแคปซูลโคโดซานบรรจุ n-Oc อยู่ในช่วง 100-600 °C ซึ่งนาโนแคปซูลที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ต่างกันมีพฤติกรรมการสลายตัวในลักษณะเดียวกันทั้ง 3 สภาวะ ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของนาโนแคปซูลทั้งในส่วนของ n-Oc SDS และโคโดซาน โดยเริ่มมีการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 190 °C

ทั้งนี้ Cap1-S10-Oc50 มีน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วและมีปริมาณสารที่เหลือน้อยกว่า 3.29% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่า n-Oc เริ่มต้นสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 191.33 °C ในขณะที่ตัวอย่าง Cap1-S30-Oc50 และ Cap1-S50-Oc50 เริ่มต้นมีการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 208.85 °C และ 206.08 °C ตามลำดับ ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นการสลายตัวของสายโซ่พาราฟินของ n-Oc



รูปที่ 4.12 TGA thermogram แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 1 โดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่ 10 30 และ 50 mM

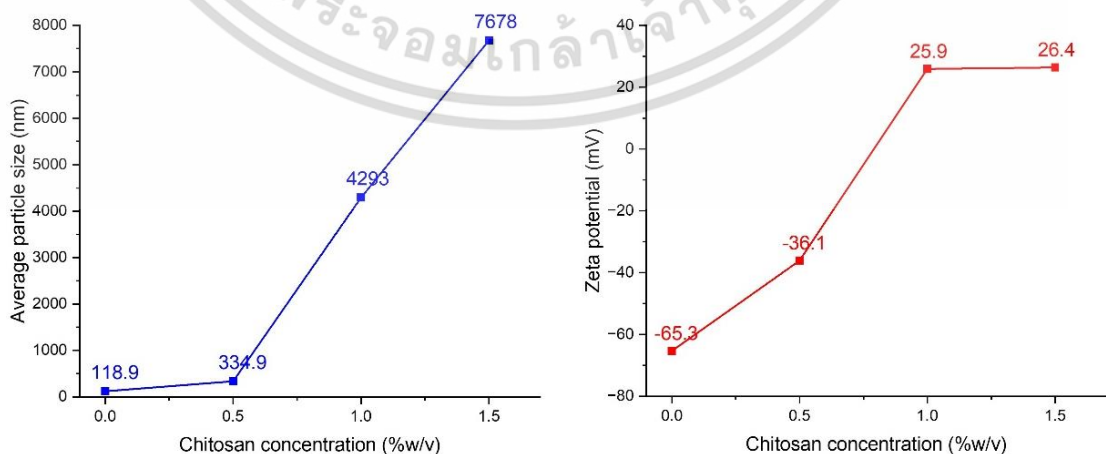
4.1.5 ผลของความเข้มข้นของไคโตซานต่อนานาแคปซูลไคโตซานบรรจุ n-Oc (สภาวะที่ 2)

ก. ขนาดอนุภาคและศักย์ซีต้า

- สภาวะที่ 2 เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของไคโตซานที่ 0.5 1 และ 1.5 %w/v

ก. ขนาดอนุภาคและค่าศักย์ซีต้า

ขนาดอนุภาคและศักย์ซีต้าบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคปซูลไคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมด้วยสภาวะที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของไคโตซาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

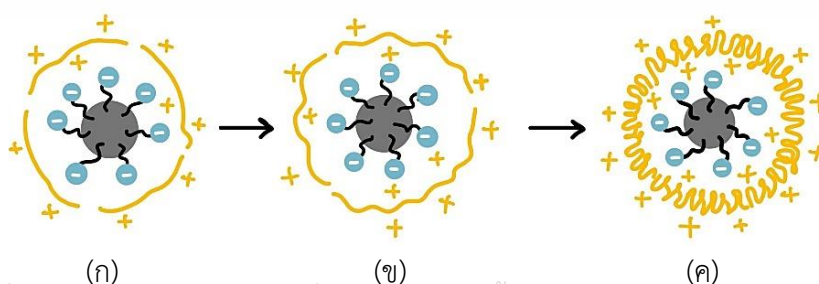
รูปที่ 4.13 ขนาดและศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของไคโตซานที่ 0.5 1 และ 1.5 %w/v

รูปที่ 4.13 แสดงขนาดอนุภาคและศักย์ซีต้าของไมเซลล์ Oc-SDS และนาโนแคปซูลที่เตรียมได้จากสภาวะที่ 2 พบว่าขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 118.9 ถึง 7678 nm และศักย์ซีต้าอยู่ในช่วง (-) 65.3 ถึง (+) 26.4 mV ทั้งนี้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและศักย์ซีต้าของไมเซลล์ Oc-SDS อยู่ที่ประมาณ 118.9 nm และ (-) 65.3 mV ตามลำดับ เมื่อมีการสร้างชั้นเปลือกโดยใช้ความเข้มข้นของไคโตซานที่ 0.5 %w/v จะเห็นได้ว่าศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap0.5-S10-Oc50 เปลี่ยนเป็น (-) 36.1 mV เนื่องจากอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างไมเซลล์ของ n-Oc ผสมกับ SDS ที่มีประจุลบและสายโซ่จากไคโตซานที่มีประจุบวก ส่งผลให้มีการชดเชยประจุบางส่วน ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะเดียวกันขนาดของอนุภาคของนาโนแคปซูลเพิ่มขึ้นจากขนาดของไมเซลล์ Oc-SDS

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไคโตซานที่ใช้ในการสร้างชั้นเปลือกจะส่งผลต่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยและศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลไคโตซานบรรจุ n-Oc ให้มีค่าเพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่ามีการก่อตัวของเปลือกไคโตซานที่หนาขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไคโตซานให้สูงขึ้น โดยที่มีความเข้มข้นของ SDS คงที่ สันนิษฐานว่าไมเซลล์ Oc-SDS มีขนาดเท่าเดิม แต่ลักษณะโครงสร้างของสายโซ่ไคโตซานจะเปลี่ยนไป ดังแสดงในแผนภาพจำลองในรูปที่ 4.14 เมื่อใช้ความเข้มข้นของไคโตซานที่ต่ำ แสดงดังรูปที่ 4.14 (ก) สันนิษฐานว่าสายโซ่ไคโตซานจะมีลักษณะของที่เหยียดออก โดยแรงผลักไฟฟ้าสถิตภายในสายโซ่เดียวกันของไคโตซาน ดังนั้นโมเลกุลของไคโตซานจะยึดตัวและเกิดอันตรกิริยากับประจุลบของ SDS ที่ผิวของไมเซลล์ Oc-SDS ไปตามพื้นผิวที่สามารถดูดซับได้บนอนุภาคนาโน ทำให้การก่อตัวของเปลือกไคโตซานที่ค่อนข้างบางล้อมรอบไมเซลล์

ในขณะที่เมื่อใช้ความเข้มข้นของไคโตซานที่เพิ่มขึ้นดังรูป 4.14 (ข) และ (ค) สันนิษฐานว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสายโซ่โมเลกุลไคโตซานที่ล้อมรอบบนไมเซลล์ Oc-SDS โดยโมเลกุลของไคโตซานเกิดการขดตัวและมีแนวโน้มในการดูดซับบนพื้นผิวในปริมาณมากขึ้น ทำให้ชั้นเปลือกหนาขึ้น ขนาดอนุภาคจึงเพิ่มขึ้น พร้อมกับศักย์ซีต้ามีค่าเป็น (+) มากขึ้น

Chitosan low concentration \longrightarrow Chitosan high concentration



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

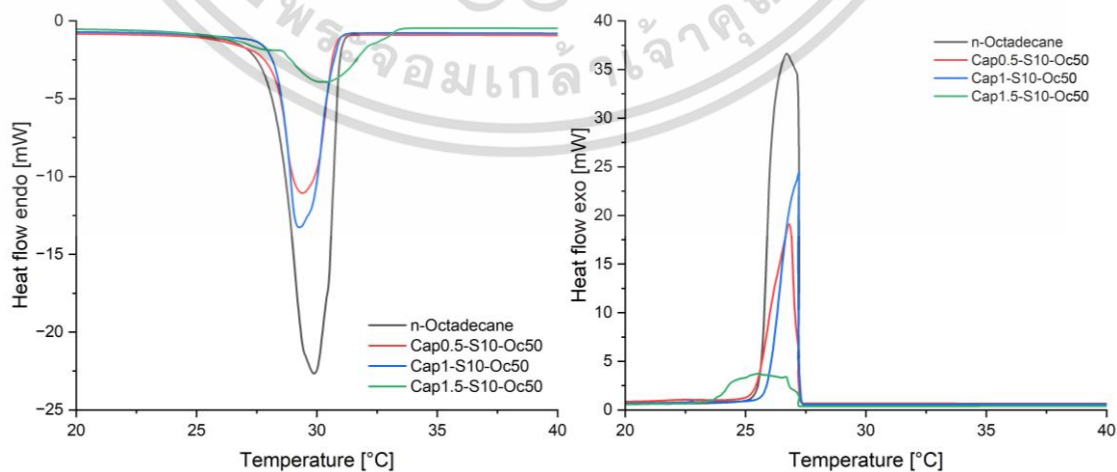
รูปที่ 4.14 ภาพแสดงแบบจำลองแผนผังของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc โดยใช้ความเข้มข้นโคโตซานที่แตกต่างกัน

ข. สมบัติทางความร้อน

รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมในสภาวะที่ 2 เปรียบเทียบกับสารตั้งต้น n-Oc พบว่า อุณหภูมิเริ่มหลอมและค่า T_m สูงกว่าสารตั้งต้น n-Oc อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 27 - 30 °C ขณะที่อุณหภูมิตกผลึกและค่า T_c อยู่ในช่วง 25 - 27 °C

ในรูปที่ 4.15 Cap0.5-S10-Oc50 มีค่า T_m และ T_c ใกล้เคียงกับสารตั้งต้น n-Oc ที่ 28 °C และ 29 °C ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิเริ่มหลอมสูงกว่าสารตั้งต้น n-Oc เล็กน้อย ทั้งนี้เป็นผลมาจากมีชั้นเปลือกห่อหุ้ม n-Oc ดังที่ได้กล่าวข้างต้น เมื่อพิจารณาค่าความร้อนแฝง ΔH_m และ ΔH_c พบว่า Cap0.5-S10-Oc50 แสดงปริมาณความร้อนในการหลอมเหลวและการตกผลึกมีค่าประมาณ 93 และ 83 J/g ตามลำดับ จากค่าดังกล่าวสามารถคำนวณถึงประสิทธิภาพการห่อหุ้มมีค่าประมาณ 34.46% ผลดังกล่าวน่าจะเนื่องมาจากการใช้โคโตซานที่ความเข้มข้นต่ำ จึงมีปริมาณโคโตซานในการสร้างชั้นเปลือกน้อย ในขณะที่ Cap1-S10-Oc50 และ Cap1.5-S10-Oc50 มีอุณหภูมิเริ่มหลอมและ T_m ที่สูงกว่าสารตั้งต้น n-Oc อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มความเข้มข้นโคโตซาน ทำให้เกิดการก่อตัวของโมเลกุลโคโตซานเป็นชั้นเปลือกที่หนา จึงทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงในการหลอม n-Oc เมื่อพิจารณาค่าความร้อนแฝง ΔH_m และ ΔH_c ของ Cap1-S10-Oc50 มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับ Cap0.5-S10-Oc50 โดยมี ΔH_m และ ΔH_c อยู่ที่ 155 และ 151 J/g ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการห่อหุ้มเพิ่มขึ้นเป็น 59.91%

อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นโคโตซานเป็น 1.5%w/v พบว่าค่าความร้อนแฝง ΔH_m และ ΔH_c พบว่ามีค่าลดลงจากเดิมประมาณ 110.70 และ 69.30 J/g ทำให้ประสิทธิภาพการห่อหุ้มลดลงเหลือเพียง 35.11% เป็นผลจากโคโตซานที่มีปริมาณมากเกินไป ประจุบวกของโคโตซานที่มีมากอาจดึง SDS ออกจากไมเซลล์ เป็นผลให้เกิดเป็นแคปซูลน้อยลง



