

ไมโครแคปซูลวัสดุเปลี่ยนเฟสสำหรับสีทาห้องโคมเพื่อรักษาอุณหภูมิเก็ตเลือด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PHASE CHANGE MATERIAL MICROCAPSULE FOR FOAM CONTAINER PAINT TO MAINTAIN
PLATELET TEMPERATURE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile
Technology

Department of Materials Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ไมโครแคปซูลวัสดุเปลี่ยนเฟสสำหรับสีทาห้องโถงโคมเพื่อ รักษาอุณหภูมิแก่ลัดเลือด
โดย	นายพสธร ลิมปธนโชติ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ)	
.....	กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี)	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พสธร ลิมปธนโชติ : ไมโครแคปซูลวัสดุเปลี่ยนเฟสสำหรับสีทากล่องโฟมเพื่อรักษา
อุณหภูมิแก๊สดีดเลือด. (PHASE CHANGE MATERIAL MICROCAPSULE FOR FOAM
CONTAINER PAINT TO MAINTAIN PLATELET TEMPERATURE) อ.ที่ปรึกษาหลัก :
รศ. ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ

งานวิจัยชิ้นนี้กล่าวถึงการเตรียมไมโครแคปซูลวัสดุเปลี่ยนเฟสโดยมีเฮปตะเดคเคนเป็น
แกนและเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เป็นเปลือก เปลือกของไมโครแคปซูลสังเคราะห์ด้วยกระบวนการพอลิ
ลิเมอไรเซชันแบบอินซิทู เริ่มจากเตรียมอิมัลชันของเฮปตะเดคเคนด้วย Tween 80 จากนั้นเติมเม
ลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสทขณะมีการกวนสารตลอดเวลาตามด้วยกรดซิตริก 1 หยดทุก 1 นาที
เพื่อปรับสภาวะกรด เมื่อเวลาผ่านไปเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสทรวมร่างเป็นเปลือกล้อมรอบ
หยดเฮปตะเดคเคน ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการกวน (1000, 1250, 1500 รอบต่อนาที)
และปริมาณของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (0.5:1, 1:1, 1.5:1) มีผลต่อขนาดของไมโครแคปซูลทดสอบ
โดยเทคนิค SEM พบว่าไมโครแคปซูลมีรูปร่างเป็นทรงกลมและมีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 5 ไมโครเมตร
ความร้อนแฝงของไมโครแคปซูลวัสดุเปลี่ยนเฟสวัดโดยเทคนิค DSC เท่ากับ 120.89 จูลต่อกรัมและ
มีประสิทธิภาพของไมโครแคปซูลเท่ากับ 89.31 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับ 135.85 จูลต่อกรัมของ
เฮปตะเดคเคน ยิ่งไปกว่านั้นไมโครแคปซูลมีเสถียรภาพเมื่อผ่านวัฏจักรการให้ความร้อนและความ
เย็นสูงถึง 50 รอบ หลังจากนั้นเตรียมกล่องโฟมทาสีซูเปอร์ซิลด์ตัดแปรด้วยเฮปตะเดคเคน 40
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้มีความหนา 0.38 มิลลิเมตรและปิดด้วยฟิล์มแบบคทีเรียเซลลูโลสที่ผิว
ภายใน จากนั้นวางถุงไมโครแคปซูล ถุงน้ำปราศจากประจุและเครื่องบันทึกอุณหภูมิในกล่องโฟมที่
เตรียมไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสนาน 12 ชั่วโมง จากนั้นนำกล่องที่เตรียมไว้มาทดสอบที่
อุณหภูมิ 25 ถึง 27 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมง โดยเครื่องจะบันทึกการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ
ระหว่าง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียสเทียบกับเวลาผลพบว่าไมโครแคปซูล 200 กรัมสามารถเก็บ
รักษาอุณหภูมิภายในกล่องโฟมมากกว่า 24 ชั่วโมงเมื่อเทียบกับเฮปตะเดคเคนและกล่องควบคุมตัว
แปร

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์ ลายมือชื่อนิสิต

และเทคโนโลยีสิ่งทอ

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6172183823 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORD: microencapsulation, in-situ polymerization, phase change material, microcapsule, melting and solidifying enthalpy, heating-cooling cycle, bacterial cellulose, temperature profile

Possathorn Limpathanachote : PHASE CHANGE MATERIAL MICROCAPSULE FOR FOAM CONTAINER PAINT TO MAINTAIN PLATELET TEMPERATURE.

Advisor: Assoc. Prof. KAWEE SRIKULKIT, Ph.D.

In this work, the preparation of phase change material (PCM) microcapsule using n-heptadecane as a core and melamine formaldehyde resin as a sheath was carried out. The formation of a sheath was synthesized via in-situ polymerization. Firstly, oil/water core emulsion was prepared using tween 80 surfactant. Then, melamine formaldehyde prepolymer (MF) was added under stirring followed by 1 min dropwise addition of citric acid to adjust acidic pH. By times, melamine formaldehyde condensate was formed as a wall surrounding PCM droplets. Effects of stirring speeds (1000, 1250, 1500rpm) and MF: n-heptadecane ratios (0.5:1, 1:1, 1.5:1) on sizes of microcapsules were investigated. Size and morphology revealed by SEM analysis were found in the range between 1 and 5 microns (relating to stirring speeds) and to be spherical shape, respectively. The specific latent heat of PCM microcapsule measured by DSC was 120.89 J/g when compared to 135.85 J/g of n-heptadecane with encapsulation efficiency around 89.31%. Moreover, the stability of PCM microcapsule was up to 50 heating-cooling cycles. After that, EPP insulation foam box (W13.5cm x L20cm x H13.5cm) was prepared by coating with 40 wt% n-heptadecane modified Supershield paint with thickness layer of 0.38 mm followed by covering the paint surface with bacterial cellulose film. Then, the microcapsule bag, DI bag, and datalogger were placed prior to the conditioning the foam box at the temperature of 10 °C for 12 h. The conditioned box was left

Field of Study: Applied Polymer Science Student's Signature

and Textile Technology

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ตามวัตถุประสงค์อย่างสมบูรณ์เพราะได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ วัสดุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่างๆเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวิ ศรีกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาความรู้และคำแนะนำทางวิชาการ รวมไปถึงให้การสนับสนุนในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย อีกทั้งยังให้ความช่วยเหลือเอาใจใส่ทั้งเรื่องการทดลองและการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปอย่างลุล่วง

ศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อางองค์ ที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ทำวิจัย เครื่องมือและเครื่องทดสอบต่างๆ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนในโครงการพัฒนาศักยภาพงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ปี พ.ศ. 2564

