

การเตรียมไมโครแคปซูลโคโตซานบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ  
n-Octadecane ที่มีสมบัติการรักษาระดับอุณหภูมิและ  
การเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ

PREPARATION OF CHITOSAN MICROCAPSULES  
CONTAINING n-OCTADECANE : THEIR  
THERMOREGULATING AND THERMOCHROMIC PROPERTIES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION OF CHITOSAN MICROCAPSULES  
CONTAINING n-OCTADECANE : THEIR  
THERMOREGULATING AND THERMOCHROMIC PROPERTIES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การเตรียมไมโครแคปซูลโคไโดซานบรรจุสตุเปลี่ยนสถานะ n-Octadecane ที่มีสมบัติการรักษาระดับอุณหภูมิและการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ

Preparation Of Chitosan Microcapsules Containing n-Octadecane : Their Thermoregulating And Thermochromic Properties

ชื่อนักศึกษา

นางสาวจินณิศา นุ่มแทน รหัสนักศึกษา 58050445

นางสาวชนนิกานต์ แสนสุข รหัสนักศึกษา 58050450

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี



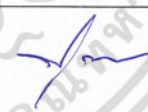
ปีการศึกษา

2561

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ กรรมการ	
ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมไมโครแคปซูลโคโตซานบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ n-Octadecane ที่มีสมบัติการรักษาระดับอุณหภูมิและการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจิณณิศา นุ่มแทน รหัสนักศึกษา 58050445 นางสาวชนนิกันต์ แสนสุข รหัสนักศึกษา 58050450
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมไมโครแคปซูลบรรจุเอ็น-ออกตะเดเคนโดยใช้โคโตซานเป็นวัสดุห่อหุ้ม (Oc/Cs) โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) เป็น 10 และ 15 mM และปริมาณของวัสดุแกนกลางเอ็น-ออกตะเดเคนเป็น 500 1000 และ 1500  $\mu\text{L}$  ในการเตรียมไมโครแคปซูลทำได้โดยนำเอ็น-ออกตะเดเคนผสมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูงเกิดเป็นไมเซลล์ จากนั้นนำไมเซลล์ไปผสมกับสารละลายโคโตซานในกรดแอสติก สายโซ่โมเลกุลของโคโตซานจะเกิดอันตรกิริยากับ SDS ที่พื้นผิวไมเซลล์เกิดเป็นไมโครแคปซูลบรรจุเอ็น-ออกตะเดเคน ข้อมูลจากการตรวจวิเคราะห์ DSC แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนปริมาณเอ็น-ออกตะเดเคนและความเข้มข้นของสารละลาย SDS ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการห่อหุ้มเอ็น-ออกตะเดเคนของไมโครแคปซูล โดยไมโครแคปซูล Oc/Cs ที่เตรียมโดยใช้ SDS เข้มข้น 15 mM และใช้เอ็น-ออกตะเดเคน 1000  $\mu\text{L}$  มีประสิทธิภาพในการห่อหุ้มเอ็น-ออกตะเดเคนสูงที่สุดเท่ากับ 34.47% ไมโครแคปซูลดังกล่าวมีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) และค่าความร้อนแฝงในการก่อผลึก ( $\Delta H_c$ ) ของเอ็น-ออกตะเดเคนเท่ากับ 53 และ 51 J/g ตามลำดับ เมื่อนำไมโครแคปซูล Oc/Cs ไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ 0  $^{\circ}\text{C}$  แล้วนำไปทดสอบสมบัติการรักษาระดับอุณหภูมิภายในตู้ความร้อน พบว่าไมโครแคปซูล Oc/Cs สามารถแสดงสมบัติการรักษาระดับอุณหภูมิได้ นอกจากนี้ได้ศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมไมโครแคปซูลบรรจุสารผสมคลอเลสเทอรอลโอเลิลคาร์บอเนต (Cholesterol oleyl carbonate, COC) และคลอเลสเทอริลโนนาโนเอต (Cholesteryl nonanoate, CPE) ด้วยวิธีการเดียวกับการเตรียมไมโครแคปซูล Oc/Cs

**คำสำคัญ :** โคโตซาน เทอร์โมโครมิก ประสิทธิภาพการห่อหุ้ม เอ็น-ออกตะเดเคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Preparation Of Chitosan Microcapsules Containing n-Octadecane : Their Thermoregulating and Thermochromic Properties
<b>Students</b>	Miss. Jinnisa Numtan Student ID 58050445 Miss. Chonnikan Saensuk Student ID 58050450
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2018
<b>Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Punnama Siriphannon

### Abstract

This special project studied on preparation of microcapsules loading n-octadecane in chitosan shell (Oc/Cs). The concentration of sodium dodecyl sulfate (SDS) surfactant was 10 and 15 mM and the amount of n-octadecane core was 500, 1000 and 1500  $\mu\text{L}$ . In the preparation of Oc/Cs microcapsules, the n-octadecane was mixed with SDS surfactant using homogenizer in order to form micelles. The micelles were mixed with solution of chitosan in acetic acid. The molecules of chitosan simultaneously interacted with the SDS on the surface of micelles, creating the microcapsules containing n-octadecane. The DSC data described that the changes of sodium dodecyl sulfate concentration and n-octadecane quantity exhibited the significant effects on the encapsulation efficiency of n-octadecane in the Oc/Cs microcapsules. The Oc/Cs microcapsules prepared by using SDS concentration of 15 mM and n-octadecane 1000  $\mu\text{L}$  found the highest encapsulation efficiency 34% such microcapsules had enthalpy of fusion ( $\Delta H_m$ ) and enthalpy of crystallization ( $\Delta H_c$ ) of 53 and 51 J/g respectively. The Oc/Cs microcapsule freezing at temperature 0  $^{\circ}\text{C}$  and then tested the thermoregulating property. It was found that the Oc/Cs microcapsules could maintain low thermoregulation. In addition, preliminary studies on the preparation of microcapsules containing mixtures cholesterol oleyl carbonate (COC) and cholesteryl nonanoate (CPE) which is a substance that gives oil color. By using chitosan and SDS as a wrapper. In the same way as preparing microcapsules, Oc / Cs

**Keywords :** Chitosan, Thermochromic, Encapsulation efficiency, n-Octadecane

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ไม่อาจสำเร็จได้ หากปราศจากความเมตตา กรุณาจากท่านอาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ที่ทำให้ผู้เขียนได้หัวข้อในการทำโครงการพิเศษ และ กรณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของผู้เขียน ได้ให้ข้อมูลและคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อ ผู้เขียน อย่างมาก โดยเฉพาะแนวทางการเขียนเนื้อหาและบทวิเคราะห์ตลอดจนการ กำหนดกรอบเวลาในการเสนอความคิดหน้าของงานถือเป็นแรงกระตุ้นให้แก่ผู้เขียน ทั้งท่านอาจารย์ยังได้สละเวลาอันมีค่า ตรวจสอบความถูกต้องของงานผู้เขียนอีกด้วย ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งและสำนึกในพระคุณของท่าน อาจารย์เป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภรัตน์ รักชลธิ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ประธานกรรมการ และกรรมการโครงการพิเศษ ที่ท่านได้กรุณาชี้แนะแนวทางและ คำแนะนำ ตลอดจนข้อสังเกตต่าง ๆ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้โครงการพิเศษฉบับนี้ สำเร็จได้

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ในภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ซึ่งได้ให้ความรู้ทางวิชาการ และ ความรู้ รวมทั้งได้แต่งตำราให้ผู้เขียนได้ใช้ค้นคว้าอ้างอิง จนสามารถจัดทำโครงการพิเศษฉบับนี้ สำเร็จ ลงได้ สุดท้ายนี้ต้องขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจเสมอมา สุดท้ายผู้เขียน ขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่ท่านช่วยสนับสนุนในด้านการศึกษาแก่ผู้เขียน ให้ความรัก ความเข้าใจและเป็นกำลังใจสำคัญให้ซึ่งทำให้โครงการพิเศษฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงลงได้โดยหากโครงการ พิเศษฉบับนี้มี ประโยชน์และคุณค่าทางการศึกษาอยู่บ้างผู้เขียนขอยกความดีทั้งหมดแต่ท่านอาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน และกรรมการสอบโครงการพิเศษทุกท่าน แต่หาก โครงการพิเศษฉบับนี้มีความบกพร่องประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับความผิดพลาด ไว้แต่เพียงผู้เดียว

จิณณิศา นุ่มแทน  
ชนนิกานต์ แสนสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>4</b>
2.1 ไมโครแคปซูล.....	4
2.1.1 ไมโครเอนแคปซูเลชัน.....	4
2.1.2 กระบวนการผลิตไมโครแคปซูล.....	5
2.1.2.1 การเคลือบด้วยวิธีทางเคมี.....	5
2.1.2.2 การเคลือบด้วยวิธีทางกายภาพ.....	6
2.2 สารลดแรงตึงผิว.....	7
2.3 ไคโตซาน.....	10
2.4 วัสดุเปลี่ยนวิญภาค.....	11
2.4.1 ชนิด สมบัติของวัสดุเปลี่ยนวิญภาคและการประยุกต์ใช้.....	12
2.5 การเชื่อมโยงแบบไอออนิก.....	13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b> .....	<b>18</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	18
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	18
3.3 วิธีการทดลอง.....	18
3.3.1 การเตรียมสารตั้งต้น.....	18
3.3.2 การเตรียมไมโครแคปซูล Oc/Cs จากไคโตซานที่บรรจุสารเปลี่ยนสภาวะชนิด	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อออกตะตักเค้น (Oc/Cs) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น 3.3.3 การเตรียมไมโครแคปซูลที่มีสารผสมสี COC/CPE ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ 19 ใช้

3.4	วิธีการตรวจวิเคราะห์ไมโครแคปซูล Oc/Cs.....	23
3.5	การทดสอบสมบัติการรักษาระดับอุณหภูมิของไมโครแคปซูล Oc/Cs.....	23
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>24</b>
4.1	การเตรียมไมโครแคปซูลโคโตซานบรรจุเอ็น-ออกตะเดกเคน (Oc/Cs).....	24
4.1.1	โครงสร้างทางเคมีและหมู่ฟังก์ชันสำคัญของไมโครแคปซูล Oc/Cs.....	24
4.1.2	สมบัติทางความร้อนของไมโครแคปซูล Oc/Cs .....	26
4.1.3	ประสิทธิภาพการรักษาระดับอุณหภูมิของไมโครแคปซูล Oc/Cs.....	31
4.2	การเตรียมไมโครแคปซูลโคโตซานบรรจุสารให้สี.....	32
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>35</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย .....	35
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	35
	เอกสารอ้างอิง .....	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางเคมีของเอ็น-ออกตะเดกเคน .....	12
3.1 สภาพที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูล Oc/Cs โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย SDS .....	20
3.2 สภาพที่ใช้ในการเตรียมแคปซูลของผสมสี COC/CPE.....	20
4.1 ตำแหน่งเลขคลื่นที่สำคัญในสเปกตรัม FT-IR ที่แสดงสัญญาณหมู่ฟังก์ชันหลักที่เกิดในองค์ประกอบต่าง ๆ จากสารต้นต้นที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูล Oc/Cs.....	25
4.2 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ความร้อนแฝงในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) ค่าอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) และความร้อนแฝงในการเกิดผลึก ( $\Delta H_c$ ) ของไมโครแคปซูล Oc/Cs ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณเอ็น-ออกตะเดกเคน.....	27
4.3 การเตรียมไมโครแคปซูล Oc/Cs โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย SDS ที่เอ็น-ออกตะเดกเคน 1000 $\mu$ L .....	29
4.4 การเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิของไมโครแคปซูล Oc/Cs ที่เวลาต่างๆ.....	31
4.5 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) และความร้อนแฝงในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) ของแคปซูลของสารผสมสี COC/CPE.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของ (ก) ไมโครแคปซูลแบบ Multi-core (ข) ไมโครแคปซูลแบบ Single-core และ (ค) ไมโครแคปซูลแบบ matrix encapsulation.....	4
2.2 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค Complex coacervation .....	6
2.3 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่อง Spray dryer (ก) และ Spray congealing (ข).....	6
2.4 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว.....	7
2.5 โครงสร้างของ Anionic surfactant .....	7
2.6 โครงสร้างของ Cationic surfactant โครงสร้างของ Nonionic surfactant .....	8
2.7 โครงสร้างของ Nonionic surfactant .....	9
2.8 โครงสร้างของ Amphoteric surfactant .....	9
2.9 กระบวนการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิว เรียกว่า ไมเซลล์ .....	10
2.10 โครงสร้างของ Chitin, Chitosan .....	11
2.11 การเปลี่ยนวัฏภาคหรือการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเก็บความร้อน .....	12
3.1 แผนภาพการเตรียมไมโครแคปซูล Oc/Cs.....	21
3.2 แผนภาพการเตรียมไมโครแคปซูลที่มีสี COC/CPE.....	22
4.1 สเปกตรัม FT-IR ของไมโครแคปซูล Oc/Cs.....	24
4.2 แผนภาพแสดงลักษณะที่เชื่อมโยงการเกิดไมโครแคปซูล Oc/Cs และเชื่อมโยงระหว่างโคโตซานและ SDS .....	25
4.3 เทอร์โมแกรม DSC แสดงพีค ก) การหลอมเหลว และ ข) การเกิดผลึกของเอ็น-ออกตะเดคเคน ไมโครแคปซูล Oc/Cs ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเอ็น-ออกตะเดคเคน .....	28
4.4 เทอร์โมแกรม DSC แสดงค่าพีค ก) การหลอมเหลว และ ข) การเกิดผลึกของไมโครแคปซูล Oc/Cs ที่ความเข้มข้นของสารละลาย SDS แตกต่างกันว่า เอ็น-ออกตะเดคเคน 1000 $\mu$ L....	30
4.5 เทอร์โมแกรม DSC แสดงค่าพีค ก) การหลอมเหลว และ ข) การเกิดผลึกของสารให้สี COC/CPE และไมโครแคปซูลสี COC/CPE.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
Oc	เอ็น-ออกตะเดกเคน
Cs	โคโตซาน
SDS	โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต
COC	คลอเลสเตอร์โอลีโอเลิลคาร์บอนต
CPE	คลอเลสเตอร์ลินโนเอต
CMC	ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์
DSC	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์
$\mu\text{L}$	ไมโครลิตร
mL	มิลลิลิตร
mM	มิลลิโมลาร์
g	กรัม
J	จูล
%W/V	ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร
%V/V	ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร
rpm	รอบต่อนาที
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
$T_m$	อุณหภูมิการหลอมเหลว
$T_c$	อุณหภูมิการก่อผลึก
$\Delta H_m$	ค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะการหลอมเหลว
$\Delta H_c$	ค่าความร้อนแฝงในการก่อผลึก
N/A	หาค่าไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

สิ่งทอฉลาด (Intelligent textiles) คือ สิ่งทอที่สามารถรับรู้และตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นภายนอกอาจเป็นอุณหภูมิ แสง ความชื้น [1] การตอบสนองอาจแสดงในรูปการเปลี่ยนสี การเปลี่ยนสถานะ การนำไฟฟ้าและความสามารถในการเก็บพลังงาน เป็นต้น หนึ่งในสมบัติของสิ่งทอฉลาดที่ได้รับความนิยมคือ สิ่งทอที่สามารถรักษาระดับของอุณหภูมิของร่างกายได้ (Thermoregulating textile) โดยถูกพัฒนาขึ้นจากความต้องการความสบายในการสวมใส่ของเสื้อผ้าในสภาวะการใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้ผู้สวมใส่รู้สึกร้อนหรือหนาวจนเกินไป ซึ่งสิ่งทอที่มีสมบัติดังกล่าวนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแพทย์เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิร่างกายผู้ป่วยได้