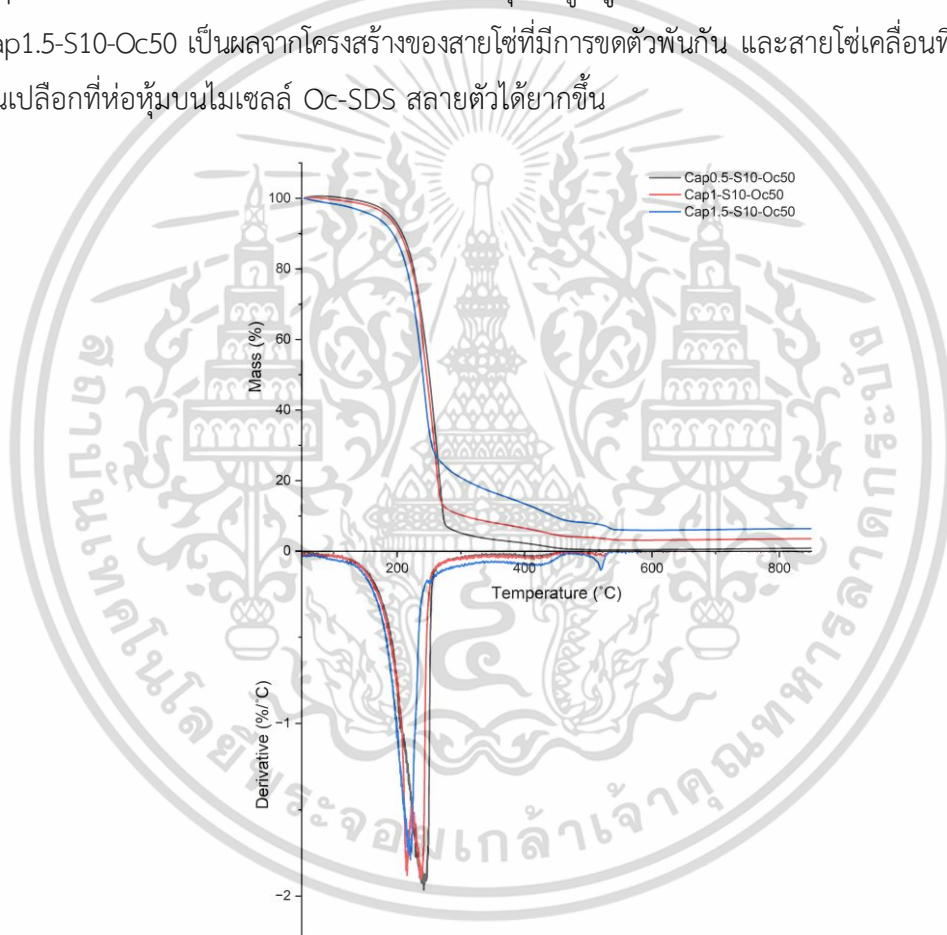
(ก)

(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 DSC Thermogram ของ n-OC และนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่ 0.5 1 และ 1.5 %w/v

รูปที่ 4.16 แสดง TGA thermogram การสลายตัวของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-OC ที่เตรียมด้วยสภาวะที่ 2 เพื่อดูสมบัติความเสถียรทางความร้อน จะเห็นได้ว่าการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 100-600 °C เนื่องจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของนาโนแคปซูล ซึ่งอุณหภูมิการสลายตัวของสารอินทรีย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของชั้นเปลือกโคโตซาน แม้ว่า Cap1.5-S10-O50 จะเริ่มเกิดการสลายตัวในช่วงต้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า Cap1-S10-Oc50 และ Cap0.5-S10-Oc50 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพบการสลายตัวครั้งที่สองในตัวอย่าง Cap1.5-S10-Oc50 เป็นผลจากโครงสร้างของสายโซ่ที่มีการขดตัวพันกัน และสายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก ทำให้ชั้นเปลือกที่ห่อหุ้มบนไมเซลล์ Oc-SDS สลายตัวได้ยากขึ้น



รูปที่ 4.16 TGA thermogram แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่ 0.5 1 และ 1.5 %w/v

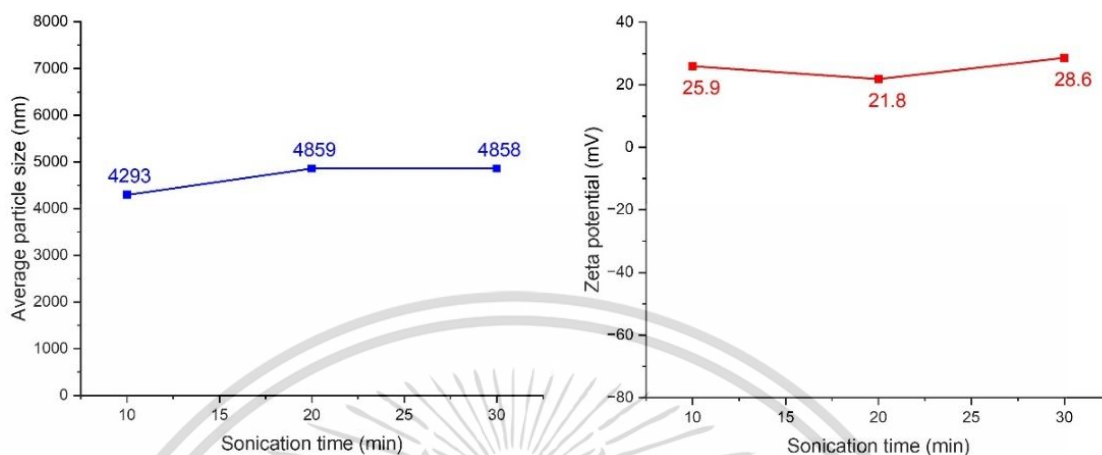
4.1.6 ผลของระยะเวลา Sonication นาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-OC (สภาวะที่ 3)

ก. ขนาดอนุภาคและศักย์ซีต้า

- สภาวะที่ 3 เตรียมโดยใช้เวลาในการ Sonication ที่ 10 20 และ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดอนุภาคและศักย์ซีต้าบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมด้วยสภาวะที่ 3 โดยปรับเปลี่ยนเวลาในการ Sonication



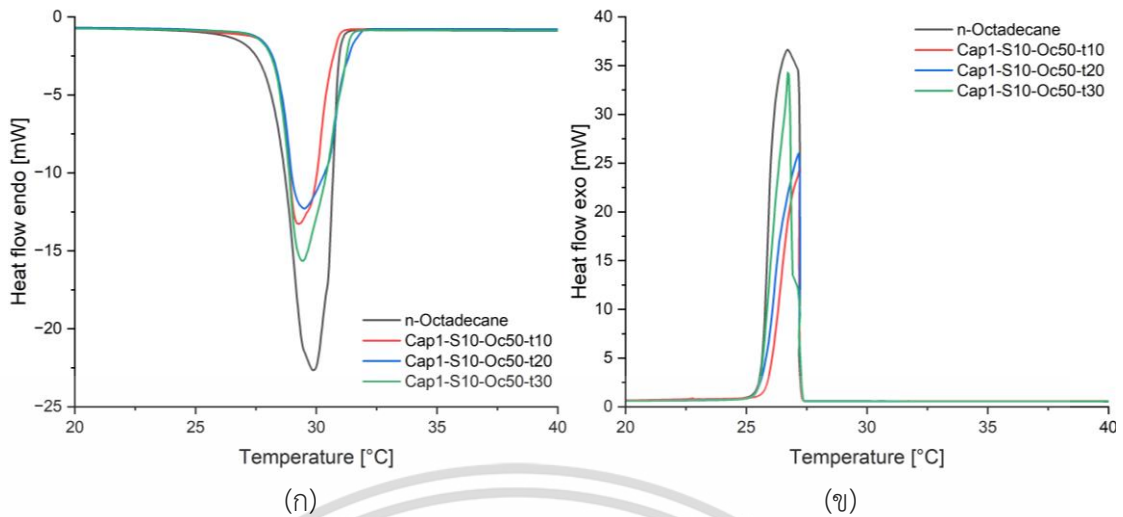
รูปที่ 4.17 ขนาดและศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 3 โดยใช้เวลา Sonication ที่ 10 20 และ 30 นาที

จากการเตรียมนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ในสภาวะที่ 3 ซึ่งใช้เวลาในการ Sonication ที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าการเพิ่มเวลาในการ Sonication ตั้งแต่ 10 ถึง 30 นาที ไม่มีอิทธิพลต่อขนาดอนุภาคและศักย์ซีต้า โดยนาโนแคปซูลที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยและศักย์ซีต้าอยู่ในช่วงประมาณ 4293 ถึง 4858 และ 21.8 ถึง 28.6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

ข. สมบัติทางความร้อน

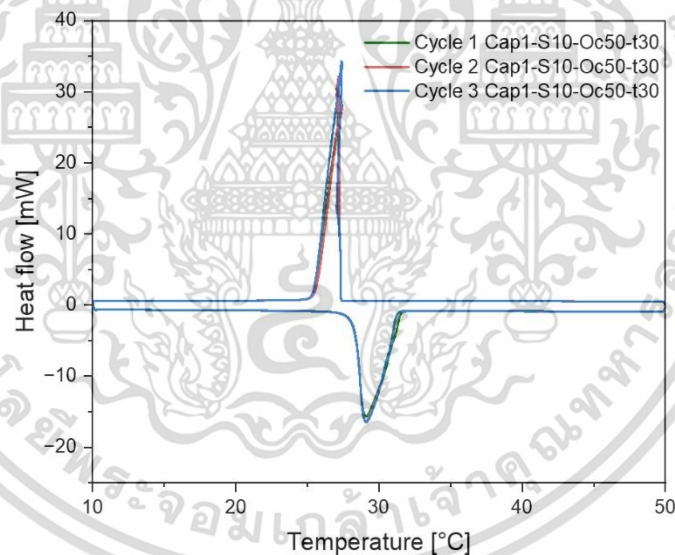
รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของเวลาที่ใช้ในการ Sonication ที่เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่า T_m และ T_c มีค่าใกล้เคียงกับสารตั้งต้น n-Oc โดยมีค่าประมาณ $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิเริ่มหลอมของนาโนแคปซูลมีอุณหภูมิเริ่มหลอมต่ำกว่า n-Oc เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงค่าความร้อนแฝง ΔH_m พบว่าการเพิ่มระยะเวลาที่ 10 20 และ 30 นาที มีผลให้ค่าความร้อนแฝงสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงขึ้น โดย Cap1-S10-Oc50-t10 มีค่าความร้อนแฝงอยู่ที่ 155.15 J/g (คิดเป็นประสิทธิภาพการห่อหุ้ม 59.91%) เมื่อเปรียบเทียบกับ Cap1-S10-Oc50-t30 พบว่ามีค่า ΔH_m เพิ่มสูงถึง 205.79 J/g (คิดเป็นประสิทธิภาพการห่อหุ้ม 80.35%) ทั้งนี้ ในรูปที่ 4.18 (ข) เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของการตกผลึกอยู่ในช่วงเดียวกับสารตั้งต้น และจะเห็นได้ว่า Cap1-S10-Oc50-t30 มีค่าความร้อนแฝง ΔH_c 206.13 J/g ซึ่งใกล้เคียงกับสารตั้งต้นมากที่สุด สันนิษฐานว่าเกิดจากการเพิ่มเวลา Sonication ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของไมเซลล์ Oc-SDS และเป็นนาโนแคปซูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 DSC Thermogram ของ n-OC และนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 3 โดยใช้เวลา Sonication ที่ 10 20 และ 30 นาที

4.1.7 การทดสอบเสถียรภาพของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t30



รูปที่ 4.19 DSC Thermogram ของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t30 ภายใต้การให้ความร้อนและความเย็น 3 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ในสภาวะ Cap1-S10-Oc50-t30 ในแต่ละรอบของการให้ความร้อนและเย็น

ชื่อตัวอย่าง	รอบ	$T_{m, onset}$ (°C)	$T_{m, peak}$ (°C)	ΔH_m (J/g)	$T_{c, onset}$ (°C)	$T_{c, peak}$ (°C)	ΔH_c (J/g)
Cap1-S10- Oc50-t30	1	28.36	29.54	205.79	27.05	26.75	206.13
	2	28.36	29.50	205.93	27.10	26.88	207.72
	3	28.36	29.54	205.93	26.85	26.45	207.26

การพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc โดยการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของนาโนแคปซูลด้วยเทคนิค DSC โดยให้ความร้อนและการลดอุณหภูมิ สารตัวอย่างซ้ำ 3 รอบ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.19 และสรุปข้อมูลในตารางที่ 4.2