รุ่นพี่ เพื่อนทั้งวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอและหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์อย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอบคุณบิดา มารดาและครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีอีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสรรสร้างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

พสธร ลิ้มปธนโชติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	5
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	5
1.2 วัตถุประสงค์.....	6
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	7
2.1 วัสดุเปลี่ยนเฟส (Phase change materials).....	7
2.1.1 วัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอินทรีย์	8
2.1.1.1 สารประกอบประเภทพาราฟิน.....	8
2.1.1.2 สารประกอบที่ไม่ใช่พาราฟิน	8
2.1.2 วัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอนินทรีย์.....	9
2.1.2.1 เกลือไฮเดรต	9
2.1.2.2 เกลือ	9
2.1.2.3 โลหะ.....	9
2.1.3 วัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดผสม	9
2.2 ไมโครแคปซูล (Microcapsule).....	10
2.2.1 การสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตร (microencapsulation).....	10
2.2.1.1 การสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรด้วยกระบวนการอินซิทูพอลิเมอไรเซชัน (In-situ polymerization)	11

2.3	วัสดุเปลือกไมโครแคปซูล (wall material)	12
2.3.1	เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde)	13
2.4	เกล็ดเลือด (platelets)	14
2.4.1	การขนส่งเกล็ดเลือด (platelet transportation).....	15
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	19
3.1	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	19
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	19
3.2.1	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สังเคราะห์ไมโครแคปซูล	19
3.2.2	เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ	20
3.3	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง	20
3.3.1	ตัวอย่างการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสด้วยวิธี In-situ polymerization MC1	20
3.3.2	การเตรียมกล่องโฟมทาดด้วยสี่ซูเปอร์ซิลด์ตัดแปร	22
3.3.3	การวัด temperature profile ของกล่องโฟม	22
3.3.3	การคิดปริมาณร้อยละยิลด์ของการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล	24
3.4	การพิสูจน์เอกลักษณ์ (Characterization).....	24
3.4.1	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค FT-IR.....	24
3.4.2	การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค SEM.....	25
3.4.3	การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลด้วย Particle size analyzer	25
3.4.4	การวิเคราะห์สัดส่วนของเฮปตะเดกเคนในไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค TGA.....	26
3.4.5	การวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการแข็งตัวด้วยเทคนิค DSC.....	27
3.4.5.1	วัฏจักรการให้ความร้อนและความเย็น (Heating-cooling cycles).....	27
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	29

4.1 การคิดปริมาณร้อยละยิลด์ของการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล	29
4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค FT-IR	30
4.3 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค SEM	31
4.4 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูล.....	33
4.5 การวิเคราะห์สัดส่วนของเฮปตะเตกเคนในไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค TGA	34
4.6 การวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการแข็งตัวด้วยเทคนิค DSC	38
4.6.1 การวิเคราะห์วัฏจักรการให้ความร้อนและความเย็นด้วยเทคนิค DSC.....	42
4.7 การวิเคราะห์การวัด temperature profile.....	44
4.7.1 การวัด temperature profile ของกล่องโฟม	44
4.7.2 การวัด temperature profile ของไมโครแคปซูล	45
4.7.3 การวัด temperature profile ของกล่องโฟมทำด้วยสียึดแปรและไมโครแคปซูล	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
บรรณานุกรม.....	53
ภาคผนวก.....	56
ประวัติผู้เขียน.....	73

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	ตารางแสดงตัวแปรของการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตร	21
ตารางที่ 3.2	ตารางแสดงอุปกรณ์ที่ใส่ในกล่องโฟม	23
ตารางที่ 4.1	ตารางร้อยละผลผลิตของไมโครแคปซูล.....	29
ตารางที่ 4.2	ตารางแสดงตำแหน่งเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันที่วิเคราะห์โดยเทคนิค FTIR.....	31
ตารางที่ 4.3	ตารางแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของไมโครแคปซูล	33
ตารางที่ 4.4	ตารางแสดงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของไมโครแคปซูล	34
ตารางที่ 4.5	ตารางแสดงร้อยละการระเหยของเฮปตะเดคเคนในไมโครแคปซูล	38
ตารางที่ 4.6	ตารางแสดงเอนทัลปี อุณหภูมิขณะแข็งตัวและหลอมเหลวและประสิทธิภาพของไมโครแคปซูล	42
ตารางที่ 4.7	ตารางแสดงค่าเอนทัลปีของเฮปตะเดคเคนและ MC3 ในการหลอมเหลวเป็นวัฏจักรครั้งที่ 1, 10, 20, 30, 40 และ 50	44
ตารางที่ 4.8	ตารางแสดงเวลาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 24 °C ของกล่องโฟม.....	45
ตารางที่ 4.9	ตารางแสดงเวลาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 24 °C ของไมโครแคปซูล.....	46
ตารางที่ 4.10	ตารางแสดงเวลาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 24 °C ของไมโครแคปซูล ...	48
ตารางที่ 4.11	ตารางแสดงเวลาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 24 °C ของกล่องโฟมทาด้วยสียัดแปรและไมโครแคปซูล	49

สารบัญญภาพ

รูปที่ 2.1	การแบ่งประเภทวัสดุเปลี่ยนเฟสตามชนิดของสาร[8].....	7
รูปที่ 2.2	รูปตารางข้อดี ข้อเสียและตัวอย่างของวัสดุเปลี่ยนเฟสแต่ละประเภท [9].....	8
รูปที่ 2.3	รูปร่างของไมโครแคปซูลที่เป็นไปได้ (a) ไร้รูปร่าง (b) รูปร่างปกติ (c) เปลือกหลายชั้น (d) แกนกลางหลายแกน (e) อนุภาคเมทริกซ์[10].....	10
รูปที่ 2.4	วิธีการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรด้วยกระบวนการต่างๆ[11].....	11
รูปที่ 2.5	การสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรแบบอินซิทิฟิเคชัน[12].....	12
รูปที่ 2.6	รูปแบบทั่วไปของเมลามีนเรซิน[14]	13
รูปที่ 2.7	การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์.....	14
รูปที่ 2.8	รูปร่างและขนาดของเกล็ดเลือดเมื่อเทียบกับเซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์เม็ดเลือดขาว ...	15
รูปที่ 2.9	DSC เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคน(ซ้าย) ไมโครแคปซูล(ขวา)[16].....	16
รูปที่ 2.10	การวิเคราะห์จาก DSC เทอร์โมแกรมของไมโครแคปซูลเมื่อทดสอบซ้ำ 100 ครั้ง[18]....	17
รูปที่ 3.1	รูปภาพการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรที่บรรจุเฮปตะเดคเคน	21
รูปที่ 3.2	รูปแสดงการทำสีผสมภายในกล่องโฟม EPP	22
รูปที่ 3.3	รูปแสดงการจัดวางการทดลองเพื่อวัด temperature profile ของกล่องโฟมที่บรรจุไมโครแคปซูล.....	23
รูปที่ 3.4	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์	24
รูปที่ 3.5	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	25
รูปที่ 3.6	เครื่องวัดขนาดอนุภาค Mastersizer 2000	26
รูปที่ 3.7	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA)	26
รูปที่ 3.8	เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	27
รูปที่ 4.1	FTIR สเปกตรัมของเฮปตะเดคเคนและไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์	30
รูปที่ 4.2	ปฏิกิริยาการพอลิเมอไรเซชันของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์	31