สิ่งทอที่สามารถรักษาระดับอุณหภูมิ ผลิตมาจากการนำเอาสารกลุ่มหนึ่งที่เรียกว่า วัสดุเปลี่ยนวิภาค (Phase change materials, PCMs) บรรจุไว้ในไมโครแคปซูลขนาดเล็ก (Microcapsules) แล้วนำมาผสมในเส้นใยหรือเคลือบบนผ้า สารเหล่านี้จะสามารถดูดซับและปลดปล่อยความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนวิภาคของวัสดุ PCMs ระหว่างของแข็งและของเหลวที่อุณหภูมิหลอมเหลวหรืออุณหภูมิเยือกแข็ง ซึ่งวัสดุ PCMs ที่ได้รับความนิยมคือ เอ็น-ออกตะเดเคน (n-Octadecane) เนื่องจากการดูดและคายความร้อนในช่วงของอุณหภูมิร่างกาย แต่ด้วยสมบัติของวัสดุ PCMs ที่เกิดการเปลี่ยนสถานะกลับไปมาระหว่างของเหลวและของแข็ง ดังนั้นในการจะนำมาประยุกต์ใช้ในสิ่งทอจึงต้องทำการห่อหุ้มเอ็น-ออกตะเดเคนไว้ เพื่อให้สารไม่สูญหายแม้เกิดการเปลี่ยนสถานะ รวมทั้งยังสามารถแสดงพฤติกรรมรักษาระดับอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยชนิดของสารห่อหุ้มที่นิยมใช้มักจะถูกอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น Poly(diallyldimethylammonium) (PDDA) Poly(4-styrenesulfonic acid) (PSS) เป็นต้น [2] ที่ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะพัฒนาการเตรียมไมโครแคปซูลโดยใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ คือ ไคโตซาน เนื่องจากไคโตซานผลิตได้จากวัตถุดิบธรรมชาติสามารถหาได้ง่าย ราคาไม่แพงช่วยลดต้นทุนของวัตถุดิบ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและเหมาะกับการใช้กับร่างกายมนุษย์ ไมโครแคปซูลไคโตซานบรรจุเอ็น-ออกตะเดเคนที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้ในทางการแพทย์ได้

นอกจากนี้ในโครงการพิเศษนี้ยังสนใจที่จะพัฒนาไมโครแคปซูลไคโตซานบรรจุเอ็น-ออกตะเดเคนให้มีสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อเกิดการเปลี่ยนอุณหภูมิของบริเวณข้างเคียง โดยการละลายสารจำพวกเทอร์โมโครมิก (Thermochromic substance) ซึ่งมีสมบัติการเปลี่ยนสีตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเอ็น-ออกตะเดเคนที่บรรจุในไมโครแคปซูล [3] ซึ่งสมบัติเทอร์โมโครมิกนี้มักพบในโมเลกุลสารอินทรีย์ สีย้อม ผลึกเหลว เป็นต้น และโครงการพิเศษนี้สนใจที่จะนำสารกลุ่มผลึกเหลวคลอเรสเทอริก (Cholesteric liquid crystals) คือ คลอเลสเทอรอลโอเลอิลคาร์บอเนต (Cholesterol oleyl carbonate, COC) และคลอเลสเทอริลโนนาโนเอต (Cholesteryl nonanoate, CPE) เนื่องจากของผสมสี COC/CPE เกิดการเปลี่ยนสีในช่วงเดียวกับเอ็น-ออกตะเดเคนจึงนำมาใช้ร่วมกันในไมโครแคปซูลจากไคโตซานที่มีการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคคอมเพล็กซ์โคเอเชอเวชัน (Complex

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

coacervation) เพื่อสร้างสมบัติการเปลี่ยนสีของไมโครแคปซูลทำให้สามารถมองเห็นการเปลี่ยนสถานะของเอ็น-ออกตะเดกเคนจากการเปลี่ยนอุณหภูมิได้ สามารถเป็นตัวบ่งชี้อุณหภูมิร่างกายของผู้ป่วย ซึ่งไมโครแคปซูลที่เปลี่ยนสีตามการเปลี่ยนอุณหภูมิที่เตรียมได้ในโครงการพิเศษนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่มทางการแพทย์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแคปซูลจากโคโตซานที่บรรจุสารเปลี่ยนสภาวะชนิด เอ็น-ออกตะเดกเคน
- 2) ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของแคปซูลจากโคโตซานที่บรรจุสารเปลี่ยนสภาวะชนิด เอ็น-ออกตะเดกเคนที่เตรียมได้
- 3) ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของแคปซูลจากโคโตซานที่ผสมสาร Cholesteryl oleyl carbonate และ Cholesteryl nonanoate

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) การเตรียมแคปซูลจากโคโตซานที่บรรจุสารเปลี่ยนสภาวะชนิดเอ็น-ออกตะเดกเคน โดยมีปัจจัยศึกษาดังนี้
  - ปริมาณของวัสดุเปลี่ยนวิภาคเอ็น-ออกตะเดกเคน ได้แก่ 500  $\mu$ L 1000  $\mu$ L และ 1500  $\mu$ L
  - ปริมาณสารผสมสี COC/CPE ได้แก่ 1000  $\mu$ L
  - ความเข้มข้นของสารละลาย SDS ได้แก่ 10 mM และ 15 mM
- 2) ตรวจสอบลักษณะไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่
  - ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)
  - ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)
  - ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS Spectroscopy)
  - กล้องถ่ายภาพทางความร้อน (Thermal imaging camera)
- 3) ทดสอบการเปลี่ยนสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมไมโครแคปซูลของวัสดุเปลี่ยนวิภาคที่มีสารห่อหุ้มจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ ซึ่งมีสมบัติในการรักษาระดับอุณหภูมิและมีความสามารถในการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิได้ ด้วยกระบวนการที่ง่ายไม่ซับซ้อนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูล  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) จากการเตรียมวัสดุเปลี่ยนวัสดุภาควิชาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประยุกต์ใช้ในสิ่งทอฉลาดเป็นการเพิ่มมูลค่าแก่สิ่งทอ เช่น เสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม และเครื่องใช้สอยต่าง ๆ
- 3) จากการเตรียมวัสดุเปลี่ยนวัสดุภาควิชาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ไมโครแคปซูล (Microcapsules)

ไมโครแคปซูลหมายถึงแคปซูลขนาดเล็กหรืออนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลม การทำไมโครแคปซูล เพื่อประโยชน์ในการคงตัวของสารตลอดการใช้งาน การห่อหุ้มสารที่มีความไวต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย การไวต่อแสง อุณหภูมิและความเป็นกรดต่าง เป็นต้น จะทำให้สารดังกล่าวมีความคงตัวดีขึ้นและเก็บรักษาได้ยาวนานยิ่งขึ้น ซึ่งปัจจุบันมีการใช้งานไมโครแคปซูลหลายด้าน ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมอาหารใช้ในการกักเก็บกลิ่นอาหาร หรือใส่สารให้รสชาติเพื่อให้ได้รสชาติของสาร อุตสาหกรรมสิ่งทอใช้ไมโครแคปซูลในการเก็บน้ำหอมเพื่อให้ความคงทนของผ้าให้หอมนานยิ่งขึ้น หรือใส่สารต้านทานจุลินทรีย์ทำให้เสื้อผ้าไม่มีกลิ่นเหม็นหลังจากใช้งาน อีกทั้งยังพบในงานวิจัยและอุตสาหกรรมยา มีการนำเทคโนโลยีไมโครเอนแคปซูเลชัน (Microencapsulation) มาใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูลเพื่อใช้ในการนำส่งและควบคุมการปลดปล่อยยา เพื่อให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาของยานั้น ๆ โดยเลือกใช้สารที่มีสมบัติที่ต่าง ๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ [4-5]

#### 2.1.1 ไมโครเอนแคปซูเลชัน (Microencapsulation)

ไมโครเอนแคปซูเลชันเป็นกระบวนการที่สารแกนกลาง (Core) ถูกห่อหุ้มด้วยสารห่อหุ้ม (Shell) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งไมโครแคปซูลส่วนใหญ่ จะมีขนาด 1-2  $\mu\text{m}$  ถึง 5 mm



รูปที่ 2.1 ลักษณะของ (ก) ไมโครแคปซูลแบบ Multi-core (ข) ไมโครแคปซูลแบบ Single-core และ (ค) ไมโครแคปซูลแบบ Matrix encapsulation

ไมโครเอนแคปซูเลชันเป็นกระบวนการที่สารหรือส่วนผสมของสารถูกเคลือบด้วยสารชนิดอื่นสารที่ถูกเคลือบ (Coated) หรือ ถูกยัดจับไว้ (Entrapped) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลว แต่บางครั้งอาจเป็นอนุภาคของแข็งหรือก๊าซ ซึ่งจะเรียกชื่อแตกต่างกันไปเช่น Core material หรือ Internal phase สารที่นำมาเคลือบจะเรียกว่า Wall material Carrier Membrane Shell หรือ Coating เป็นต้น การคำนวณว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### • วัตถุประสงค์การทำไมโครแคปซูล

ไมโครแคปซูลมีประโยชน์หลากหลายด้าน เช่น ด้านการแพทย์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งสารจำพวทยาหรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ สามารถควบคุมการปลดปล่อยสารในช่วงเวลาที่เหมาะสม ป้องกันการสลายตัวของสารที่ไวต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาเทคนิควิธีการใหม่ ๆ ขึ้นมาในการห่อหุ้มสารแกนกลาง และการเลือกชนิดของสารห่อหุ้มให้มีคุณสมบัติเฉพาะ เพื่อใช้ในการปลดปล่อยสารแกนกลางให้ออกฤทธิ์ และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการรักษาและป้องกันโรค

### • องค์ประกอบของไมโครแคปซูล

โครงสร้างของไมโครแคปซูล ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ สารที่ถูกห่อหุ้ม และสารที่ใช้ห่อหุ้ม สารที่ถูกห่อหุ้มมักเป็นของเหลวหรือของแข็ง ในส่วนของสารที่เป็นตัวห่อหุ้มมักมีผนังบาง ๆ ซึ่งมีความสำคัญในการกำหนดให้ไมโครแคปซูลมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ สารห่อหุ้มที่ดีควรมีคุณสมบัติที่สามารถแผ่เป็นฟิล์มบาง ๆ ได้ มีความยืดหยุ่นและมีความแข็งแรงเพียงพอ สามารถทำให้เกิดอิมัลชัน (Emulsion) ยึดติดกับสารแกนกลางได้ดีโดยไม่ทำปฏิกิริยากับสารแกนกลาง รวมทั้งต้องมีความหนืดต่ำเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง และไม่ขึ้นง่าย การทำไมโครแคปซูลต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง เนื่องจากจะส่งผลต่อคุณสมบัติของไมโครแคปซูลซึ่งปัจจัยที่สำคัญอย่างมาก คือ การเลือกชนิดของสารห่อหุ้ม และ กลไกในการปลดปล่อยสารที่ถูกห่อหุ้ม โดยกลไกดังกล่าวมักขึ้นอยู่กับ ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ ความดัน และชนิดของเอนไซม์ เป็นต้น

## 2.1.2 กระบวนการผลิตไมโครแคปซูล [6-7]

เทคนิคการผลิตไมโครแคปซูลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การเคลือบด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical method) และการเคลือบด้วยวิธีทางเคมี (Chemical method) เทคนิคไมโครแคปซูลชนิดแบบต่าง ๆ สามารถเตรียมไมโครแคปซูลได้ขนาดและลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละเทคนิคอาจเหมาะสมและสามารถเตรียมไมโครแคปซูลจากสารเคลือบและสารบางชนิดเท่านั้น

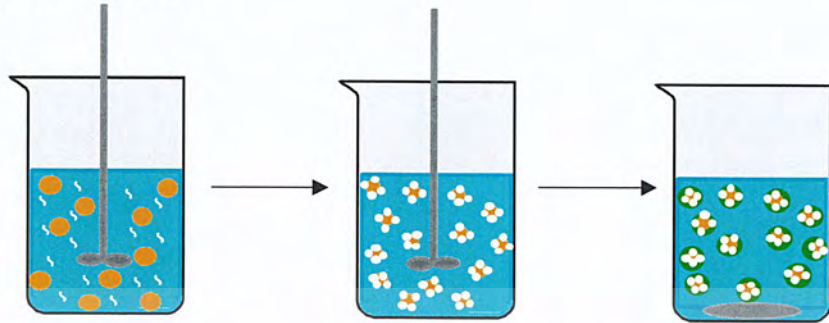
### 2.1.2.1 การเคลือบด้วยวิธีทางเคมี

#### • Complex coacervation

การทำ Complex coacervation เป็นวิธีการเตรียมไมโครแคปซูลที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยอาศัยหลักการเกิดพันธะ Electrostatic ระหว่างสาร Polyelectrolyte 2 ชนิดซึ่งมีประจุตรงข้ามกันเกิดเป็น Complex ซึ่งจะเข้าไปดูดซับที่ผิวหรือห่อหุ้มสารสำคัญไว้ภายใน โดยวิธีการทำ Complex Coacervation จะเตรียมสารละลายของสารห่อหุ้มแต่ละชนิด โดยนำสารละลายของสารห่อหุ้มชนิดหนึ่งมาผสมกับสารสำคัญจนเกิดอิมัลชันขึ้น จากนั้นเติมสารละลายของสารห่อหุ้มอีกชนิดหนึ่งแล้วนำมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน สารห่อหุ้มที่มีประจุตรงข้ามกันจะเกิดพันธะ Electrostatic ต่อกันเกิดเป็น Coacervates ซึ่งจะห่อหุ้มสารสำคัญไว้ภายในและแยกออกเป็น 2 เฟส คือ เฟสของ Coacervates (Coacervate phase) และเฟสสารละลายที่เป็นคอลลอยด์ (Colloidal phase) [8] ราคา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(รูปที่ 2.2) โดยสาร Polyelectrolyte ที่นำมาใช้ในการทำ Complex coacervation ส่วนใหญ่จะเป็นโปรตีน และพอลิแซคคาไรด์



● เอ็น-ออกตะเดเคน ○ สารละลายไซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ● โคโดซาน

รูปที่ 2.2 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค Complex coacervation

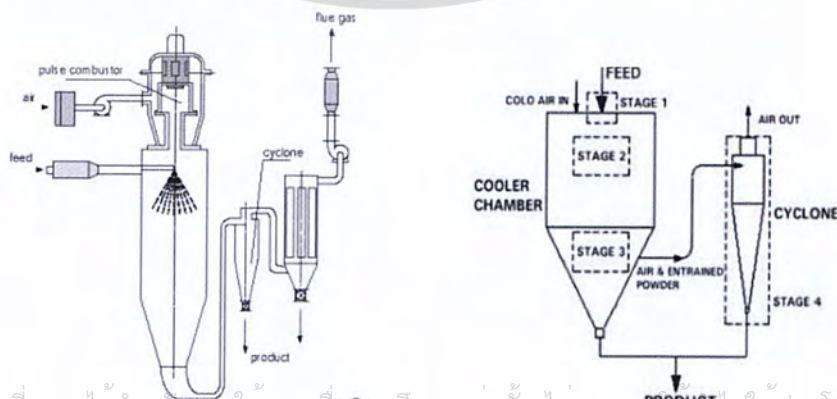
### 2.1.2.2 การเคลือบด้วยวิธีทางกายภาพ

#### ● Spray drying [9]

การพ่นฝอยแห้ง (Spray Drying) เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2473 โดยการนำสารที่ใช้เป็นแกนในซึ่งมักจะเป็นสารอิมัลชันของสารที่ไม่ละลายน้ำเช่น สารให้กลิ่น (Flavor) ผสมลงในสารละลายที่จะเป็นผนังแล้วนำไปบรรจุในเครื่อง Spray Dryer และฉีดพ่นออกมาผ่านหัวพ่น น้ำจะระเหยไปกับลมร้อนที่มีอุณหภูมิ 100-160 °C ทำให้ได้อนุภาคขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-150  $\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากในอุตสาหกรรมอาหาร

#### ● Spray Cooling

การพ่นฝอยเย็น (Spray Cooling หรือ Spray Chilling) ใช้เคลือบสารที่ไม่ทนต่อความร้อนมีหลักการการทำงานคล้ายกับวิธี Spray Drying โดยการนำอนุภาคไปกระจายตัวในสารละลายของสารเคลือบแล้วนำไปพ่นผ่านหัวสเปรย์กระทบกับลมเย็น โดยสารเคลือบที่ใช้ในวิธีนี้จะต้องเป็นสารที่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เช่น Wax กรดไขมัน และสารพอลิเมอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ารูปที่ 2.3 ที่แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่อง spray dryer (ก) และ spray congealing (ข) [10]