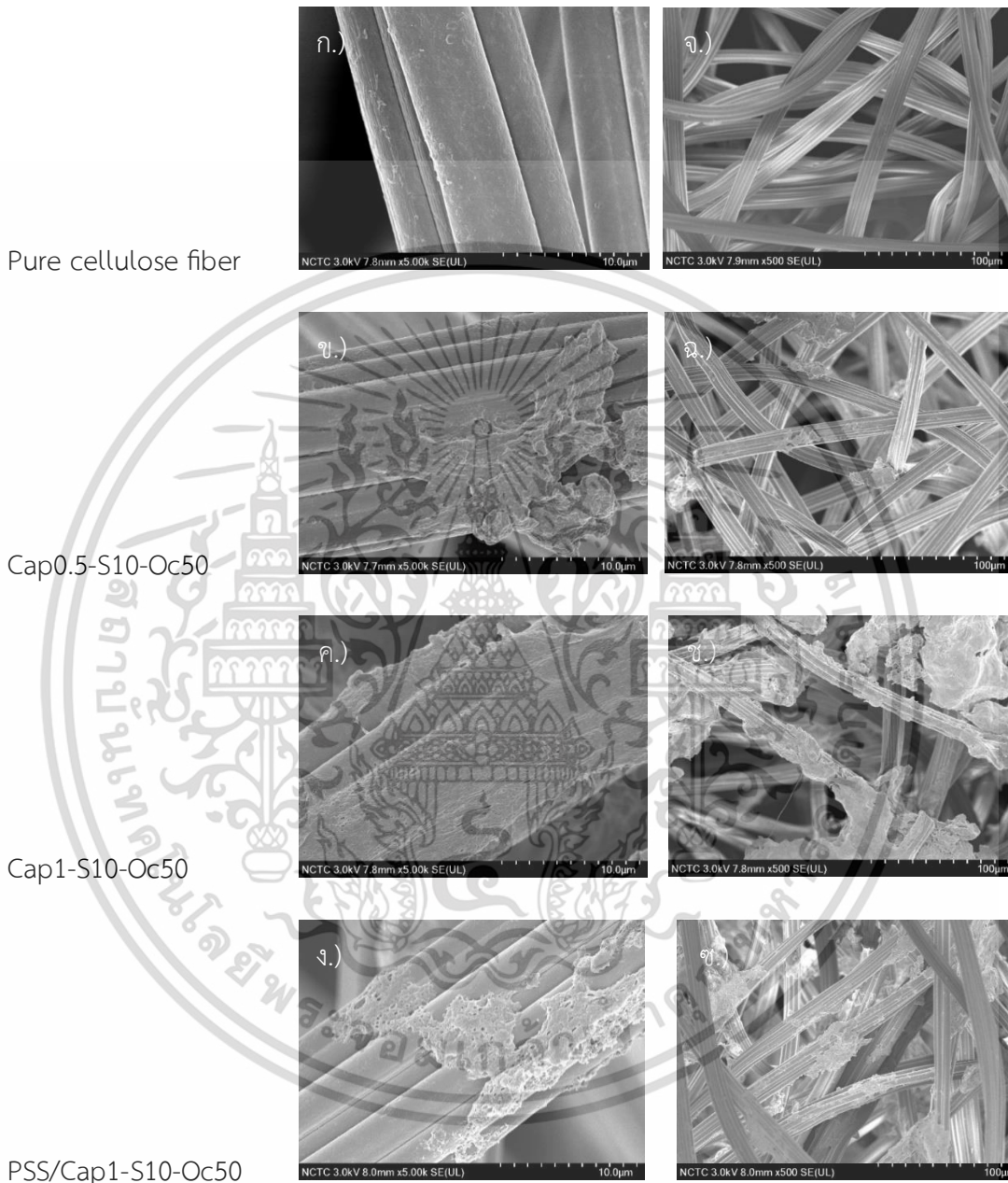
จากรูปที่ 4.19 พบว่า DSC Thermogram ทั้ง 3 รอบ แสดงพฤติกรรมการหลอมเหลว และการก่อผลึกของ n-Oc ภายใน Cap1-S10-Oc50-t30 ในลักษณะเดิม 3 รอบ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตได้จากอุณหภูมิเริ่มต้นหลอมเหลวและตกผลึก รวมถึงค่า T_m และ T_c เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดิมในช่วงอุณหภูมิ 29 °C และ 26 °C ตามลำดับ ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่า n-Oc ในนาโนแคปซูลสามารถหลอมเหลวและก่อผลึกได้ซ้ำหลายครั้ง แสดงว่าชั้นเปลือกโคโตซาน-SDS ของนาโนแคปซูลสามารถรักษาสมบัติทางความร้อนของ n-Oc ได้ และการมีเปลือกห่อหุ้มสามารถป้องกันการสูญเสีย n-Oc ในระหว่างการเปลี่ยนสถานะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 การตรึงนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc บนเส้นใยเซลลูโลส

4.2.1 สัณฐานวิทยาของเส้นใยเซลลูโลสตรึงด้วยนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc

กำลังขยาย 5000X

กำลังขยาย 500X



Pure cellulose fiber

Cap0.5-S10-Oc50

Cap1-S10-Oc50

PSS/Cap1-S10-Oc50

รูปที่ 4.20 ภาพ FE-SEM ที่กำลังขยาย 5000X และ 500X ของ (ก),(จ) เส้นใยเซลลูโลสที่ไม่มีการตรึงของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc (ข),(ฉ) เส้นใยเซลลูโลสที่มีการตรึงนาโนแคปซูล Cap0.5-S10-Oc50 (ค),(ช) เส้นใยเซลลูโลสที่มีการตรึงนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50 และ (ง), (ซ) เส้นใยเซลลูโลสที่มีการเคลือบ PSS/Cap1-S10-Oc50-t30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.20 แสดงภาพพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสเริ่มต้น และเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการตรึงนาโนแคปซูลไคโตซานบรรจุ n-Oc โดยในรูปที่ 4.20 (ก) และ (จ) แสดงพื้นผิวเส้นใยเซลลูโลสเริ่มต้นที่ไม่มีการตรึงด้วยนาโนแคปซูลไคโตซานบรรจุ n-Oc จะเห็นได้ว่าพื้นผิวเส้นใยมีความขรุขระเล็กน้อย แต่เมื่อเส้นใยเซลลูโลสที่ตรึงด้วยนาโนแคปซูล Cap0.5-S10-Oc50 และ Cap0-1-S10-Oc50 จะมีลักษณะพื้นผิวดังแสดงในภาพ 4.20 (ข), (ค), (ฉ) และ (ช) ตามลำดับ จะพบกลุ่มก้อนของสารเคลือบที่เกาะตัวบนเส้นใยเซลลูโลส สันนิษฐานว่าสารเคลือบดังกล่าวคือ กลุ่มก้อนของนาโนแคปซูล อย่างไรก็ตาม การเคลือบยังไม่สม่ำเสมอทั่วถึง

นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรึงนาโนแคปซูล ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer โดยใช้สารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์ PSS เคลือบผิวเส้นใยก่อนการตรึงด้วยนาโนแคปซูล (PSS/Cap1-S10-Oc50-t30) แสดงดังรูปที่ 4.20 (ง) และ (ซ) พบว่าลักษณะของการเคลือบคล้ายคลึงกับตัวอย่างที่ไม่ได้ตรึงด้วย PS

4.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพการรักษาระดับอุณหภูมิของเส้นใยเซลลูโลสตรึงนาโนแคปซูลไคโตซานบรรจุ n-Oc

(ก) เส้นใยเซลลูโลสตรึงนาโนแคปซูลไคโตซานบรรจุ n-Oc

ในการทดสอบประสิทธิภาพการรักษาระดับอุณหภูมิของเส้นใยเซลลูโลสเริ่มต้น และเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการตรึงนาโนแคปซูลไคโตซานบรรจุ n-Oc ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อเวลาผ่านไป โดยนำเส้นใยเซลลูโลสตัวอย่างไปแช่ที่อุณหภูมิประมาณ -40°C เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง แล้วนำมาเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิในช่วง $35 - 40^{\circ}\text{C}$ เพื่อสังเกตอุณหภูมิตั้งพื้นผิวเส้นใยเซลลูโลสที่เปลี่ยนไป ในช่วงเวลา 0 - 5 นาที ได้ผลโดยสรุปในตารางที่ 4.3, 4.4, 4.5 และ 4.6 ซึ่งภาพถ่ายทางความร้อนจะแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วยสี โดยไล่ระดับจากสีน้ำเงิน (เย็น) ไปสู่สีแดง (ร้อน) ที่แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตามลำดับ ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์อยู่ในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน ($35 - 40^{\circ}\text{C}$) แต่ภาพที่มีระดับสีเดียวกันอาจจะไม่ได้แสดงอุณหภูมิเดียวกัน เช่น ภาพถ่ายจากตารางที่ 4.3 (ก) และ (ข) ที่เวลา 0 นาที โดยมีอุณหภูมิต่ำสุด (สีน้ำเงิน) เริ่มต้นที่ 22.8°C และ 21.4°C ตามลำดับ ดังนั้นการวิเคราะห์เปรียบเทียบสีจึงเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของเส้นใยที่ Untreated และ Treated ในภาพเดียวกันเป็นหลัก

จากรูปที่แสดงในตารางที่ 4.3, 4.4, 4.5 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิพื้นผิวเริ่มต้น (0 min) ของตัวอย่างเส้นใยเซลลูโลสที่ตรึงด้วยนาโนแคปซูลไคโตซานบรรจุ n-Oc (Treated) จะมีสีน้ำเงินเข้มกว่าเส้นใยเซลลูโลสเริ่มต้นที่ไม่มีการตรึงนาโนแคปซูล (Untreated) แสดงถึงอุณหภูมิเริ่มต้นที่ต่ำกว่า พฤติกรรมนี้เป็นผลของ n-Oc ในนาโนแคปซูลที่ช่วยลดระดับอุณหภูมิตั้งพื้นผิว

เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น อุณหภูมิบริเวณรอบ ๆ ในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่มีค่าสูงประมาณ $35 - 40^{\circ}\text{C}$ จะส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวของเส้นใยมีค่าสูงขึ้น แต่จะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง Treated จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิช้ากว่าตัวอย่าง Untreated พฤติกรรมดังกล่าวเป็นผลจาก n-Oc ที่อยู่ในนาโนแคปซูลจะดูดซับความร้อนจากพื้นที่รอบ ๆ ไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะของ n-Oc ซึ่งพฤติกรรมนี้

จะชะลอการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเส้นใยเซลลูโลสตรงนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc และทำให้รักษาอุณหภูมิต่ำได้นานขึ้น

จากตารางที่ 4.3 รูป (ก), (ข) และ (ค) แสดงภาพถ่ายทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลสตรงนาโนแคปซูลที่เตรียมได้จากสถานะที่ 1 โดยมีปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว SDS ที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าเส้นใยเซลลูโลสที่ตรงด้วย Cap1-S10-Oc50 สามารถรักษาอุณหภูมิได้มากกว่า 5 นาที ในขณะที่เส้นใยเซลลูโลสที่ตรงด้วย Cap1-S30-Oc50 และ Cap1-S50-Oc50 สามารถรักษาอุณหภูมิต่ำได้ในระยะเวลา 4 และ 3 นาที ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว SDS นั้นไม่มีผลต่อการรักษาอุณหภูมิได้นานขึ้น

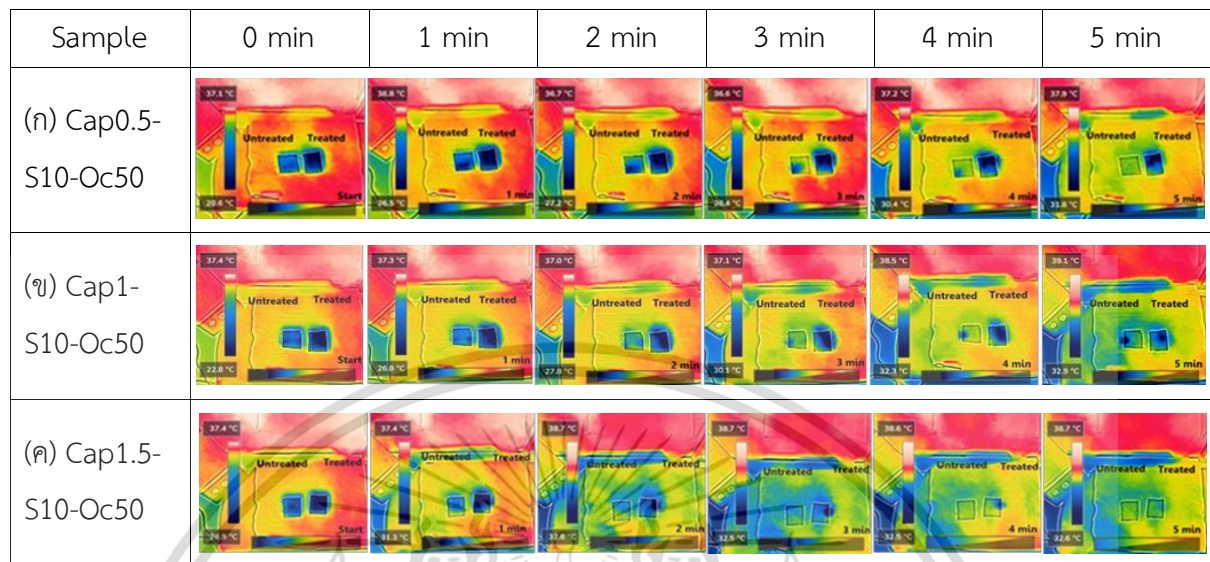
ตารางที่ 4.3 ภาพถ่ายทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ตรงบนเส้นใยเซลลูโลสในสถานะที่ 1

Sample	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
(ก) Cap1-S10-Oc50						
(ข) Cap1-S30-Oc50						
(ค) Cap1-S50-Oc50						

จากตารางที่ 4.4 รูป (ก), (ข) และ (ค) แสดงภาพถ่ายทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลสตรงนาโนแคปซูลที่เตรียมได้จากสถานะที่ 2 โดยมีปริมาณความเข้มข้นของโคโตซานที่ต่างกัน พบว่าเส้นใยเซลลูโลสที่ตรงด้วย Cap0.5-S10-Oc50 Cap1-S10-Oc50 สามารถรักษาอุณหภูมิได้นานกว่า 5 นาที ในขณะที่ Cap1.5-S10-Oc50 สามารถรักษาอุณหภูมิได้นานเพียง 3 นาที