รูปที่ 4.3	สัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูล (MC1-MC9 : a-i ตามลำดับ) ที่กำลังขยาย 20000 เท่า.	32
รูปที่ 4.4	TGA เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคนและไมโครแคปซูล (MC1, MC2 และ MC3) ที่มีอัตราส่วนของเมลามีนฟอรั่มลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคน 0.5:1	35
รูปที่ 4.5	DTG เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคนและไมโครแคปซูล (MC1, MC2 และ MC3) ที่มีอัตราส่วนของเมลามีนฟอรั่มลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคน 0.5:1	35
รูปที่ 4.6	TGA เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคนและไมโครแคปซูล (MC4, MC5 และ MC6) ที่มีอัตราส่วนของเมลามีนฟอรั่มลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคน 1:1.....	36
รูปที่ 4.7	DTG เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคนและไมโครแคปซูล (MC4, MC5 และ MC6) ที่มีอัตราส่วนของเมลามีนฟอรั่มลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคน 1:1.....	36
รูปที่ 4.8	TGA เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคนและไมโครแคปซูล (MC7, MC8 และ MC9) ที่มีอัตราส่วนของเมลามีนฟอรั่มลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคน 1.5:1	37
รูปที่ 4.9	DTG เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคนและไมโครแคปซูล (MC7, MC8 และ MC9) ที่มีอัตราส่วนของเมลามีนฟอรั่มลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคน 1.5:1	37
รูปที่ 4.10	DSC เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคนที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียส	40
รูปที่ 4.11	DSC เทอร์โมแกรมของไมโครแคปซูล MC1, MC2 และ MC3 ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียส	41
รูปที่ 4.12	DSC เทอร์โมแกรมของไมโครแคปซูล MC4, MC5 และ MC6 ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียส	41
รูปที่ 4.13	DSC เทอร์โมแกรมของไมโครแคปซูล MC7, MC8 และ MC9 ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียส	41
รูปที่ 4.14	DSC เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคน ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียสทั้งหมด 50 รอบ	43
รูปที่ 4.15	DSC เทอร์โมแกรมของไมโครแคปซูล MC3 ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียสทั้งหมด 50 รอบ	43
รูปที่ 4.16	กราฟ temperature profile ของ FB1, FB2 และ FB3.....	45
รูปที่ 4.17	กราฟ temperature profile ของ FB1, FB4, FB5 และ FB6.....	46

รูปที่ 4.18	กราฟ linear regression ของไมโครแคปซูลที่น้ำหนัก 0, 15, 30, 50 กรัม.....	47
รูปที่ 4.19	กราฟ temperature profile ของ FB1, FB6.1 และ FB6.2	48
รูปที่ 4.20	กราฟ temperature profile ของ FB8 และ FB10.....	50
รูปที่ 4.21	กราฟ temperature profile ของ FB12 และ FB14	50



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การขนส่งในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างมากต่างจากในอดีต มีความรวดเร็วในการขนส่งมากขึ้นเพราะมีช่องทางในการจัดส่งที่หลากหลาย เช่น การขนส่งทางบก การขนส่งทางน้ำ การขนส่งทางอากาศ โดยแต่ละการขนส่งจะมีเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการขนส่งทางบก แต่การขนส่งทุกระบบจะมีพัสดุที่เป็นปัญหา โดยเฉพาะอย่างยิ่งพัสดุที่ไวต่อสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ แสงแดด แก๊ส ความชื้น ฯลฯ พักสุดเหล่านี้จำเป็นต้องใช้ระบบการขนส่งแบบปิดและมีระบบเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมกับพัสดุหรือแม้กระทั่งระบบดูดความชื้น ระบบกำจัดแก๊สที่ส่งผลต่อพัสดุนั้นเอง[1] พักสุดที่ไวต่ออุณหภูมิ เช่น เลือด เกล็ดเลือด พลาสมา ยา อาหารแช่แข็ง เครื่องดื่ม ผลไม้ เนื้อสัตว์ หากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเพียงหนึ่งหรือสององศาเซลเซียสจะส่งผลต่อพัสดุนั้นอาจจะเสียหายหรือรสชาติเปลี่ยนไป การขนส่งพัสดุเหล่านี้จะใช้ระบบทำความเย็นควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมแต่การใช้ระบบทำความเย็นจะต้องใช้พลังงานอย่างมาก อีกทั้งยังก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมทางเสียงและทางอากาศ[2] ในปัจจุบันมีระบบการกักเก็บพลังงานความร้อนได้หลายรูปแบบ เทคโนโลยีที่เป็นที่นิยมคือวัสดุเปลี่ยนเฟส (Phase change material) วัสดุเปลี่ยนเฟสสามารถดูดซับและคายความร้อนเมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวและของเหลวเป็นของแข็งตามลำดับ เมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะอุณหภูมิจะคงที่ ช่วงอุณหภูมิที่คงที่นั้นจะเป็นเหตุผลในการเลือกใช้ ซึ่งสามารถใช้ประยุกต์ได้กับหลายอุตสาหกรรม เช่น มีการนำวัสดุเปลี่ยนเฟสผสมกับคอนกรีตเพื่อนำมาสร้างอาคาร[3] หรือแม้กระทั่งนำวัสดุเปลี่ยนเฟสมาบรรจุไว้ตรงกลางระหว่างกำแพงสองชั้นซึ่งการนำวัสดุเปลี่ยนเฟสมาประยุกต์ใช้เพื่อลดความร้อนภายในอาคาร[4] ในทางเดียวกันกับอุตสาหกรรมสิ่งทอ[5]และอุตสาหกรรมทำความเย็น[6]

