วัสดุคอมโพสิตจากอนุพันธ์ของกรดไขมันสำหรับระบบกักเก็บพลังงานความร้อน

เกวลี สุขแสงทอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

วัสดุคอมโพสิตจากอนุพันธ์ของกรดไขมันสำหรับระบบกักเก็บพลังงานความร้อน

เกวลี สุขแสงทอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FATTY ACID-DERIVED COMPOSITE FOR THERMAL ENERGY STORAGE

KAEWALEE SUKSANGTHONG

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	วัสดุคอมโพสิตของอนุพันธ์ของกรดไขมันสำหรับระบบกักเก็บพลังงานความร้อน
โดย	นางสาวเกวลี สุขแสงทอง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ธีรพร สุธีวงศ์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

T. Sutteewong .....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร. ธีรพร สุธีวงศ์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสรณ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	วัสดุคอมโพสิตของอนุพันธ์ของกรดไขมันสำหรับระบบกักเก็บพลังงานความร้อน
โดย	นางสาวเกวลี สุขแสงทอง
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ธีรพร สุธีวงศ์

บทคัดย่อ

วัสดุเปลี่ยนวัฏภาคอินทรีย์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้หลายด้าน เช่น สิ่งก่อสร้าง และสิ่งทอ เนื่องจากสามารถกักเก็บพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ กรดไขมันเป็นวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคอินทรีย์ที่น่าสนใจ เพราะสังเคราะห์ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ไม่เป็นอันตราย และมีค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยค่าความร้อนแฝง และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและจำนวนอะตอมของคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคอินทรีย์มีค่าการนำความร้อนต่ำและรั่วไหลเมื่ออยู่ในสถานะของเหลว การใช้เทคนิคเอนแคปซูเลชันร่วมกับวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคถือเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับแก้ไขปัญหาดังกล่าว อีกทั้งยังเพิ่มความเสถียรทางความร้อน แต่ชนิดของสารห่อหุ้มเช่น โลหะ สารอนินทรีย์ และพอลิเมอร์มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้วัสดุเปลี่ยนวัฏภาคอินทรีย์ที่ถูกห่อหุ้มมีความหนาแน่นของพลังงาน (heat storage density) ต่ำกว่าวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคอินทรีย์ที่ไม่ได้ถูกหุ้ม งานวิจัยนี้สนใจที่จะเพิ่มค่าการนำความร้อน และแก้ไขปัญหาการรั่วไหลของวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคอินทรีย์ โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรทที่ห่อหุ้มด้วยชั้นซิลิกา และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและสมบัติทางความร้อน จากการทดลองพบว่าอนุภาคนาโนแคปซูลมีค่าความเสถียรทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยที่สัดส่วน core-shell เท่ากับ 1 ได้อนุภาคขนาด 26.5 นาโนเมตร และค่าพลังงานความร้อนแฝงของหลอมเหลวของอนุภาคมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Fatty Acid-Derived Composite for Thermal Energy Storage
By	Miss Kaewalee Suksangthong
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2017
Advisor	Asst.Prof.Dr. Teeraporn Suteewong

ABSTRACT

Organic phase change materials (PCMs) play an important role as the effective thermal energy storage, which can be applied in several areas such as building and clothing due to their good properties. Among various organic PCMs, fatty acid provides suitable latent heat storage and phase change temperature depending on number of carbon and molecular structure of the responsive molecule. However, it has low thermal conductivity and can leak during the phase change. Encapsulation is a great choice to solve aforementioned problems. Nevertheless, encapsulating materials like inorganic has poor heat storage capacity leading to low latent heat storage density of the encapsulated PCM. In order to enhance heat storage capacity and thermal stability, prevent leakage and test thermoregulation of encapsulated PCM, we report the preparation of ethylene glycol distearate (EGDS) encapsulated with silica shell via chemical precipitation process. Effect of core-shell ratio on particle size and thermal properties were investigated. Nanocapsules synthesized with core-shell ratio of 1 presented the particle size of 26.51 nm with high latent heat storage capability of 16.16 J/g.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคลากรหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผศ.ดร. ธีรพร สุธีวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และแนวทางแก้ไขปรับปรุงระหว่างการจัดทำปริญญานิพนธ์ ทำให้ปริญญานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสรณ์ และ อาจารย์ ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์ กรรมการตรวจสอบเล่มปริญญานิพนธ์ ที่ให้แนวทางการแก้ไขปรับปรุงปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์ ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สำหรับความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ ความรู้ และคำแนะนำตลอดการทำปริญญานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบุพการี ญาติพี่น้อง เพื่อนนักศึกษา และบุคคลที่เกี่ยวข้องที่ให้คำปรึกษาความช่วยเหลือ และกำลังใจเสมอมา ถ้ามีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขอน้อมรับ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

เกวลี สุขแสงทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง หน้า

บทคัดย่อ I

ABSTRACT II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญภาพ VII

บทที่ 1 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 3

2.1 ระบบกักเก็บพลังงานความร้อน (Thermal energy storage) [8] 3

2.1.1 ประเภทของระบบกักเก็บพลังงานความร้อน [9] 3

2.2 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค [10] 4

2.2.1 สารประกอบอินทรีย์ (Organic compound) 4

2.3 กรดไขมัน (Fatty acid) [11] 5

2.3.1 สารประกอบไดเอสเทอร์ของกรดไขมัน [4] 6

2.4 เทคนิคเอนแคปซูเลชัน (Encapsulation technique) [12] 6

2.4.1 วิธีเอนแคปซูเลชันวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค 7

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3	**10**
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	10
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	10
3.3 การเอนแคปซูเลชันอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา	11
3.4 การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติ และขนาดของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา	11
3.5 การทดสอบสมบัติการเก็บความร้อน และการควบคุมอุณหภูมิ	12
บทที่ 4	**13**
4.1 การสังเคราะห์อนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา (Silica-coated ethylene glycol distearate; EGDS@SiO_2)	13
4.1.1 โครงสร้างทางเคมีของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา	13
4.1.2 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานและขนาดของอนุภาค	15
4.1.3 วิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน	17
4.1.4 วิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อน	19
4.1.5 วิเคราะห์สมบัติการเก็บความร้อน และการควบคุมอุณหภูมิ	21
บทที่ 5	**24**
5.1 สรุปผลการทดลอง	24
5.2 ข้อเสนอแนะ	24
เอกสารอ้างอิง	**25**
ภาคผนวก ก	**28**
ภาคผนวก ข	**35**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
4.1 ผลวิเคราะห์พีคจากสเปกตรัม FTIR ของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา.....	16
4.2 สัดส่วนโดยน้ำหนักอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตต่อซิลิกา..... และเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคนาโนแคปซูลทั้ง 3 สัดส่วน	16
4.3 คุณสมบัติทางความร้อนของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และอนุภาคนาโนแคปซูล..... ที่สัดส่วน core-shell 0.6 0.8 และ 1	18
4.4 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และสารประกอบอินทรีย์..... ที่ห่อหุ้มด้วยซิลิกาในช่วงที่สอง	21
4.5 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงที่สามของสารประกอบอินทรีย์ที่ห่อหุ้มด้วยซิลิกา.....	21
4.6 องค์ประกอบ สมบัติทางความร้อน และอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ..... ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 55 ถึง 65 องศาเซลเซียส ของสารตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง	22
ก.1.1 ส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตหุ้มด้วยซิลิกา...	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

เรื่อง หน้า

2.1 โครงสร้างสารประกอบไดเอสเตอร์ของกรดไขมัน..... 6

2.2 โครงสร้างของแคปซูล..... 6

2.3 การเกิดสวอลเล็นไมเซลล์..... 7

3.1 การทดสอบสมบัติการเก็บความร้อน..... 12

4.1 เอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาหลังผ่านการอบแห้ง..... 14
และโครงสร้างทางเคมีของ (ข) เอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และ (ค) ซิลิกา

4.2 สเปกตรัม ATR-FTIR ของอนุภาคนาโนแคปซูลของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต..... 14
ที่หุ้มด้วยซิลิกที่สัดส่วน core-shell 0.6 (ก) 0.8 (ข) และ 1(ค)

4.3 ภาพ TEM ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา..... 16
ที่สัดส่วน core-shell (ก,ข) 0.6 (ค,ง) 0.8 และ (จ,ฉ) 1 ที่กำลังขยาย 29,000X

4.4 กราฟ DSC ของ (ก) การหลอมเหลว (ข) การเกิดผลึกของอนุภาคนาโนแคปซูล..... 18
ที่สัดส่วน core-shell 0.6 0.8 และ 1 และ (ค) การหลอมเหลว-การเกิดผลึกของ
อนุภาคนาโนแคปซูลที่สัดส่วน 1 และเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต

4.5 การเปลี่ยนแปลงมวลเมื่อให้ความร้อนของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต..... 21
และอนุภาคนาโนแคปซูลที่สัดส่วน core-shell 0.6 0.8 และ 1 (TGA curves)

4.6 (ก) อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาของสารตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่าง..... 22
และ (ข) อัตราการปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาที่ช่วงอุณหภูมิ 55 ถึง 65 องศาเซลเซียส

ก.2.1 ผลวิเคราะห์ ATR-FTIR ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา..... 29
ที่สัดส่วน core-shell 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

ก.2.2 ผลวิเคราะห์ ATR-FTIR ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา..... 30
ที่สัดส่วน core-shell 0.8

ก.2.3 ผลวิเคราะห์ ATR-FTIR ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา..... 30
ที่สัดส่วน core-shell 1

ก.2.4 ผลวิเคราะห์ DSC ของเอทิลีนไกคอลไกสเตรียเรต..... 31

ก.2.5 ผลวิเคราะห์ DSC ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา..... 31
ที่สัดส่วน core-shell 0.6

ก.2.6 ผลวิเคราะห์ DSC ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา..... 32
ที่สัดส่วน core-shell 0.8

ก.2.7 ผลวิเคราะห์ DSC ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา..... 32
ที่สัดส่วน core-shell 1

ก.2.8 ผลวิเคราะห์ TGA ของเอทิลีนไกคอลไดสเตรียเรต..... 33

ก.2.9 ผลวิเคราะห์ TGA ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา..... 33
ที่สัดส่วน core-shell 0.6

ก.2.10 ผลวิเคราะห์ TGA ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา..... 34
ที่สัดส่วน core-shell 0.8

ก.2.11 ผลวิเคราะห์ TGA ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา..... 34
ที่สัดส่วน core-shell 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

จากการเติบโตอย่างต่อเนื่องของเศรษฐกิจโลก ความต้องการพลังงานซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานสำหรับการดำเนินชีวิต การดำเนินธุรกิจ และการผลิตในภาคอุตสาหกรรมเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาการขาดแคลนเชื้อเพลิงในปัจจุบัน เนื่องจากแหล่งพลังงานส่วนใหญ่ เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน เป็นต้น มีปริมาณกัดเพราะมาจากซากดึกดำบรรพ์ (Fossil) นำไปสู่การพัฒนาพลังงานทดแทนรวมถึงการบริหารจัดการเพื่อนำพลังงานมาใช้ให้เกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด อาทิ การพัฒนาพลังงานทางเลือก การค้นคว้าวัสดุที่สามารถกักเก็บพลังงานเหลือใช้ เพื่อลดการสูญเสียของพลังงานและนำพลังงานที่มีอยู่กลับมาใช้ใหม่ [1] หนึ่งในเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage: TES) ที่สำคัญ คือ การประยุกต์ใช้วัสดุเปลี่ยนวัฏภาค (Phase Change Materials: PCMs) ซึ่งเป็นวัสดุที่กักเก็บ และคายพลังงานความร้อนในรูปความร้อนแฝงผ่านการเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็ง-ของเหลวของสาร [2] สารที่ใช้ในการกักเก็บพลังงานแบ่งเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ สารอินทรีย์ (organics) และสารอนินทรีย์ (inorganics) โดยสารที่นิยมใช้คือ พาราฟินแว็กซ์ (Paraffin wax) และเกลืออนินทรีย์ [3,4]

การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น กรดไขมันและอนุพันธ์ มาใช้เป็นวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีความสามารถในการกัดกร่อนน้อย ไม่เป็นอันตราย อีกทั้งเป็นการช่วยลดต้นทุนในการสังเคราะห์วัสดุเปลี่ยนวัฏภาค แต่อย่างไรก็ตามสารจำพวกกรดไขมันมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับพาราฟินแว็กซ์ที่มีค่าความร้อนแฝง (Latent heat) อยู่ระหว่าง 189 ถึง 210 จูลต่อกรัม [5] เพราะโครงสร้างของกรดไขมันในธรรมชาติมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 12 ถึง 18 อะตอม ดังนั้นการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันโดยการสังเคราะห์สารประกอบไดเอสเตอร์ของกรดไขมันเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิในการหลอมเหลว และค่าความร้อนแฝงได้ Floros M.C. และคณะ ทำการพัฒนาสารประกอบไดเอสเตอร์จากกรดสเตรียริกและสารประกอบไดแอลกอฮอล์ โดยทำการปรับเปลี่ยนจำนวนอะตอมของคาร์บอนในสารประกอบไดแอลกอฮอล์ (2 4 6 และ 8 อะตอม) พบว่าค่าความร้อนแฝงของสารประกอบไดเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 155 จูลต่อกรัม (กรดสเตรียริก) เป็น 230 จูลต่อกรัม เมื่อเพิ่มขนาดโมเลกุลของไดแอลกอฮอล์ซึ่งประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 2 อะตอม อีกทั้งมีอุณหภูมิหลอมเหลวครอบคลุมช่วง 39 ถึง 77 องศาเซลเซียส [4,6] Yu S. และคณะ ทำการสังเคราะห์อนุภาคลักษณะ core-shell โดยมีพาราฟินแว็กซ์ คือ ออกตะเดกเคน (N-octadecane) ซึ่งเป็นวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคเป็นแกนกลาง (core) และหุ้มด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) โดยอนุภาคที่ได้เป็นของแข็ง พบว่าวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคที่ถูกห่อหุ้มมีค่าการนำความร้อน พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน และช่วงอายุการใช้งานของวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคสูงกว่าวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคที่ไม่ถูกห่อหุ้ม เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำมาหุ้มมีค่าการนำความร้อนสูง นอกจากนี้ยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าพลังงานที่ถูกกักเก็บในรูปของความร้อนแฝงของการหลอมเหลว ($\triangle H_m$) ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารที่เป็นวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคที่ถูกห่อหุ้มไว้ [7]

จากการศึกษาก่อนหน้านี้ ทางกลุ่มวิจัยได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคลักษณะ core-shell โดยมีเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรท (Ethylene glycol distearate: EDGS) ซึ่งเป็นสารประกอบไดเอสเทอร์ของกรดไขมันคุณภาพดีที่มีราคาถูก หาได้ง่าย และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะอยู่ที่ 62 องศาเซลเซียส เป็นแกนกลางหุ้มด้วยชั้นซิลิกา โดยอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีขนาด 5 ถึง 20 นาโนเมตร และมีค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวตั้งแต่ 17.51 ถึง 36.65 จูลต่อกรัม เพื่อเพิ่มสมบัติทางความร้อนให้มากขึ้น ในงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงวิธีการสังเคราะห์อนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรทที่ห่อหุ้มด้วยชั้นซิลิกาให้มีขนาดครอบคลุมมากขึ้น แล้วศึกษาสมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้อง อาทิ วิเคราะห์หาอุณหภูมิในการหลอมเหลวและปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารด้วยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry: DSC) และวิเคราะห์ความเสถียรของอนุภาคเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA) เป็นต้น จากนั้นศึกษาผลของขนาดอนุภาคกับความสามารถในการกักเก็บความร้อน และการควบคุมอุณหภูมิ