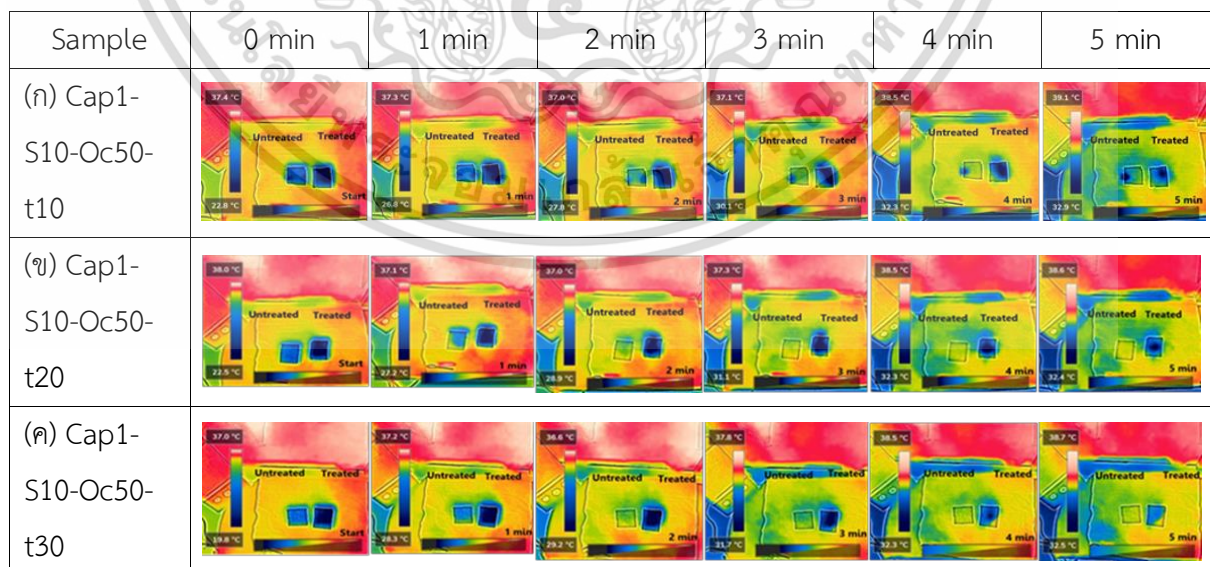
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ภาพถ่ายทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ตรึงบนเส้นใยเซลลูโลส ในสภาวะที่ 2



จากตารางที่ 4.5 รูป (ก), (ข) และ (ค) แสดงภาพถ่ายทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลสตรึงนาโนแคปซูลที่เตรียมได้จากสภาวะที่ 3 โดยมีระยะเวลา Sonication ที่แตกต่างกัน พบว่า Cap1-S10-Oc50-t20 สามารถรักษาอุณหภูมิได้มากกว่า 5 นาที ในขณะที่ Cap1-S10-Oc50-t10 และ Cap1-S10-Oc50-t30 สามารถรักษาอุณหภูมิภายในระยะเวลา 5 นาที

ตารางที่ 4.5 ภาพถ่ายทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ตรึงบนเส้นใยเซลลูโลส ในสภาวะที่ 3



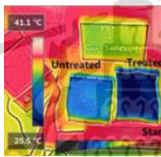

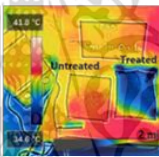

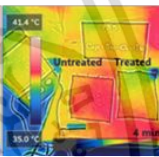
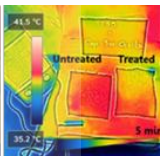
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) เส้นใยเซลลูโลสเคลือบ PSS ตรึงนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc

การเคลือบเส้นใยเซลลูโลสด้วยสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ PSS เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรึงโดยอาศัยประจุลบของ PSS และประจุบวกของโปรตีนเตอเมอีนที่เกิดจากไคโตซานให้สามารถตรึงบนเส้นใยเซลลูโลสได้มากขึ้น

จากตารางที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลส PSS/Cap1-S10-Oc50-t30 เปรียบเทียบกับเส้นใยเซลลูโลสเริ่มต้นที่ไม่มีการตรึงนาโนแคปซูล (Untreated). จะสังเกตเห็นว่าเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่มีการตรึงนาโนแคปซูลจะสามารถรักษาอุณหภูมิได้เพียง 1 นาที ในขณะที่เส้นใยเซลลูโลส PSS/Cap1-S10-Oc50-t30 สามารถรักษาอุณหภูมิได้ประมาณ 3 นาที ทั้งนี้จึงสามารถบ่งบอกได้ว่าการเคลือบพื้นผิวเส้นใยด้วย PSS ไม่ส่งผลต่อการรักษาอุณหภูมิ โดยสันนิษฐานว่า PSS อาจเกาะบนเส้นใยได้ไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการจับกับไคโตซานแล้วหลุดออกจากเส้นใย

ตารางที่ 4.6 ภาพถ่ายทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลสเคลือบ PSS ตรึงนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc

Sample	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
PSS/Cap1-S10-Oc50-t30						

ผลการศึกษาภาพถ่ายทางความร้อนสามารถสรุปได้ว่า การมีนาโนแคปซูลไคซานบรรจุ n-Oc ตรึงบนพื้นผิวเส้นใยจะเป็นผลให้เส้นใยมีสมบัติการรักษาอุณหภูมิได้ อย่างไรก็ตามการทดลองนี้ไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพของนาโนแคปซูลที่เตรียมจากสภาวะที่แตกต่างกันได้ เนื่องจากประสิทธิภาพในการเคลือบแสดงผลกระทบที่ชัดเจนกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการเตรียมนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ด้วยเทคนิคการห่อหุ้มเป็นนาโนแคปซูลด้วยตัวเอง (Self-assembly nanoencapsulation) โดยเริ่มจากการเตรียมเป็นนาโนอิมัลชัน (Nanoemulsion) โดยการกระจายตัวน้ำมันเอ็นออกตะเดคเคน (n-Oc) ในสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) ซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ชนิดประจุลบ โดยอาศัยการ Sonication เกิดเป็นโครงสร้างลักษณะไมเซลล์ จากนั้นสร้างเปลือกโคโตซานผ่านการเกิดอันตรกิริยาระหว่างประจุบวกของโปรโตเนตโคโตซานกับประจุลบของไมเซลล์เกิดนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc โดยมีการปรับเปลี่ยนสถานะในการสร้างนาโนแคปซูล ได้แก่ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว SDS 10 30 และ 50 mM ที่ความเข้มข้นของโคโตซาน 0.5 1.0 และ 1.5 %w/v และระยะเวลาในการ Sonication ที่เวลา 10 20 และ 30 นาที

เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว SDS ในการเตรียมนาโนแคปซูล พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ SDS เพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของนาโนแคปซูลที่เตรียมได้จะมีค่าลดลงจาก 4293 nm เป็น 1086 และ 1064 nm เมื่อลดความเข้มข้นของ SDS จาก 10 mM เป็น 30 และ 50 mM ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของ SDS ที่สูงขึ้นจะทำให้ n-Oc แยกตัวเป็นหยดที่เล็กลง จึงเกิดเป็นไมเซลล์จำนวนมากขึ้น

เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโคโตซานในการเตรียมนาโนแคปซูล พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโคโตซานจาก 0.5 เป็น 1.0 และ 1.5 %w/v โดยที่ความเข้มข้นของ SDS คงที่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของนาโนแคปซูลที่เตรียมได้จะมีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 334.9 nm เป็น 4293 และ 7678 nm ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลจากปริมาณโคโตซานที่เพิ่มขึ้นจะเกิดการก่อตัวเป็นเปลือกที่หนาขึ้น เนื่องจากการจัดรูปร่างสายโซ่โมเลกุลโคโตซานที่แตกต่างกัน

เมื่อปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการ Sonication โดยให้ความเข้มข้นของ SDS และโคโตซาน คงที่ พบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการ Sonication จาก 10 นาที เป็น 20 และ 30 นาที จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการห่อหุ้มแคปซูลเพิ่มขึ้นจาก 59.91 % เป็น 72.85 และ 80.35 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาในการ Sonication ไม่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคของนาโนแคปซูลที่เตรียมได้อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อนำนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ไปตรึงบนเส้นใยเซลลูโลสทั้งที่มีและไม่มี การเคลือบผิวเส้นใยด้วยสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์ (PSS) ประจุลบ พบว่า เส้นใยเซลลูโลสที่มีการตรึงนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc แสดงความสามารถในการรักษาระดับอนุภาคได้ดีกว่าเส้นใย

เซลลูโลสปกติ นอกจากนี้ชั้นเปลือกของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมได้มีเสถียรภาพ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการห่อหุ้มและรักษา n-Oc ที่บรรจุอยู่ภายใน ไม่เกิดการสูญเสีย n-Oc ในระหว่างการเปลี่ยนสถานะ จึงมีความเป็นไปได้และเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการศึกษาการตรึงนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc บนเส้นใยเซลลูโลสควรมีการควบคุมสภาพในการเคลือบ หรือมีการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใย เพื่อให้มีการตรึงนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ได้สม่ำเสมอทั่วทุกบริเวณ

2) ในการศึกษาประสิทธิภาพการรักษาระดับอุณหภูมิของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ควรมีการควบคุมปริมาณนาโนแคปซูลให้คงที่ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้ถูกต้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิศรุต เอ็นดู. (2560). การใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะในผนังอิฐขาวเพื่อลดความร้อนที่เข้าสู่อาคาร (สถาปัตยกรรม ปริญญาโท)., มหาวิทยาลัยศิลปากร
- [2] Dr. Dong Choon Hyun, Nathanael S. (2014). “Emerging Applications of Phase-Change Materials (PCMs): Teaching an Old Dog New Tricks”. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201305201>
- [3] Liu Yang , Jia-nan Huang , Fengjiao Zhou. (2020). “Thermophysical properties and applications of nano-enhanced PCMs: An update review” Energy Conversion and Management. 214
- [4] ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์ และคณะ. (2556). การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลระดับนาโนเมตรที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบมินิมัลชันที่ไม่ใช้แรงเฉือนสูงสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [5] Yalin Zhu , Shuen L. , Hui W. , Ke Z. , Xiaorong J. , Chunrong T. , Yuanlin Z. , Jianhua W. (2016). “Morphological control and thermal properties of nonencapsulated n-octadecane phase material with organosilica shell materials” Energy Conversion and Management 119. 151-162
- [6] เอกรัตน์ ตั้งศิริรัตนา. (2562). สมบัติการนำความร้อนของแคปซูลหุ้มวัสดุเปลี่ยนเฟสไข่อ้อยคอมโพสิตกับนาโนอนุภาควิศวกรรมเคมี (ปริญญาตรี)., มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [7] Belen Zalba , Jose M., Luisa F., Cabeza , Harald M. (2003). “Review on thermal energy storage with phase change : material, heat transfer analysis and applications”. Applier Thermal Engineering 23. 251-283
- [8] Ali S. (2021. May). “Effectiveness of Thermal Properties in Thermal Energy Storage Modeling”. Frontiers in Mechanical Engineering. 7. <https://doi.org/10.3389/fmech.2021.690793>
- [9] William E. O’Connor., Ronald W., Rebecca W., Amy S.F. and Aaron P.W. (2014. February). “Thermal property prediction and measurement of organic phase change materials in the liquid phase near the melting point”. Applied Energy. 132 : 496-506

[10] บริษัท โบนัฟิเดส มาร์เก็ตติ้ง จำกัด. (2023). ไคติน-ไคโตซาน คืออะไร มีประโยชน์อย่างไร. เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า <https://www.bonafidesmarketing.com/articledetail.asp?id=4929>
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] นฤถณ อินทราชัย และคณะ. (2559). การเตรียมวัสดุประกอบนาโนโคโตซาน/เคอร์คูมิน(เคมีอุตสาหกรรม ปริญญาตรี)., สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [12] ดร.จิราพร โรจน์ทินกร และผศ.ดร. อรุณี คงดี. (2555, มีนาคม). การเตรียมอนุภาคนาโนโคโตซาน-สมุนไพรรักษาแผลเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ., มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 11-17.
- [13] Joanna Makowska , Dariusz W., Bogaslaw P., Lech C. (2015). “Thermodynamics of sodium dodecyl sulphate (SDS) micellization in the presence of some biologically relevant pH buffers” *Journal Thermal of Analysis Colorimetry* 121. 257-261
- [14] รัชนีวรรณ ศิริ. (2561). การสังเคราะห์พื้นผิวไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่มีความใสด้วยเทคนิคการจัดเรียงตัวเองที่ละชั้นโดยอาศัยการพ่นสเปรย์ (ฟิลิกส์ ปริญญาโท)., มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [15] Joana C.A., Catarina L.P., Maria M., Frederico F.D.S., Mariagamiliana D., Antonio G., Luigi A., Raquel M.G., and Mario A.B. (2011). “Layer-by-Layer Self-Assembly of Chitosan and Poly(γ -glutamic acid) into Polyelectrolyte Complexes”. *Biomacromolecules*. 12 : 41183-4195.
- [16] Yuwanda I. and Punnama S. (2014). “Nanoencapsulation of n-Octadecane Phase Change Material in Self-Assembly Polyelectrolyte by Soft Solution Technique”. *International Journal of Polymeric Material and Polymeric Biomaterials*. 63 : 918 – 922.
- [17] Shuang F., Hongyi G., Qiming X., Huanqiu H., Lili L., Junyao S., Yu X. and Li T. (2015). “Nanocapsulation of n-Octadecane Phase Change Material with Polyaniline Shell for Thermal Energy Storage”. *International Conference Advances in Energy and Environmental Science*. 1547-1550.
- [18] Yeliz K., Halime O.P. and Murat U. (2015). “Nanoencapsulation of n-alkane with poly(styrene-co-ethylacrylate) shells for thermal energy storage”. *Applied Energy*. 150 : 335-340.
- [19] Yalin Z., Shuen L., Keping C., Xia G., Pianpian C., Chunrong T., Jianhua W. and Yigang H. (2015). “Preparation and properties of nanoencapsules n-octadecane phase change material with organosilica shell for thermal energy storage”. *Energy Conversion and Management*. 105 : 908-917.