วัสดุเปลี่ยนเฟสมีปัญหาใหญ่อย่างหนึ่งคือการเป็นสารอินทรีย์ซึ่งสามารถระเหยได้จึงไม่สามารถนำใช้ได้โดยตรง เนื่องจากจะเกิดการสัมผัสกับพัสดุลินค้าที่ขนส่งและเกิดระเหยตัวไปไม่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้ จำเป็นต้องมีการบรรจุที่เหมาะสมกับบรรจุภัณฑ์ที่ปิดมิดชิดเพื่อไม่ให้เกิดการซึมออกมา ซึ่งทั่วไปจะบรรจุลงในช่องพลาสติก หากบรรจุภัณฑ์ไม่แข็งแรงพอ ตกจากที่สูงหรือสัมผัสกับของมีคม บรรจุภัณฑ์จะเสียหายและวัสดุเปลี่ยนเฟสจะไหลออกมา ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้พัฒนาไมโครแคปซูลวัสดุเปลี่ยนเฟสเพื่อป้องกันการรั่วไหล อีกทั้งนำไมโครแคปซูลร่วมกับนาโนเซลลูโลสมา

ประยุกต์ใช้กับสีทาสำหรับกล่องโฟม เพื่อพัฒนากล่องโฟมบรรจุภัณฑ์สำหรับขนส่งเกล็ดเลือดที่ต้องการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ระหว่าง 20-24 °C ตลอดระยะเวลาการขนส่ง

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาการรวมวิธีการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลที่บรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสด้วยเทคนิค in-situ polymerization
2. นำไมโครแคปซูลร่วมกับแบคทีเรียเซลล์โลสมาประยุกต์ใช้กับสีทาสำหรับกล่องโฟมเพื่อเก็บรักษาอุณหภูมิของเกล็ดเลือดตลอดระยะเวลาการขนส่ง

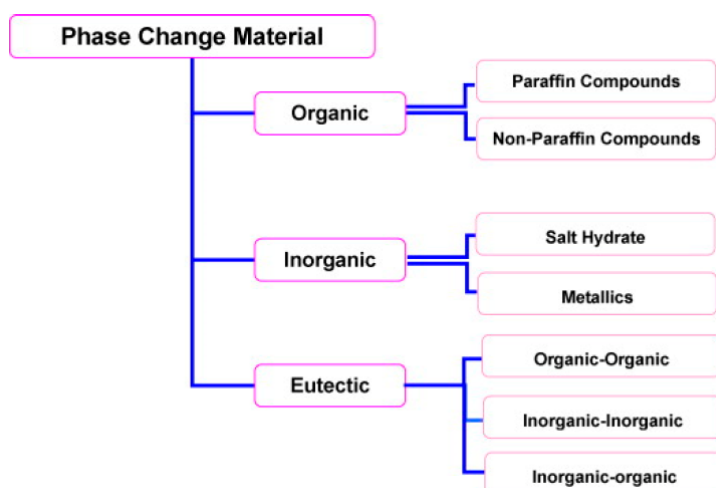


บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 วัสดุเปลี่ยนเฟส (Phase change materials)

วัสดุเปลี่ยนเฟสเป็นสารที่สามารถดูดซับหรือปลดปล่อยพลังงานความร้อนในขณะที่เปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวหรือของเหลวเป็นของแข็งตามลำดับ พลังงานความร้อนที่กักเก็บจะถูกเรียกว่าพลังงานความร้อนแฝง (Latent heat energy) โดยแต่ละวัสดุเปลี่ยนเฟสจะมีช่วงอุณหภูมิจำเพาะของแต่ละวัสดุ ในระหว่างเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะอุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนเฟสจะมีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อเกิดความร้อนขึ้นวัสดุเปลี่ยนเฟสจะดูดซับพลังงานความร้อนในปริมาณน้อยและอุณหภูมิขึ้นอย่างคงที่ แต่เมื่อถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุเปลี่ยนเฟส วัสดุเปลี่ยนเฟสจะดูดความร้อนเข้าไปเพื่อใช้ในการหลอมเหลวและอุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนเฟสจะคงที่ตลอดการเปลี่ยนสถานะและหลังจากเปลี่ยนสถานะสมบูรณ์แล้ว อุณหภูมิจะขึ้นอย่างคงที่ต่อไปจนเท่าอุณหภูมิสภาพแวดล้อม ในทางกลับกันวัสดุเปลี่ยนเฟสจะปลดปล่อยพลังงานความร้อนแฝงเมื่อเกิดกระบวนการเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิแข็งตัวของวัสดุเปลี่ยนเฟส วัสดุเปลี่ยนเฟสจะเปลี่ยนสถานะกลับไปจากของเหลวเป็นของแข็ง ในระหว่างที่มีการเปลี่ยนสถานะ อุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนเฟสจะคงที่ ซึ่งเรียกความสามารถนี้ว่า การกักเก็บพลังงานความร้อน (Thermal energy storage)[7] วัสดุเปลี่ยนเฟสสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักตามชนิดของสารดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทวัสดุเปลี่ยนเฟสตามชนิดของสาร[8]

2.1.1 วัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอินทรีย์

วัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอินทรีย์แบ่งออกเป็นสารประกอบพาราฟินและสารประกอบที่ไม่ใช่พาราฟิน ข้อดีของวัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอินทรีย์คือมีความเสถียรภาพทางความร้อน ไม่มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วและไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน ในทางกลับกันวัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอินทรีย์มีข้อเสียเหมือนกัน นั่นคือมีการนำความร้อนที่ต่ำ สามารถติดไฟได้และมีเอนทัลปีต่ำที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอื่น

2.1.1.1 สารประกอบประเภทพาราฟิน

สารประกอบที่เป็นผลผลิตจากกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเชื่อมกันด้วยพันธะเดี่ยว โดยมีสูตรเคมีคือ C_nH_{2n+2} เมื่อ จำนวนคาร์บอนเท่ากับ 1 ถึง 4 จะอยู่ในสถานะแก๊ส 5 ถึง 17 จะอยู่ในสถานะของเหลวและ เมื่อจำนวนคาร์บอนมากกว่า 17 จะอยู่ในสถานะของแข็ง ไขพาราฟิน (paraffin wax) จะมีจำนวนคาร์บอนเท่ากับ 20 ถึง 40 โดยสถานะของสารประกอบพาราฟินจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสภาพแวดล้อมของวัสดุเปลี่ยนเฟส