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาวิธีการสังเคราะห์อนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรทที่ห่อหุ้มด้วยซิลิกาที่สามารถควบคุม ขนาดให้ได้ตามต้องการ และตรวจสอบสมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาสมบัติการเก็บความร้อนของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรทที่ห่อหุ้มด้วยซิลิกา โดยผสมอนุภาคกับน้ำมันในลักษณะของสารละลายข้น (Nano-encapsulated Phase Change Material slurries) ซึ่งทำหน้าที่เป็นของเหลวสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat transfer fluid)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการปรับขนาดของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรทที่ห่อหุ้มด้วยซิลิกา เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานในลักษณะต่างๆ
2. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ และสมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้อง
3. ศึกษาความสามารถในการกักเก็บพลังงานความร้อนของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้อยู่ในรูปของวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อน
2. สามารถนำไปอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ เช่น บรรจุภัณฑ์อาหาร สิ่งทอ และสิ่งก่อสร้าง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบกักเก็บพลังงานความร้อน (Thermal energy storage) [8]

ระบบกักเก็บพลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage: TES) คือ เทคโนโลยีที่กักเก็บพลังงานความร้อนส่วนเกิน โดยการให้ความร้อนหรือความเย็นผ่านตัวกลางที่ใช้ในการกักเก็บพลังงาน ซึ่งพลังงานที่ถูกเก็บไว้สามารถนำมาใช้ได้ในภายหลัง ระบบกักเก็บพลังงานความร้อนถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม และสิ่งก่อสร้าง โดยประมานครึ่งหนึ่งของพลังงานที่ถูกใช้ไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน และความต้องการของพลังงานอาจแตกต่างกันไปในแต่ละวัน ดังนั้น ระบบกักเก็บพลังงานความร้อนสามารถช่วยรักษาสมดุลของการผลิตและความต้องการพลังงาน ณ ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งได้

2.1.1 ประเภทของระบบกักเก็บพลังงานความร้อน [9]

ระบบกักเก็บพลังงานแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในการกักเก็บความร้อน

2.1.1.1 ระบบกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage)

ความร้อนสัมผัส คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยที่สารนั้นๆไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ โดยระบบการเก็บความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัสจะถูกจำกัดด้วยค่าความจุความร้อนจำเพาะของตัวกลาง โดยสารที่นิยมใช้เป็นตัวกลางในการกักเก็บความร้อนมีทั้งที่มีสถานะเป็นของเหลว และที่มีสถานะเป็นของแข็ง แต่อย่างไรก็ตามสารที่มีสถานะเป็นของแข็งมักเกิดปัญหาหากมีการเปลี่ยนสถานะจะมีค่าความดันไอสูง อีกทั้งการที่สารที่นำมาใช้เป็นตัวกลางในการกักเก็บความร้อนมีค่าความจุความร้อนต่ำ เป็นผลให้ต้องใช้สารในปริมาณมากเพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนมาก ทำให้ต้องใช้เงินลงทุนมากขึ้นไปอีก

2.1.1.2 ระบบกักเก็บความร้อนในรูปของปฏิกิริยาเคมี (Thermo-chemical storage: TCS)

ระบบกักเก็บความร้อนในรูปของปฏิกิริยาเคมีสามารถเก็บและคายความร้อนปริมาณมากโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีที่ผันกลับได้ โดยสารที่นิยมนำมาใช้ คือ เกลือไฮเดรต (salt hydrate) เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการหลอมละลาย อีกทั้งยังมีค่าความจุความร้อน และมีค่าการนำความร้อนสูง แต่อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญที่มักเกิดขึ้นคือ สารเกิดการแยกตัว (Phase segregation) เกิดสภาวะเย็นยิ่งยวด (Subcooling) และเกิดการสลายตัว (Decomposition) อีกทั้งปฏิกิริยาเคมีของระบบกักเก็บความร้อนรูปแบบนี้ค่อนข้างซับซ้อน และยากที่จะดำเนินการ รวมถึงอายุของระบบเก็บกักพลังงานค่อนข้างน้อย และมีความกัดกร่อนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.3 ระบบกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนแฝง (Latent heat storage)

ระบบกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนแฝงสามารถเก็บและคายความร้อนผ่านกระบวนการการเปลี่ยนวัฏภาคของตัวกลาง หรือสารเปลี่ยนวัฏภาค (Phase Change Materials: PCMs) เมื่อเปรียบเทียบกับระบบกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส ตัวกลางที่เป็นวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคสามารถเก็บพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของสารได้มากกว่า และช่วงอุณหภูมิที่ตัวกลางคายพลังงานออกค่อนข้างคงที่ วัสดุเปลี่ยนวัฏภาคมีทั้งที่อยู่ในรูปของ ของแข็ง-ของแข็ง ของแข็ง-ของเหลว ของแข็ง-แก๊ส และของเหลว-แก๊ส ซึ่งวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคที่เปลี่ยนสถานะในรูปของของแข็ง-ของเหลว มีค่าความร้อนแฝงค่อนข้างสูง และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพียงเล็กน้อยเมื่อสารเกิดการเปลี่ยนสถานะ เป็นผลให้วัสดุเปลี่ยนวัฏภาคประเภทนี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการกักเก็บความร้อน โดยมีหลักการดังนี้ เมื่ออุณหภูมิภายนอกเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของสาร สารจะเริ่มเปลี่ยนวัฏภาคจากของแข็งเป็นของเหลว โดยระหว่างการเปลี่ยนวัฏภาค สารที่เป็นตัวกลางจะทำการดูดซับพลังงานความร้อน และในทางตรงข้ามหากอุณหภูมิภายนอกลดลงจนถึงอุณหภูมิเปลี่ยนวัฏภาค สารจะเปลี่ยนวัฏภาคกลับเป็นของแข็งโดยการคายพลังงานออกมา

2.2 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค [10]

โดยทั่วไปวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้

2.2.1 สารประกอบอินทรีย์ (Organic compound)

สารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบทางเคมีที่ไม่เกิดปรากฏการณ์เย็นยิ่งยวด ไม่กัดกร่อน และไม่เป็นพิษ อีกทั้งยังมีค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งสารประกอบอินทรีย์แบ่งออกเป็น 2 พวก คือ 1. สารจำพวกพาราฟิน (Paraffin) และ 2. สารที่ไม่ใช่พาราฟิน (Non-paraffin)

2.2.1.1 สารจำพวกพาราฟิน (Paraffin)

สารจำพวกพาราฟิน (Paraffin) ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูกและมีค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 120 ถึง 210 จูลต่อกรัม อีกทั้งช่วงของอุณหภูมิในการหลอมเหลวค่อนข้างกว้าง โดยอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 20 จนถึง 70 องศาเซลเซียส และไม่เกิด Phase segregation แต่อย่างไรก็ตาม สารจำพวกพาราฟินมีค่าการนำความร้อนต่ำ ซึ่งจะส่งผลต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน และเป็นสารที่ได้มาจากแหล่งทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป

2.2.1.2 สารที่ไม่ใช่พาราฟิน (Non-paraffin)

สารที่ไม่ใช่พาราฟิน (Non-paraffin) ประกอบด้วยสารอินทรีย์จำพวกกรดไขมัน เอสเทอร์ของกรดไขมัน แอลกอฮอล์ และไกลคอล ซึ่งมีสมบัติในการหลอมเหลวและแข็งตัวที่ดีเยี่ยม อีกทั้งยังเป็นสารจำพวกที่สังเคราะห์ได้จากทรัพยากรประเภทใช้แล้วไม่หมดสิ้นสามารถเกิดขึ้นมาใหม่โดยธรรมชาติ แต่สารจำพวกนี้มีค่าความร้อนแฝงและอุณหภูมิในการหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic compound)

วัสดุเปลี่ยนวัฏภาคที่เป็นสารประกอบอนินทรีย์มีค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวและค่าการนำความร้อนสูง อีกทั้งไม่ติดไฟ แต่อย่างไรก็ตามสารประกอบอนินทรีย์มักกัดกร่อนโลหะ เกิดปรากฏการณ์เย็นยิ่งยวด และเกิดการแยกวัฏภาค ซึ่งเกลือไฮเดรต (Hydrated salts) เป็นวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคประเภทสารอนินทรีย์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีค่าความร้อนแฝงสูงถึง 240 จูลต่อกรัม และมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าสารประกอบอินทรีย์ แต่เนื่องด้วยปัญหาต่างๆที่มักเกิดขึ้น อันได้แก่ ปัญหาในเรื่องของการกัดกร่อน และปัญหาการแยกวัฏภาคของเกลือไฮเดรตหลังจากเกิดวัฏจักรการเปลี่ยนวัฏภาคไปช่วงนึง รวมไปถึงปรากฏการณ์เย็นยิ่งยวด

2.2.3 สารยูเทคติก (Eutectic)

สารยูเทคติก โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้ สารประกอบอินทรีย์-อินทรีย์ สารประกอบอนินทรีย์-อนินทรีย์ และสารประกอบอนินทรีย์-อินทรีย์ ซึ่งผสมกันในสัดส่วนที่เหมาะสมที่จะทำให้จุดหลอมเหลวของสารผสมดังกล่าวลดต่ำลง โดยความสามารถในการเก็บพลังงานเชิงปริมาตรค่อนข้างสูงกว่าสารประกอบอินทรีย์

2.3 กรดไขมัน (Fatty acid) [11]

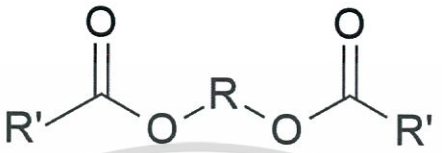
กรดไขมันเป็นกรดอินทรีย์ที่สามารถพบได้ในพืชและสัตว์ มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเป็นเลขคู่อยู่ระหว่าง 12 ถึง 18 อะตอม โดยเฉพาะจำนวนคาร์บอน 16 และ18 สามารถพบได้มากที่สุด โดยกรดไขมันแบ่งได้ 2 ประเภท คือ กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acids) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acids)

กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acids) เป็นกรดไขมันที่พันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนเป็นพันธะเดี่ยวทั้งหมด กรดไขมันอิ่มตัวเหล่านี้ได้แก่ กรดลอริก (Lauric Acid) กรดไมริสติก (Myristic Acid) กรดปาล์มมิติก (Palmitic Acid) และกรดสเตียริก (Stearic Acid) ซึ่งกรดไขมันอิ่มตัวมีคุณสมบัติแข็งตัวง่ายและไม่เหม็นหืน ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acids) คือกรดไขมันที่พันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนบางพันธะเป็นพันธะคู่ ซึ่งคุณสมบัติของกรดไขมันไม่อิ่มตัว มีจุดหลอมเหลวต่ำ และเมื่อสัมผัสกับอากาศเป็นเวลานานจะเกิดกลิ่นเหม็นหืน ซึ่งในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการสังเคราะห์สารประกอบไดเอสเทอร์ของกรดไขมันอิ่มตัว หรือเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรท (Ethylene glycol distearate: EDGS) เพื่อเป็นการเพิ่มอุณหภูมิหลอมเหลว อันเนื่องมาจากการเพิ่มมวลโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 สารประกอบไดเอสเทอร์ของกรดไขมัน [4]

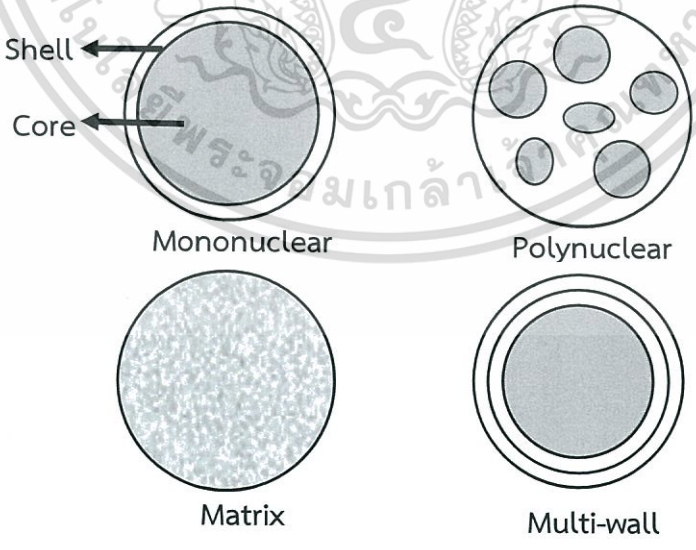
สารประกอบไดเอสเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid diester) ประกอบด้วยหมู่แอลคิล (R) ที่มาจากสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของไดแอลกอฮอล์ (Dialcohol) และหมู่แอลคิล (R') ของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันชนิดเดียวกัน 2 หมู่ ซึ่งสารประกอบไดเอสเอสเทอร์ของกรดไขมันสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชั่น (Transesterification) ของไดแอลกอฮอล์ และเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Methyl Ester: FAMEs)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างสารประกอบไดเอสเตอร์ของกรดไขมัน

2.4 เทคนิคเอนแคปซูเลชัน (Encapsulation technique) [12]

เทคนิคเอนแคปซูเลชัน (Encapsulation) คือ การห่อหุ้มสารที่มีลักษณะเป็นของเหลว ของแข็ง หรือก๊าซให้อยู่ภายในแคปซูล ซึ่งอนุภาคที่ได้จะมีโครงสร้างสัณฐานเป็นแบบมีแกนกลางและเปลือกหุ้ม (Core-shell) ดังรูปที่ 2.2 โดยสารที่นำมาห่อหุ้มอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ โดยสารที่ถูกนำมาทำเป็นเปลือกหุ้มต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นแกนกลาง ในปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคเอนแคปซูเลชันมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย รวมไปถึงมีการใช้เทคนิคเอนแคปซูเลชั่นร่วมกับสารปลี่ยนวัฏภาค เพื่อปรับปรุงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) เพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน และป้องกันการรั่วไหลของสารปลี่ยนวัฏภาคเมื่ออยู่ในสถานะของเหลว



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแคปซูล [13]

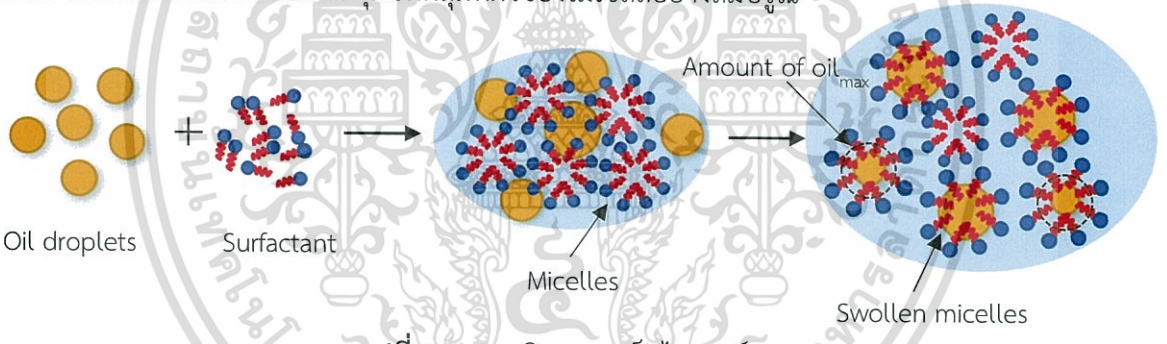
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 วิธีเอนแคปซูเลชันวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค

วิธีเอนแคปซูเลชันวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคมี 2 วิธีหลักๆ คือ วิธีทางกายภาพ (Physico-mechanical methods) และวิธีทางเคมี (Chemical methods) โดยวิธีทางกายภาพ เช่น การพ่นฝอยอบแห้ง (Spray drying) ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร และยา แต่เนื่องจากระบบการพ่นฝอยมีราคาสูง อีกทั้งการควบคุมขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคขึ้นกับอุปกรณ์อะตอมไมเซอร์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีทางเคมีพบว่า ในการเอนแคปซูเลชันวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคสามารถทำได้ง่ายกว่า [14] วิธีทางเคมีประกอบด้วย วิธีโซลเจล (Sol-gel) วิธี Interfacial Polymerization และวิธี Self-assembly เป็นต้น

2.4.1.1 วิธี Self-assembly [7]

ไขมันกระจายตัวอยู่ในสารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำ ซึ่งประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดทวีน 80 และสแปน 80 เพื่อทำให้อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil in water emulsion) มีความคงตัว โดยบริเวณผิวของหยดไขมันที่กระจายตัวถูกปกคลุมด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของสารลดแรงตึงผิว และหันส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ออกด้านนอก ในลักษณะของสวอลเล็นไมเซลล์ (Swollen micelles) ดังรูปที่ 2.3 และเมื่อสารห่อหุ้มถูกเติมลงไปในอิมัลชันจะเกิดการเกาะกับส่วนที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่บริเวณผิวของไมเซลล์ จากนั้นเติมสารช่วยให้เกิดการตกตะกอนเพื่อให้สารห่อหุ้มปกคลุมที่ผิวของไมเซลล์อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.3 การเกิดสวอลเล็นไมเซลล์

2.4.2 ชนิดของสารห่อหุ้ม (Shell materials) [15]

ชนิดของสารห่อหุ้มที่นำมาใช้กับวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ 1. กลุ่มโลหะ อาทิเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) เหล็กกล้าผสมนิกเกิล-โครเมียม (Nickel-chromium steel) ซึ่งส่วนใหญ่มักใช้ห่อหุ้มสารที่ใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูง เนื่องจากมีความแข็งแรง และมีความเสถียรทางความร้อนสูง แต่มักถูกกัดกร่อนได้ง่าย และมีราคาแพง 2. พอลิเมอร์ มีราคาถูกกว่ากลุ่มที่เป็นโลหะ แต่มีค่าความเสถียรทางความร้อนและค่าการนำความร้อนต่ำ อีกทั้งยังถูกจำกัดช่วงอุณหภูมิการใช้งานไว้ที่ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส และ 3. สารอนินทรีย์ เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) [16,17,18] ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) [19] แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) [7] ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ชั้นซิลิกาเพื่อห่อหุ้มเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรท เนื่องจากมีราคาถูก และหาได้ง่าย อีกทั้งซิลิกาที่ถูกนำมาใช้เป็นสารห่อหุ้มนั้น ไม่เป็นพิษ และมีค่าความเสถียรทางความร้อนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ท่ามกลางวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคที่เป็นสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ พาราฟินแว๊กซ์มีคุณสมบัติที่ดี เช่น มีช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม มีค่าความร้อนแฝงสูง แต่เนื่องจากเป็นสารที่ได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี จึงได้มีการสังเคราะห์สารอินทรีย์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น กรดไขมันและอนุพันธ์ Floros M. C. และคณะ (2014) [4] ได้สังเคราะห์อนุพันธ์ของไดเอสเทอร์จากกรดไขมันที่สังเคราะห์จากสเตรียโลอิลคลอไรด์ (Stearoyl chloride) และทำการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของคาร์บอนในสารประกอบไดแอลกอฮอล์ (2 4 6 และ 8 อะตอม) พบว่าค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวเท่ากับ 240 จูลต่อกรัม สูงกว่ากรดสเตรียริก (155-190 จูลต่อกรัม) และพาราฟิน (146-210 จูลต่อกรัม) ถึง 38% แต่ทั้งพาราฟินแว๊กซ์ กรดไขมันและอนุพันธ์มีค่าการนำความร้อนต่ำ เกิดการรั่วไหลเมื่อเปลี่ยนวัฏภาคเป็นของเหลว ดังนั้นจึงได้มีการทำการเอนแคปซูเลชันวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคซึ่งเป็นวิธีที่นิยม เนื่องจากสามารถแก้ปัญหาการรั่วไหล และสามารถปรับปรุงค่าการนำความร้อน Latibari S. T. และคณะ (2013) [18] ได้สังเคราะห์อนุภาคกรดปาล์มิติก (palmitic acid: PA) ที่ห่อหุ้มด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธี Sol-gel โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-เบส (11 11.5 และ 12) พบว่าขนาดของอนุภาคขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดเบส (pH value) โดยที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 11 11.5 และ 12 ขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีขนาด 183.7 466.4 และ 722.5 นาโนเมตร ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าประสิทธิภาพในกระบวนการห่อหุ้มสารเพิ่มขึ้นจาก 83.25 เป็น 89.55 เปอร์เซ็น เมื่อค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากการเอนแคปซูเลชันด้วยวิธี sol-gel ใช้เวลานาน และต้องทำการควบคุมค่าความเป็นกรดเบส Yu S. และคณะ (2014) [7] ได้สังเคราะห์อนุภาคออกตะเดกเคน (N-octadecane) ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ขนาดประมาณ 5 ไมโครเมตร ด้วยวิธี Self-assembly โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการเอนแคปซูเลชันที่มีราคาถูก คือ แคลเซียมไดคลอไรด์ (Calcium dichloride) และโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) จากการศึกษาพบว่าความหนาของเปลือกหุ้มส่งผลให้ค่าการนำความร้อน และช่วงอายุการใช้งานของวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เป็นการเพิ่มความเสถียรทางความร้อนโดยการป้องกันออกตะเดกเคนจากการสลายตัวทางความร้อน (Thermally evaporating) และปริมาณความร้อนที่ถูกกักเก็บขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคภายในแคปซูลเท่านั้น

Luo R. และคณะ (2015) [16] ได้สังเคราะห์อนุภาคพาราฟินแว๊กซ์ที่ถูกห่อหุ่มด้วยซิลิกา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 437 นาโนเมตร ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวและแข็งตัว เท่ากับ 111.7 และ 110.8 จูลต่อกรัม ตามลำดับ โดยวิธีการที่ผู้วิจัยใช้ คือ Chemical Precipitation เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก ใช้โซเดียมซิลิเกตซึ่งมีราคาถูกและหาได้ง่าย เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซิลิกา จากงานวิจัยพบว่าความสามารถในการเก็บกักปริมาณพลังงานความร้อน (Thermal storage capability) ของพาราฟินที่ถูกห่อหุ้มด้วยวิธีดังกล่าวมีค่าสูงถึง 99.93%

Floros M. C. และคณะ (2016) [6] ทำการสังเคราะห์ไดเอสเทอร์ของกรดไขมันซึ่งเป็นวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคที่สังเคราะห์จากเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAMEs) และไดแอลกอฮอล์ (Dialcohol) และได้นำ Butane-1,4-diyl dihexadecanoate ที่สังเคราะห์ได้และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะอยู่ที่ 63 องศาเซลเซียสมาใส่เข้ากับแก้วน้ำสุญญากาศ เพื่อทดสอบความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องดื่มร้อน ซึ่งพบว่าแก้วน้ำสูญญากาศที่บรรจุด้วยอนุภาคเปลี่ยนวัฏภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถลดอุณหภูมิของเครื่องดื่มร้อนจาก 85 องศาเซลเซียส ลงมาที่ 63 องศาเซลเซียส ภายในเวลาต่ำกว่า 1 นาที อีกทั้งยังรักษาอุณหภูมิของเครื่องดื่มร้อนให้อยู่ในช่วง 50 ถึง 70 องศาเซลเซียสได้นานถึง 3 ชั่วโมง 55นาที ในขณะที่แก้วน้ำสูญญากาศ ใช้เวลาถึง 18 นาทีในการลดอุณหภูมิของเครื่องดื่มร้อน และรักษาอุณหภูมิไว้ได้ 2ชั่วโมง 37 นาที ซึ่งสรุปได้ว่าวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิ และรักษาอุณหภูมิได้ยาวนาน อีกทั้งสามารถลดอุณหภูมิของเครื่องดื่มให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ (60 องศาเซลเซียส) ได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากในปัจจุบันร้านกาแฟเชิงพาณิชย์ส่วนมากเสิร์ฟเครื่องดื่มร้อนที่ถูกบรรจุอยู่ในแก้วกระดาษที่อุณหภูมิประมาณ 82.2 และ 85 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ The National Coffee Association of U.S.A., Inc. แนะนำว่าควรจะเสริฟต่อผู้บริโภคเพื่อให้ได้รสชาติที่ดีที่สุด [20,21] แต่ที่อุณหภูมิดังกล่าวส่งผลให้ผู้บริโภคเกิดอาการลวก พองในช่องปาก [22] ในทางตรงกับข้าม จากข้อมูลที่ถูกตีพิมพ์ [23] พบว่าผู้บริโภคนิยมดื่มกาแฟที่อุณหภูมิประมาน 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำกว่าอุณหภูมิที่แนะนำให้เสิร์ฟ

จากข้อมูลดังกล่าวยังไม่มีงานวิจัยที่ทำการพัฒนาขนาดอนุภาคของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรทที่ห่อหุ้มด้วยซิลิกาซึ่งเป็นวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค และศึกษาสมบัติทางความร้อนของอนุภาคดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรท (Ethylene Glycol Distearate, Cosmetic Grade - CHEMIPAN)
2. ทวีน 80 (Tween 80, Commercial Grade)
3. สแปน 80 (Span 80, Commercial Grade)
4. น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)
5. โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate, Extra Pure - Merck KGaA)
6. แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium Chloride, AR - RCI Labscan)
7. เอทิลอะซีเตต (Ethyl Acetate, AR - RCI Labscan)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. อ่างน้ำมัน (Oil bath)
2. เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot plate stirrer)
3. แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic Bar)
4. ขวดก้นกลม (Round Bottom Flask)
5. ขาตั้ง (Burette Stand) และตัวหนีบบิวเรต (Holder)
6. ที่หยดสาร (Dropping funnels)
7. ช้อนตักสาร (Spatula)
8. บีกเกอร์ (Beaker)
9. ปิเปต (Pipette)
10. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask)
11. หลอดเหวี่ยงแยก (Centrifugal tube)
12. เครื่องชั่งน้ำหนัก (Analytical balance)
13. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge machine)
14. ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum oven)
15. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, FEI TECNAI T20 G^2)
16. เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารด้วยการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, Parkin Elmer, Spectra GX)
17. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, Parkin Elmer, Pysis 1)
18. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Colorimeter, METTLER TOLEDO DSC 1, $STAR^e$ System)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเอนแคปซูเลชันอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา

1. เตรียมอ่างน้ำมัน โดยนำไปวางบนเครื่องกวนสารให้ความร้อน แล้วตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที
2. ผสมเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรทกับทวีน 80 (Tween 80) 0.71 กรัม สแปน 80 (Span 80) 0.29 กรัม และเติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร ลงไปในขวดก้นกลม
3. นำขวดก้นกลมดังกล่าวใส่แท่งกวนแม่เหล็ก แล้วนำไปให้ความร้อน จากนั้นกวนต่อเนื่อง 10 นาที
4. หยดโซเดียมซิลิเกตอย่างช้าๆ ความเข้มข้น 6.4 โมลาร์ 2 มิลลิลิตร และกวนต่อเนื่อง 2 ชั่วโมง เพื่อที่จะให้ได้อิมัลชันที่เสถียร
5. หยดสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์อย่างช้าๆ ความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ 29 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1ชั่วโมง 30นาที
6. กวนต่อเนื่อง 3 ชั่วโมง จะได้สารละลายแขวนลอย
7. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาลดอุณหภูมิลงให้อยู่ที่อุณหภูมิห้อง
8. ใส่สารละลายลงในหลอดเหวี่ยงแยกแล้วแยกผลิตภัณฑ์ออกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที 15 นาที
9. รินของเหลวภายในหลอดทิ้ง แล้วล้างผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยน้ำกลั่น
10. ทำซ้ำข้อ 8-9 อีก 2 รอบ
11. นำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นมาล้างด้วยเอทิลอะซีเตตร้อน อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส 4 ครั้ง
12. นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
13. ทดลองซ้ำโดยปรับเปลี่ยนปริมาณเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรทเป็น 0.6 กรัม 0.75 กรัม

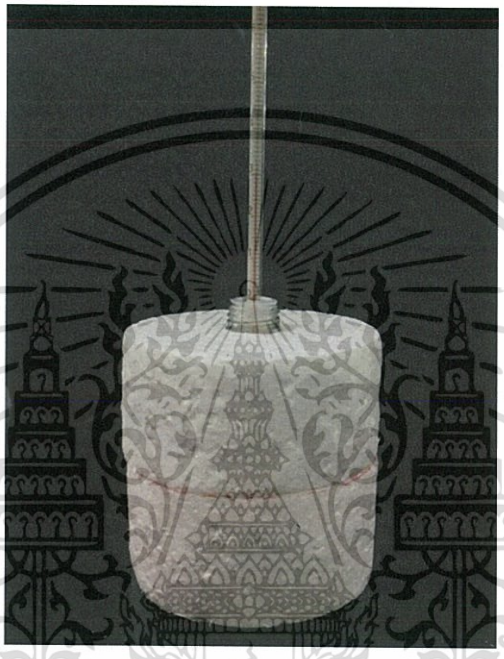
3.4 การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติ และขนาดของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา

ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาด้วยการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: ATR-FTIR) ดูการกระจายตัว ขนาดและโครงสร้างสัณฐานอนุภาคผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM) วิเคราะห์ความเสถียรของอนุภาคเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA) โดยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 650 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน วิเคราะห์หาอุณหภูมิในการหลอมเหลว และปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารด้วยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry: DSC) โดยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการเย็นตัว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 115 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบสมบัติการเก็บความร้อน และการควบคุมอุณหภูมิ