## 2.2 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) [11-12]

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำ จะสามารถช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวที่เป็น Hydrophilic (ชอบน้ำ) และ ส่วนหางที่เป็น Hydrophobic (ไม่ชอบน้ำ) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.4 ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ มักจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่มาจากไขมันและน้ำมันตามธรรมชาติ สารลดแรงตึงผิวจะไปลดแรงตึงผิวของน้ำเพื่อให้เกิดกระบวนการต่าง ๆ ให้ได้ง่ายยิ่งขึ้น เช่น การเกิดฟอง การทำให้เปียก และกระบวนการทำความสะอาด เป็นต้น

hydrophobic hydrophilic

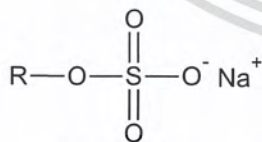


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว [12]

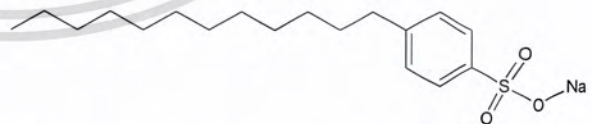
หลักการทำงานของสารลดแรงตึงผิว คือ ส่วนที่ชอบน้ำจะทำการจับกับน้ำ และส่วนที่ชอบน้ำมันจะทำการจับสิ่งสกปรกพวกไขมันที่ไม่สามารถละลายในน้ำได้ ทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกไปแล้วแขวนลอยในน้ำ สารลดแรงตึงผิวแบ่งออกเป็นหลายกลุ่ม ขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าบนส่วนประกอบที่ละลายน้ำ (Hydrophilic) โดยสามารถแยกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

### 1) Anionic surfactant

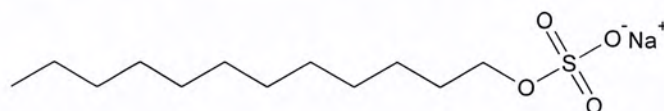
สารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบน Hydrophilic สารนี้เมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัวและส่วนหัวจะมีประจุเป็นลบสารจำพวกนี้มักถูกนำมาใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดต่าง ๆ เช่น น้ำยาล้างจาน ผงซักฟอก รวมทั้งผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น แชมพู ครีมอาบน้ำและอื่น ๆ ทั้งนี้เพราะมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และละลายน้ำได้ดี ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.5



Sodium Alkyl Sulphate (AS)



Sodium linear alkylbenzenesulfonate (LAS)

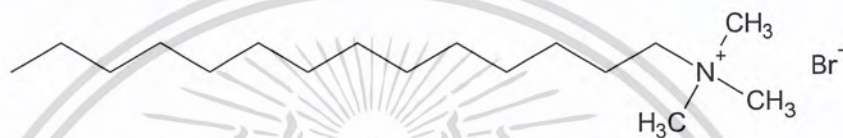


Sodium Dodecyl Sulfate

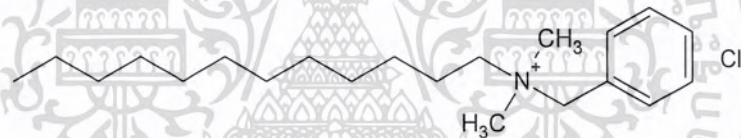
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามรูปที่ 2.5 โครงสร้างของ Anionic surfactant การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) Cationic surfactant

สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุไฟฟ้าบน Hydrophilic ซึ่งให้ประจุบวก ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.6 โดยส่วนมากนั้นมักจะเป็นประเภท Quaternary ammonium สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูง เนื่องจาก Ammonium salt จะมีการสูญเสียประจุบวก ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ สารลดแรงตึงผิวประเภท Cationic จะสามารถทำให้เกิดความระคายเคืองมากกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภท Anionic สารประเภทนี้มักนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้เคลือบผ้า เพื่อให้ความลื่น และป้องกันไฟฟ้าสถิต โดยที่สารจำพวกนี้ไม่มีความสามารถในการทำความสะอาด และไม่มีฟอง แต่สามารถเกาะเส้นผม และพื้นผิวได้ดี ให้ความลื่นจึงนิยมมาใช้ในครีมหวดผม หรือน้ำยาปรับผ้านุ่ม



Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB)



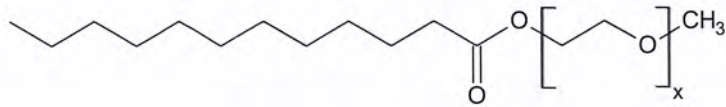
Benzalkonium chloride (BAC)

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ Cationic surfactant

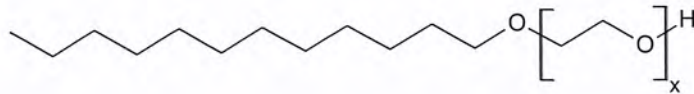
## 3) Nonionic surfactant

สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.7 จะแตกต่างจากสารลดแรงตึงผิวประเภท Anionic และ Cationic เนื่องจากเป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ โดยมีพวก Polyether หรือ Polyhydroxyl เป็นกลุ่มที่แสดงคุณสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุสามารถละลายน้ำได้จนถึงไม่ละลายน้ำ สารที่ไม่ละลายน้ำมักใช้เป็นตัวดับฟองและ Emulsifier ส่วนสารที่ละลายน้ำมักใช้เป็นสารทำความสะอาด แต่เนื่องจากมีฟองน้อยจึงมักใช้คู่กับ Sodium linear alkylbenzenesulfonate (LAS) หรือ Anionic surfactant อื่น ๆ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้สารนี้ ได้แก่ ผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิว เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Methyl ester ethoxylate

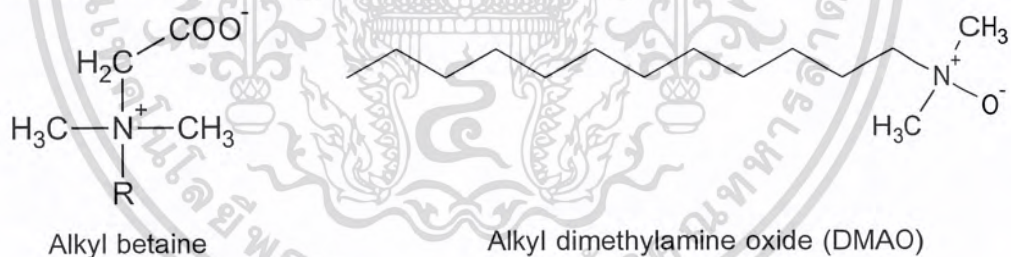


Alcohol ethoxylate (AE)

## รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Nonionic surfactant

## 4) Amphoteric surfactant หรือ Zwitterions

สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุไฟฟ้าบน Hydrophilic สามารถเป็นได้ทั้งประจุบวกและลบดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.8 ซึ่งจะให้คุณสมบัติประเภทใดนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อม ดังนั้นถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นด่าง ( $\text{pH} > 7$ ) ประจุไฟฟ้าบน Hydrophilic จะให้ประจุลบ ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นกรด ( $\text{pH} < 7$ ) ประจุไฟฟ้าบน Hydrophilic จะให้ประจุบวก และในสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดการให้ประจุไฟฟ้าบน Hydrophilic สมบัติหลักของสารกลุ่มนี้คือ สามารถทนน้ำกระด้าง อ่อนละมุนต่อผิว มีคุณสมบัติการเกิดป้องกันไฟฟ้าสถิต และให้ความนุ่มได้ สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิว หรือ ผม



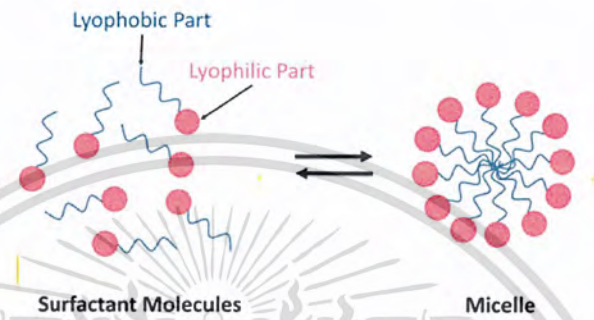
Alkyl betaine

Alkyl dimethylamine oxide (DMAO)

## รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ Amphoteric surfactant

กลไกการทำความสะอาดเริ่มจากการละลายของสารลดแรงตึงผิวในน้ำโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ละลายนั้นจะเริ่มรวมตัวเป็นชั้นอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุที่ต้องการทำความสะอาด หรือที่เรียกว่าการดูดซับ (Adsorption) จากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวให้มากขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่มีจำนวนมากขึ้นนี้จะนำไปสู่กระบวนการรวมตัวกันเอง เกิดเป็นสิ่งที่เรียกว่าไมเซลล์ (Micelle) ซึ่งไมเซลล์ชนิดธรรมดาจะมีลักษณะคล้าย ทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ด้านนอกของไมเซลล์ซึ่งสัมผัสกับน้ำจะเป็นส่วนหัวของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่มีขั้ว ในกรณีของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate) คือส่วนที่มีประจุลบอยู่ด้วย ส่วนด้านในที่ทรงกลมจะเป็นส่วนหางที่ประกอบด้วยสายไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ซึ่งก็คือสายโซ่อัลเคนที่มีคาร์บอน 12 อะตอม บริเวณด้านในทรงกลมนี้จะเป็นวัฏภาคใหม่ซึ่งไม่มีอยู่ในน้ำบริสุทธิ์ และเป็นวัฏภาค

ภาคที่ไม่มีขั้ว เวลาที่ใช้ครีมอาบน้ำหรือแชมพูซึ่งประกอบไปด้วยสารลดแรงตึงผิวทำความสะอาดส่วนต่างๆของร่างกาย ขณะที่ฟอกครีมอาบน้ำไปบนผิวหนังที่เปียก สิ่งสกปรกทั้งหลายที่ไม่มีขั้ว เช่น คราบไขมันจะละลายเข้าไปอยู่ด้านในของไมเซลล์ ส่วนสิ่งสกปรกที่มีขั้วจะละลายน้ำไปตามปกติ และเมื่อชำระล้างร่างกายด้วยน้ำสะอาดอีกครั้ง สิ่งสกปรกทั้งหมดทั้งที่อยู่ในน้ำและในไมเซลล์จะถูกกำจัดออกไปร่างกายจะมีความสะอาดมากขึ้น การซักผ้าด้วยผงซักฟอกที่มีสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน



รูปที่ 2.9 กระบวนการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิว เรียกว่า ไมเซลล์ [13]

โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตมีค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration, CMC) ในน้ำกลั่น ที่ 25 °C เท่ากับ 0.008 M แสดงว่าปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวละลายในน้ำสะอาดเพื่อให้เกิดไมเซลล์มีค่าค่อนข้างน้อย ดังนั้นการใช้สารลดแรงตึงผิวจึงถือเป็นวิธีการทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับปริมาณการใช้ต่อครั้งและราคาของสารลดแรงตึงผิวเอง อย่างไรก็ตามปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด ความกระด้างของน้ำ ล้วนส่งผลให้ค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์เปลี่ยนไป และทำให้ความสามารถในการทำความสะอาดเปลี่ยนไปด้วย

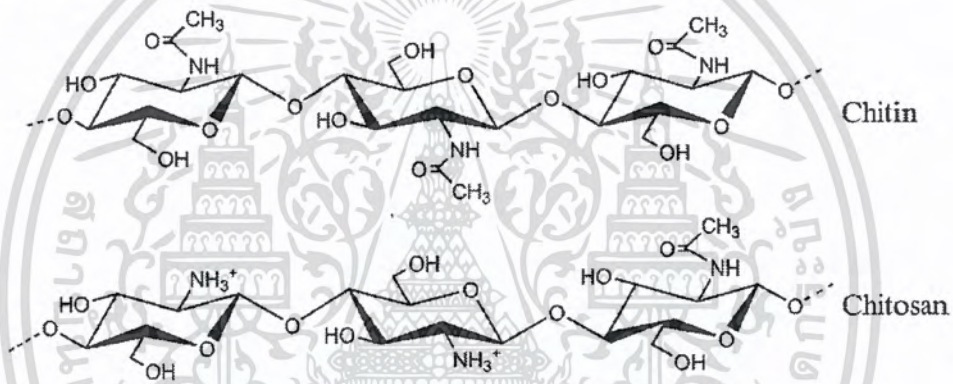
### 2.3 ไคโตซาน (Chitosan)

ไคตินเป็นโครงสร้างแข็งของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง จำพวก แมลง กุ้ง ปู ปลาหมึก เป็นต้น ส่วนไคโตซานเป็นองค์ประกอบอยู่ในเปลือกนอกของสัตว์พวก กุ้ง ปู แมลง และเชื้อรา เป็นสารธรรมชาติที่มีลักษณะโดดเด่นเฉพาะตัว คือ เป็นวัสดุชีวภาพเกิดในธรรมชาติ และย่อยสลายตามธรรมชาติ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตผสมที่ประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีธาตุไนโตรเจนติดอยู่ด้วย ทำให้มีสมบัติที่โดดเด่นและหลากหลายมีประสิทธิภาพสูงในกิจกรรมชีวภาพ ดังนั้นจึงเป็นสารที่มีความปลอดภัยในการใช้กับมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม

โครงสร้างทางเคมีของสารไคตินคล้ายคลึงกับเซลลูโลส คือเป็นสายโซ่ยาวไคตินที่เกิดในธรรมชาติ มีโครงสร้างของผลึกที่แข็งแรงมีการจัดตัวของรูปแบบของผลึก ไคตินเป็นสารพอลิแซคคาไรด์ที่เป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติที่เกิดจากสาร 2-acetamido-2-deoxy- $\beta$ -D-glucose และ 2-amino-2-deoxy- $\beta$ -D-glucose มีความแตกต่างจากพอลิแซคคาไรด์ชนิดอื่น เนื่องจากไคตินมีไนโตรเจนเป็น

องค์ประกอบ มีลักษณะโครงสร้างคล้ายเซลลูโลส แต่ต่างที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของเซลลูโลสจะมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เกาะอยู่ ส่วนของไคตินจะมีหมู่ acetamide (NH-CO-CH<sub>3</sub>) เกาะอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.11

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ได้จากการดึงเอาหมู่อะซิทิล Acetyl Group ของไคตินออกไปโดย ปฏิกิริยาที่เรียกว่า Deacetylation ทำให้โครงสร้างของไคตินที่เป็น N-Acetyl Glucosamine กลายเป็น Glucosamine ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ Active พร้อมจะทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว และมีสมบัติละลายได้ในกรดอ่อน ในอุตสาหกรรมจะสกัดจากเปลือกกุ้ง, ปู, ปลาหมึก โดยผลิตอยู่ในรูปของผงไคโตซาน ซึ่งไคโตซานที่ได้จะมีส่วนผสมของน้ำตาล N-Acetyl-DGlucosamine และ Glucosamine อยู่ในสายพอลิเมอร์เดียวกันซึ่งระดับการกำจัดหมู่ Acetyl หรือเปอร์เซ็นต์การเกิด Deacetylation [15] มีผลต่อสมบัติและการทำงานของไคโตซาน นอกจากนี้น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานบอกถึงความยาวของสายไคโตซานซึ่งมีผลต่อความหนืด เช่น ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีสายยาวและความหนืดมากกว่าไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ [14]

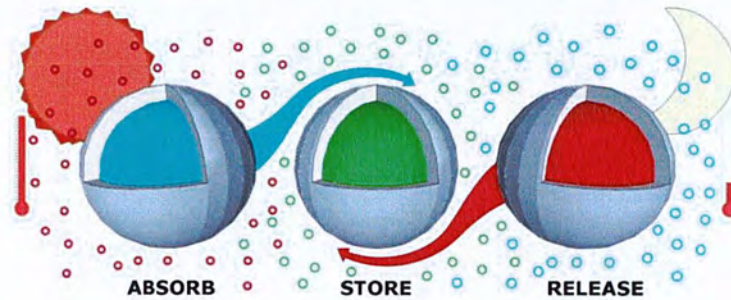


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของ Chitin, Chitosan [16]