2.1.1.2 สารประกอบที่ไม่ใช่พาราฟิน

สารประกอบที่ไม่ใช่พาราฟินส่วนใหญ่เป็นกรดไขมัน ซึ่งกรดไขมันจะมีหมู่คาร์บอกซิลิกและต่อกับไฮโดรคาร์บอนสายยาวโดยมีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 ถึง 30 อะตอม วัสดุเปลี่ยนเฟสที่เป็นกรดไขมันจะไม่มีพิษและยังมีฤทธิ์กัดกร่อนต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติไม่ใช่ผลผลิตจากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (Fossil fuels) นอกจากกรดไขมันแล้วยังมีน้ำ แอลกอฮอล์ เอสเทอร์

	Eutectic material	Organic material	Inorganic material
Examples	<ul style="list-style-type: none"> Inorganic-organic Inorganic-inorganic Organic-organic 	<ul style="list-style-type: none"> Paraffin Fatty acids Alcohol Ester Polyethylene glycol 	<ul style="list-style-type: none"> Salt hydrate Metallic
Advantage	<ul style="list-style-type: none"> Wide range of phase change temperature Good chemical and thermal stability High heat capacity No or little supercooling 	<ul style="list-style-type: none"> Non-corrosive Good chemical and thermal stability No supercooling High heat of fusion Low vapor pressure Nontoxic 	<ul style="list-style-type: none"> Nonflammable Inexpensive High heat of fusion Good thermal conductivity
Disadvantage	<ul style="list-style-type: none"> Leakage during the phase transition Low thermal conductivity 	<ul style="list-style-type: none"> Low thermal conductivity Low phase change enthalpy High changes in volumes during the phase transition 	<ul style="list-style-type: none"> Corrosion Phase decomposition High supercooling effect Loss of hydrate throughout the process Insufficient thermal stability Weight problem

รูปที่ 2.2 รูปตารางข้อดี ข้อเสียและตัวอย่างของวัสดุเปลี่ยนเฟสแต่ละประเภท [9]

2.1.2 วัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอนินทรีย์

วัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอนินทรีย์สามารถแบ่งได้เป็น เกลือไฮเดรต เกลือและโลหะ วัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดนี้มีประโยชน์น้อยกว่าวัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอนินทรีย์ แต่สิ่งที่น่าดึงดูดของวัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดนี้คือมีเอนทัลปีที่สูงกว่ามาก แต่ข้อเสียของวัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดอนินทรีย์มีหลายข้อเช่น การกัดกร่อนที่สูง การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว การแยกเฟสและมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ

2.1.2.1 เกลือไฮเดรต

เกลือไฮเดรตเป็นเกลืออนินทรีย์ที่มีโมเลกุลของน้ำรวมเป็นส่วนหนึ่งกับผลึกของเกลือ โดยมีสูตรเคมี $X_nY_m \cdot aH_2O$ โดย X เป็นไอออนบวก Y เป็น ไอออนลบและ a เป็นจำนวนโมเลกุลของน้ำ เกลือไฮเดรตเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องเมื่อถึงอุณหภูมิหลอมเหลวส่วนที่เป็นผลึกของเกลือไฮเดรตจะเริ่มละลาย

2.1.2.2 เกลือ

เกลืออนินทรีย์ที่มีสูตรเคมี X_nY_m โดย X เป็นไอออนบวก และ Y เป็น ไอออนลบ เกลือมีช่วงอุณหภูมิที่สูงมากแต่มีเอนทัลปีต่ำกว่าเกลือไฮเดรต

2.1.2.3 โลหะ

โลหะที่เป็นวัสดุเปลี่ยนเฟสจะเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและโลหะผสม

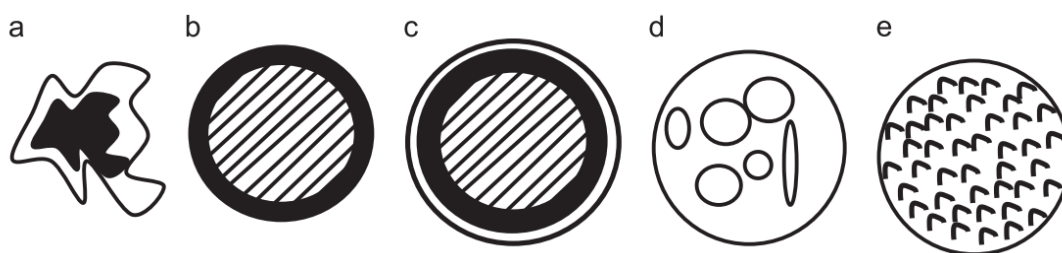
2.1.3 วัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดผสม

วัสดุเปลี่ยนเฟสที่ผสมระหว่างวัสดุเปลี่ยนเฟสแบบอินทรีย์กับอินทรีย์ แบบอินทรีย์กับแบบอนินทรีย์และแบบอนินทรีย์กับอนินทรีย์ โดยผสมกันเพื่อต้องการสมบัติบางอย่างที่วัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดเดิมไม่มีมาเสริม[10]

วัสดุเปลี่ยนเฟสนั้นมีปัญหาที่สำคัญมาก เมื่อหลอมเหลวหรือเปลี่ยนสถานะจะมีการไหลหรือรั่วออกมาจากรอยตะเข็บของบรรจุภัณฑ์นั้น วัสดุเปลี่ยนเฟสจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสิ่งของหรือกัดกร่อนบรรจุภัณฑ์ ต่อมามีการพัฒนากระบวนการทำให้วัสดุเปลี่ยนเฟสนั้นคงรูปหลากหลายประเภท เช่น การผสมเข้ากับซีเมนต์และหล่อให้อยู่ในรูปที่ต้องการ[3] แต่หนึ่งในกระบวนการที่เป็นที่นิยมคือการทำให้เป็นไมโครแคปซูล

2.2 ไมโครแคปซูล (Microcapsule)

ไมโครแคปซูลประกอบด้วยสองส่วนหลักคือสารแกนกลางที่ถูกห่อหุ้ม (core material) และสารพอลิเมอร์ที่เป็นเปลือก (wall material) โดยไมโครแคปซูลจะมีรูปร่างที่หลากหลายดังแสดงในรูปที่ 2.3