การทดสอบความสามารถในการกักเก็บความร้อน และการควบคุมอุณหภูมิทำได้โดยนำอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ผสมกับน้ำมันปาล์มอุณหภูมิ 88 องศาเซลเซียส ในลักษณะของสารละลายข้น (Nano-encapsulated Phase Change Material slurries) ซึ่งทำหน้าที่เป็นของเหลวสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat transfer fluid) จากนั้นศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทุกๆ 30 วินาที จนอุณหภูมิลดลงมาที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.1 การทดสอบสมบัติการเก็บความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา (EGDS@SiO_2) ด้วยวิธี Self-assembly และศึกษาผลของการปรับสัดส่วน core-shell ต่อขนาด โครงสร้างสัณฐาน สมบัติทางความร้อน และความสามารถในการกักเก็บความร้อนของ EGDS@SiO_2 โดยการวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐาน และขนาดอนุภาคผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาด้วยการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR) ศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน อาทิ อุณหภูมิในการหลอมเหลว และปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคด้วยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry: DSC) วิเคราะห์ความเสถียรของอนุภาคเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (Thermogravimetric Analysis: TGA) และจากนั้นศึกษาสมบัติการเก็บความร้อนของ EGDS@SiO_2 โดยนำอนุภาคที่สังเคราะห์ผสมกับน้ำมันปาล์มซึ่งทำหน้าที่เป็นของเหลวสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อศึกษาความสามารถในการเก็บความร้อน และแลกเปลี่ยนความร้อนของ EGDS@SiO_2 ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อน

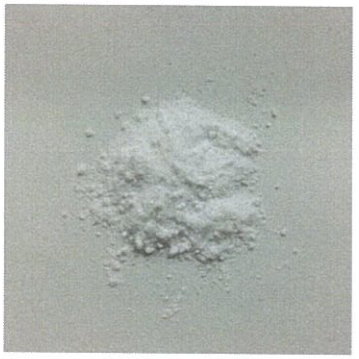
ตอนที่ 1

4.1 การสังเคราะห์อนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา (Silica-coated ethylene glycol distearate; EGDS@SiO_2)

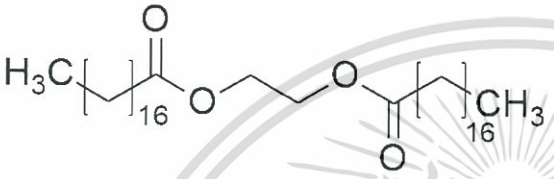
4.1.1 โครงสร้างทางเคมีของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา

ในการทดลองนี้ทำการหุ้มเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตด้วยชั้นซิลิกา โดยวิธี Self-assembly อนุภาคที่ได้มีลักษณะเป็นผงสีขาวแสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงถึงสเปกตรัม ATR-FTIR ของอนุภาคนาโนแคปซูลของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต (EGDS@SiO_2) ที่สังเคราะห์ได้โดยปรับสัดส่วนของ EGDS ที่ใช้เป็นแกนกลาง (core) และสารตั้งต้นซิลิกาที่ใช้หุ้ม (shell) เป็น 0.6 0.8 และ 1 พบว่า สเปกตรัมของ EGDS@SiO_2 ทั้ง 3 สัดส่วน มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และการวิเคราะห์พีคดังตารางที่ 4.1 ปรากฏหมู่ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และซิลิกา อีกทั้งคาดว่าเกิดการซ้อนทับกันของพีคที่เกิดจาก C-O stretching ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชั่นหลักของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และพีคของ Si-O-Si stretching ที่เลขคลื่นในช่วง 1000-1260 cm^{-1} (รูป 4.2) ซึ่งจากผล FTIR บอกได้ว่าสารตัวอย่างมีเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และซิลิกาเป็นองค์ประกอบ

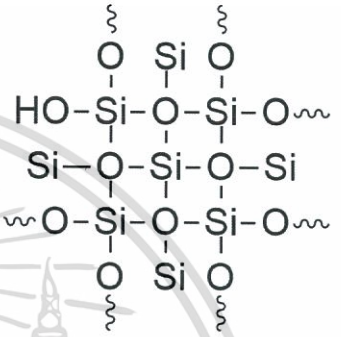
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

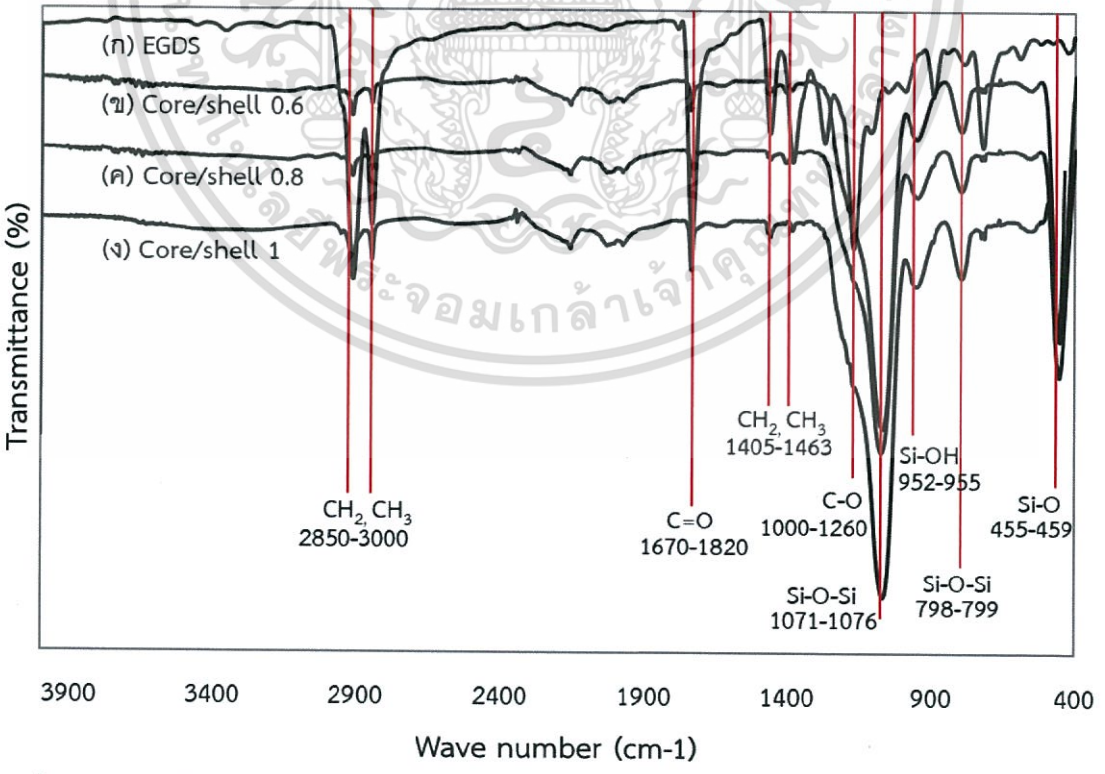


(ข)



(ค)

รูปที่ 4.1 (ก) เอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาหลังผ่านการอบแห้ง และโครงสร้างทางเคมีของ (ข) เอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และ (ค) ซิลิกา



รูปที่ 4.2 สเปกตรัม ATR-FTIR ของอนุภาคนาโนแคปซูลของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาที่สัดส่วน core-shell 0.6 (ก) 0.8 (ข) และ 1(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์พีคจากสเปกตรัม FTIR ของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา

Wavenumber (cm-1)	หมู่ฟังก์ชันที่สอดคล้อง
2850-3000	C-H stretching (CH_2 and CH_3)
1405-1463	C-H bending (CH_2 and CH_3)
1000-1260	C-O stretching
1670-1820	C=O stretching
1071-1076	Asymmetry Si-O-Si (Stretching Vibration)
798-799	Symmetry Si-O-Si (Stretching Vibration)
455-459	Si-O (bending Vibration)
952-955	Si-OH (Bending Vibration)

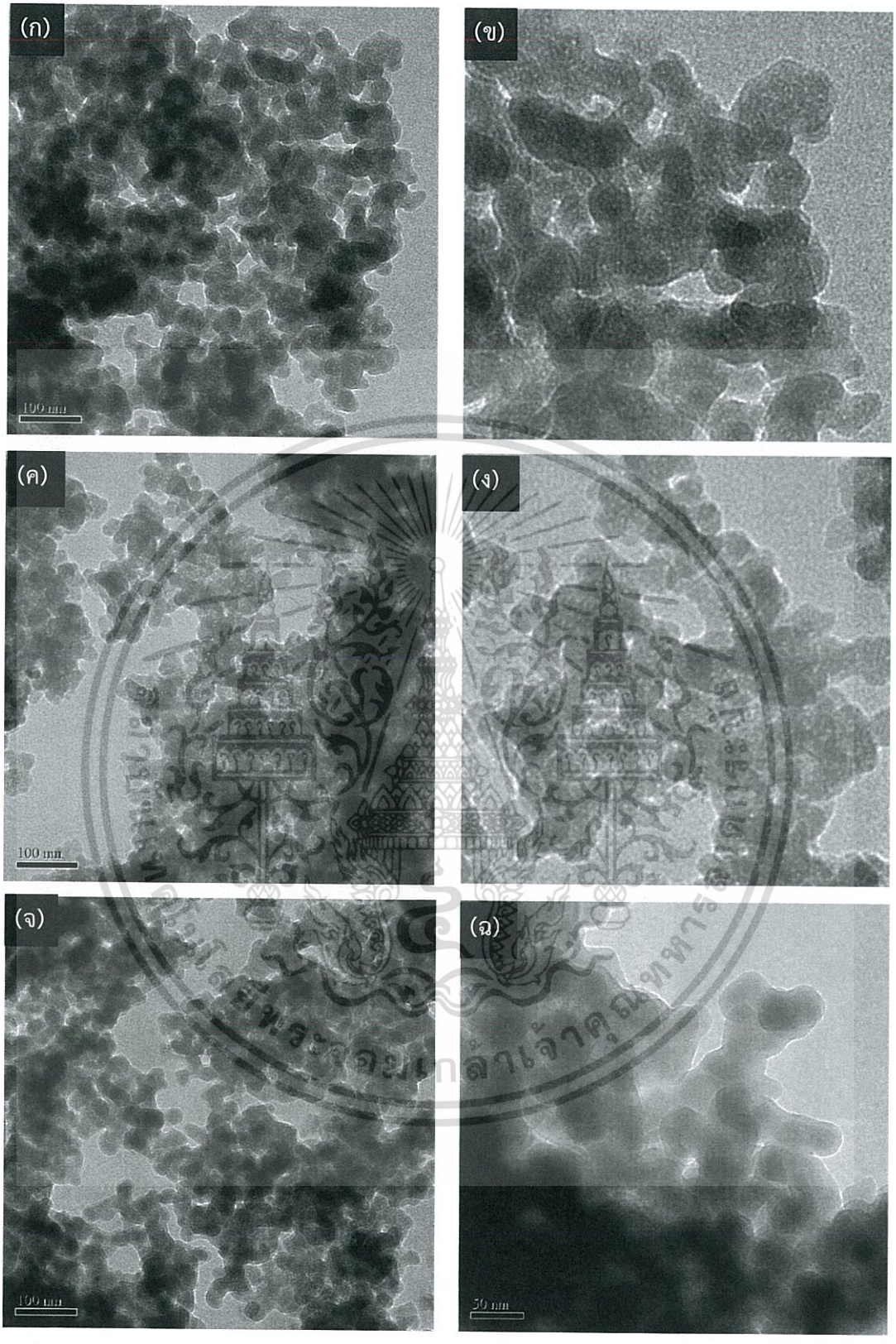
4.1.2 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานและขนาดของอนุภาค

รูปที่ 4.3 แสดงรูป TEM ของ EGDS@SiO_2 ที่สัดส่วน core-shell ต่างๆ พบว่าอนุภาคที่เตรียมได้ทั้ง 3 สัดส่วน มีลักษณะค่อนข้างกลม และเกาะติดกัน (aggregation) ซึ่งการที่อนุภาคนาโนแคปซูลเกิดการรวมตัวกันเพื่อเป็นการลดพลังงานอิสระพื้นผิว (surface free energy) ที่เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็ก [24] และอาจเกิดระหว่างการหยดสารละลายโซเดียมซิลิเกต อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) คอนเดนเซชัน (condensation) ของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ของซิลิกาที่ผิวของอนุภาคเกิดอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการเกาะติดกัดของอนุภาค [25] อีกทั้งการเพิ่มสัดส่วน core-shell ขึ้นจาก 0.6 เป็น 0.8 และ 1 ขณะที่ปริมาณของซิลิกาคงที่ ขนาดของอนุภาค (วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ImageJ) เล็กลงแสดงดังตารางที่ 4.2 เป็นผลมาจากเมื่อสัดส่วนของไขมัน (เอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต) เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดนิวคลีไอ (nuclei) จำนวนมากระหว่างการเกิดสวอลเล็นไมเซลซ์ ดังนั้นปริมาณซิลิกาที่ปกคลุมแต่ละอนุภาคจึงน้อยลง เกิดชั้นห่อหุ้มที่ไม่หนามากนัก อนุภาคแคปซูลมีขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนโดยน้ำหนักอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตต่อซิลิกา และเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคนาโนแคปซูลทั้ง 3 สัดส่วน

Core/shell ratio	สัดส่วนโดยน้ำหนักไขมันต่อสารห่อหุ้ม (g/g)	เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (nm)
0.6	0.4/0.75	45.64 ± 1.48
0.8	0.6/0.75	33.81 ± 1.26
1	0.75/0.75	26.51 ± 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ภาพ TEM ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาที่สัดส่วน core-shell (ก,ข) 0.6 (ค,ง) 0.8 และ (จ,ฉ) 1 ที่กำลังขยาย 29,000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 วิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน

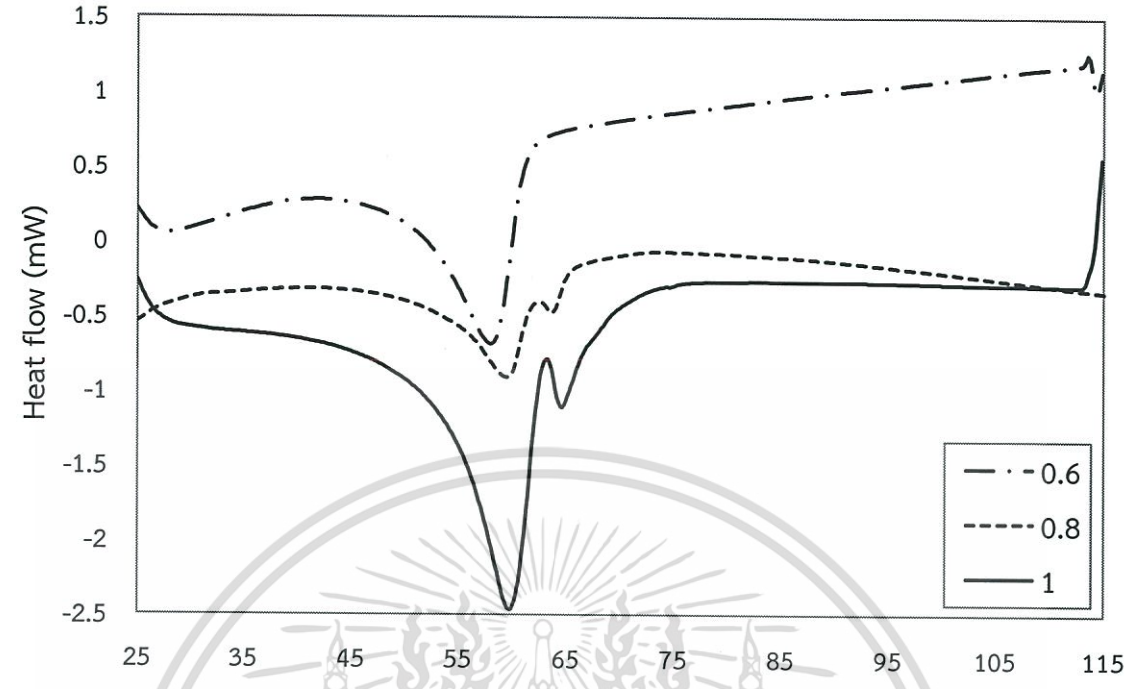
อุณหภูมิ และพลังงานของการเปลี่ยนวัฏภาคของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และอนุภาคนาโนแคปซูลแสดงดังตารางที่ 4.3 จากผลการตรวจวิเคราะพบว่าเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตมีพลังงานของการเปลี่ยนวัฏภาคสูงเมื่อเทียบกับอนุภาคนาโนแคปซูลที่ประกอบด้วยเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตอยู่ภายในชั้นห่อหุ้มซิลิกา และพลังงานของการเปลี่ยนวัฏภาคของอนุภาคนาโนแคปซูลเพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วน core-shell เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากพลังงานความร้อนแฝงถูกกักเก็บไว้เฉพาะในวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค หรือเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่อยู่ภายในสารห่อหุ้มเท่านั้น [7] อีกทั้งเมื่อดูจากรูปที่ 4.4 แสดงกราฟ DSC (DSC Thermogram) พบว่าลักษณะพีคของการดูดความร้อน (endothermic peak) และพีคของการคายความร้อน (exothermic peak) ซึ่งแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนวัฏภาคของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และอนุภาคนาโนแคปซูลทั้ง 3 สัดส่วนมีลักษณะคล้ายคลึงกัน เป็นไปได้ว่าเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตถูกหุ้มด้วยซิลิกาอย่างสมบรูณ์ [16] แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนแคปซูลมีลักษณะพีคกว้างกว่าเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตดังรูปที่ 4.4 (ค) อีกทั้งมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาคต่ำกว่าเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต คาดว่าเป็นผลมาจากจากการเอนแคปซูเลชันด้วยชั้นซิลิกานั้นจำกัดการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ระหว่างการเกิดผลึก ส่งผลให้เกิดความบกพร่องขึ้นที่ผลึก (crystal defect) ของอนุภาคที่อยู่ภายใน ทำให้ช่วงของการเปลี่ยนวัฏภาคของสารกว้างขึ้น และอุณหภูมิของการเปลี่ยนวัฏภาคต่ำลง [16,17]