- [20] Yuwanda I., Avinash P.M., Tom W., Barnaby Caven., Thomas B. and Punnama S. (2016). "Polyelectrolyte-Assisted Immobilization of Oil-Based Nanocapsules on Cotton Fabric". CSIRO PUBLISHING. 69:811-816.
- [21] Yalin Zhu, Yaosong Q., Shuen L., Keping C., Chunrong T., Jianhua W., Xuan L., Lin Z. (2019). "Graphene/SiO₂/n-octadecane nanoencapsulated phase change material with flower like morphology, high thermal conductivity, and suppressed supercooling" *Applied Energy* 250. 98-108
- [22] Dimberu G. Atinafu, Yong Sik Ok, Harn Wei Kua and Sumin Kim. (2020, August 21). "Thermal properties of composite organic phase change materials (PCMs): A critical review on their engineering chemistry". *Applied Thermal Engineering* 181:115960
- [23] Nan Z. and Yanping Y. (2020). "Synthesis and thermal properties of nanoencapsulation of paraffin as phase change material for latent heat thermal energy storage". *Energy and Built Environment*. 1 : 410-416.
- [24] Kai Z., Jifen w., Linjun X., Huaqing X. and Zhixiong G. (2021). "Preparation and thermal characterization of n-octadecane/ pentafluorostyrene nanocapsules for phase-change storage". *Journal of Energy Storage*. 35 : 102327.
- [25] Shiraz A.M., Lusine R.H., and Romik S.H. (2004, November 22). "The properties of Mixtures of Sodium Dodecylsulfate and Diethylsulfoxide in Water". *Journal of Solution Chemistry*. 34 : 361-368

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การกระจายตัวของสีย้อมในสารละลายไคโตซาน



(ก)

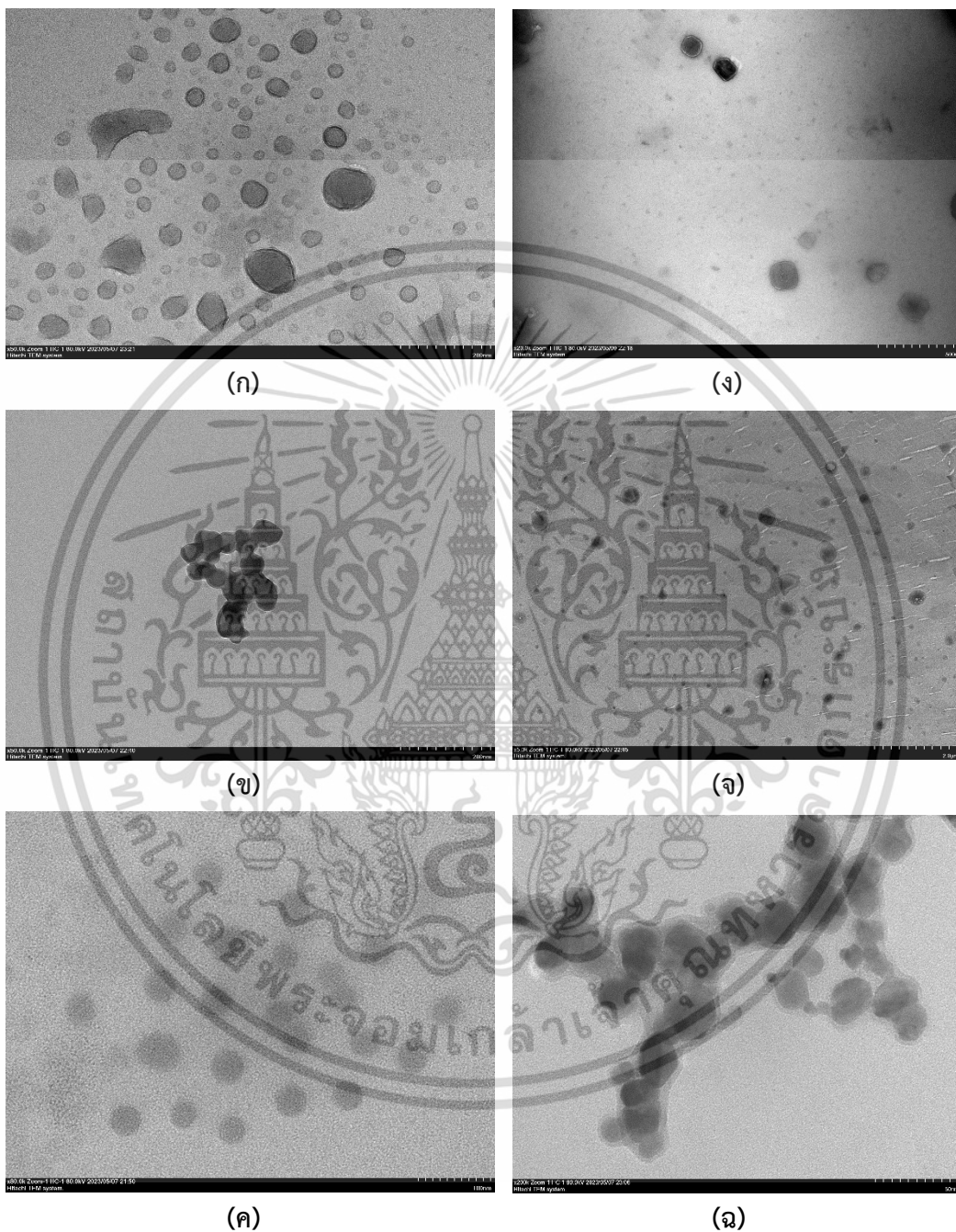
(ข)

รูปที่ ก.1 ลักษณะทางกายภาพของสารผสมระหว่างสีย้อมและสารละลายไคโตซานเข้มข้น
(ก) 0.5 %w/v และ (ข) 1.5 %w/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ลักษณะวิทยาของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc



รูปที่ ข.1 ภาพถ่าย TEM micrographs ของอนุภาคนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc

(ก) Cap0.5-S10-Oc50 (ข) Cap1-S10-Oc50 (ค) Cap1.5-S10-Oc50

(ง) Cap0.5-S50-Oc50 (จ) Cap1-S50-Oc50 และ (ฉ) Cap1.5-S50-Oc50

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติเหินาไปไซประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ขนาด ดัชนีการกระจายตัว (PDI) และค่าศักย์ซีต้า

ตารางที่ ค.1 ขนาด ดัชนีการกระจายตัว (PDI) และค่าศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมในสภาวะที่1 สภาวะที่2 และสภาวะที่ 3

ชื่อตัวอย่าง	ขนาด (nm)	PDI	Zeta potential (mV)
Oc-SDS	118.9	0.167	-65.3
Cap1-S10-Oc50	4293	0.121	25.9
Cap1-S30-Oc50	1086	1.000	-16.5
Cap1-S50-Oc50	1064	0.724	-30.3
Cap0.5-S10-Oc50	334.9	0.121	25.9
Cap1.5-S10-Oc50	7678	0.558	26.4
Cap1-S10-Oc50-t20	4859	0.038	21.8
Cap1-S10-Oc50-t30	4858	0.195	28.6

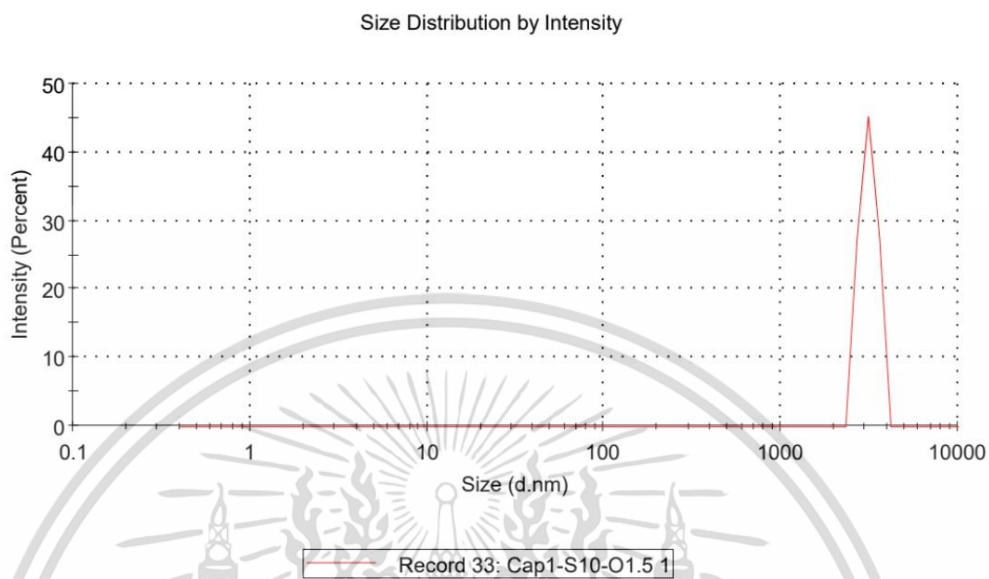
หมายเหตุ : - Oc-SDS คือ นาโนอิมัลชันของ n-Oc ผสมกับ SDS

- Capx-Sy-Ocz-tm คือ นาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc
- x หมายถึง ความเข้มข้น (%w/v) ของโคโตซานที่ใช้สังเคราะห์
- y หมายถึง ความเข้มข้น (mM) ของ SDS ที่ใช้ในการสังเคราะห์
- z หมายถึง ความเข้มข้นของ n-Oc (mL/L) ที่ใช้ในการสังเคราะห์
- m หมายถึง เวลา (min) ในการ Sonication ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนแคปซูล

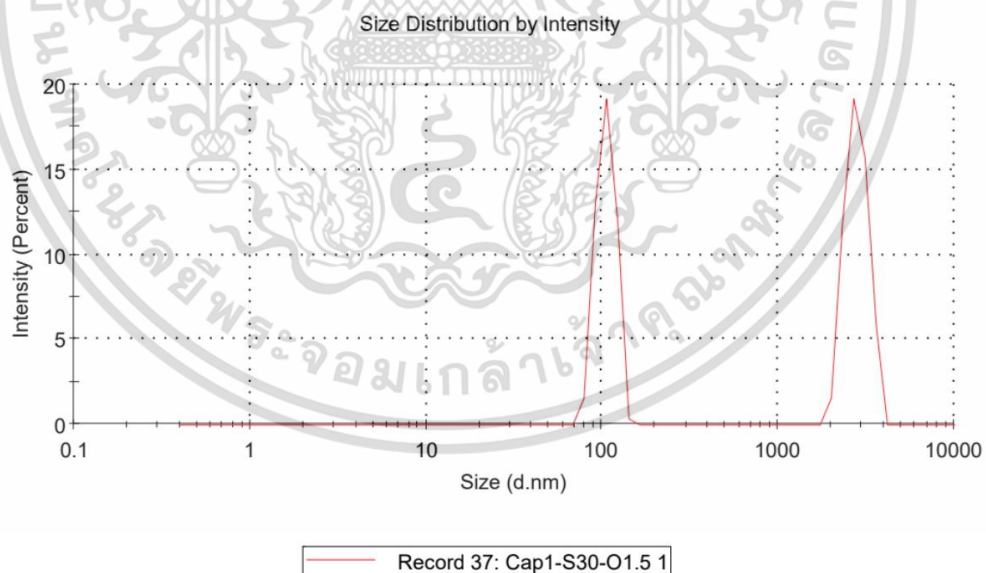
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟขนาดอนุภาคของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมในสภาวะแตกต่างกัน