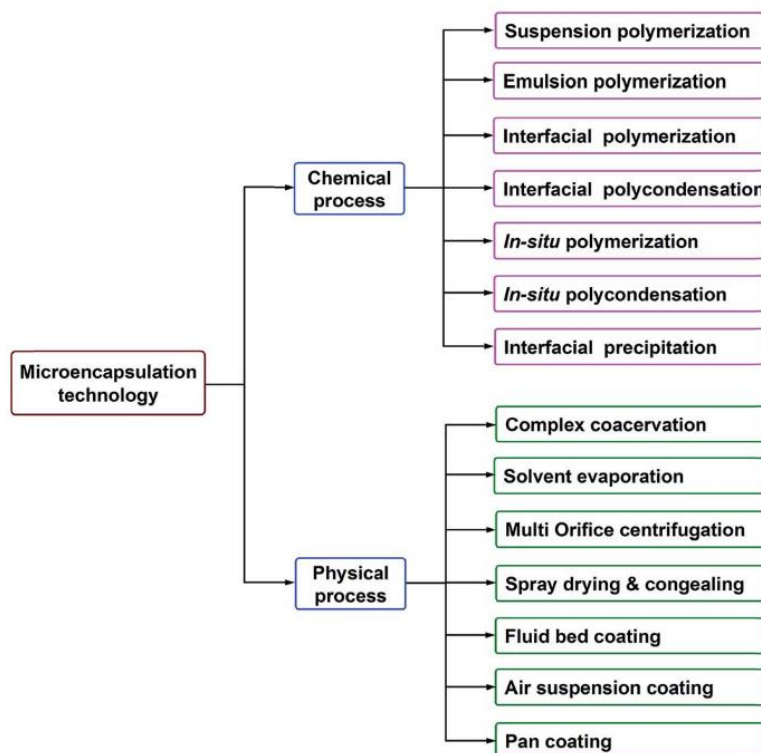


รูปที่ 2.3 รูปร่างของไมโครแคปซูลที่เป็นไปได้ (a) ไร้รูปร่าง (b) รูปร่างปกติ (c) เปลือกหลายชั้น (d) แกนกลางหลายแกน (e) อนุภาคเมทริกซ์[10]

2.2.1 การสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตร (microencapsulation)

การสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรเป็นการคลุมอนุภาคของแข็งหรือของเหลวที่มีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 100 ไมโครเมตรด้วยพอลิเมอร์ชั้นบางๆ ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือทางเคมี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บ เพิ่มอายุการใช้งาน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียของอนุภาคหรืออาจจะใช้ห่อหุ้มเพื่อขนส่งสารจากที่หนึ่งไปยังที่หนึ่ง โดยทั่วไปการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลระดับไมโครเมตรจะได้ผลลัพธ์ดังรูป 2.3(a) และ 2.3(b)

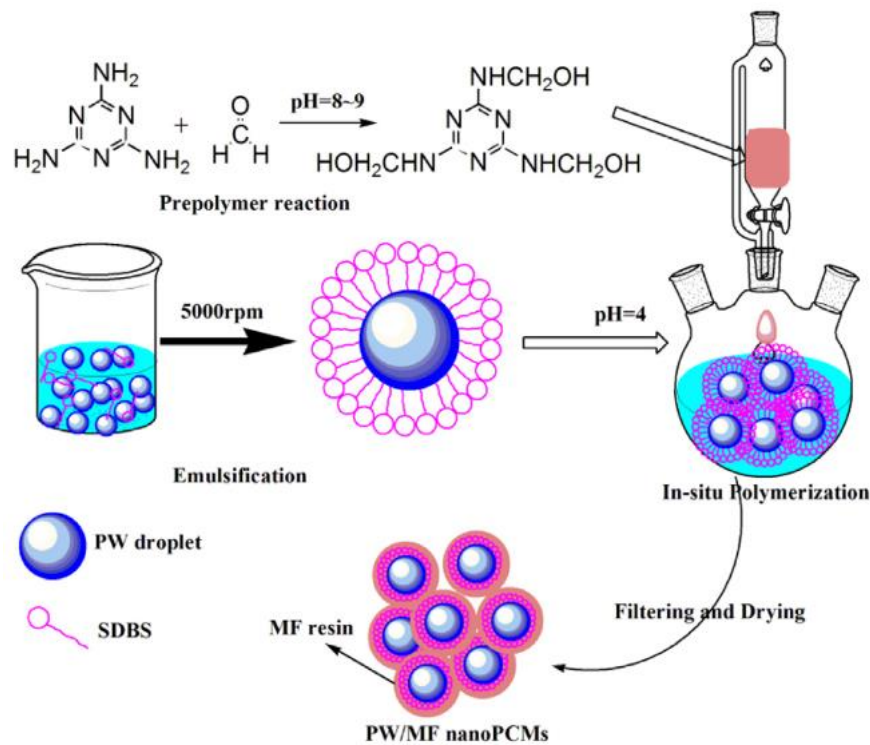
กระบวนการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเคมี การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางกายภาพดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วิธีการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรด้วยกระบวนการต่างๆ[11]

2.2.1.1 การสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรด้วยกระบวนการอินซิทูพอลิเมอไรเซชัน (In-situ polymerization)

การสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรแบบอินซิทูพอลิเมอไรเซชันเริ่มต้นจากการทำระบบอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ โดยการทำให้เฟสน้ำมัน (Oil phase) แตกตัวเป็นหยดน้ำมันเล็กกลดด้วยการปั่นความเร็วสูงและต้องมีสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เพื่อคงรูปหยดน้ำมันให้คงตัว ต่อมาเติมพรีพอลิเมอร์ลงในอิมัลชันโดยพรีพอลิเมอร์จะต้องอยู่ในเฟสน้ำ (Water phase) ตามด้วยปรับสภาพของอิมัลชันให้เหมาะสมเพื่อให้พรีพอลิเมอร์เกิดพอลิเมอไรเซชัน พรีพอลิเมอร์เกิดการพอลิเมอไรเซชันและมีขนาดใหญ่ขึ้นจนไม่สามารถละลายในเฟสน้ำได้ จึงตกตะกอนลงบนหยดน้ำมันพร้อมๆกันหลายพอลิเมอร์ ต่อมาก่อตัวบนผิวของหยดน้ำมันจนกลายเป็นเปลือกห่อหุ้มสารแกนกลางกลายเป็นไมโครแคปซูล



รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรแบบอินซิทูพอลิเมอร์เซชัน[12]

2.3 วัสดุเปลือกไมโครแคปซูล (wall material)