## 2.4 วัสดุเปลี่ยนวิญญภาค (Phase change materials) [17]

วัสดุเปลี่ยนวิญญภาค หรือ วัสดุเก็บและปล่อยพลังงานความร้อนในระหว่างกระบวนการเปลี่ยนสถานะ เมื่อวัสดุดังกล่าวเปลี่ยนจากของเหลวเป็นของแข็งจะปล่อยพลังงานจำนวนมากในรูปของความร้อนแฝงของการก่อผลึก ในทางตรงกันข้ามเมื่อวัสดุเกิดการหลอมจากของแข็งเป็นของเหลว จะดูดพลังงานที่ความร้อนแฝงจากการหลอมเหลวจากสิ่งแวดล้อม วัสดุเปลี่ยนวิญญภาค (Phase change materials, PCMs) สามารถใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น การเก็บรักษาพลังงานความร้อนโดยความร้อนหรือความเย็นสามารถจัดเก็บได้จากกระบวนการหนึ่งหรือช่วงระยะเวลาหนึ่งและใช้ในภายหลังหรือสถานที่อื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนวัฏภาคหรือการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเก็บความร้อน [18]

#### 2.4.1 ชนิด สมบัติของวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคและการประยุกต์ใช้

วัสดุเปลี่ยนวัฏภาค หรือ วัสดุเก็บความร้อน แบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ

- 1) วัสดุเก็บความร้อนแบบเซนซิเบิล (Sensible heat storage) ได้แก่ หิน และ น้ำ
- 2) วัสดุเก็บความร้อนแฝง ได้แก่ สารกลุ่มอนินทรีย์ (Inorganic compounds) และกลุ่มอินทรีย์ (Organic compounds)

สารกลุ่มอนินทรีย์ที่นิยมใช้ คือ เกลือที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง (Hydrated salts) เช่น  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

สารกลุ่มอินทรีย์ที่นิยมใช้ คือ พาราฟิน (Paraffin) กรดไขมัน (Fatty acid)

สำหรับสารกลุ่มอินทรีย์ พาราฟินเป็นกลุ่มที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากมีค่าความจุความร้อนของการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสูง และมีลักษณะเฉพาะสำคัญที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุเก็บความร้อนแฝง เช่น ไม่เป็นพิษ ไม่เกิดการกัดกร่อน มีความเสถียรในระยะยาวและมีราคาถูก แต่อย่างไรก็ตามพาราฟินมีการนำความร้อนที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเกลือที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง ดังนั้นในการใช้งานจึงต้องการพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนมาก ซึ่งการทอหุ้มสารเหล่านี้ให้เป็นแคปซูลเป็นเทคนิคหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว และส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้งานโดยตรง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากลุ่มพาราฟินของเอ็น-ออกตะเดเคน (*n*-Octadecane)

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีของเอ็น-ออกตะเดเคน [19]

สมบัติ	รายละเอียด
สูตรโมเลกุล	$\text{C}_{18}\text{H}_{38}$
น้ำหนักโมเลกุล	254.501 g/mol
สถานะ สี	ของแข็งสีขาว
จุดหลอมเหลว	28.00-29.00 °C
จุดเดือด	316.00-317.00 °C
ความถ่วงจำเพาะ	0.7770 @ 25.00 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นจำเป็นต้องใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหวังให้เกิดแรงบันดาลใจแก่เจ้าของเอกสารทุกท่านที่มีการนำไปใช้

- การประยุกต์ใช้วัสดุเปลี่ยนวัฏภาค
  - การขนส่งและการปลดปล่อยยาที่ควบคุมด้วยอุณหภูมิ
  - PCMs สามารถรวมอยู่ในสิ่งทอควบคุมความร้อนเพื่อที่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
  - การนำมาใช้ผลิตเป็นแผ่นกันความร้อนหรือผสมในวัสดุสำหรับก่อสร้างอาคารบ้านเรือน
  - การนำมาช่วยรักษาความร้อนในเครื่องอบพลังงานอาทิตย์ ให้สามารถเพิ่มระยะเวลาการกักเก็บความร้อนเพื่อใช้ในการอบในเวลาที่ไม่ได้มีแสงแดด

## 2.5 การเชื่อมโยงแบบไอออนิก (Ionic crosslink) [20]

การเชื่อมโยงแบบไอออนิก (Ionic crosslink) เป็นวิธีการเตรียมอนุภาคนาโนจากพอลิเมอร์ในธรรมชาติที่มักจะอาศัยหลักการของแรงดึงดูดระหว่างประจุที่ตรงข้ามกันของพอลิเมอร์ในธรรมชาติกับสารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) เช่น โคโตซาน เป็นพอลิเมอร์ในธรรมชาติที่มีประจุเป็นบวกสามารถเกิดการเชื่อมโยงแบบไอออนิกกับ SDS ที่มีประจุเป็นลบ

เนื่องจากวิธีนี้เหมาะกับพอลิเมอร์ในธรรมชาติและสารที่มีประจุ ดังนั้นวิธีการเตรียมสามารถทำได้ในน้ำซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และอีกทั้งยังเป็นวิธีที่ง่ายเพียงหยดสารละลายชนิดใดชนิดหนึ่งลงไปในสารละลายอีกชนิดหนึ่งโดยที่ ต้องมีการปั่นกวนอย่างสม่ำเสมอ สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้องและยังใช้เครื่องมือที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนและประจุบนพื้นผิวของอนุภาคที่ได้ เช่น

- น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งถ้าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์มากอนุภาคที่ได้จะมีขนาดใหญ่
- ความเข้มข้น ปริมาตร และอัตราส่วนของพอลิเมอร์ในธรรมชาติกับสารเชื่อมโยง โดยทั่วไปนั้นถ้าหากต้องการอนุภาคเล็กขนาดนาโนเมตรควรใช้ความเข้มข้นต่ำ ๆ เนื่องจากถ้าหากใช้ความเข้มข้นสูงมากจะได้อนุภาคขนาดใหญ่ และอาจเกิดการรวมตัวกัน (Aggregation) เกิดการตกตะกอน
- สารลดแรงตึงผิวอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความคงตัวให้กับอนุภาคที่ได้
- อัตราเร็วในการกวนเมื่อสารทั้งสองผสมกันและอัตราเร็วในการหยดสาร
- ค่าพีเอชของสารละลาย
- อุณหภูมิ

อนุภาคนาโนที่นำมาจากพอลิเมอร์ในธรรมชาติที่ใช้วิธีการเชื่อมโยงแบบไอออนิกที่นิยมใช้กันมาก คือ การเตรียมอนุภาคนาโนโคโตซานกับ TPP อนุภาคที่ได้จะมีลักษณะทรงกลม และมีประจุบวกบนพื้นผิว โดยโคโตซานมีการแทนที่ของหมู่อะมิโน (Degree of deacetylation) ถ้าระดับการแทนที่ของหมู่อะมิโนมากอนุภาคที่ได้จะมีขนาดเล็ก เนื่องจากถ้าระดับการแทนที่ของหมู่อะมิโนมาก การละลายในกรดอ่อน เช่น กรดแอสติกและกรดแลคติกก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Yuwanda lamphaojeen และ Punnama Siriphannon [21] ได้ศึกษาการเตรียมอนุภาคนาโนแคปซูลที่บรรจุเอ็น-ออกตะเดเคน (n-Octadecane) บนผ้าฝ้าย โดยทำการเตรียมผ้าฝ้ายให้มีประจุบวก (Cat-cot) ทำได้โดยการแช่ลงในสารละลายผสมของ 3-Chloro-2-hydroxy propyltrimethylammonium (CHTAC) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากนั้นทำการเตรียมแคปซูล โดยห่อหุ้ม n-Octadecane ด้วย สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ ชนิด พอลิไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDDA) เกิดเป็น นาโนแคปซูล ที่มีประจุเป็นบวก (PDDA-Oc-cap) ทำการตรึง Cat-cot ด้วย PDDA-Oc-cap โดยใช้สารยึดเกาะ พอลิ-4-สไตรีนซัลโฟนิคแอซิด (PSS) จากนั้นทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ PSS และ PDDA-Oc-cap ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับโมเลกุลสีย้อม พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ PSS จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประจุลบบนพื้นผิวผ้าฝ้าย เนื่องจาก PSS ในทางตรงกันข้ามแคปซูล PDDA-Oc-cap ไม่สามารถดูดซับสีย้อม MB ที่มีประจุบวก แต่สามารถดูดซับสีย้อมประจุลบ eosin B

งานวิจัยของ Yu Guan และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาการเตรียมไมโครแคปซูลของผลึกเหลวคลอเรสเตอริก (Cholesteric Liquid Crystals Microcapsules; CLCM) โดยใช้วิธีคอมเพล็กซ์โคเอเซอร์เวชัน (Complex Coacervation) โดยนำสารละลายอะคาเซีย (Acacia) มาผสมกับผลึกเหลวคลอเรสเตอริก (Cholesteric Liquid Crystals; CLC) จนเกิดเป็นอิมัลชัน จากนั้นเติมสารละลายเจลาติน (Gelatin) อะคาเซียและเจลาตินจะเกิดอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic interaction) ระหว่างสารอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิดที่มีประจุตรงข้ามกัน เกิดเป็นคอมเพล็กซ์เพื่อทำการห่อหุ้มสาร CLC โดยสาร CLC ภายในมีสมบัติเป็นสารเทอร์โมโครมิก (Thermochromic) ซึ่งสามารถเปลี่ยนสีได้เมื่ออุณหภูมิของสารเปลี่ยนแปลง เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของสารแกนกลางและสารห่อหุ้ม (Core-Shell) ของ CLCM พบว่ามี CLC ภายในแคปซูลคิดเป็น 52% สมบัติเทอร์โมโครมิกของ CLCM มีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของอนุภาค CLCM ซึ่งมีขนาดอนุภาคในช่วง 3-30  $\mu\text{m}$  ส่งผลให้แสดงสมบัติของเทอร์โมโครมิกได้ดี จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีแดงเป็นสีฟ้าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ CLCM จะถูกผสมกับสารละลายโพลีไวนิล ไพโรลิโดน (Polyvinyl Pyrrolidone; PVP) จากนั้นนำสารผสม CLCM/PVP ไปผลิตเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง (Electrospinning Process) สาร CLCM ในเส้นใย CLCM/PVP ยังคงแสดงสมบัติเทอร์โมโครมิกขนาดอนุภาคของ CLCM ที่เหมาะสมในการเตรียมเป็นเส้นใยคืออนุภาคที่มีขนาดช่วง 3-10  $\mu\text{m}$

งานวิจัยของ Xiaofen Tang และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาการเตรียมไมโครแคปซูลของ n-Octadecane (MicroC18) ที่ห่อหุ้มด้วย n-Octadecyl methacrylate (ODMA) และ Methacrylic acid (MAA) ซึ่งเชื่อมโยงด้วย Divinylbenzene (DVB) หรือ Allyl methacrylate (AMA) โดยใช้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย (Suspension-like polymerization) เมื่อนำ MicroC18 ไปตรวจวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่า MicroC18 มีลักษณะทรงกลม นูน และขรุขระ เมื่อศึกษาผลของอัตราส่วนมอนอเมอร์ : เอ็น-ออกตะเดเคน (C18) พบว่าเมื่อปริมาณ C18 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเอนทัลปีสูงขึ้น อย่างไรก็ตามหากเพิ่มปริมาณของ C18 ในการเตรียมไมโคร-

แคปซูลสูงเกินไปจะมีผลให้แอลทลปิดลดลง เนื่องจากปริมาณของ C18 มากเกินไปส่งผลให้การห่อหุ้มไม่สมบูรณ์จึงเกิดการแพร่ของ C18 ออกจากไมโครแคปซูล ดังนั้นอัตราส่วนมวลของมอนอเมอร์ : C18 ที่เหมาะสมที่สุด คือ 2 : 1 เนื่องจากมีเอนทัลปีของ MicroC18 ที่สูงที่สุด ในการศึกษาผลของสารเชื่อมโยงพบว่า MicroC18 ที่ใช้สารเชื่อมโยง AMA มีความแข็งแรงเชิงกลที่สูงกว่า MicroC18 ที่ใช้สารเชื่อมโยง DVB เนื่องจากการเชื่อมขวางของเปลือกพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น และความยืดหยุ่นที่สูงขึ้น MicroC18 ที่เตรียมโดยใช้สารเชื่อมโยง AMA มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าที่เตรียมโดยใช้ DVB

งานวิจัยของ Yuwanda lamphaojeen และ Punnama Siriphannon [24] ได้ทำการศึกษากการเตรียมนาโนแคปซูลของวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค (Phase change materials, PCMs) ด้วยเทคนิค Soft solution โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ สารที่เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ชนิด Poly(diallyldimethylammonium chloride) (PDDA) เป็นเปลือก และเอ็น-ออกตะเดคเคนเป็นสารแกนกลาง ทำการเตรียมนาโนแคปซูล โดยนำเอ็น-ออกตะเดคเคน 0.5% V/V ผสมกับ Sodium dodecyl sulfate (SDS) เข้มข้น 10 mM โดยคลื่นเสียงความเข้มสูงเป็นเวลา 10 นาที เกิดเป็นอิมัลชัน Oc-SDS จากนั้นนำ Oc-SDS ที่เตรียมไว้ผสมกับ PDDA เข้มข้น 1, 2, 4 หรือ 6 mM ในอัตราส่วนปริมาณ PDDA : เอ็น-ออกตะเดคเคน ที่ 1 : 0.01 เกิดเป็นนาโนแคปซูล PDDA1-en-Oc, PDDA2-en-Oc, PDDA4-en-Oc และ PDDA6-en-Oc ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PDDA จาก 1 เป็น 2 mM ส่งผลให้ขนาดอนุภาค PDDA-en-Oc และความหนาของเปลือกเพิ่มขึ้น ปริมาณแคปซูลที่ห่อหุ้มมากขึ้น ปริมาณความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่ม PDDA จะทำให้ประสิทธิภาพการห่อหุ้มลดต่ำลง เนื่องจากความเข้มข้น PDDA ที่สูงมากก่อให้เกิดแรงดันออสโมติกระหว่างไมโครแคปซูล ส่งผลให้ประสิทธิภาพการห่อหุ้มลดลง สรุปได้ว่าประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงสุดนั้นอยู่ที่ประมาณ 58% เมื่อใช้ PDDA ขนาด 4 mM ซึ่งมีความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะสูงที่สุดประมาณ 124.4 J/g

งานวิจัยของ Yuwanda lamphaojeen และ Punnama Siriphannon [25] ได้ทำการศึกษาศาสมารถในการรักษาระดับอุณหภูมิของผ้าฝ้าย ด้วยการตรึงของเอ็น-ออกตะเดคเคน ที่ห่อหุ้มด้วย Poly(diallyldimethylammonium chloride) (PDDA) ซึ่งเตรียมจากเทคนิค Layer-by-layer (LbL) ที่มี Sodium dodecyl sulfate (SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิว โดยเริ่มต้นจากการเตรียม PDDA ที่ห่อหุ้มเอ็น-ออกตะเดคเคน (PDDA-en-cap หรือ Cap+) ในอัตราส่วนปริมาณของ เอ็น-ออกตะเดคเคน: SDS: PDDA ที่ 0.01: 1: 1 จากนั้นนำผ้าฝ้ายที่มีประจุบวก (Cat-cot) แخلลงใน poly(4-styrenesulfonic) (PSS) ที่มีประจุลบเป็นเวลา 10 นาที ได้เป็น Cat-cot/PSS และนำ Cat-cot/PSS แخلลงใน Cap+ เป็นเวลา 10 นาที ได้เป็น Cat-cot/PSS/Cap+ ทำการตรึงนาโนแคปซูล Cap+ ซ้ำด้วยเทคนิค LbL จำนวน 1-5 รอบ เพื่อเพิ่มจำนวนนาโนแคปซูล Cap+ ที่ถูกตรึงบนผ้าฝ้าย เนื่องจากปริมาณของนาโนแคปซูล Cap+ จะส่งผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนและการรักษาระดับอุณหภูมิของผ้าฝ้าย