เพื่อเป็นการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการกักเก็กความร้อนของอนุภาคนาโนแคปซูล 2 ตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ Encapsulation efficiency (ประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนของสารภายในแคปซูล; E) และ Encapsulation ratio (ประสิทธิภาพของการห่อหุ้มสาร; R) ซึ่งขึ้นอยู่กับความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (ΔH_m) และการเกิดผลึก (ΔH_c) [7,26,27] แสดงดังตารางที่ 4.3 สรุปได้ว่าเมื่อปริมานของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตเพิ่มขึ้น ความร้อนแฝงที่กักเก็บไว้จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น Encapsulation efficiency และ Encapsulation ratio จึงมีค่าสูงขึ้น

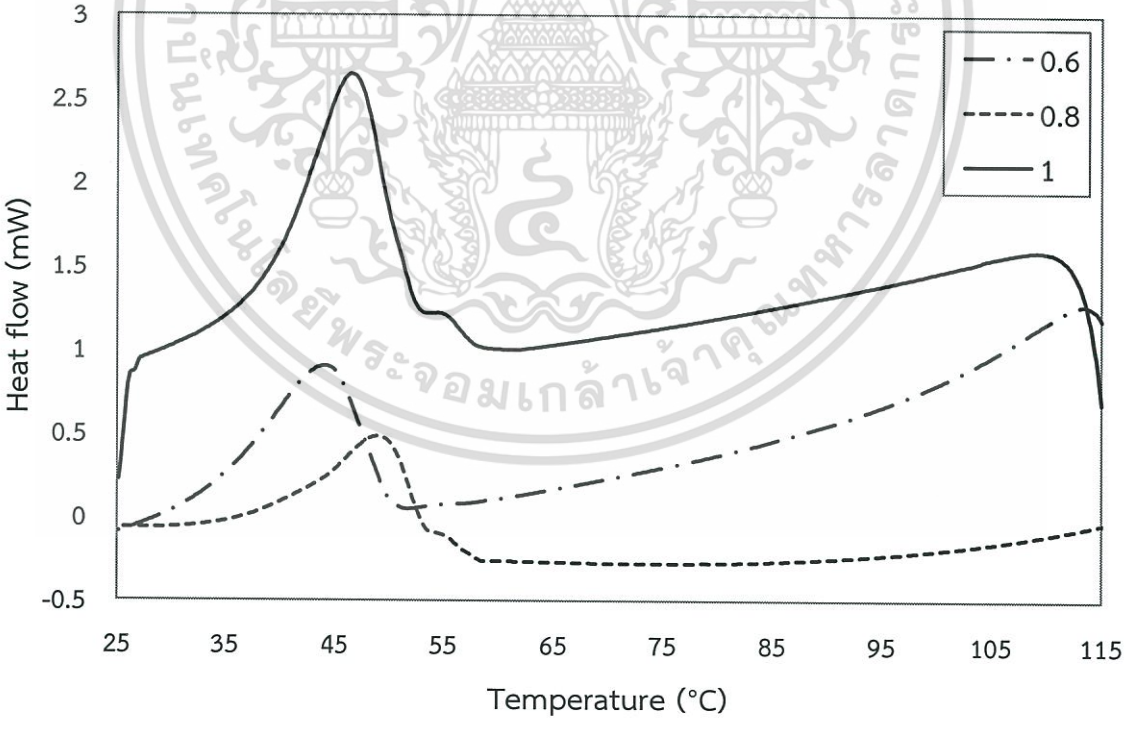
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางความร้อนของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และอนุภาคนาโนแคปซูลที่สัดส่วน core/shell 0.6 0.8 และ 1

Core/shell ratio	การหลอมเหลว		การเกิดผลึก		Encapsulation efficiency (%)	Encapsulation ratio (%)
	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)		
EGDS	64.27	110.26	58.93	109.97	-	-
0.6	58.17	4.88	44.00	6.88	5.34	4.43
0.8	59.48	6.9	49.02	7.42	6.50	6.26
1	60.00	16.16	46.33	12.41	12.97	14.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

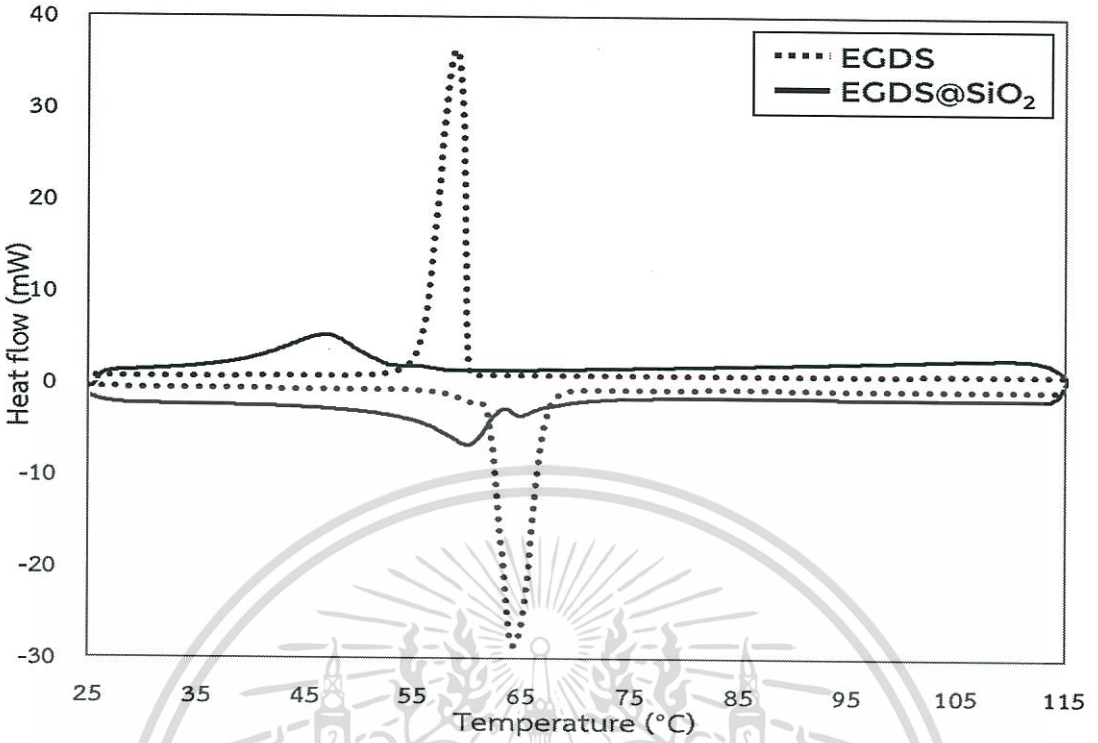


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 4.4 กราฟ DSC ของ (ก) การหลอมเหลว (ข) การเกิดผลึกของอนุภาคนาโนแคปซูลที่สัดส่วน core-shell 0.6 0.8 และ 1 และ (ค) การหลอมเหลว-การเกิดผลึกของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตและอนุภาคนาโนแคปซูลที่สัดส่วน 1

4.1.4 วิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อน

รูปที่ 4.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และอนุภาคนาโนแคปซูลทั้ง 3 สัดส่วน core-shell จากผลการตรวจวิเคราะห์พบว่าเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตมีลักษณะกราฟเปนรูปตัวเอส (Sigmoid curve) และระยะการสลายตัวมีหนึ่งช่วง คือ เริ่มการสลายตัวที่อุณหภูมิ 254.22 องศาเซลเซียส และสลายตัวเกือบ 100% ที่อุณหภูมิ 299.13 องศาเซลเซียส ในขณะที่อนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาทั้ง 3 สัดส่วน สามารถแบ่งระยะการสลายตัวเป็นสามช่วง คือ ช่วงแรกเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสูญเสียความชื้นที่ถูกดูดซับไว้โดยซิลิกา [25] ช่วงที่สองและช่วงที่สามเป็นช่วงการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ โดยช่วงที่สองเกิดที่อุณหภูมิประมาน 200 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าเป็นการสลายตัวของสารลดแรงตึงผิวคือ ทวีน 80 และ สแปน 80 ที่อยู่ภายในเปลือกหุ้มซิลิกา [28] และช่วงที่สามเกิดสลายตัวที่อุณหภูมิตั้งแต่ 280 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป และสลายตัวหมดที่อุณหภูมิประมาน 320 องศาเซลเซียส คาดว่าเป็นการสลายตัวของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่อยู่ภายในเปลือกหุ้มซิลิกา โดยน้ำหนักของสารประกอบอินทรีย์ที่สูญเสียไปแสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งอนุภาคนาโนแคปซูลที่ห่อหุ้มด้วยซิลิกานั้น อุณหภูมิที่สารประกอบอินทรีย์สลายตัวหมดมากกว่าเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต เป็นไปได้ว่าการห่อหุ้มด้วยซิลิกาจะช่วยยืดอุณหภูมิในการสลายตัวเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตได้ ถือเป็นการเพิ่มความสเถียรทางความร้อน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการสลายตัวและน้ำหนักที่สูญเสียไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงที่ 3 ของสารประกอบอินทรีย์ที่คาดว่าเป็นเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่สัดส่วน core-shell เท่ากับ 0.6 และ 1 นั้นเท่ากัน ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ที่ได้จากดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (DSC) ที่บ่งบอกว่าปริมาณของเอทิลีนไกคอลเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วน core-shell เพิ่มขึ้น [7, 16] เนื่องจากความไม่ชัดเจนระหว่างการสะลายของสารอินทรีย์ในช่วงที่สอง และช่วงที่สาม

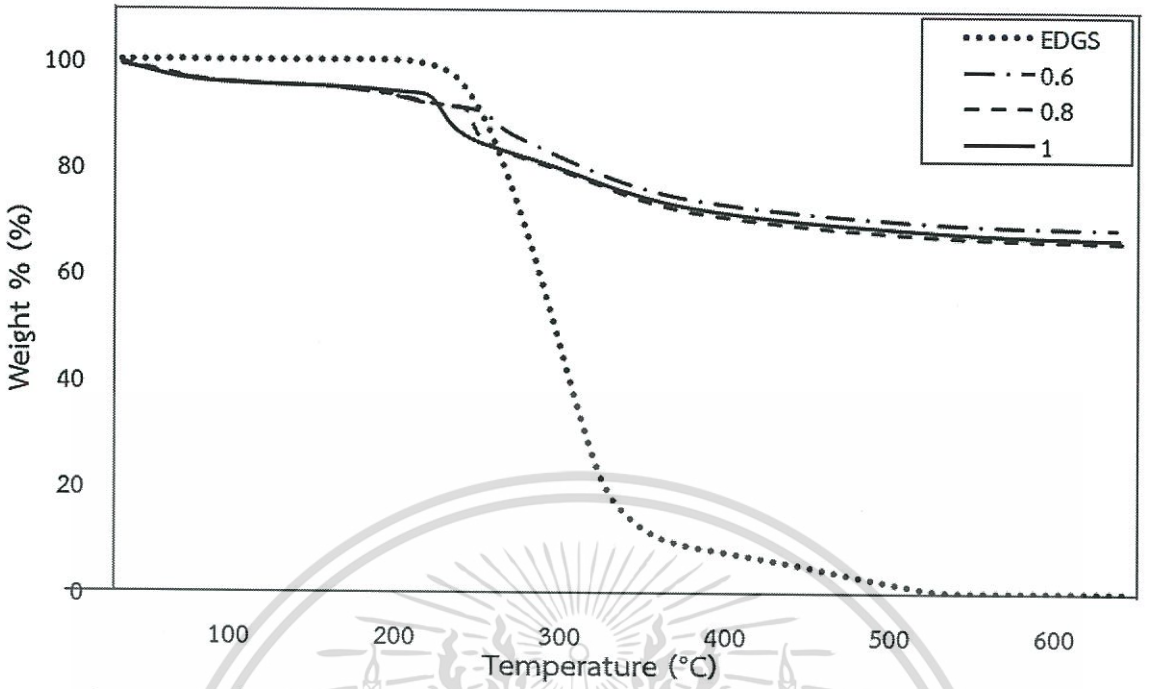
ตารางที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และสารประกอบอินทรีย์ที่ห่อหุ้มด้วยซิลิกาในช่วงที่สอง

Core/shell ratio	อุณหภูมิที่เริ่มการสลายตัว (°C)	อุณหภูมิที่การสลายตัวหมด (°C)	ปริมานสารที่สลายตัวไป (%)
EGDS	254.22	299.13	99.70
0.6	252.62	260.22	6.729
0.8	243.01	247.36	10.04
1	220	228.75	12.488

ตารางที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงที่สามของสารประกอบอินทรีย์ที่ห่อหุ้มด้วยซิลิกา

Core/shell ratio	อุณหภูมิที่เริ่มการสลายตัว (°C)	อุณหภูมิที่การสลายตัวหมด (°C)	น้ำหนักสารที่สูญเสียไป (%)
0.6	299.21	313.81	16.02
0.8	307.94	321.84	15.53
1	289.41	314.44	16.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงมวลเมื่อให้ความร้อนของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต และอนุภาคนาโนแคปซูลที่สัดส่วน core-shell 0.6 0.8 และ 1 (TGA curves)