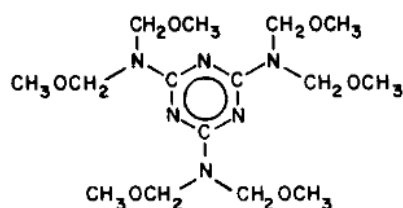
เปลือกของไมโครแคปซูลมีหลากหลายมาก ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาการพอลิเมอร์เซชันของแต่ละวัสดุ นั้น โดยมีมากกว่า 50 ชนิดทั้งจากธรรมชาติและสังเคราะห์ การเลือกใช้วัสดุที่เป็นเปลือกของไมโครแคปซูลขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้น แต่คุณสมบัติสำคัญของวัสดุเปลือกไมโครแคปซูลต้องเหนียวหรือไม่เกิดปฏิกิริยากับวัสดุเปลี่ยนเฟส มีความแข็งแรงเพียงพอต่อแรงต่างๆที่เกิดขึ้นเพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุเปลี่ยนเฟสรั่วออก ต้องมีเสถียรภาพทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่วัสดุเปลี่ยนเฟสหลอมเหลวอีกด้วย นอกจากนี้ต้องมีความสามารถในการกักน้ำไม่ให้เกิดการแลกเปลี่ยนสารหรือแก๊สเข้าไปภายในไมโครแคปซูลเพื่อไม่ให้วัสดุเปลี่ยนเฟสเสื่อมสภาพ วัสดุเปลือกไมโครแคปซูลที่นิยมใช้ในการทำไมโครแคปซูล เช่น เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ พอลิยูเรีย พอลิยูรีเทน พอลิเมทิลเมทาคริเลต อะคิลิกโคพอลิเมอร์ พอลิสไตรีน พอลิอะนิลีน และยังมีวัสดุเปลือกชนิดอนินทรีย์อีกด้วย[11] ซึ่งวัสดุเปลือกไมโครแคปซูลจะมีปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ต่างกัน

2.3.1 เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde)

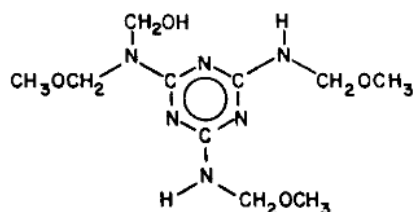
เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์เทอร์โมเซตที่มีความแข็งแรงและเหนียวที่สุด ซึ่งเป็นคุณสมบัติและมีประสิทธิภาพที่ดี จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายแขนงเพื่อเสริมสร้างความแข็งแรง เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เกิดผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นโดยมีเมลามีนและฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสารตั้งต้นและโครงสร้างของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซินขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเมลามีนต่อฟอร์มัลดีไฮด์และมีค่าความเป็นกรดเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา[13]

โครงสร้างทางเคมีของเมลามีนประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติกไตรเอซีนที่มีหมู่ที่สามารถแทนที่ได้ 6 ตำแหน่ง แบ่งเป็นที่ตำแหน่งไนโตรเจน 3 ตัวแต่ละ 2 ตำแหน่ง โดยหมู่แทนที่เป็นได้ทั้งหมู่เอมีน(-NH₂) หมู่เมทิลอล(N-CH₂OH) อัลคอกซี(N-CH₂OR) และเมลามีน-เมลามีน อีเทอร์(N-CH₂OCH₂-N) จากรูปที่ 2.6(A) และ 2.6(B) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของฟอร์มัลดีไฮด์ต่อเมลามีน หากมีฟอร์มัลดีไฮด์มากเกินไปจะเกิดเป็นเมลามีนพรีพอลิเมอร์ดังรูป 2.6(A)

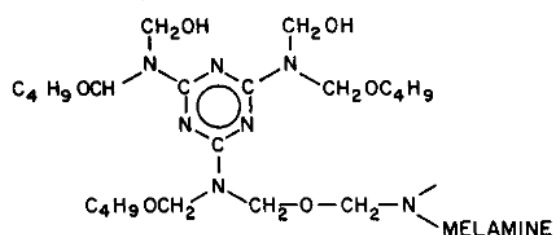
A. FULLY ALKYLATED (HEXAMETHOXYMETHYLMELAMINE)



B. PARTIALLY ALKYLATED (MONOMERIC - METHYLATED)

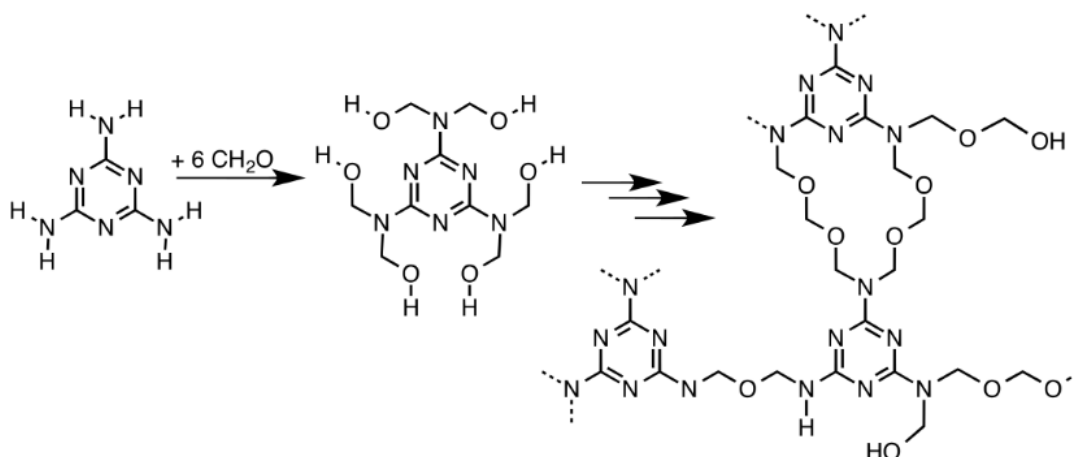


C. PARTIALLY ALKYLATED (POLYMERIC - BUTYLATED)



รูปที่ 2.6 รูปแบบทั่วไปของเมลามีนเรซิน[14]

การเชื่อมขวางของเมลามินฟอร์มัลดีไฮด์มีปฏิกิริยาหลักคือการควบแน่นของหมู่เมทิลอลกับหมู่เมทิลอลด้วยตัวเองหรือกับหมู่เอมีนเพื่อเกิดเป็นการเชื่อมขวางของเมลามินเรซินดังรูปที่ 2.7[14]