งานวิจัยของ Hyungbo Shim, Ernest Armstrong McCulloch และ Brandon Jones [26] ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค (Phase change materials, PCMs) ที่เคลือบบนเสื้อผ้าซึ่งผลิตจากฟองน้ำลามิเนต โดยทำการเคลือบ PCMs หนึ่งชั้นและสองชั้น แล้วนำมาทดสอบ

การสูญเสียความร้อนจากร่างกายของหุ่นจำลองที่สวมใส่เสื้อผ้าเคลือบ PCMs โดยนำหุ่นจำลองมาอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลา 15 นาทีแล้วนำไปอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมอุณหภูมิต่ำเป็นระยะเวลา 15 นาที ผลการทดสอบพบว่า ความร้อนที่ปล่อยออกมาจากเสื้อผ้าที่เคลือบด้วย PCMs ในสภาพแวดล้อมที่เย็นจะลดการสูญเสียความร้อนในร่างกายโดยเฉลี่ย 6.5 W สำหรับชุดหนึ่งชั้นและ 13.2 W สำหรับชุดแบบสองชั้น

งานวิจัยของ Preeyaporn Chaiyasat และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาการเตรียมแคปซูลพอลิเมอร์ห่อหุ้มเอ็น-ออกตะเดกเคน เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเก็บความร้อนด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบมินิมัลชัน โดยในขั้นตอนการเตรียมหยดมอนอเมอร์โดยวิธีการเตรียมแบบดั้งเดิมที่ใช้แรงเฉือนสูงด้วยการปั่นด้วยโฮโมจีไนเซอร์ เปรียบเทียบกับวิธีกลับเฟส (Phase inversion) ที่ไม่ใช้แรงเฉือนสูงในกรณีเตรียมหยดมอนอเมอร์แบบดั้งเดิม พบว่าอัตราเร็วในการปั่นกวนที่ 5,000 rpm 5 นาที และ 15,000 rpm 10 นาที และใช้มีริสทิล ไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ เข้มข้น 1.0 wt% ของสารละลายทั้งหมด เป็นสภาวะที่เหมาะสม หยดมอนอเมอร์และพอลิเมอร์แคปซูลที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 300-1,000 nm มีความเสถียรภาพทางคอลลอยด์สูงไม่จับตัวกันเป็นก้อน ในกรณีการเตรียมหยดมอนอเมอร์แบบไม่ใช้แรงเฉือนสูงด้วยวิธีกลับเฟส พบว่าเมื่อใช้ PVA 3 g ในชั้นสารอินทรีย์แล้วเติม SDS 0.1 g ในชั้นน้ำเป็นสารลดแรงตึงผิวร่วม อิมัลชันที่ได้ไม่เกิดการจับตัวกันมีความเสถียรภาพทางคอลลอยด์สูง แต่แคปซูลที่ได้มีขนาดประมาณ 2-3  $\mu\text{m}$  มีขนาดใกล้เคียงกัน มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแคบ เมื่อทำการเตรียมแคปซูลพอลิไดไวนิลเบนซีน-โค-เมทิลเมทาคริเลต) โดยมีอัตราส่วนไดไวนิลเบนซีนต่อเมทิลเมทาคริเลตเป็น 50:50 พบว่าแคปซูลที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีรอยยุบจำนวนมาก เนื่องจากความแข็งแรงของเปลือกแคปซูลลดลง แคปซูลที่ได้มีขนาดประมาณ 4-6  $\mu\text{m}$  และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคมากกว่ากรณีแคปซูลพอลิไดไวนิลเบนซีน ค่าปริมาณความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของเอ็น-ออกตะเดกเคนที่ถูกห่อหุ้มอยู่ในโคพอลิเมอร์แคปซูลมีค่าเท่ากับ 237 J/g-OD และความร้อนแฝงของการก่อผลึกมีค่าเท่ากับ 236 J/g-OD ซึ่งมีค่าใกล้เคียงเอ็น-ออกตะเดกเคนที่ไม่ถูกห่อหุ้มมาก ดังนั้นในการเตรียมแคปซูลพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบมินิมัลชันหรือแบบแขวนลอย สามารถเตรียมหยดมอนอเมอร์แบบไม่ใช้แรงเฉือนสูงได้โดยใช้วิธีกลับเฟสได้

งานวิจัยของ Siriluck Namwong และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวสามชนิดที่มีต่อสัญญาณวิทยาของแคปซูลพอลิไดไวนิลเบนซีนห่อหุ้มเอ็น-ออกตะเดกเคนที่เตรียมด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอย ในกรณีใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะได้ขนาดหยดมอนอเมอร์และแคปซูลพอลิเมอร์ประมาณ 1-10  $\mu\text{m}$  มีเปลือกพอลิเมอร์ห่อหุ้มเอ็น-ออกตะเดกเคนอย่างสมบูรณ์ เป็นทรงกลมผิวเรียบและมีการยุบตัวที่ผิวของแคปซูลหนึ่งตำแหน่ง ในกรณีที่ใช้โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและไมริสทิล ไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ได้ขนาดหยดมอนอเมอร์และแคปซูลพอลิเมอร์ที่เล็กกว่าการใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อนุภาคที่ได้มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลม ความหนาของเปลือกไม่สม่ำเสมอ โครแคปซูลที่เตรียมโดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีเปอร์เซ็นต์การบรรจุเอ็น-ออกตะเดกเคน

ประมาณ 50% และประสิทธิภาพการหุ้มประมาณ 100% ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลว และค่าความร้อนแฝงของการก่อผลึกของเอ็น-ออกตะเดกเคนเป็น 193 และ 182 J/g-OC ตามลำดับ ซึ่งมี

ค่าต่ำกว่าของเอ็น-ออกตะเดกเคนที่ไม่ถูกห่อหุ้มเนื่องจากผลของการห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ ในทางตรงกันข้ามการใช้โซเดียมโอดีเซลซัลเฟตและไมริสทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ไม่พบพีคของเอ็น-ออกตะเดกเคนซึ่งเกิดจากการหุ้มไม่สมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ไคโตซาน (Chitosan) บริษัทไบโอ21 จำกัด เกรดการค้า
- 2) สารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium Dodecyl Sulfate,  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$ ) บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd เกรดวิเคราะห์
- 3) เอ็น-ออกตะเดเคน (n-Octadecane 99+%,  $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ ) บริษัท Acros Organics เกรดวิเคราะห์
- 4) กรดแอซิติก (Acetic acid,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) บริษัท Carlo Erba Reagenti SpA เกรดวิเคราะห์
- 5) คลอเรสเตอรอล โอเรอิลคาร์บอเนต (Cholesterol oleyl carbonate,  $\text{C}_{46}\text{H}_{80}\text{O}_3$ ) และ คลอเลสเทอรอล โนนานอเอต (Cholesteryl nonanoate,  $\text{C}_{36}\text{H}_{62}\text{O}_2$ ) บริษัท SIGMA-ALDRICH Co.Ltd เกรดวิเคราะห์
- 6) น้ำกลั่น (Distilled water)

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) PERKIN ELMER,co.,Ltd รุ่น PYRIS DIAMOND DSC
- 2) ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) PERKIN ELMER,co.,Ltd รุ่น Spectrum GX
- 3) ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-visible Spectroscopy) PG Instruments,co.,Ltd รุ่น T60U
- 4) กล้องถ่ายภาพทางความร้อน (Thermal imaging camera)
- 5) เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น SI-234
- 6) ไมโครปิเปต (Micropipette) Labnet International
- 7) เครื่องปั่นกวน (Homogenizer) DAIHAN Scientific (Thailand) co.,Ltd รุ่น HG-15D

#### 3.3 วิธีการทดลอง

##### 3.3.1 การเตรียมสารตั้งต้น

- 1) เตรียมสารละลาย SDS เข้มข้น 10 mM โดยละลาย SDS 0.3460 g ในน้ำกลั่นปราศจากไอออน 120 mL ปั่นกวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2) เตรียมสารละลายกรดแอซิติก เข้มข้น 2% V/V ปิเปตกรดแอซิติก เข้มข้น 99% V/V ปริมาตร 2 mL ละลายในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 98 mL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เตรียมสารละลายโคโตซาน เข้มข้น 1.5% W/V โดยละลายโคโตซาน 0.3 g ในกรดแอซิดิกเข้มข้น 2% V/V 20 mL ปั่นกวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

### 3.3.2 การเตรียมไมโครแคปซูล Oc/Cs จากโคโตซานที่บรรจุสารเปลี่ยนสถานะชนิดเอ็น-ออกตะเดกเคน (Oc/Cs)

- 1) ปิเปตเอ็น-ออกตะเดกเคน (Oc) ปริมาตร 1000  $\mu$ L ใส่ลงในสารละลาย SDS 120 mL
- 2) ปั่นกวนสารผสมข้อ 1) ด้วยเครื่อง Homogenizer โดยใช้ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นระยะเวลา 5 นาที จากนั้นตั้งสารอิมัลชันที่เตรียมได้ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) นำสารอิมัลชันจากข้อ 2) มาปั่นกวนอย่างช้า ๆ ด้วยแท่นปั่นกวนแม่เหล็ก จากนั้นหยดสารละลายโคโตซาน เข้มข้น 1.5% W/V ลงในสารอิมัลชันอย่างช้า ๆ พร้อมปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นตั้งสารผสมที่เตรียมได้ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง
- 4) นำสารผสมที่เตรียมได้ในข้อ 3) มาทำให้แห้งด้วย เครื่อง Freeze dry ทำเป็นผงเยือกแข็งเป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมง
- 5) ทำการเตรียมไมโครแคปซูล Oc/Cs ซ้ำ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนปริมาตรสารละลายโคโตซาน : เอ็น-ออกตะเดกเคน เป็น 2:1 6:1 10:1 20:1 และ 20:2 ดังแสดงในตารางที่ 3.1

### 3.3.3 การเตรียมไมโครแคปซูลที่มีสารผสมสี COC/CPE

- 1) ปิเปตของผสมสี Cholesteryl oleyl carbonate (COC) และ Cholesteryl nonanoate (CPE) ปริมาตร 1000  $\mu$ L ปั่นกวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2) ปิเปตของผสมในข้อ 1) ลงในสารละลาย SDS 120 mL
- 3) ปั่นกวนสารผสมข้อ 2) ด้วยเครื่อง Homogenizer โดยใช้ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นระยะเวลา 5 นาที จากนั้นตั้งสารอิมัลชันที่เตรียมได้ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำสารอิมัลชันจากข้อ 3) มาปั่นกวนอย่างช้า ๆ ด้วยแท่นปั่นกวนแม่เหล็ก จากนั้นหยดสารละลายโคโตซาน เข้มข้น 1.5% W/V ลงในสารอิมัลชันอย่างช้า ๆ พร้อมปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นตั้งสารผสมที่เตรียมได้ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง
- 5) นำสารผสมที่เตรียมได้ในข้อ 4) มาทำให้แห้งด้วยเครื่อง Freeze dry ทำเป็นผงเยือกแข็งเป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูล Oc/Cs โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย SDS

ชื่อตัวอย่าง	สภาวะที่ใช้						
	สารละลายโคโตซาน (1.5% W/V)	สารละลาย SDS (mM)	เอ็น-ออกตะเดกเคน ( $\mu\text{L}$ )	$\Delta H_m$ (J/g)	$T_{m,onset}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta H_c$ (J/g)	Encapsulation efficiency (%)
Oc			-	N/A	N/A	N/A	N/A
Cs10-S10-Oc0.5		10	500	N/A	N/A	N/A	N/A
Cs10-S10-Oc1	10			36	27	31	22
Cs10-S15-Oc1		15	1000	53	27	51	34
Cs10-S10-Oc1.5		10	1500	146	29	142	95

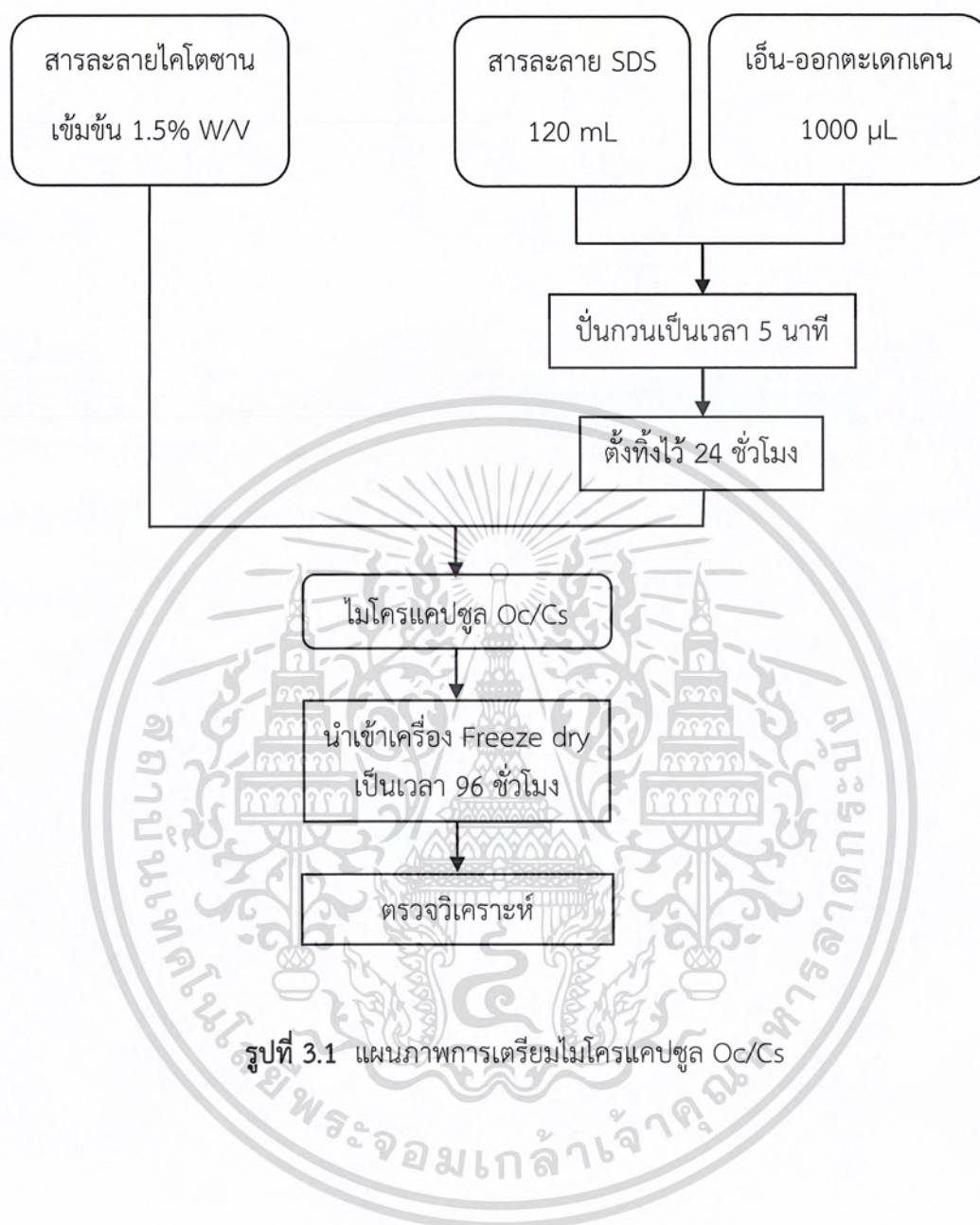
\* หมายเหตุ : Cs หมายถึง สารละลายโคโตซาน S หมายถึง สารละลาย SDS Oc หมายถึง เอ็น-ออกตะเดกเคน  $T_m$  หมายถึง ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว  $\Delta H_m$  หมายถึง ความร้อนแฝงในการหลอมเหลว  $\Delta H_c$  หมายถึง ความร้อนแฝงในการก่อผลึก ประสิทธิภาพในการห่อหุ้ม (Encapsulation efficiency) ของไมโครแคปซูล Oc/Cs