สภาวะที่ 1 การเตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่แตกต่างกัน

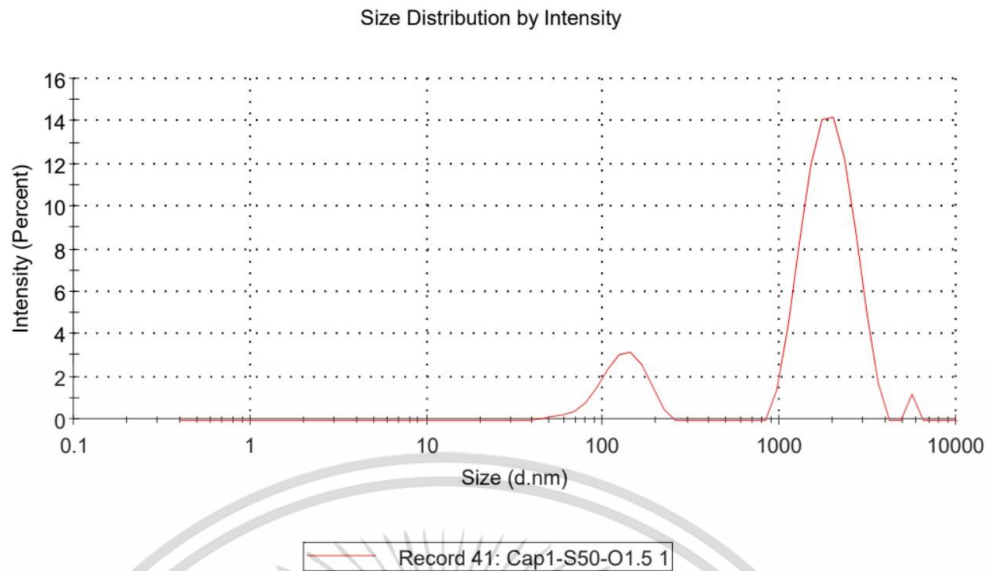


รูปที่ ค.1 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50



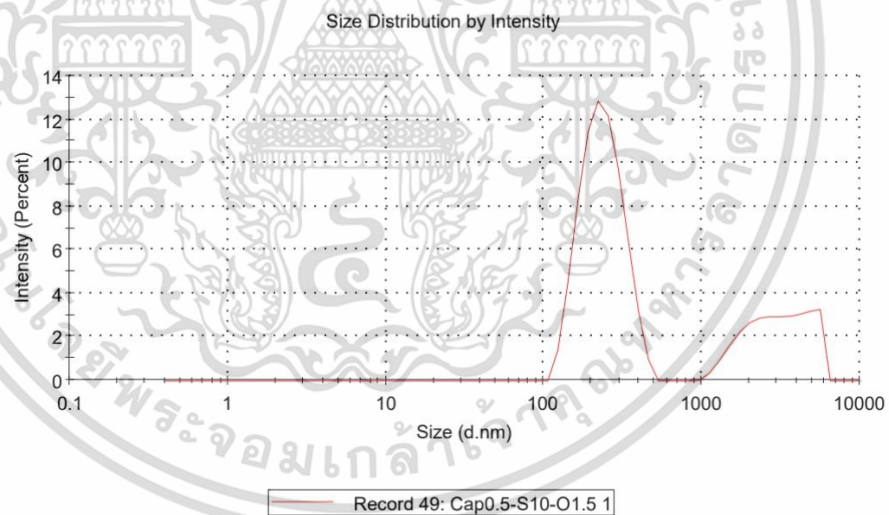
รูปที่ ค.2 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S30-Oc50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



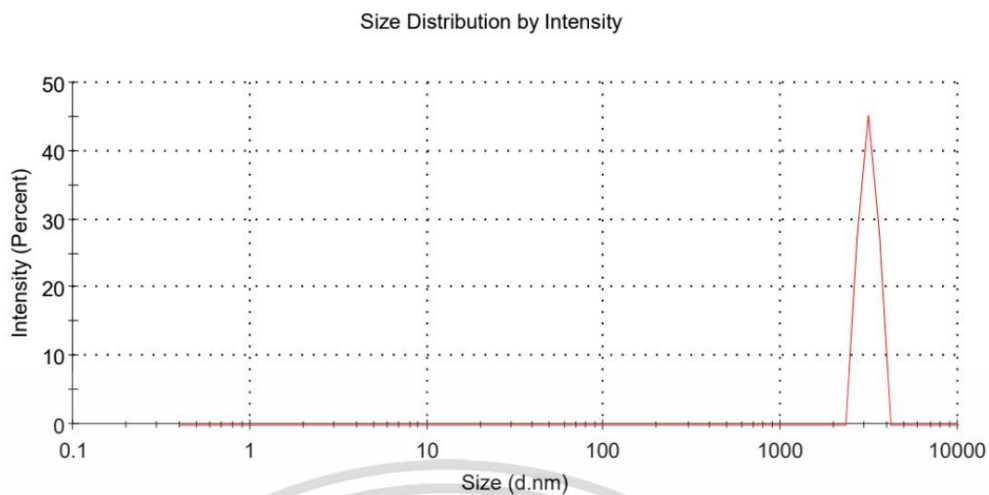
รูปที่ ค.3 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S50-Oc50

สภาวะที่ 2 การเตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของโคโตนที่แตกต่างกัน

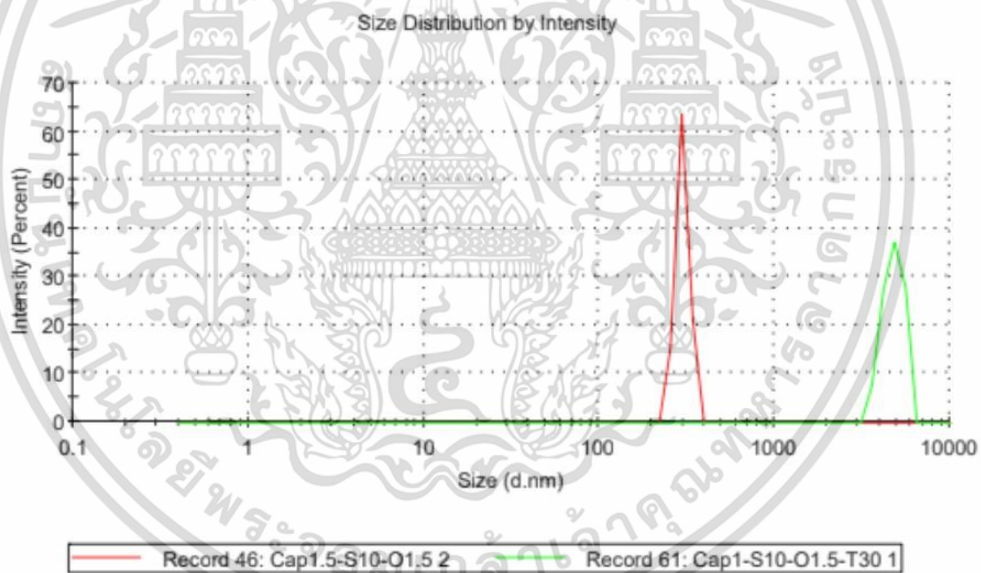


รูปที่ ค.4 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap0.5-S10-Oc50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



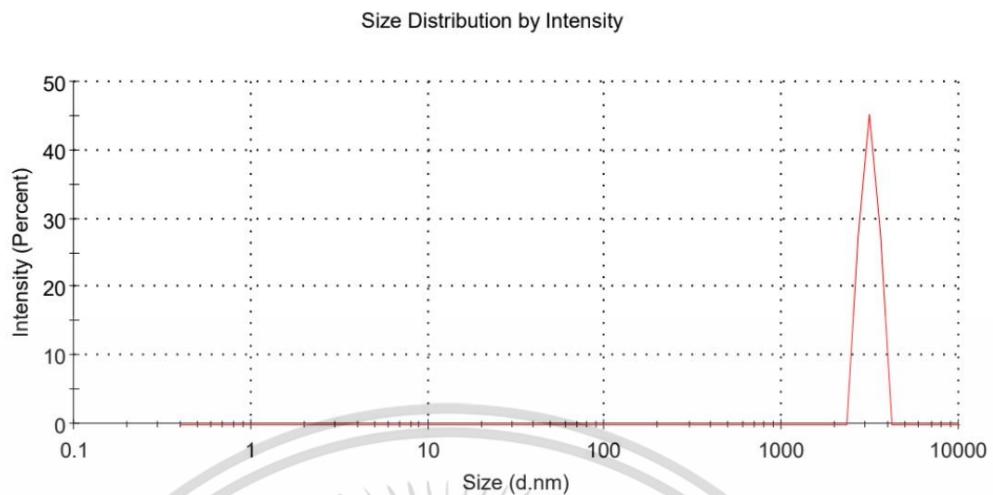
รูปที่ ค.5 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50



รูปที่ ค.6 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1.5-S10-Oc50

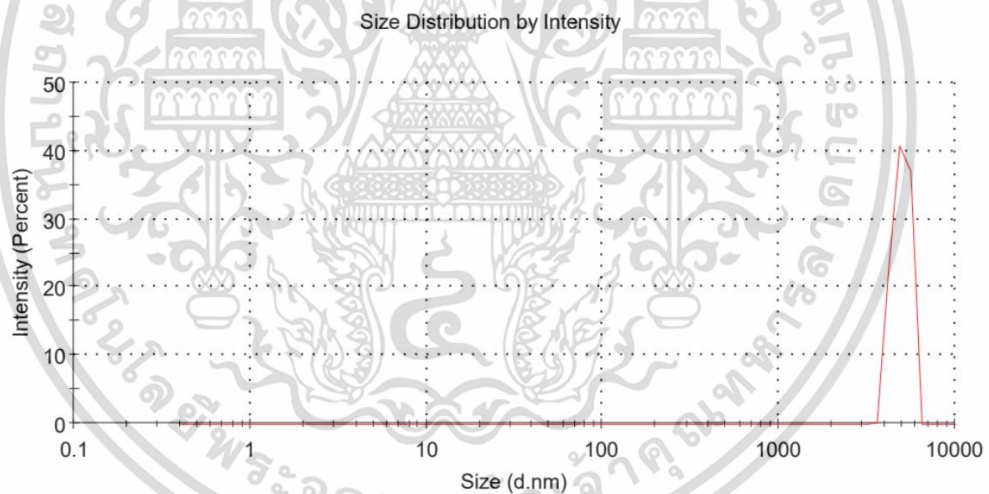
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ 3 การเตรียมโดยใช้เวลา Sonication ที่แตกต่างกัน



Record 33: Cap1-S10-O1.5 1

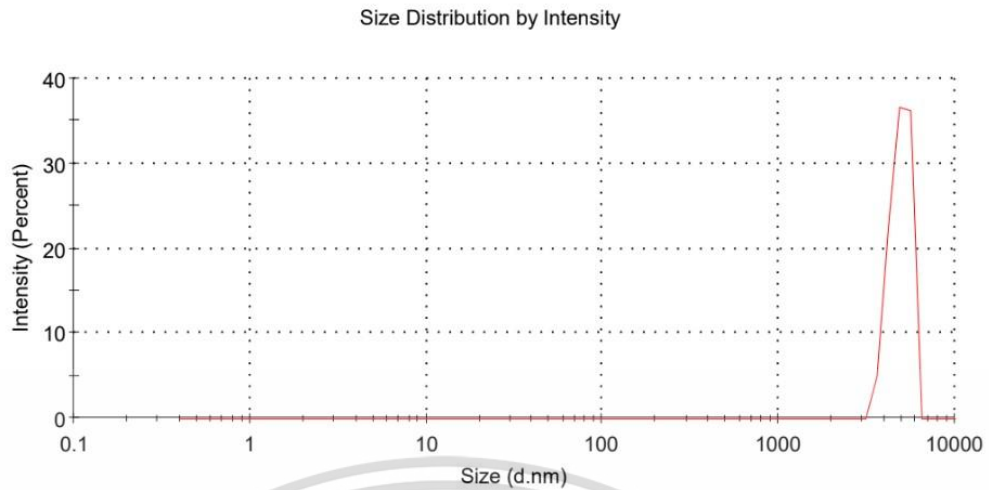
รูปที่ ค.7 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc5-t10



Record 52: Cap1-S10-O1.5-T20 1

รูปที่ ค.8 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc5-t20

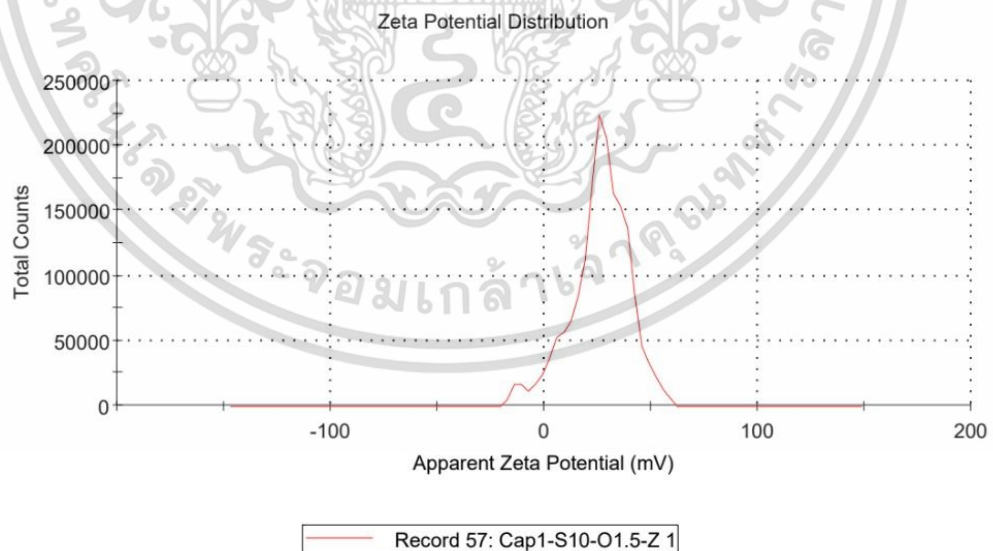
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.9 กราฟขนาดของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc5-t30