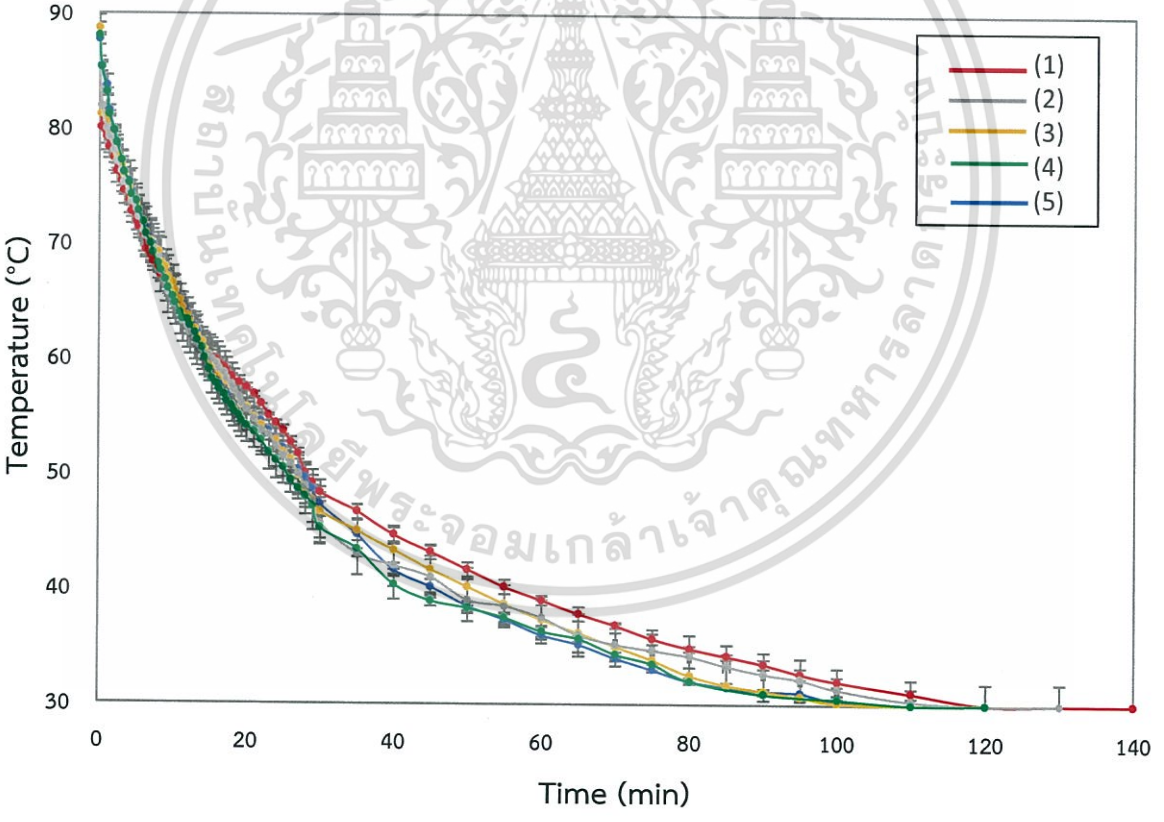
4.1.5 วิเคราะห์สมบัติการเก็บความร้อน และการควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 4.6 (ก) แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาของสารตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่างตั้งแต่อุณหภูมิ 88 ถึง 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) โดยในช่วงแรกอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของสารตัวอย่างที่ (1) (2) และ (3) ซึ่งมีวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคเป็นองค์ประกอบมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูง คาดว่าเป็นผลมาจากการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำมัน และวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคโดยวัสดุเปลี่ยนวัฏภาคดูดซับพลังงานความร้อนจากน้ำมันร้อน เพื่อใช้ในการเปลี่ยนวัฏภาคจากของแข็งเป็นของเหลวซึ่งพลังงานดังกล่าวอยู่ในรูปของความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (ΔH_m) และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 55 ถึง 65 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 4.6 (ข) ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิหลอมเหลม และเกิดผลึกของวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของตัวอย่างที่ (1) (2) และ (3) ลดต่ำลง คาดว่าเป็นผลมาจากที่ช่วงอุณหภูมิดังกล่าววัสดุเปลี่ยนวัฏภาคเริ่มเปลี่ยนวัฏภาคจากของเหลวเป็นของแข็งและคายพลังงานความร้อนที่กักเก็บไว้ในรูปของความร้อนแฝงของการเกิดผลึก (ΔH_c) โดยเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนกับน้ำมันเป็นผลให้ที่ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาช้าลงแสดงดังตารางที่ 4.6 [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

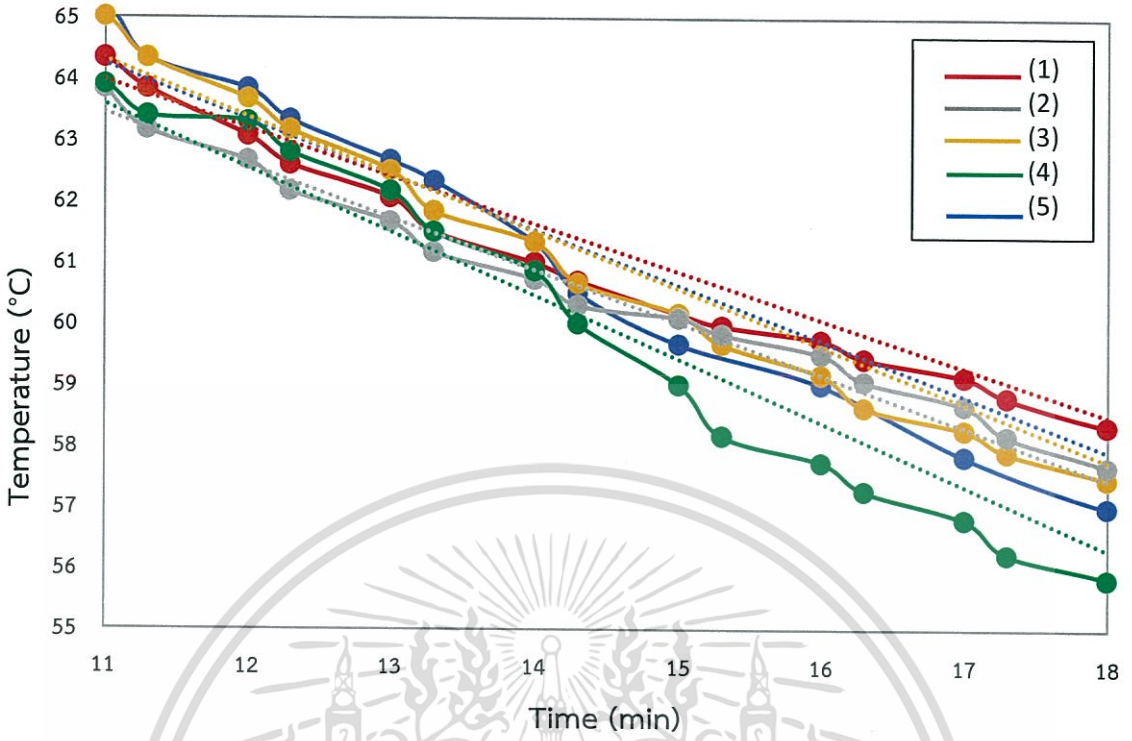
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบ สมบัติทางความร้อน และอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 55 ถึง 65 องศาเซลเซียส ของสารตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง

ตัวอย่าง	องค์ประกอบ	การหลอมเหลว		การเกิดผลึก		อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (°C/min)
		T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	
(1)	Palm oil + 0.4 C/S	60.00	36.65	54	31.35	0.7809
(2)	Palm oil + 1 C/S	60.00	16.16	46.33	12.41	0.8569
(3)	Palm oil + 0.6 C/S	58.17	4.88	44.00	6.88	0.9022
(4)	Palm oil +silica	-	-	-	-	0.9366
(5)	Palm oil	-	-	-	-	1.0384



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาของสารตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่าง และ (ข) อัตราการปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาที่ช่วงอุณหภูมิ 55 ถึง 65 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาเพื่อแก้ไขปัญหาการรั่วไหล เพิ่มค่าการนำความร้อน และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาด สมบัติทางความร้อน และความสามารถในการกักเก็บความร้อน โดยเทียบสัดส่วน core-shell ที่ 0.6 0.8 และ 1 เมื่อกำหนดปริมาณซิลิกาซึ่งเป็นสารห่อหุ้ม (shell) เท่ากับ 0.75 กรัม พบว่าอนุภาคนาโนแคปซูลมีลักษณะเป็นทรงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 26 ถึง 45 นาโนเมตร ขึ้นอยู่กับปริมาณของเอทิลีนไกคอลไดสเตียเรต และซิลิกา และเมื่อพิจารณาถึงความเสถียรทางความร้อน พบว่าอนุภาคนาโนแคปซูลทั้ง 3 สัดส่วนมีเสถียรทางความร้อนเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งความสามารถในการกักเก็บความร้อนของอนุภาคนาโนแคปซูลเพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วน core-shell เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วน core-shell ที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากสามารถกักเก็บพลังงานความร้อนได้มากที่สุด คือ สัดส่วน core-shell 1

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาผลของปริมาณสารลดแรงตึงผิว (Tween 80 และ Span 80) ที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคแคปซูล

2. ศึกษาวิธีการเตรียมอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนของสารภายในแคปซูลสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Sharma, V. V Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," vol. 13, pp. 318–345, 2009.

[2] L. F. Cabeza and H. Mehling, *Review on thermal energy storage with phase change : materials , heat transfer analysis and applications*, vol. 23. 2003.

[3] M. R. Anisur, M. H. Mahfuz, M. A. Kibria, R. Saidur, I. H. S. C. Metselaar, and T. M. I. Mahlia, "Curbing global warming with phase change materials for energy storage," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 23–30, 2013.

[4] M. C. Floros and S. S. Narine, "Saturated linear diesters from stearic acid as renewable phase change materials," *Mater. Lett.*, vol. 137, pp. 252–255, 2014.

[5] A. Sharma, S. D. Sharma, and D. Buddhi, "Accelerated thermal cycle test of acetamide , stearic acid and paraffin wax for solar thermal latent heat storage applications," vol. 43, pp. 1923–1930, 2002.

[6] M. C. Floros and S. S. Narine, "Latent heat storage using renewable saturated diesters as phase change materials," *Energy*, vol. 115, pp. 924–930, 2016.

[7] S. Yu, X. Wang, and D. Wu, "Microencapsulation of n-octadecane phase change material with calcium carbonate shell for enhancement of thermal conductivity and serving durability: Synthesis, microstructure, and performance evaluation," *Appl. Energy*, vol. 114, pp. 632–643, 2014.

[8] I. Renewable and E. Agency, "IRENA-IEA-ETSAP Technology Brief 4: Thermal Storage," no. January, 2013.

[9] C. Liu and Z. Rao, "Challenges in various thermal energy storage technologies," *Sci. Bull.*, vol. 62, no. 4, pp. 231–233, 2017.

[10] R. Baetens, B. Petter, and A. Gustavsen, "Phase Change Materials for Building Applications : A State-of-the-Art Review," pp. 1–13.

[11] ธนวันต์ คงแก้ว., "'ไขมันและน้ำมัน (Lipid and Oil)'. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : www.student.chula.ac.th /~56370431/Lipid.html (สืบค้นข้อมูลวันที่ 22 พฤศจิกายน2559)."

[12] "'การใชเทคนิคเอนแคปซูเลชัน (encapsulation) ในอุตสาหกรรม'. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://rubber.oie.go.th/box/ELib_Document/2384/การใชเทคนิคเอนแคปซูเลชันในอุตสาหกรรม.pdf."

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[13] A. Jamekhorshid, S. M. Sadrameli, and M. Farid, "A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 531–542, 2014.

[14] T. Khadiran, M. Zobir, Z. Zainal, and R. Rusli, "Solar Energy Materials & Solar Cells Encapsulation techniques for organic phase change materials as thermal energy storage medium : A review," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 143, pp. 78–98, 2015.

[15] R. Jacob and F. Bruno, "Review on shell materials used in the encapsulation of phase change materials for high temperature thermal energy storage," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 79–87, 2015.

[16] R. Luo, S. Wang, T. Wang, C. Zhu, and T. Nomura, "Fabrication of paraffin @ SiO 2 shape-stabilized composite phase change material via chemical precipitation method for building energy conservation," *Energy Build.*, vol. 108, pp. 373–380, 2015.

[17] H. Zhang, S. Sun, X. Wang, and D. Wu, "Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects Fabrication of microencapsulated phase change materials based on n -octadecane core and silica shell through interfacial polycondensation," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 389, no. 1–3, pp. 104–117, 2011.

[18] S. Tahan *et al.*, "Synthesis , characterization and thermal properties of nanoencapsulated phase change materials via sol e gel method," *Energy*, vol. 61, pp. 664–672, 2013.

[19] L. Cao, F. Tang, and G. Fang, "Synthesis and characterization of microencapsulated paraffin with titanium dioxide shell as shape-stabilized thermal energy storage materials in buildings," *Energy Build.*, vol. 72, pp. 31–37, 2014.

[20] "National Coffee Association of America, Inc. http://www.ncausa.org/ [accessed 12/06].," *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, vol. 32, no. 01, pp. 155–161, 2017.

[21] Lingle TR., "The coffee brewing handbook. Long Beach, California: Specialty Coffee Association of America," 1996.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[22] D. C. Roberts, I. S. Whitaker, and P. J. Drew, "Perineal scalds from drive through restaurants: A public health hazard," *Burns*, vol. 33, no. 2, pp. 258–260, 2007.

[23] N. Qualities, "At What Temperatures Do Consumers Like to Drink Coffee ?: Mixing Methods," vol. 67, no. 7, pp. 7–10, 2002.

[24] D. J. McClements, "Nanoemulsions versus microemulsions: terminology, differences, and similarities," *Soft Matter*, vol. 8, no. 6, pp. 1719–1729, 2012.

[25] S. Liang *et al.*, "Nanoencapsulation of n-octadecane phase change material with silica shell through interfacial hydrolysis and polycondensation in miniemulsion," *Energy*, vol. 93, pp. 1684–1692, 2015.

[26] H. Zhang, X. Wang, and D. Wu, "Silica encapsulation of n-octadecane via sol-gel process: A novel microencapsulated phase-change material with enhanced thermal conductivity and performance," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 343, no. 1, pp. 246–255, 2010.

[27] F. He, X. Wang, and D. Wu, "New approach for sol-gel synthesis of microencapsulated n-octadecane phase change material with silica wall using sodium silicate precursor," *Energy*, vol. 67, pp. 223–233, 2014.