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการเตรียมแคปซูลของผสมสี COC/CPE

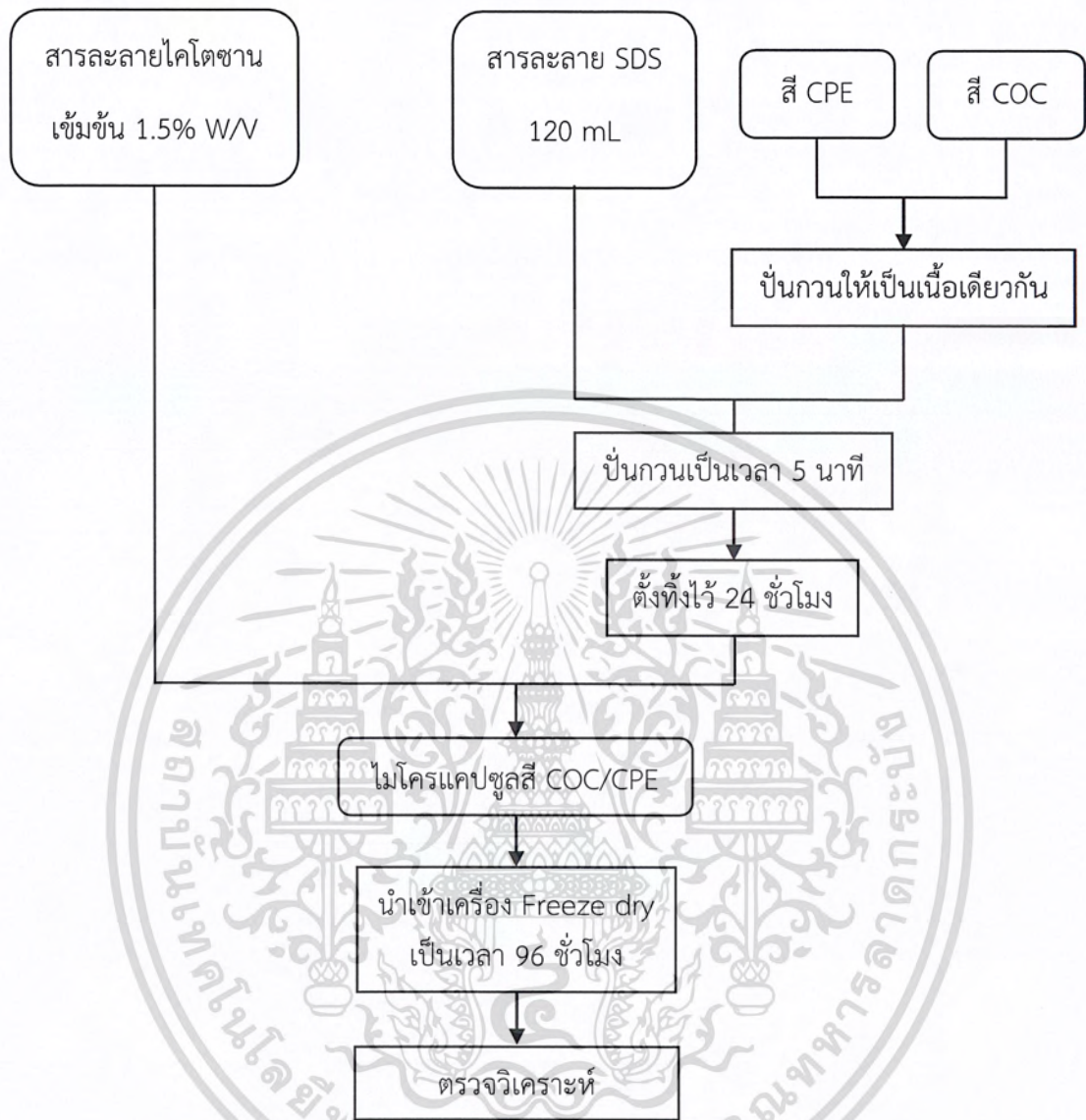
ชื่อตัวอย่าง	สภาวะที่ใช้		
	สารละลายโคโตซาน (1.5% W/V)	สารละลาย SDS (mM)	ของผสมสี COC/CPE ( $\mu\text{L}$ )
Cs10-S10-COC/CPE1	10	10	1000

\* หมายเหตุ : Cs หมายถึง สารละลายโคโตซาน S หมายถึง สารละลาย SDS COC หมายถึง สีคลอเรสเตอร์อล โอเรอิตคาร์บอนेट CPE หมายถึง คลอเลสเตอรอล โนนานอเอต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาพที่ 3.2 แผนภาพการเตรียมไมโครแคปซูลที่มีสี COC/CPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การตรวจวิเคราะห์ไมโครแคปซูล Oc/Cs

- การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของไมโครแคปซูล Oc/Cs

นำตัวอย่างไมโครแคปซูล Oc/Cs ไปตรวจวิเคราะห์ด้วยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimetry, DSC) โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 0-50 °C ใช้อัตราการให้ความร้อนและอัตราการเย็นตัว 10 °C/นาที ในบรรยากาศไนโตรเจน

- การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไมโครแคปซูล Oc/Cs

นำตัวอย่างไมโครแคปซูล Oc/Cs ไปตรวจวิเคราะห์ด้วยฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

- การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางแสงของไมโครแคปซูล COC/CPE/Cs

นำตัวอย่างไมโครแคปซูล COC/CPE/Cs ตรวจวิเคราะห์ด้วยยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectroscopy)

### 3.5 การทดสอบสมบัติการรักษาระดับอุณหภูมิของไมโครแคปซูล Oc/Cs

นำสารตัวอย่างไมโครแคปซูล Oc/Cs 1 g ไปให้ความเย็นที่อุณหภูมิ 0 °C เป็นเวลา 20 นาทีแล้วนำมาวางในตู้ให้ความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิในช่วง 35-40 °C แล้วทำการบันทึกภาพถ่ายความร้อนของสารตัวอย่างไมโครแคปซูล Oc/Cs ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนที่เวลาต่าง ๆ

## บทที่ 4

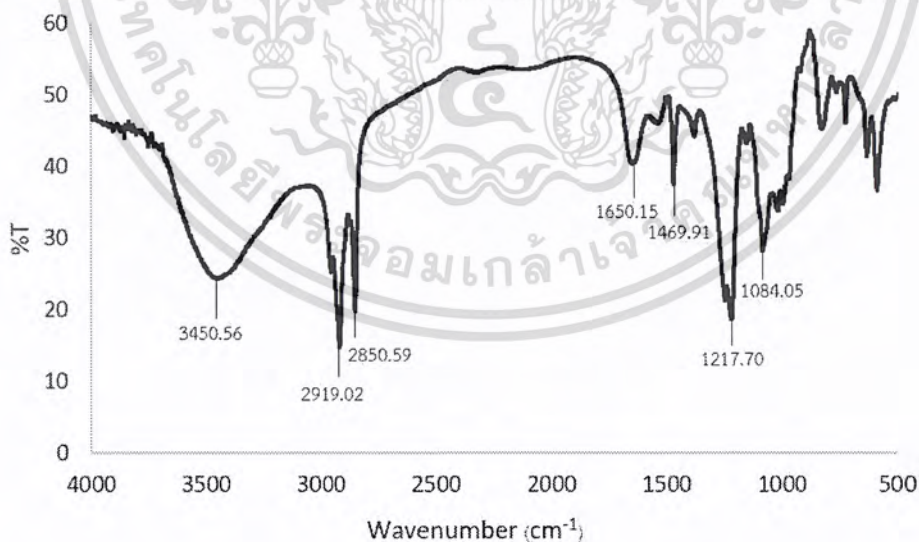
### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 การเตรียมไมโครแคปซูลโคโตซานบรรจุเอ็น-ออกตะเดคเคน (Oc/Cs)

ไมโครแคปซูล Oc/Cs เตรียมได้โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของเอ็น-ออกตะเดคเคนโดยใช้ปริมาณของเอ็น-ออกตะเดคเคนเป็น 500 1000 และ 1500  $\mu\text{L}$  และปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย SDS เป็น 10 และ 15 mM จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและหมู่ฟังก์ชันสำคัญของ ไมโครแคปซูล Oc/Cs วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และทดสอบประสิทธิภาพในการรักษาระดับอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพทางความร้อน (Thermal imaging camera)

##### 4.1.1 โครงสร้างทางเคมีและหมู่ฟังก์ชันสำคัญของไมโครแคปซูล Oc/Cs

จากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีและหมู่ฟังก์ชันสำคัญของไมโครแคปซูล Oc/Cs ด้วยเทคนิคฟลูอริเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) แสดงผลดังภาพที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 พบว่า สเปกตรัม FT-IR ของไมโครแคปซูล Oc/Cs ปรากฏพีกที่รวมของโครงสร้างโคโตซาน เอ็น-ออกตะเดคเคน และ SDS ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูล โดยโครงสร้างโคโตซานพบหมู่เอมีน ( $-\text{NH}_2$ ) ซึ่งปรากฏพีกในช่วง  $3200\text{-}3500$  กับ  $1650\text{ cm}^{-1}$  หมู่ไฮดรอกซิล ( $-\text{OH}$ ) ซึ่งปรากฏพีกในช่วง  $3200\text{-}3400\text{ cm}^{-1}$  และ หมู่อีเทอร์ (C-O) ซึ่งปรากฏพีกที่  $1084\text{ cm}^{-1}$  โครงสร้าง SDS พบหมู่อีเทอร์ (C-O) ซึ่งปรากฏพีกที่  $1217\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ไฮโดรคาร์บอน ( $-\text{CH}$ ) ซึ่งปรากฏพีกที่  $1470$   $2851$  และ  $2919\text{ cm}^{-1}$  เป็นไปได้ทั้งโครงสร้างโคโตซาน SDS และเอ็น-ออกตะเดคเคน

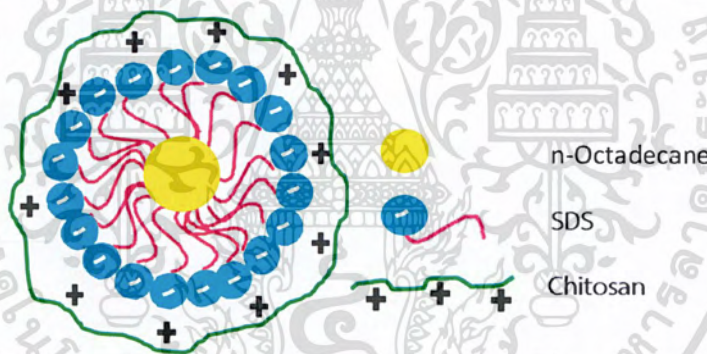


รูปที่ 4.1 สเปกตรัม FT-IR ของไมโครแคปซูล Oc/Cs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.1** ตำแหน่งเลขคลื่นที่สำคัญในสเปกตรัม FT-IR ที่แสดงสัญญาณหมู่ฟังก์ชันหลักที่เกิดในองค์ประกอบต่าง ๆ จากสารต้นต้นที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูล Oc/Cs

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )		
	n-Octadecane	Chitosan	SDS
OH	-	3200-3400	-
-NH stretching	-	3200-3500	-
-CH stretching	2850.59	2850.59	2850.59
	2919.02	2919.02	2919.02
-NH bending	-	1650.15	-
-CH bending	1469.91	1469.91	1469.91
CO stretching	-	1084.05	1217.44



**รูปที่ 4.2** แผนภาพแสดงลักษณะที่เชื่อมโยงการเกิดไมโครแคปซูล Oc/Cs และเชื่อมโยงระหว่างไคโตซานและ SDS

แผนภาพแสดงลักษณะโครงสร้างสรุปรูปการเกิดไมโครแคปซูล Oc/Cs ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อผสมเอ็น-ออกตะเดเคนกับสารละลาย SDS ซึ่งเป็นสารที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเป็นสารประกอบที่ไม่มีขั้วและมีขั้ว ซึ่งส่วนหางที่ไม่มีขั้วของ SDS จะเกิดอันตรกิริยากับเอ็น-ออกตะเดเคน โดยล้อมรอบเอ็น-ออกตะเดเคนเกิดเป็นโครงสร้างลักษณะไมเซลล์ และเมื่อทำการเติมสารละลายไคโตซานลงไปผสม สายโซ่โมเลกุลของไคโตซานซึ่งมีหมู่  $\text{NH}_3^+$  จะเกิดอันตรกิริยาส่วนหัวที่มีขั้วของ SDS เกิดเป็นชั้นเปลือกไคโตซานห่อหุ้มไมเซลล์ของเอ็น-ออกตะเดเคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 สมบัติทางความร้อนของไมโครแคปซูล Oc/Cs

##### ● ผลของปริมาณของเอ็น-ออกตะเดกเคน

ในการเตรียมไมโครแคปซูลโคโตซานบรรจุเอ็น-ออกตะเดกเคน (Oc/Cs) โดยปรับเปลี่ยนปริมาณเอ็น-ออกตะเดกเคนเป็น 500 1000 และ 1500  $\mu\text{L}$  ได้เป็นไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc0.5 Cs10-S10-Oc1 และ Cs10-S10-Oc1.5 ตามลำดับ เมื่อนำไมโครแคปซูลที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางความร้อนได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 พบว่าไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc0.5 ไม่พบฟิสิกการหลอมเหลวและฟิสิกการก่อผลึกของเอ็น-ออกตะเดกเคน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ทั้งนี้สันนิษฐานว่าสัดส่วนของเอ็น-ออกตะเดกเคนที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูลมีปริมาณน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนปริมาณของสารห่อหุ้มโคโตซาน ส่งผลให้ไม่สามารถตรวจวัดได้

เมื่อเปรียบเทียบเอ็น-ออกตะเดกเคนที่ไม่มีการห่อหุ้มกับไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc1 และ Cs10-S10-Oc1.5 ซึ่งเพิ่มปริมาณของเอ็น-ออกตะเดกเคนเป็น 2 และ 3 เท่า ตามลำดับ พบว่าค่า  $T_m$  ของเอ็น-ออกตะเดกเคนที่บรรจุในไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc1 และ Cs10-S10-Oc1.5 มีค่าเท่ากับ 27 และ 29  $^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $T_m$  ของเอ็น-ออกตะเดกเคนซึ่งมีค่าประมาณ 27  $^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนของเอ็น-ออกตะเดกเคนที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูลที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถตรวจวิเคราะห์เอ็น-ออกตะเดกเคนได้ อย่างไรก็ตามการปรับเปลี่ยนปริมาณของเอ็น-ออกตะเดกเคนที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูลไม่ส่งผลต่อค่า  $T_m$  และ  $T_c$  ดังนั้นค่า  $T_m$  และ  $T_c$  จึงมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $T_m$  และ  $T_c$  เอ็น-ออกตะเดกเคนที่ไม่ถูกห่อหุ้ม

เมื่อพิจารณาค่า  $\Delta H_m$   $\Delta H_c$  และประสิทธิภาพการห่อหุ้มเอ็น-ออกตะเดกเคนของไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc1 และ Cs10-S10-Oc1.5 พบว่าไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc1 มีค่า  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  เป็น 36 และ 31 J/g ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่า  $\Delta H_m$  ของเอ็น-ออกตะเดกเคนที่ไม่มีการห่อหุ้มอย่างมีนัยสำคัญ สันนิษฐานได้ว่าการวิเคราะห์เอ็น-ออกตะเดกเคนที่บรรจุในไมโครแคปซูลจะมีปริมาณสาร SDS และโคโตซานซึ่งเป็นส่วนของเปลือกหุ้มแคปซูล จึงทำให้สัดส่วนปริมาณเอ็น-ออกตะเดกเคนที่ถูกวิเคราะห์มีปริมาณน้อยกว่าการวิเคราะห์เอ็น-ออกตะเดกเคนที่ไม่ถูกห่อหุ้ม และในไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc1 มีค่าประสิทธิภาพการห่อหุ้มอยู่ที่ 22% ในขณะที่ไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc1.5 มีค่า  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  เป็น 146 และ 142 J/g ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวใกล้เคียงกับค่า  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  ของเอ็น-ออกตะเดกเคนที่ไม่มีการห่อหุ้ม ผลดังกล่าวสันนิษฐานว่าเป็นผลเนื่องจากไมโครแคปซูลดังกล่าวมีสัดส่วนของเอ็น-ออกตะเดกเคนมากกว่าความสามารถที่ SDS จะสามารถก่อตัวเป็นไมเซลล์ห่อหุ้มได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้มีเอ็น-ออกตะเดกเคนที่ไม่มีการห่อหุ้มรวมอยู่ด้วย ส่งผลให้ไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc1.5 มีช่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่กว้าง สังเกตได้จากรูปที่ 4.3 ดังนั้นเมื่อนำค่า  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการห่อหุ้มจึงมีการคลาดเคลื่อน โดยมีอยู่ที่ 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.2** ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ความร้อนแฝงในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) ค่าอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) และความร้อนแฝงในการเกิดผลึก ( $\Delta H_c$ ) ของไมโครแคปซูล Oc/Cs ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณเอ็น-ออกตะเดกเคน