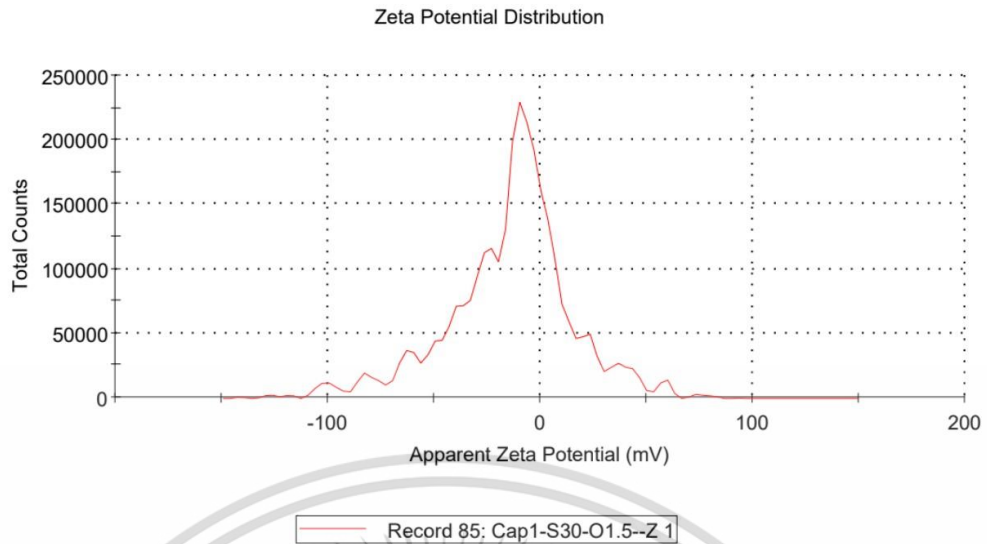
กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลโคโดซานบรจุ n-Oc ที่เตรียมในสภาวะแตกต่างกัน

สภาวะที่ 1 การเตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่แตกต่างกัน

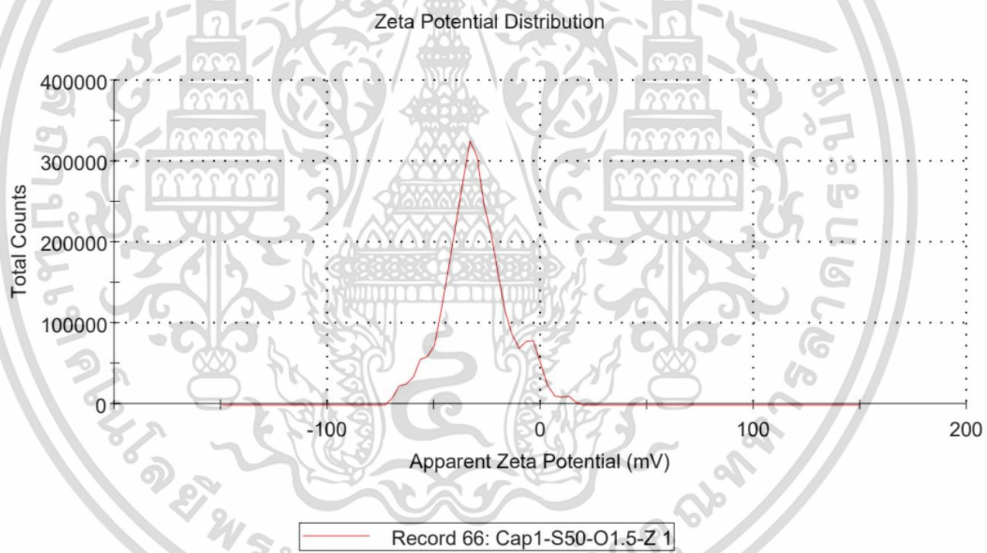


รูปที่ ค.10 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



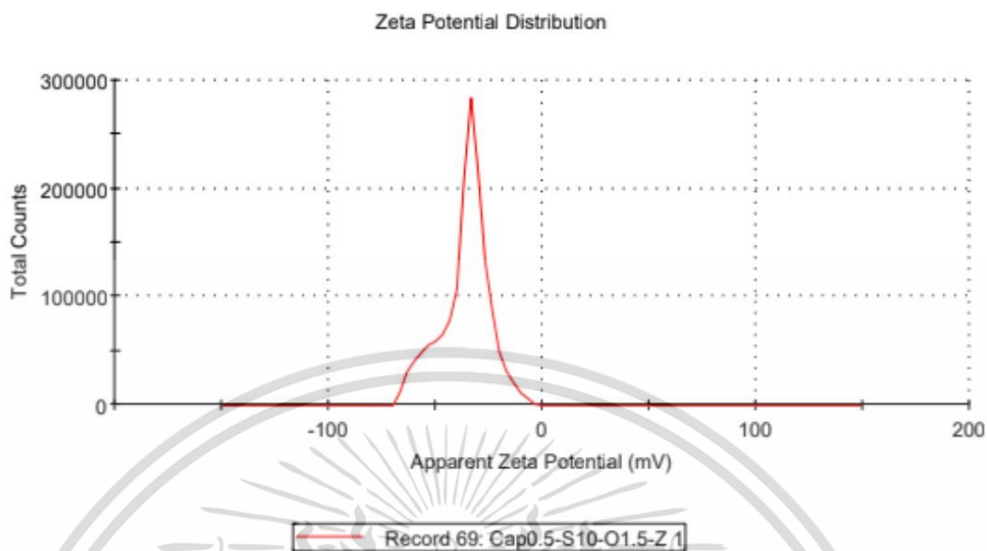
รูปที่ ค.11 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S30-Oc50



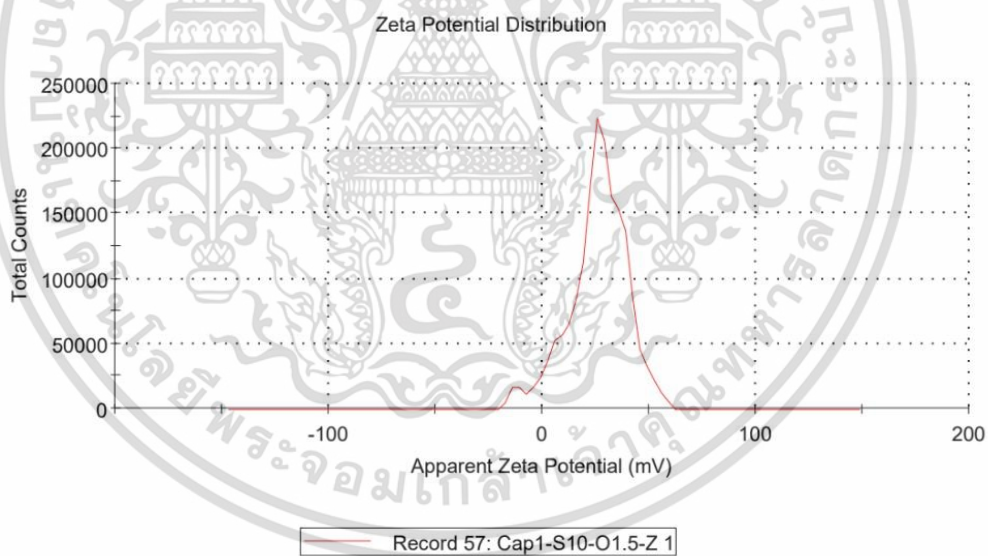
รูปที่ ค.12 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S50-Oc50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ 2 การเตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่แตกต่างกัน

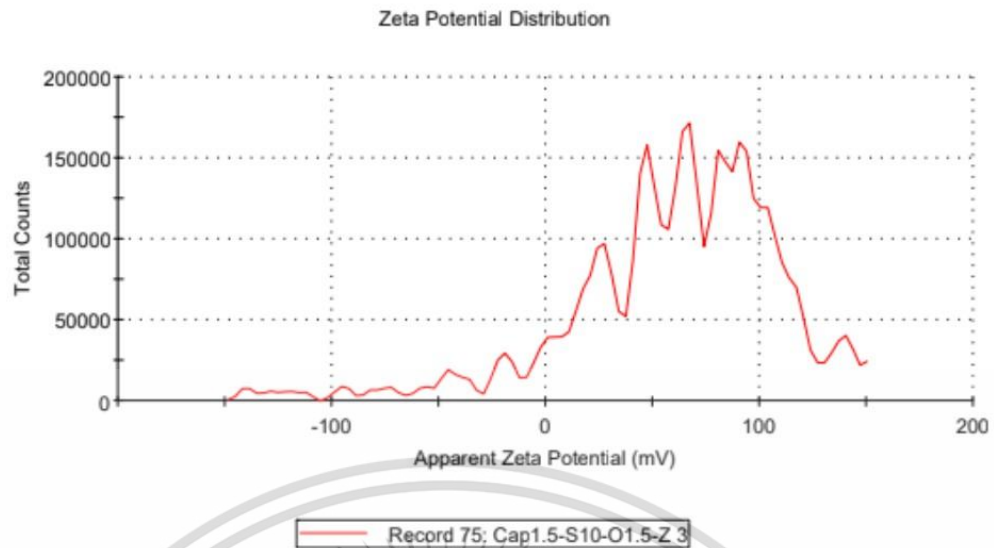


รูปที่ ค.13 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap0.5-S10-Oc50



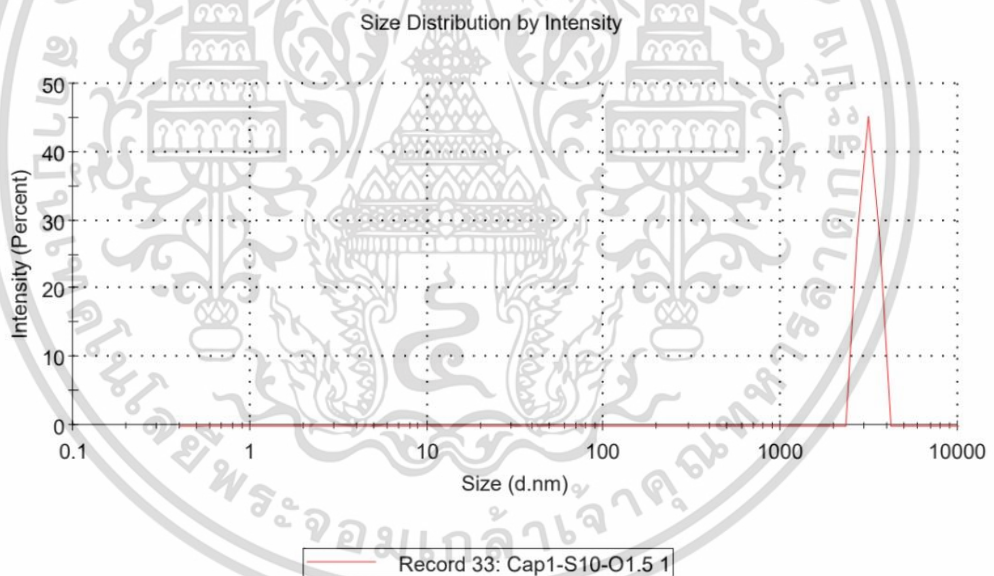
รูปที่ ค.14 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



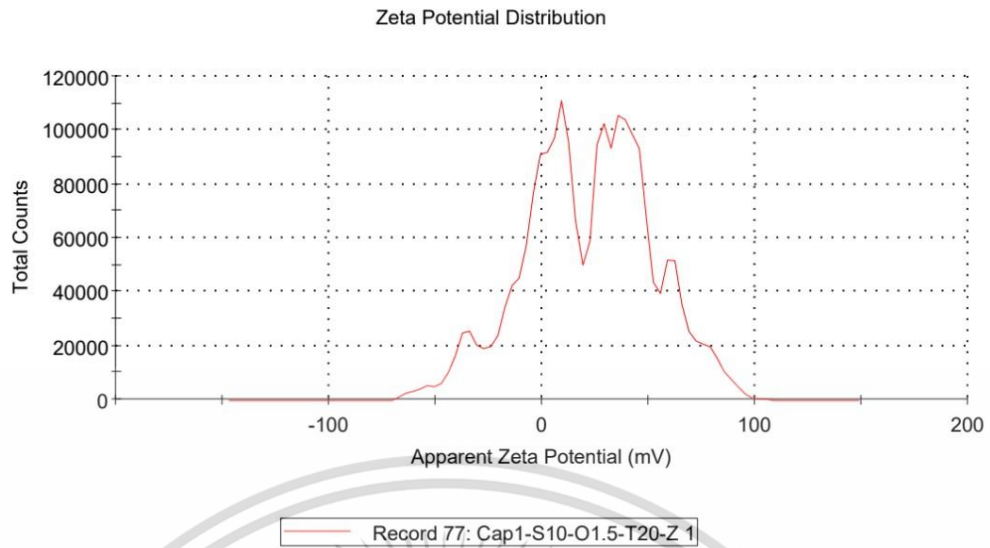
รูปที่ ค.15 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1.5-S10-Oc50