[28] K. Nidhi, S. Indrajeet, M. Khushboo, K. Gauri, and D. J. Sen, "Hydrotropy: A promising tool for solubility enhancement: A review," *Int. J. Drug Dev. Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 26–33, 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดลอง

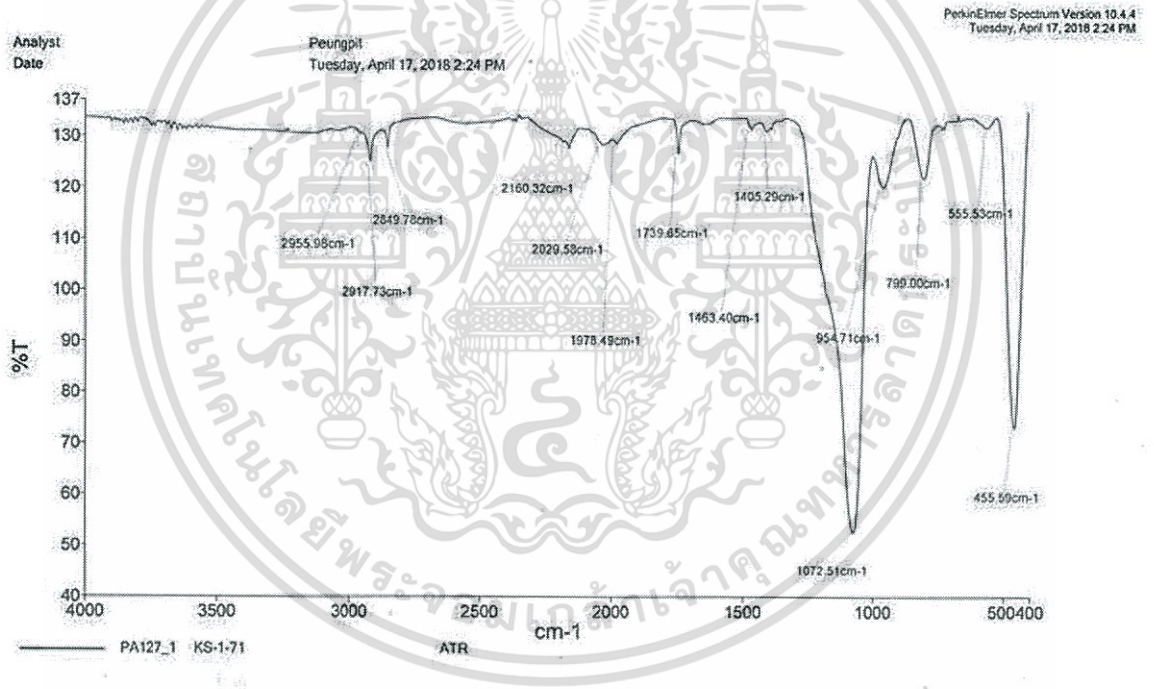
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 การสังเคราะห์อนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกา

ตารางที่ ก.1.1 ส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตหุ้มด้วยซิลิกา

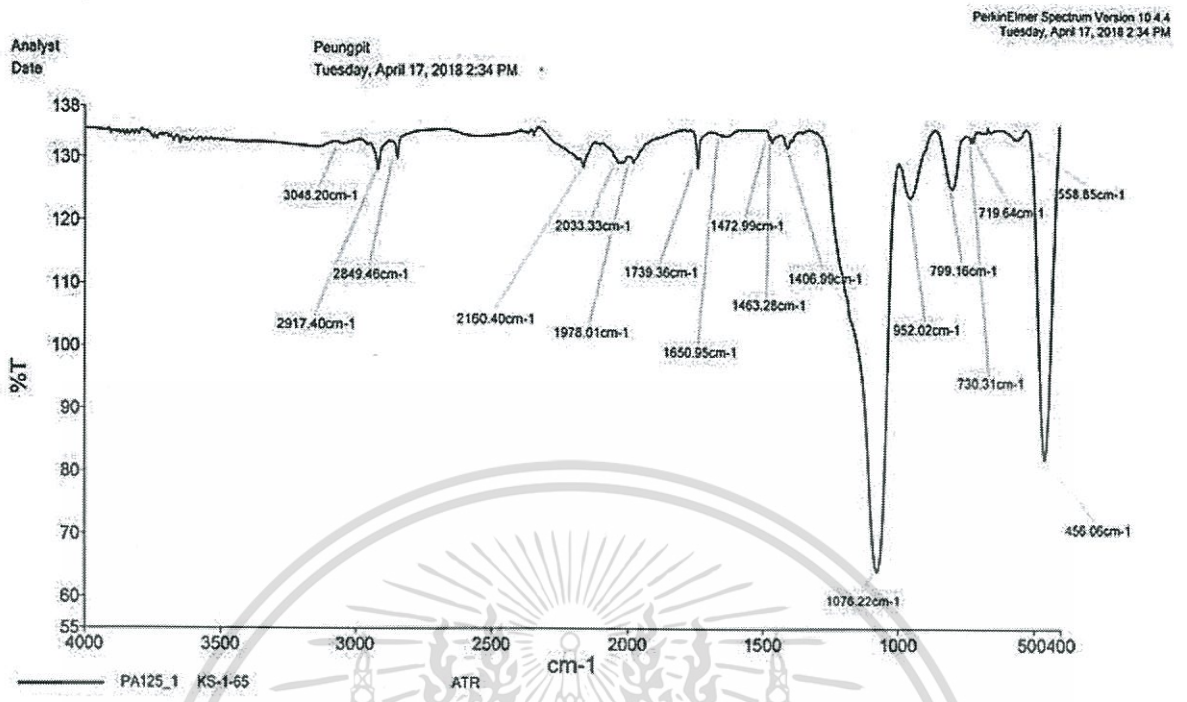
สัดส่วน core-shell	ปริมาณโซเดียมซิลิเกต (g)	ปริมาณ EGDS (g)
0.6	1.35	0.4
0.8	1.35	0.6
1	1.35	0.75

ก.2 ข้อมูลผลการทดลอง

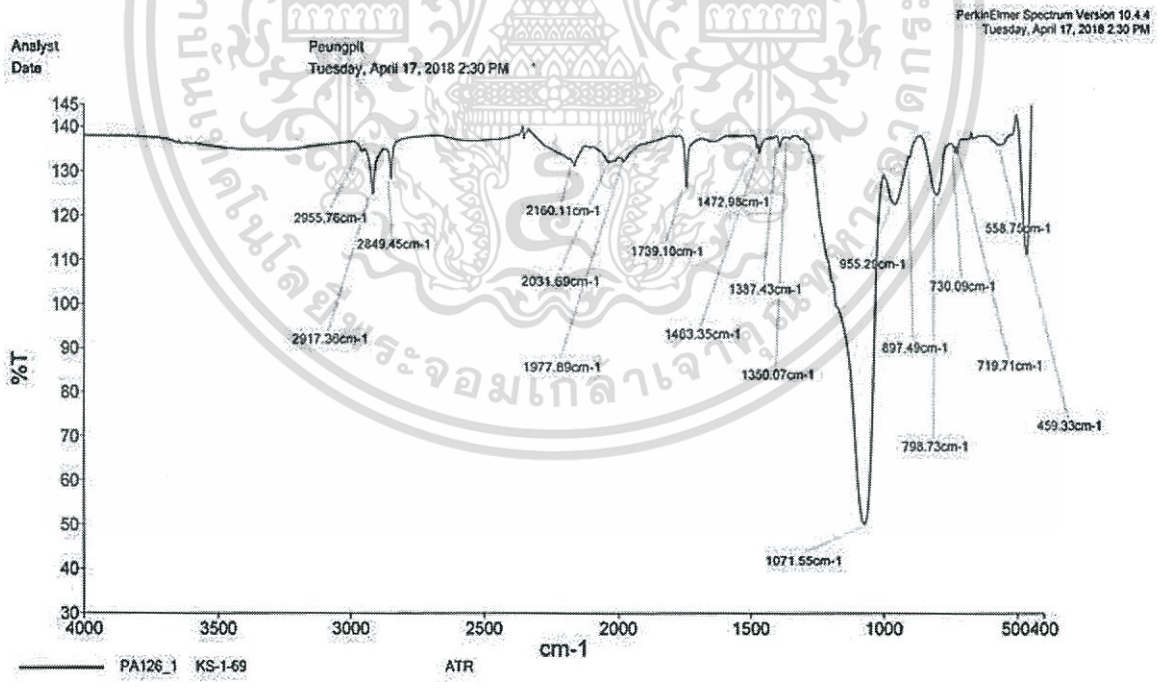


รูปที่ ก.2.1 ผลวิเคราะห์ ATR-FTIR ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาที่สัดส่วน core-shell 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

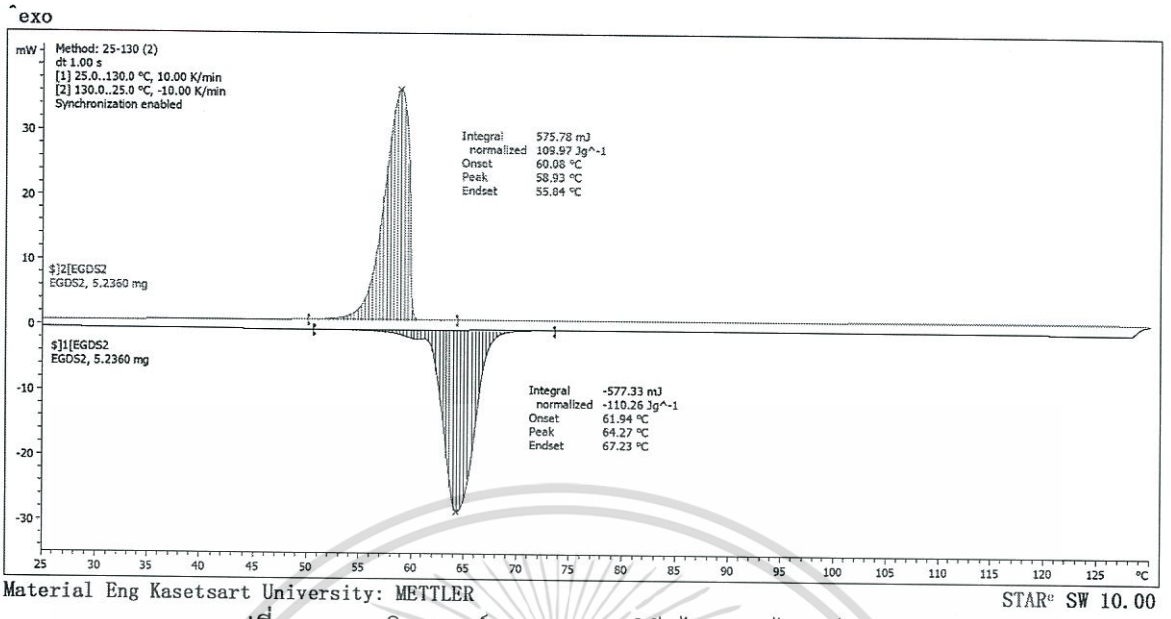


รูปที่ ก.2.2 ผลวิเคราะห์ ATR-FTIR ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาที่สัดส่วน core-shell 0.8

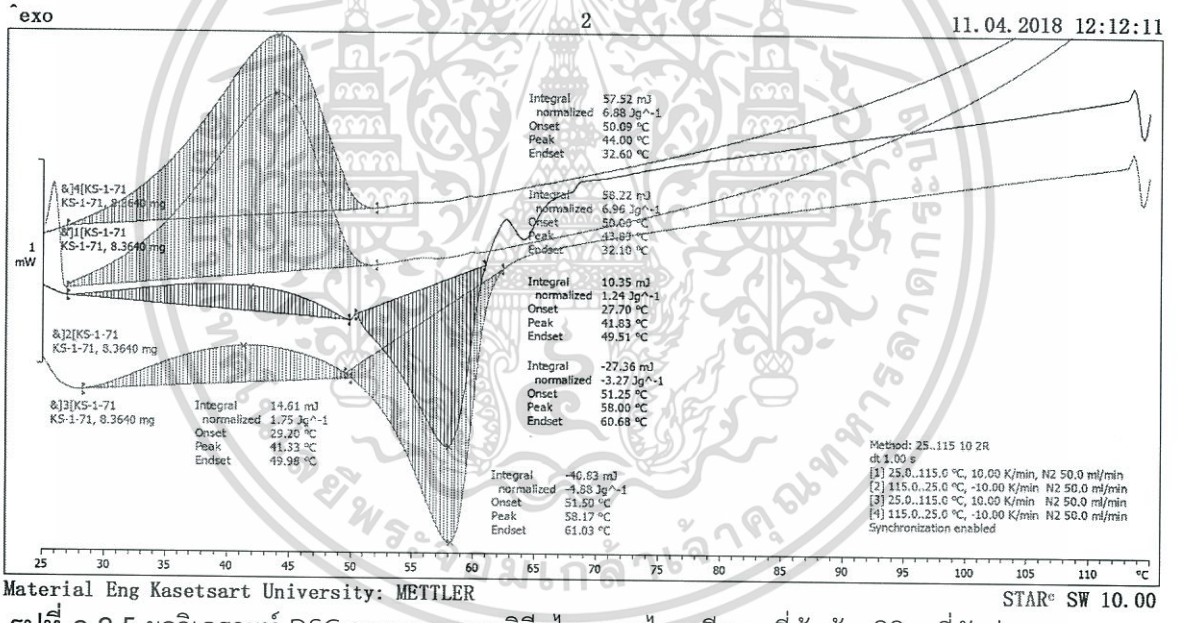


รูปที่ ก.2.3 ผลวิเคราะห์ ATR-FTIR ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาที่สัดส่วน core-shell 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

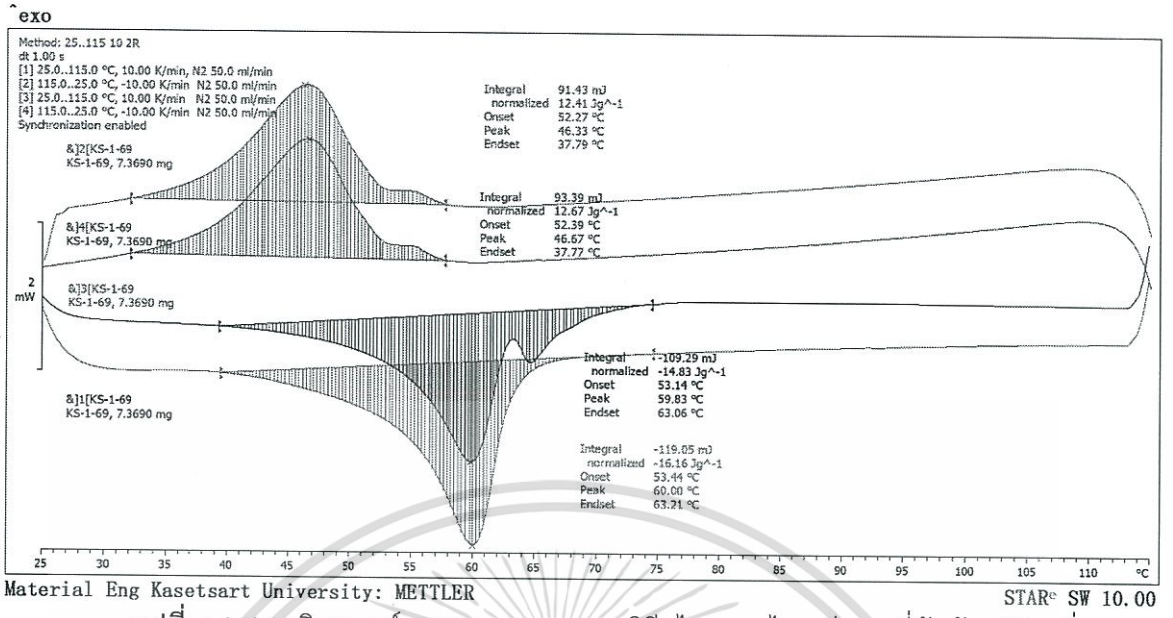


รูปที่ ก.2.4 ผลวิเคราะห์ DSC ของเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรต

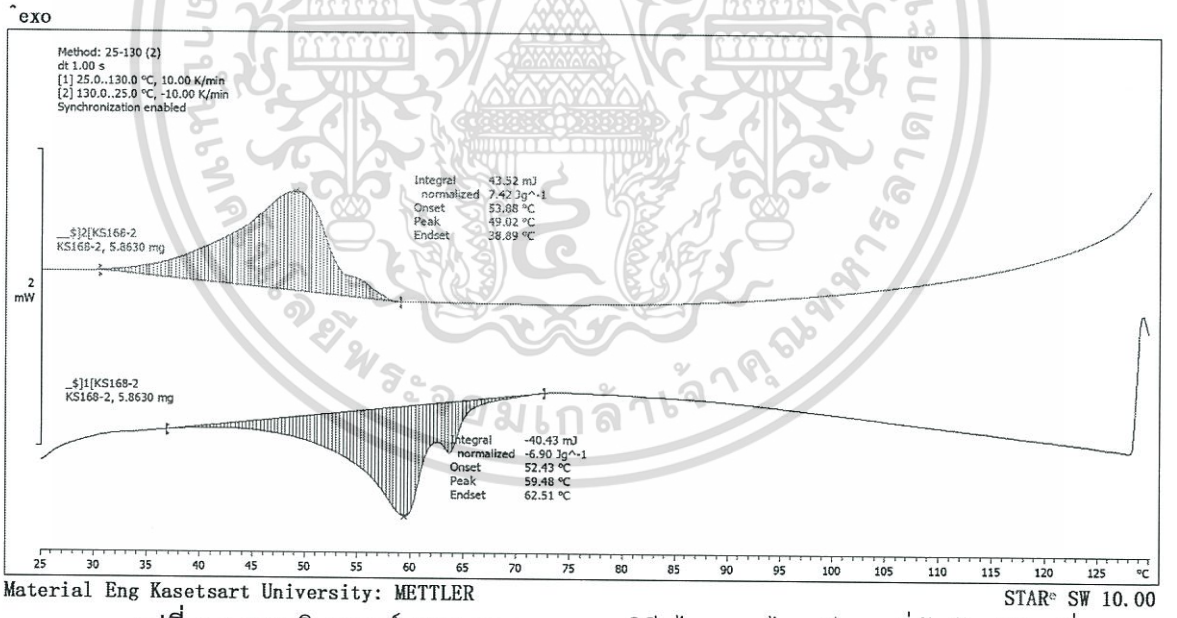


รูปที่ ก.2.5 ผลวิเคราะห์ DSC ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาที่สัดส่วน core-shell 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

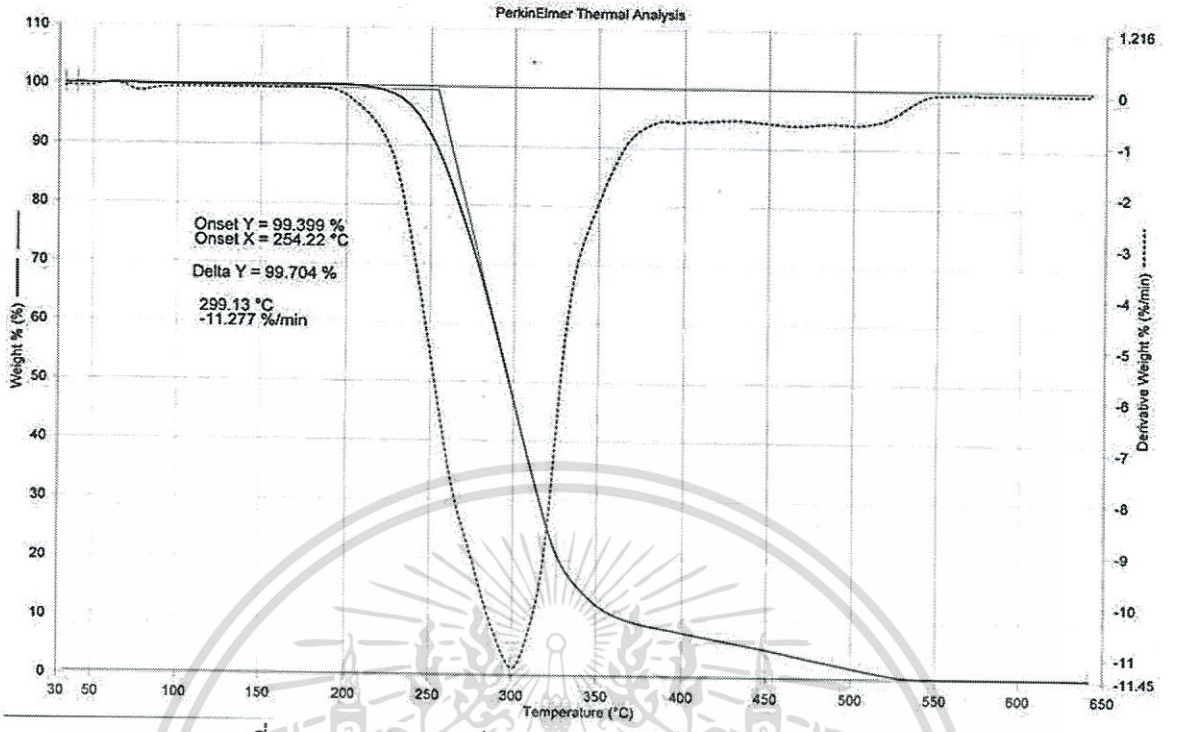


รูปที่ ก.2.6 ผลวิเคราะห์ DSC ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาที่สัดส่วน core-shell 0.8

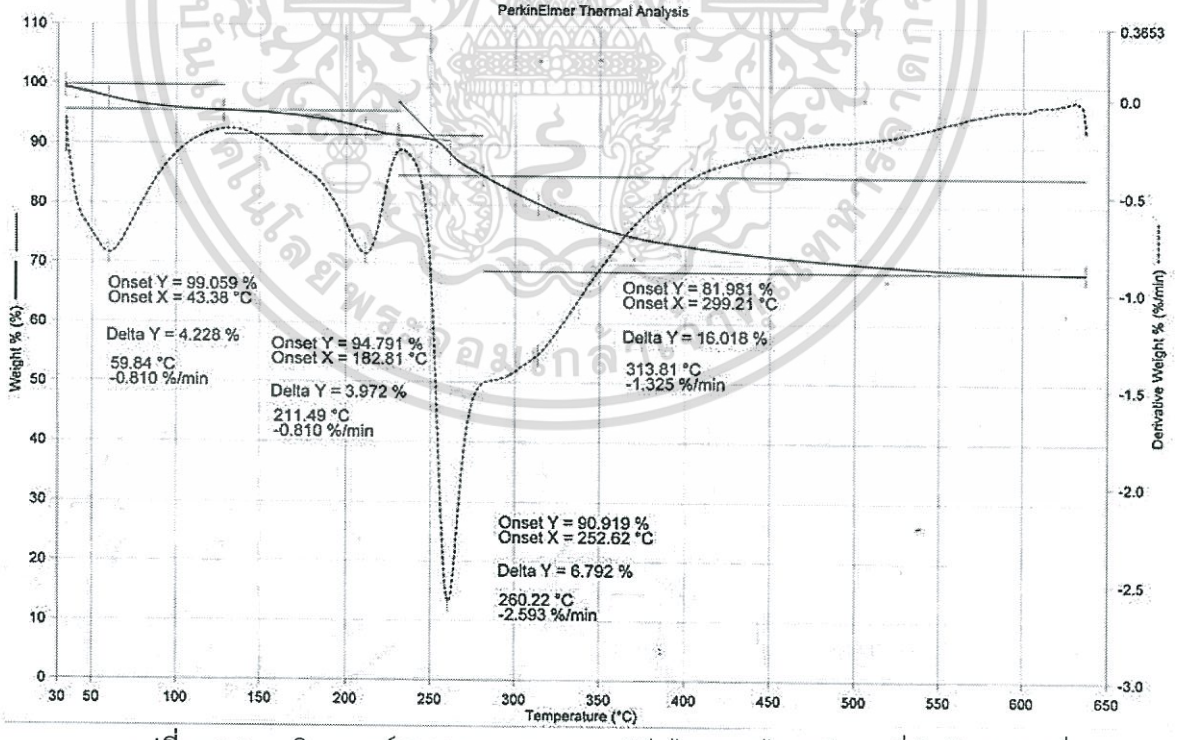


รูปที่ ก.2.7 ผลวิเคราะห์ DSC ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาที่สัดส่วน core-shell 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

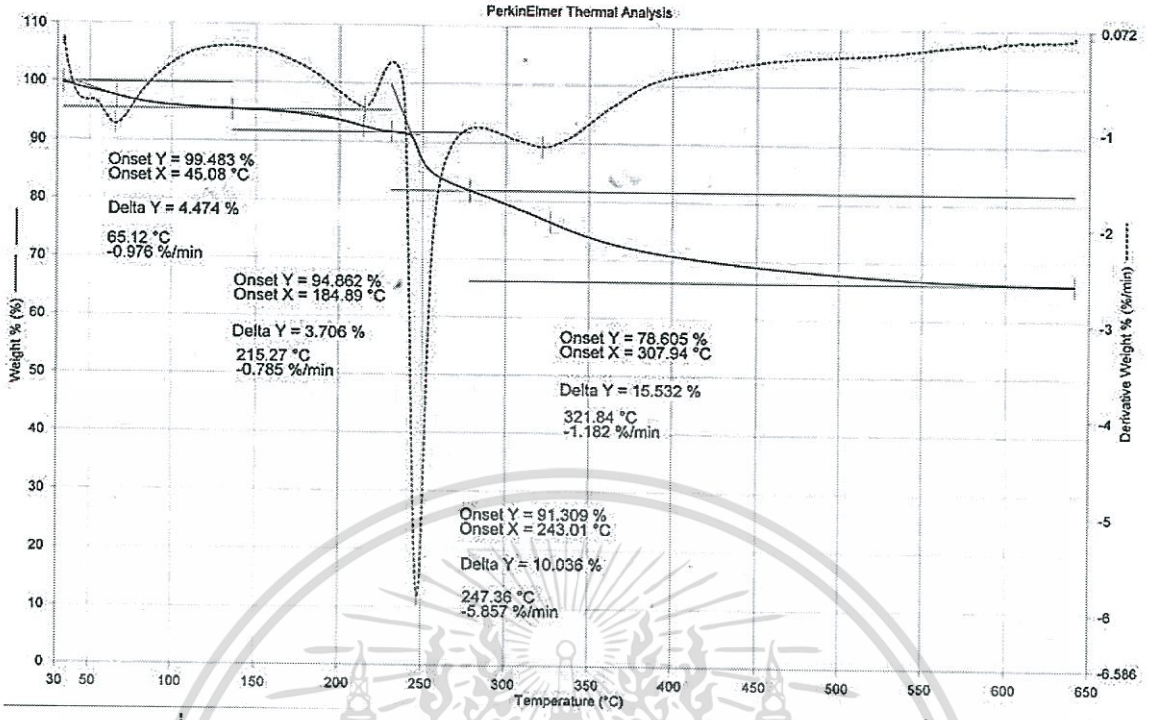


รูปที่ ก.2.8 ผลวิเคราะห์ TGA ของเอทิลีนไกคอลไดสเตรียเรต

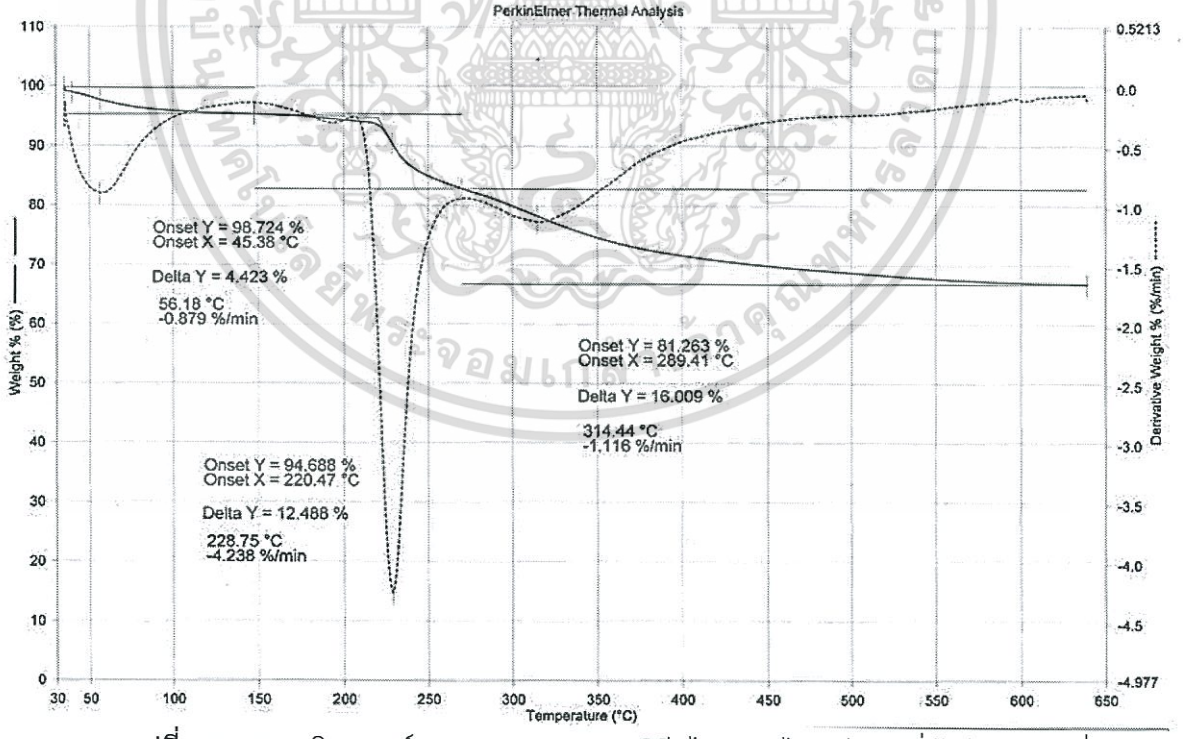


รูปที่ ก.2.9 ผลวิเคราะห์ TGA ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาที่สัดส่วน core-shell 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2.10 ผลวิเคราะห์ TGA ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาที่สัดส่วน core-shell 0.8



รูปที่ ก.2.11 ผลวิเคราะห์ TGA ของอนุภาคเอทิลีนไกลคอลไดสเตียเรตที่หุ้มด้วยซิลิกาที่สัดส่วน core-shell 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ข้อมูลผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 การคำนวณ Encapsulation efficiency (%E)

การคำนวณประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานความร้อนของเอทิลีนไกคอลไดสเตียเรตที่ถูกห่อหุ้มด้วยชั้นซิลิกาสามารถคำนวณได้จากสมการ (ข.1)

$$E = \frac{\Delta H_{m,\ EGDS@SiO_2} + \Delta H_{C,\ EGDS@SiO_2}}{\Delta H_{m,\ EGDS} + \Delta H_{C,\ EGDS}} \qquad (ข.1)$$

ข.2 การคำนวณ Encapsulation ratio (%R)

การคำนวณประสิทธิภาพของการเอนแคปซูเลชันเอทิลีนไกคอลไดสเตียเรตด้วยชั้นซิลิกาสามารถคำนวณได้จากสมการ (ข.2)

$$R = \frac{\Delta H_{m,\ EGDS@SiO_2}}{\Delta H_{m,\ EGDS}} \qquad (ข.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้