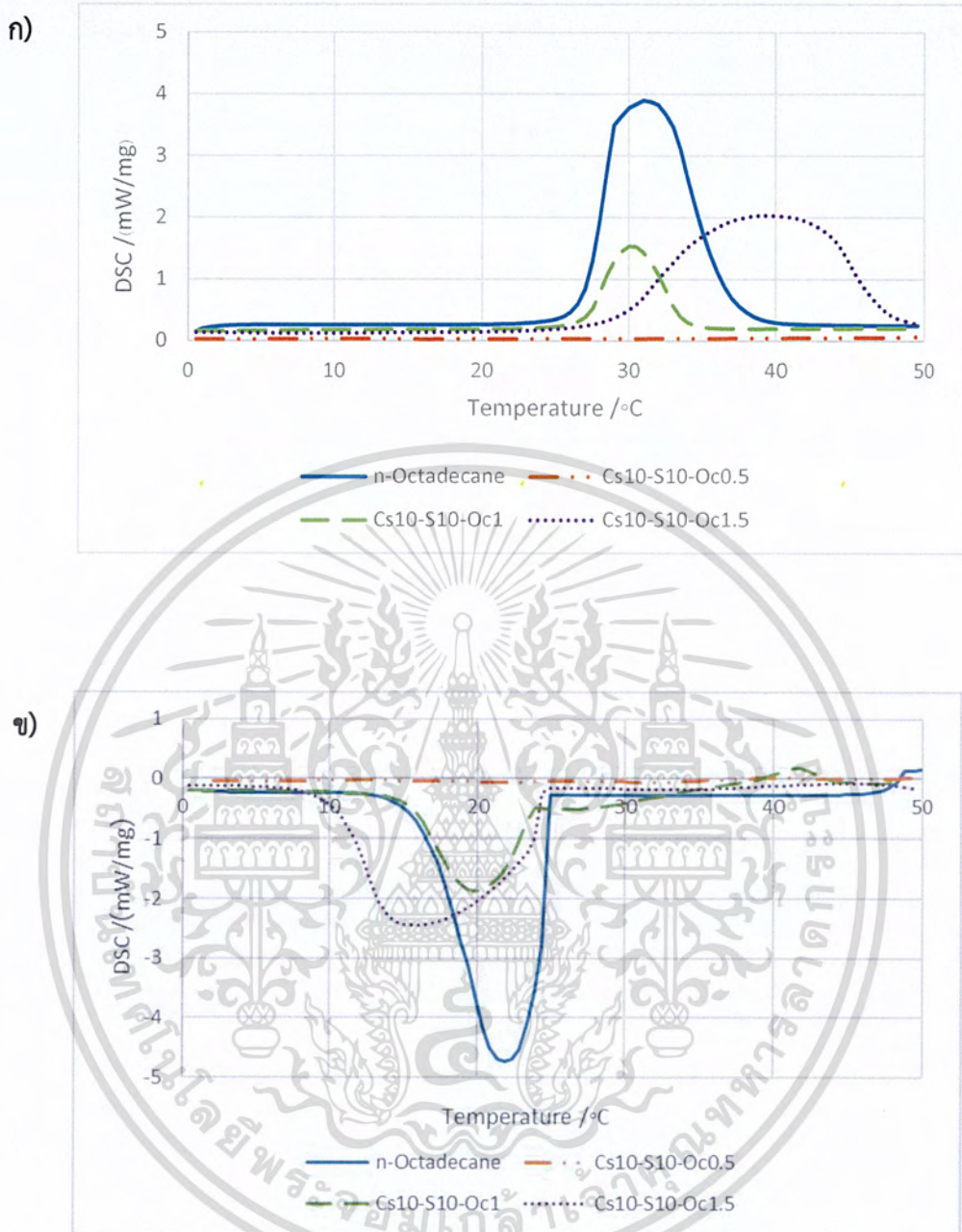
ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณเอ็น-ออกตะเดกเคน ( $\mu\text{L}$ )	$T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) *	$\Delta H_m$ (J/g)	$T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )*	$\Delta H_c$ (J/g)	Encapsulation efficiency** (%)
Oc	N/A	27	150	24	152	N/A
Cs10-S10-Oc0.5	500	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cs10-S10-Oc1	1000	27	36	25	31	22
Cs10-S10-Oc1.5	1500	29	146	24	142	95

\* ค่าที่ตำแหน่ง onset

\*\* Encapsulation efficiency (%) =  $\frac{\Delta H_m \text{capsules} + \Delta H_c \text{capsules}}{\Delta H_m \text{PCM} + \Delta H_c \text{PCM}} \times 100$

\*\*\*ในการคำนวณค่า  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  ของเอ็น-ออกตะเดกเคนในไมโครแคปซูลมีค่าต่ำกว่าค่าจริง เนื่องจากค่าน้ำหนักตัวอย่างประกอบด้วยวัสดุแกนกลางเอ็น-ออกตะเดกเคนและวัสดุเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.3** เทอร์โมแกรม DSC แสดงพีก ก) การหลอมเหลว และ ข) การเกิดผลึกของเอ็น-ออกตะเดคเคนไมโครแคปซูล Oc/Cs ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเอ็น-ออกตะเดคเคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● ผลของความเข้มข้นของสารละลาย SDS

ในการเตรียมไมโครแคปซูลโคโตซานบรรจุเอ็น-ออกตะเดคเคน (Oc/Cs) โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย SDS เป็น 10 และ 15 mM ได้เป็นไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc1 และ Cs10-S15-Oc1 ตามลำดับ เมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนของไมโครแคปซูล Oc/Cs ที่เตรียมได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าในไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc1 มีค่า  $T_m$  และ  $T_c$  เท่ากับ 27 และ 25 °C ตามลำดับ และไมโครแคปซูล Cs10-S15-Oc1 มีค่า  $T_m$  และ  $T_c$  เท่ากับ 27 และ 25 °C ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนของเอ็น-ออกตะเดคเคนที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูลเท่ากัน ส่งผลให้ค่า  $T_m$  และ  $T_c$  ของทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

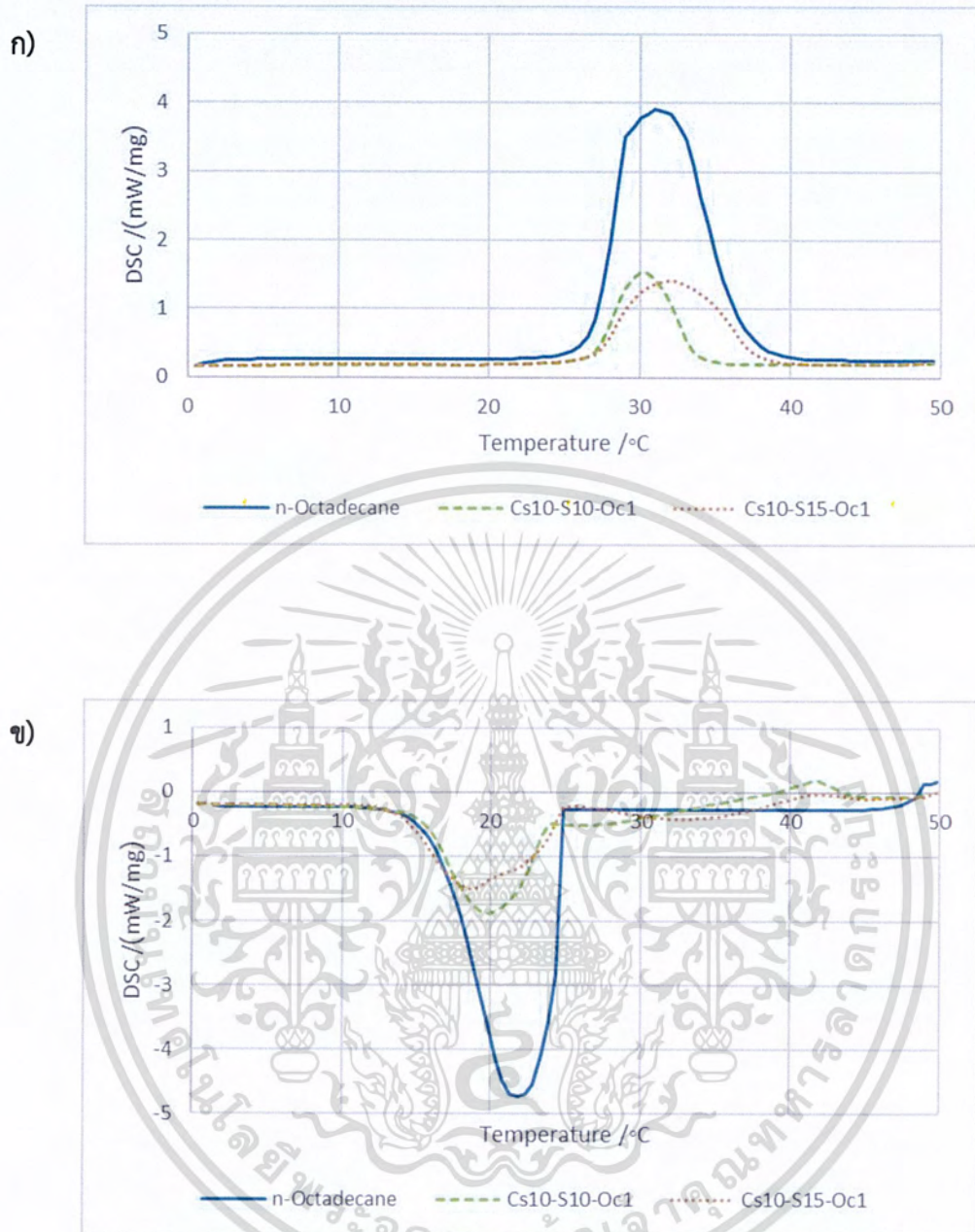
ซึ่งจากการเตรียมไมโครแคปซูล Cs10-S15-Oc1 มีค่า  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  เป็น 53 และ 51 J/g ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการห่อหุ้มเป็น 34% ซึ่งสูงกว่าไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc1 ที่มีค่า  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  เป็น 36 และ 31 J/g ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการห่อหุ้มเป็น 22% ดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลาย SDS ที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณไมโครแคปซูลเพิ่มขึ้น ความร้อนแฝงในการหลอมเหลวและพลังงานในการเปลี่ยนสถานะสูงขึ้น

ตารางที่ 4.3 การเตรียมไมโครแคปซูล Oc/Cs โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย SDS ที่เอ็น-ออกตะเดคเคน 1000  $\mu$ L

ชื่อตัวอย่าง	สารละลาย SDS (mM)	$T_m$ (°C)*	$\Delta H_m$ (J/g)	$T_c$ (°C)*	$\Delta H_c$ (J/g)	Encapsulation efficiency** (%)
Cs10-S10-Oc1	10	27	36	25	31	22
Cs10-S15-Oc1	15	27	53	25	51	34

\*\*\* ในการคำนวณค่า  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  ของเอ็น-ออกตะเดคเคนในไมโครแคปซูลมีค่าต่ำกว่าค่าจริง เนื่องจากค่าน้ำหนักตัวอย่างประกอบด้วยวัสดุแกนกลางเอ็น-ออกตะเดคเคนและวัสดุเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.4** เทอร์โมแกรม DSC แสดงค่าพิก ก) การหลอมเหลว และ ข) การเกิดผลึกของไมโครแคปซูล Oc/Cs ที่ความเข้มข้นของสารละลาย SDS แตกต่างกันใน เอ็น-ออกตะเดเคน 1000  $\mu\text{L}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 ประสิทธิภาพการรักษาระดับอุณหภูมิของไมโครแคปซูล Oc/Cs

เมื่อนำไมโครแคปซูล Oc/Cs ที่เตรียมได้ โดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย SDS เป็น 10 และ 15 mM มาทดสอบประสิทธิภาพการรักษาระดับอุณหภูมิ พบว่าได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิของไมโครแคปซูล Oc/Cs ที่เวลาต่าง ๆ

ตัวอย่าง นาที่	Cs10-S10	Cs10-S10-Oc1	Cs10-S15-Oc1
0			
1			
2			
3			
4			

เมื่อนำไมโครแคปซูล Oc/Cs ไปให้ความเย็นที่อุณหภูมิ 0 °C เป็นเวลา 20 นาที สามารถสังเกตได้ว่าบริเวณที่ได้รับ ความเย็นแสดงให้เห็นเป็นสีฟ้า ซึ่งเป็นส่วนของเอ็น-ออกตะเดคเคนที่บรรจุภายใน เอกสารเกิดการคายความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมและเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง เมื่อนำสารตัวอย่าง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปใส่ในตู้ให้ความร้อน บริเวณที่มีอุณหภูมิในช่วง 35-40 °C แสดงให้เห็นเป็นพื้นที่สีแดงในภาพถ่าย ความร้อน จากนั้นทำการสังเกตพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิของสารตัวอย่าง

เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาของการรักษาระดับอุณหภูมิของไมโครแคปซูล Oc/Cs กับวัสดุห่อหุ้ม ที่ไม่มีเอ็น-ออกตะเดกเคน พบว่าไมโครแคปซูล Oc/Cs เมื่อนำมาใส่ในตู้ให้ความร้อนสามารถ สังเกตเห็นจากภาพถ่ายความร้อนว่าบริเวณที่มีตัวอย่างไมโครแคปซูล Oc/Cs เป็นสีฟ้าและบริเวณ สิ่งแวดล้อมเป็นสีแดงแสดงถึงอุณหภูมิที่แตกต่างกันมาก ทั้งนี้ไมโครแคปซูลทั้ง 2 ตัวอย่างมีระยะเวลา ในการรักษาอุณหภูมิที่ต่ำกว่าสิ่งแวดล้อมได้ถึงที่ 4 นาที ในขณะที่วัสดุห่อหุ้มที่ไม่มีเอ็น-ออกตะเดก เคนเมื่อนำมาใส่ในตู้ให้ความร้อนบริเวณสารตัวอย่างจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีจากสีฟ้าเป็นสีเหลืองและสีแดง ภายในเวลา 1 นาที แสดงให้เห็นว่าวัสดุห่อหุ้มที่ไม่มีเอ็น-ออกตะเดกเคนไม่สามารถรักษาอุณหภูมิได้ จากผลข้างต้นสรุปได้ว่าสารตัวอย่างที่มีเอ็น-ออกตะเดกเคนบรรจุอยู่ ส่งผลให้สารตัวอย่างสามารถ รักษาอุณหภูมิที่ต่ำกว่าสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยประสิทธิภาพการรักษาอุณหภูมิของไมโคร- แคปซูล Cs10-S15-Oc1 มีค่าเท่ากับไมโครแคปซูล Cs10-S10-Oc1 ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวอย่างทั้ง 2 มีปริมาณเอ็น-ออกตะเดกเคนเท่ากัน