สภาวะที่ 3 การเตรียมโดยใช้เวลา Sonication ที่แตกต่างกัน

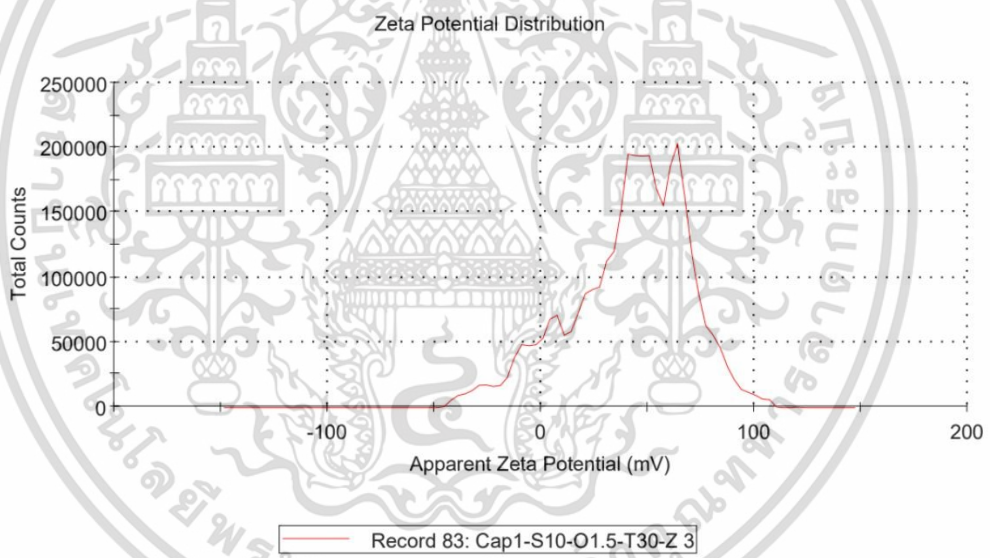


รูปที่ ค.16 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



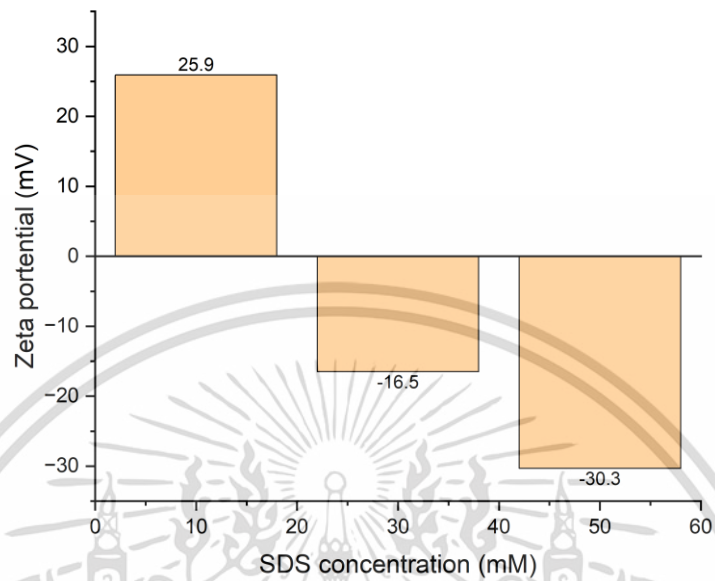
รูปที่ ค.17 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t20



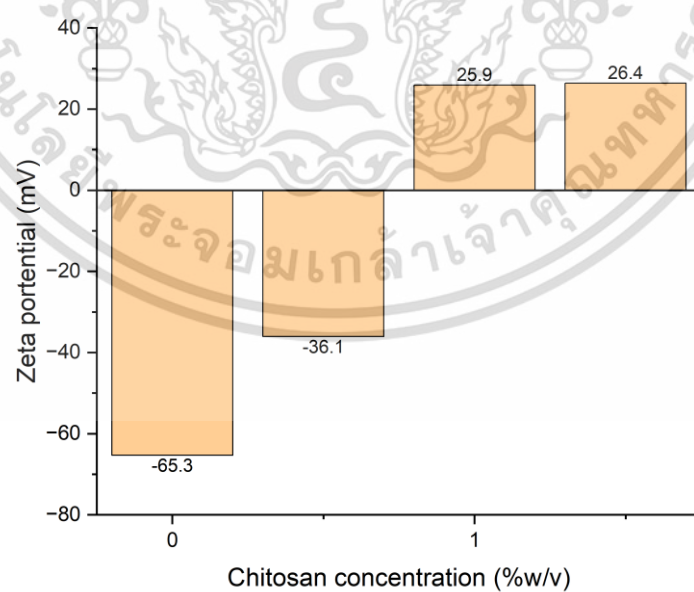
รูปที่ ค.18 กราฟศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50-t30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

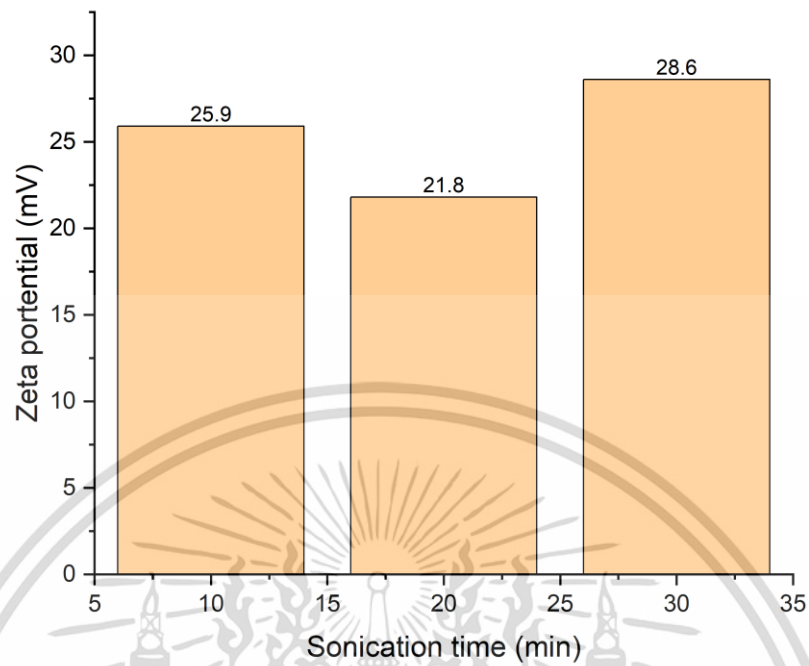
แผนภูมิแสดงศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมในสภาวะที่ 1 สภาวะที่ 2 และสภาวะที่ 3



รูปที่ ค.19 แผนภูมิแสดงศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมในสภาวะที่ 1 การเตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่แตกต่างกัน



เอกสารนี้รูปที่ ค.20 แผนภูมิแสดงศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมในสภาวะที่ 2 การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การเตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของโคโตซานที่แตกต่างกันเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.21 แผนภูมิแสดงศักย์ซีต้าของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมในสภาวะที่ 3 การเตรียมโดยใช้เวลา Sonication ที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

สมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลบรรจุ n-Oc

ตารางที่ ง.1 เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc ที่เตรียมในสภาวะที่ 1 สภาวะที่ 2 และสภาวะที่ 3

ชื่อตัวอย่าง	T _{m, onset} (°C)	T _{m, peak} (°C)	ΔH _m (J/g)	T _{c, onset} (°C)	T _{c, peak} (°C)	ΔH _c (J/g)	ประสิทธิภาพการห่อหุ้ม(%)
n-Octadecane	28.17	29.88	255.03	27.08	26.46	257.62	n/a
Cap1-S10-Oc50	28.36	29.38	155.15	27.24	27.04	151.97	59.91
Cap1-S30-Oc50	28.62	30.13	124.30	27.00	26.71	110.89	45.87
Cap1-S50-Oc50	28.58	30.92	138.86	27.21	26.83	136.14	53.64
Cap0.5-S10-Oc50	28.24	29.46	93.23	26.98	26.63	83.46	34.46
Cap1.5-S10-Oc50	27.82	30.46	110.70	27.02	25.42	69.30	35.11
Cap1-S10-Oc50-t20	28.35	29.63	187.39	27.03	26.75	186.08	72.85
Cap1-S10-Oc50-t30	28.36	29.54	205.79	27.05	26.75	206.13	80.35

หมายเหตุ : - Oc-SDS คือ นาโนอิมัลชันของ n-Oc ผสมกับ SDS

- Capx-Sy-Ocz-tm คือ นาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc

- x หมายถึง ความเข้มข้น (%w/v) ของโคโตซานที่ใช้สังเคราะห์

- y หมายถึง ความเข้มข้น (mM) ของ SDS ที่ใช้ในการสังเคราะห์

- z หมายถึง ความเข้มข้นของ n-Oc (mL/L) ที่ใช้ในการสังเคราะห์

- m หมายถึง เวลา (min) ในการ Sonication ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนแคปซูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณค่าร้อยละประสิทธิภาพในการห่อหุ้มนาโนแคปซูล

การคำนวณค่าร้อยละประสิทธิภาพในการห่อหุ้มนาโนแคปซูล (Encapsulation efficiency)

$$\% \text{ Encapsulation efficiency} = \frac{\Delta H_{m,\text{capsule}} + \Delta H_{c,\text{capsule}}}{\Delta H_{m,\text{PCM}} + \Delta H_{c,\text{PCM}}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละประสิทธิภาพในการห่อหุ้มนาโนแคปซูล Cap1-S10-Oc50 จากการสังเคราะห์ในสภาวะที่ 1

จากข้อมูลใน ตารางที่ ง.1 Cap1-S10-Oc50 ในสภาวะที่ 1

$$\Delta H_m \text{ ของนาโนแคปซูล} = 155.15 \text{ J/g}$$

$$\Delta H_c \text{ ของนาโนแคปซูล} = 151.97 \text{ J/g}$$

$$\Delta H_m \text{ ของ PCM} = 255.03 \text{ J/g}$$

$$\Delta H_c \text{ ของ PCM} = 257.62 \text{ J/g}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Encapsulation efficiency} &= \frac{155.15 + 151.97}{255.03 + 257.62} \times 100 \\ &= 59.91 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

การสลายตัวของนาโนแคปซูลโคโดซานบรรจุ n-Oc

ตารางที่ ฉ.1 การสลายตัวของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 1 ใช้ความเข้มข้นของ SDS ที่แตกต่างกัน

Sample	T _{onset} (°C)	T _{peak} (°C)	น้ำหนักเริ่มต้น (mg)	น้ำหนักที่ เปลี่ยนแปลง (%)	น้ำหนัก คงเหลือ (mg)	น้ำหนัก คงเหลือ (%)
Cap1-S10-O1.5	191.33	256.83	7.7600	96.7063	0.2556	25.56
Cap1-S30-O1.5	208.85	250.17	7.8500	91.2621	0.6859	68.59
				0.8093	0.0056	0.56
Cap1-S50-O1.5	206.08	256.00	7.4700	94.0916	0.4414	44.14

ตารางที่ ฉ.2 การสลายตัวของนาโนแคปซูลเตรียมในสภาวะที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของโคโดซานที่ต่างกัน

Sample	T _{onset} (°C)	T _{peak} (°C)	น้ำหนักเริ่มต้น (mg)	น้ำหนักที่ เปลี่ยนแปลง (%)	น้ำหนัก คงเหลือ (mg)	น้ำหนัก คงเหลือ (%)
Cap0.5-S10-O1.5	205.18	261.83	7.3900	99.7963	0.0151	1.51
Cap1-S10-O1.5	191.33	256.83	7.7600	96.7063	0.2556	25.56
Cap1.5-S10-O1.5	202.68	240.83	7.0500	91.8166	0.5769	57.69
				1.9691	0.5646	56.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าร้อยละน้ำหนักคงเหลือของนาโนแคปซูลโคโตซานบรรจุ n-Oc

การคำนวณค่าร้อยละน้ำหนักที่คงเหลือจากการสลายตัวของนาโนแคปซูล

$$\text{น้ำหนักที่หายไป} = \text{น้ำหนักเริ่มต้น} \times \frac{\text{น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง}}{100}$$

ตัวอย่างการคำนวณ หาน้ำหนักที่หายไปจากการสลายตัว Cap1-S10-Oc50 จากการสังเคราะห์ใน
สภาวะที่ 1

จากข้อมูลในตารางที่ ๑.1 Cap1-S10-Oc50 ในสภาวะที่ 1

$$\text{น้ำหนักเริ่มต้น} = 7.39 \text{ mg}$$

$$\text{น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง} = 99.7963 \%$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักที่หายไป} &= 7.39 \times \frac{99.7963}{100} \\ &= 7.37494657 \text{ mg} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าร้อยละน้ำหนักที่คงเหลือ

$$\begin{aligned} \% \text{ น้ำหนักที่คงเหลือ} &= \text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักที่หายไป} \times 100 \\ &= 7.39 - 7.37494657 \times 100 \\ &= 1.51 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 31 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า นางสาวณัฐนิชา อินทรแพทย์ รหัสประจำตัว 62050281

นายปิยวัฒน์ มาลาเวช รหัสประจำตัว 62050305

นางสาวพัฒนิตา กว้างนอก รหัสประจำตัว 62050313

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง
 ชื่อภาษาไทย เรื่อง การเตรียมและการตรึงนาโนแคปซูลไคโตซานบรรจุ n-Octadecane บนเส้นใยเซลลูโลส
 สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นแผ่นกรองหน้ากากอนามัย

ชื่อภาษาอังกฤษ Preparation and Immobilization of chitosan nanocapsules loading n-Octadecane
 on cellulose fiber for medical face mask applications

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้
 แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 1.41 %

ลงชื่อ.....ณัฐนิชา อินทรแพทย์.....

ลงชื่อ.....ปิยวัฒน์ มาลาเวช.....

ลงชื่อ.....พัฒนิตา กว้างนอก.....

(นางสาวณัฐนิชา อินทรแพทย์)

(นายปิยวัฒน์ มาลาเวช)


(นางสาวพัฒนิตา กว้างนอก)

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร.ปยุตต์มา ศิริพันธ์โนน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของนักศึกษา
 ข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ..........

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 อาจารย์ที่ปรึกษา
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้