#### 4.2 การเตรียมไมโครแคปซูลโคโตซานบรรจุสารให้สี

ในการศึกษาเตรียมไมโครแคปซูลที่เปลี่ยนสีได้ เริ่มต้นด้วยการทดสอบเบื้องต้นโดยการนำสาร ผสมระหว่างสารให้สีคลอเลสเทอร์อลโอเลิลคาร์บอเนต (Cholesterol oleyl carbonate, COC) และคลอเลสเทอร์ิลโนนาโนเอต (Cholesteryl nonanoate, CPE) ในอัตราส่วน COC:CPE เป็น 1:1 มาละลายผสมกับเอ็น-ออกตะเดกเคน แล้วนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยสเปกโตรมิเตอร์ UV-visible เพื่อ ศึกษาพฤติกรรมการให้สีพบว่า ไม่สามารถตรวจสอบการทำงานของสารให้สีดังกล่าวได้ สันนิษฐานว่า เนื่องจากปริมาณสารผสมสี COC/CPE ที่ใช้มีปริมาณค่อนข้างน้อยอาจจะถูกบดบังด้วยสัญญาณของ ตัวทำละลายเอ็น-ออกตะเดกเคน จึงได้ปรับเปลี่ยนการทดสอบเป็นการเตรียมไมโครแคปซูลโคโตซาน บรรจุสารให้สี COC/CPE และศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของไมโครแคปซูลสารให้สีด้วยเทคนิค DSC ได้ผลดังแสดงตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.5** ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) และความร้อนแฝงในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) ของแคปซูลของสารผสมสี COC/CPE

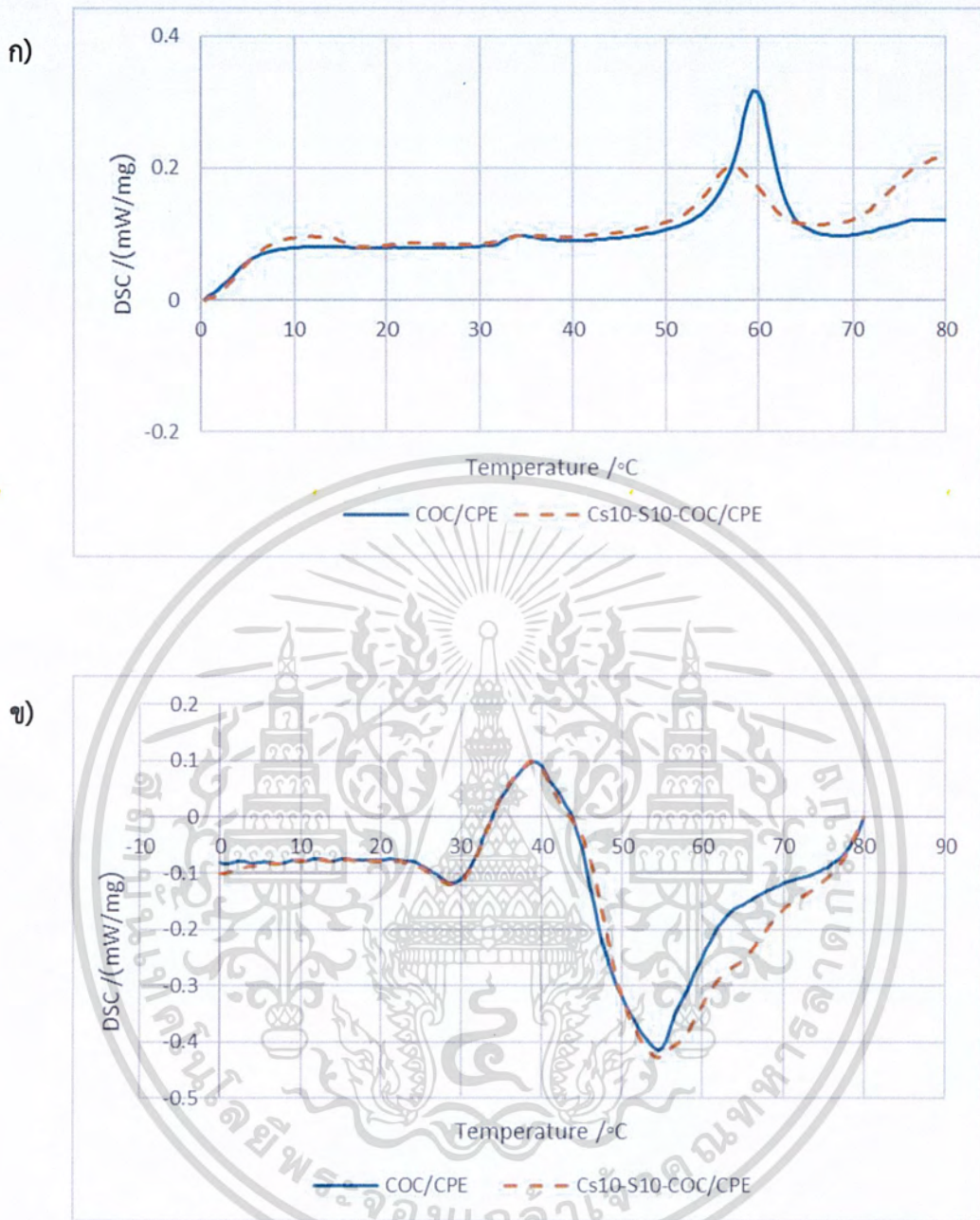
ชื่อตัวอย่าง	$T_m$ (°C)*	$T_c$ (°C)*	$\Delta H_m$ (J/g)	$\Delta H_c$ (J/g)	Encapsulation efficiency** (%)
COC/CPE	55	65	7	42	N/A
Cs10-S10-COC/CPE1	51	71	4	37	14

\*\*\* ในการคำนวณค่า  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  ของสารผสมสี COC/CPE ในไมโครแคปซูลมีค่าต่ำกว่าค่าจริง เนื่องจากค่าน้ำหนักตัวอย่างประกอบด้วยวัสดุแกนกลางสารผสมสี COC/CPE และวัสดุเปลือก

เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อนของสารผสม COC/CPE ที่ไม่มีการห่อหุ้ม มีค่า  $T_m$  และ  $T_c$  อยู่ที่ 55 และ 65 °C ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $T_m$  และ  $T_c$  ของสารผสม COC/CPE ที่บรรจุในไมโครแคปซูล COC/CPE/Cs ที่เตรียมได้ โดยในสารตัวอย่าง Cs10-S10-COC/CPE1 มีค่า  $T_m$  และ  $T_c$  อยู่ที่ 51 และ 71 °C ตามลำดับ และในขณะที่สารตัวอย่าง Cs10-S10-COC/CPE1 ที่มีค่า  $\Delta H_m$  และ  $\Delta H_c$  อยู่ที่ 4 และ 37 J/g ตามลำดับ ซึ่งค่าลดต่ำลงจากของสารผสมสี COC/CPE ที่ไม่มีการห่อหุ้ม จึงสันนิษฐานได้ว่าสารตัวอย่าง Cs10-S10-COC/CPE1 ประกอบด้วยสารผสม COC/CPE ที่ถูกห่อหุ้มด้วยไคโตซาน

เนื่องจากเอ็น-ออกตะเดคเคนมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวในช่วงประมาณ 30 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิร่างกายและจากการตรวจวิเคราะห์ DSC สารผสมสี COC/CPE มีช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลวประมาณ 50 °C ซึ่งช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าสูงกว่าช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวของเอ็น-ออกตะเดคเคน จากผลดังกล่าวจึงทำให้สารผสมสี COC/CPE ไม่สามารถแสดงพฤติกรรมได้ในช่วงอุณหภูมิเดียวกับเอ็น-ออกตะเดคเคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 เทอร์โมแกรม DSC แสดงค่าพิก ก) การหลอมเหลว และ ข) การเกิดผลึกของสารให้สี COC/CPE และไมโครแคปซูลสี COC/CPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้สามารถเตรียมไมโครแคปซูลโคโตซานบรรจุเอ็น-ออกตะเดกเคนโดยเลือกใช้โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิวในการสร้างไมเซลล์ และเกิดอันตรกิริยาโดยตรงกับสายโซ่โคโตซานเกิดเป็นไมโครแคปซูล ซึ่งในกระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลการปรับเปลี่ยนปริมาณเอ็น-ออกตะเดกเคนและความเข้มข้นของสารละลาย SDS จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการห่อหุ้ม (Encapsulation efficiency) เอ็น-ออกตะเดกเคนในไมโครแคปซูล

เมื่อปรับเพิ่มปริมาณของเอ็น-ออกตะเดกเคนที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูล Oc/Cs ส่งผลให้ปริมาณเอ็น-ออกตะเดกเคนในไมโครแคปซูลเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของไมโครแคปซูลจึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณเอ็น-ออกตะเดกเคนมากเกินไปเอ็น-ออกตะเดกเคนบางส่วนอยู่ภายนอกแคปซูล ไมโครแคปซูลที่เตรียมโดยใช้ปริมาณเอ็น-ออกตะเดกเคน 1000  $\mu\text{L}$  เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการห่อหุ้มเท่ากับ 22%

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย SDS ที่ใช้ในการเตรียมไมโครแคปซูล ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการห่อหุ้มเอ็น-ออกตะเดกเคนมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยประสิทธิภาพการห่อหุ้มที่สูงที่สุดคือไมโครแคปซูลที่เตรียมโดยใช้ปริมาณเอ็น-ออกตะเดกเคนเริ่มต้น 1000  $\mu\text{L}$  ความเข้มข้นของ SDS 15 mM ซึ่งมีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวและการก่อผลึกเท่ากับ 53 และ 51 J/g ตามลำดับ

ในการศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มสารเปลี่ยนสีได้ โดยใช้สารผสมระหว่างคลอเลสเทอรอลโอเลอิลคาร์บอเนต และคลอเลสเทอรอลโนนาโนเอตสามารถเกิดเตรียมไมโครแคปซูลบรรจุสารเปลี่ยนสีได้ด้วยวิธีการเตรียมแบบเดียวกับเตรียมไมโครแคปซูลบรรจุเอ็น-ออกตะเดกเคนโดยใช้โคโตซานและ SDS เป็นเปลือกหุ้ม ซึ่งมีค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของสารผสมที่สามารถเปลี่ยนสีได้มีค่าประมาณ 50  $^{\circ}\text{C}$

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูล Oc/Cs
- 2) ควรปรับเปลี่ยนปริมาณของสารละลายโคโตซาน เพื่อศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพการห่อหุ้ม
- 3) ควรปรับเปลี่ยนสัดส่วนของสารผสมคลอเลสเทอรอลโอเลอิลคาร์บอเนต และคลอเลสเทอรอลโนนาโนเอตเพื่อศึกษาการแสดงพฤติกรรมให้ได้อยู่ในช่วงอุณหภูมิเดียวกับเอ็น-ออกตะเดกเคน
- 4) ควรมีการทดสอบสมบัติความเป็นพิษต่อร่างกาย เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] จุรีรัตน์ ประสาร. “สิ่งทอฉลาดเพื่อชีวิตคุณภาพ Smart Textiles For Smart Life”. ว.ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2553(251) : 44-49.
- [2] Huang C, Qian X, Yang R. “Thermal conductivity of polymers and polymer nanocomposites”. Materials Science and Engineering. Reports. 2018(132) : 1-22.
- [3] บุญรักษ์ กาญจนวรรณิชย์. “หมึกเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ”. ว.ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2553(251) : 21-25.
- [4] กัมปนาท หวลบุตรตา, ธนิกันต์ แสงน้อม. “การใช้ประยุกต์ใช้ไมโครแคปซูลในทางเภสัชกรรม”. มหาวิทยาลัยบูรพา; 2560.
- [5] จิตรา สิงห์ทอง, รัชฎาพร อุ่นศิริไธย์. “การผลิตไมโครแคปซูลของสารสกัดเพื่อการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร”. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2559.
- [6] สายรุ่ง นพฤทธิ์. “การเตรียมพอลิเมทิลเมทาคริเลตไมโครแคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบไมโครซัสเพนชัน”. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2554
- [7] Salaün F. 9 - “Microencapsulation technology for smart textile coatings”. In: Hu J, editor. Active Coatings for Smart Textiles. Woodhead Publishing; 2016 : 179-220.
- [8] วิกิพีเดีย. “คอลลอยด์ 2019”. [Online]. Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/คอลลอยด์>. เข้าถึงเมื่อ 19 กุมภาพันธ์ 2562.
- [9] BUCHI. “วิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยและวิธีการห่อหุ้มสารสำคัญ”. [Online]. Available from: <https://www.buchi.com/en/content/spray-drying-encapsulation-solutions>. เข้าถึงเมื่อ 21 มกราคม 2562.
- [10] PAULA CORDEIRO MT, CONRAD WINTERS. “Spray congealing: applications in the Pharmaceutical Industry”. Paper Review. 2013; 31(5). 69-72.
- [11] จิรสา กรงกรต. “สารลดแรงตึงผิว”. โครงการเคมี. 2548.
- [12] Muthuprasanna P, Surya K, Sobhita P, A. Satish babu I, Sarath Chandiran I, Ganesan A, et al. “Basics and Potential Applications of Surfactants” - A Review 2009; 1(4). 1354-1365
- [13] พรเพ็ญ วีระวัฒน์กานนท์. “การเกิดปฏิกิริยาเคมีในสารละลายไมเซลล์”. ว.วิจัยวิทยาศาสตร์การแพทย์. 2548; 19(2). 165-81.
- [14] น้อย เนียมสา. “อนุภาคระดับไมโครของโคโตซานสำหรับใช้เป็นระบบนำส่งยาแบบควบคุมการปลดปล่อย”. ว.วิทยาศาสตร์บูรพา. 2556; 18(2). 281-287.
- [15] อิศราวุธ ประเสริฐสังข์. “โครงการผลของสภาวะของพลาสมาวิญญากาศของเหลวที่มีต่อการย่อยสลายโคโตซาน”: มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2558.
- [16] Berezina N. “Production and application of chitin”. [Online]. Available from: <https://www.degruyter.com/view/j/psr.2016.1.issue-9/psr-2016-0048/psr-2016-0048.xml>. เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2562.

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] Pause B. 9 - "Phase change materials and their application in coatings and laminates for textiles". In: Smith WC, editor. Smart Textile Coatings and Laminates: Woodhead Publishing; 2010 : 175-187.
- [18] "PHASE CHANGE MATERIALS (PCM) FOR HIGH PERFORMANCE ENCLOSURES". [Online]. Available from: <https://www.aiaaustin.org/event/phase-change-materials-pcm-high-performance-enclosures>. เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2562.
- [19] National Center for Biotechnology Information. PubChem. Database. NCfBIP. "Octadecane". [Online]. Available from : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/octadecane>. เข้าถึงเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2562.
- [20] Pieróg M, Gierszewska M, Ostrowska-Czubenko J. "Effect of ionic crosslinking agents on swelling behaviour of chitosan hydrogel membranes". 2009(16) : 75-82.
- [21] lamphaojeen Y, Manian A, Wright T, Caven B, Bechtold T, Siriphannon P. "Polyelectrolyte-Assisted Immobilization of Oil-Based Nanocapsules on Cotton Fabric". 2016 : 1-6.
- [22] Guan Y, Zhang L, Wang D, West JL, Fu S. "Preparation of thermochromic liquid crystal microcapsules for intelligent functional fiber". Materials & Design. 2018(147) : 28-34.
- [23] Tang X, Li W, Zhang X, Shi H. "Fabrication and characterization of microencapsulated phase change material with low supercooling for thermal energy storage". Energy. 2014(68) : 160-166.
- [24] lamphaojeen Y, Siriphannon P. "Nanoencapsulation of n-Octadecane Phase Change Material in Self-Assembled Polyelectrolyte by Soft Solution Technique". 2014 : 918-922.
- [25] lamphaojeen Y, Siriphannon P. "Adjustable thermal barrier of cotton fabric by multilayer immobilization of PCM nanocapsules". 2018; 25(6). 3649-3661.
- [26] Shim H, A. McCullough E, W. Jones B. "Using Phase Change Materials in Clothing". 2001 : 495-502
- [27] ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์, อมร ไชยสัตย์, วรยุทธ สะโคมแสง. "การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลระดับนาโนเมตรที่หุ้มด้วยวัสดุเก็บความร้อนด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบมินิอิมัลชันที่ไม่ใช้แรงเฉือนสูงสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ". ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2556.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้