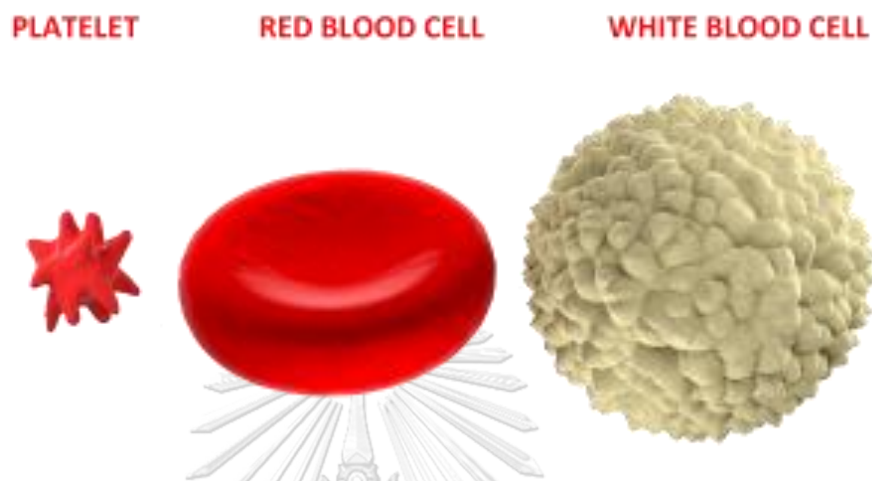
รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของเมลามินฟอร์มัลดีไฮด์

2.4 เกล็ดเลือด (platelets)

เกล็ดเลือดเป็นองค์ประกอบหนึ่งของเลือด มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์เม็ดเลือดขาว โดยเกล็ดเลือดของมนุษย์มีจำนวน 100,000 ถึง 400,000 เกล็ดเลือดต่อเลือด 1 ไมโครลิตร เกล็ดเลือดสร้างจากไขกระดูก มีอายุประมาณ 10 วันก่อนที่จะถูกทำลายที่ม้ามและตับ เกล็ดเลือดทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เลือดออกจากหลอดเลือด เมื่อเกิดบาดแผลเกล็ดเลือดนั้นจะไปรวมตัวหรือจับตัวกันที่บริเวณปากแผลมีลักษณะคล้ายลิ่มเลือดและแข็งตัว เพื่อหยุดการไหลของเลือด หากมีปริมาณเกล็ดเลือดลดลงมากกว่า 50,000 เกล็ดเลือด จะทำให้เลือดออกมากและนานกว่าเลือดจะหยุดหากเกิดบาดแผลและที่ระดับเกล็ดเลือดต่ำกว่า 20,000 เกล็ดเลือด จะทำให้เลือดออกเองโดยไม่ต้องมีบาดแผลหรือการกระทบกระแทกใด โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณเยื่อต่างๆ เช่น เลือดกำเดาไหล เลือดออกตามไรฟันหรือแม้กระทั่งเลือดออกในอวัยวะสำคัญ ได้แก่ ทางเดินอาหารหรือสมอง

ภาวะเกล็ดเลือดต่ำ สามารถเกิดได้จาก ยา สารเคมี รั้งสี ภูมิต้านทานตนเองทำลายเกล็ดเลือด ไวรัส และม้ามที่โตผิดปกติ นอกจากนี้ผู้ป่วยโรคของไขกระดูกจะผลิตเกล็ดเลือดได้ลดลง เช่น ไขกระดูกทำงานผิดปกติหรือไขกระดูกฝ่อ โรคมะเร็งแทรกซึมในไขกระดูก

ภาวะเกล็ดเลือดสูง พบได้ในภาวะที่มีปัจจัยการกระตุ้นการสร้างเกล็ดเลือดให้มากขึ้น ได้แก่ การมีมะเร็งในร่างกาย การเสียเลือดหรือเม็ดเลือดแดงแตกเฉียบพลัน การอักเสบหรือติดเชื้อเรื้อรัง เพราะฉะนั้นเกล็ดเลือดจึงมีความสำคัญต่อร่างกายมนุษย์



รูปที่ 2.8 รูปร่างและขนาดของเกล็ดเลือดเมื่อเทียบกับเซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์เม็ดเลือดขาว

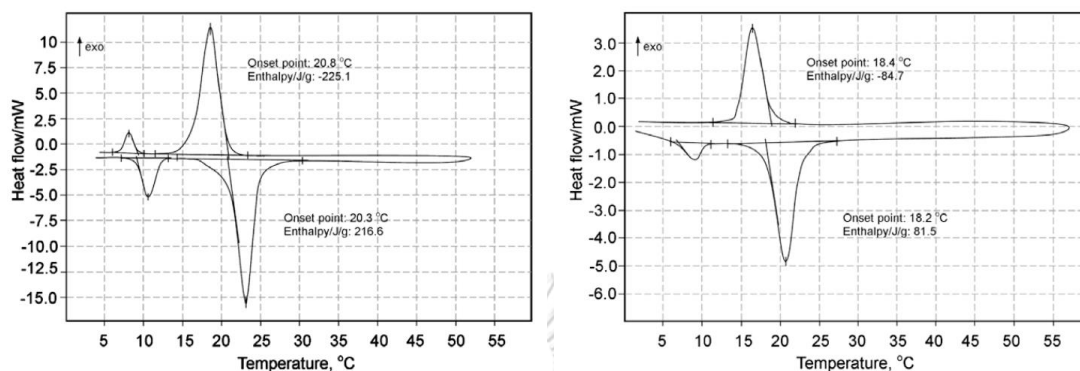
2.4.1 การขนส่งเกล็ดเลือด (platelet transportation)

เกล็ดเลือดจะมีอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่ช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 24 องศาเซลเซียส ต่างจากเซลล์เม็ดเลือดแดงและเม็ดเลือดขาวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 2 ถึง 6 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถใช้น้ำแข็งเป็นสารรักษาความเย็นได้ เมื่อมีการขนส่งทางผู้เตรียมจะใช้กล่องอีพีพี (Expandable polypropylene: EPP box) บรรจุถุงเกล็ดเลือดโดยมีถุงเจลรักษาความเย็น BD gel (Butanediol gel) ประคบบนล่างของถุงเกล็ดเลือดและมีกระดาษขึ้นระหว่างถุงเจลกับถุงเกล็ดเลือดเพื่อไม่ให้สัมผัสกันโดยตรง พรทิพย์ และคณะ[15] ทำการขนส่งทางรถยนต์ควบคุมอุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 30 องศาเซลเซียส สามารถรักษาอุณหภูมิภายในกล่องอีพีพี ช่วง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียส ตลอดการขนส่ง 5 ถึง 8 ชั่วโมง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sari และคณะ[16] เตรียมไมโครแคปซูลที่มีสารแกนกลางเป็นเฮปตะเดคเคนและมีสารเปลือกเป็นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพื่อศึกษาสัญญาณวิทยาและพฤติกรรมทางความร้อนของไมโครแคปซูล ผลการทดลองพบว่า ไมโครแคปซูลมีรูปร่างเป็นทรงกลมผิวเรียบและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.14 ถึง 0.40 ไมโครเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 0.26 ไมโครเมตร การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) พบว่าเฮปตะเดคเคนมีเอนทัลปีของการหลอมเหลว

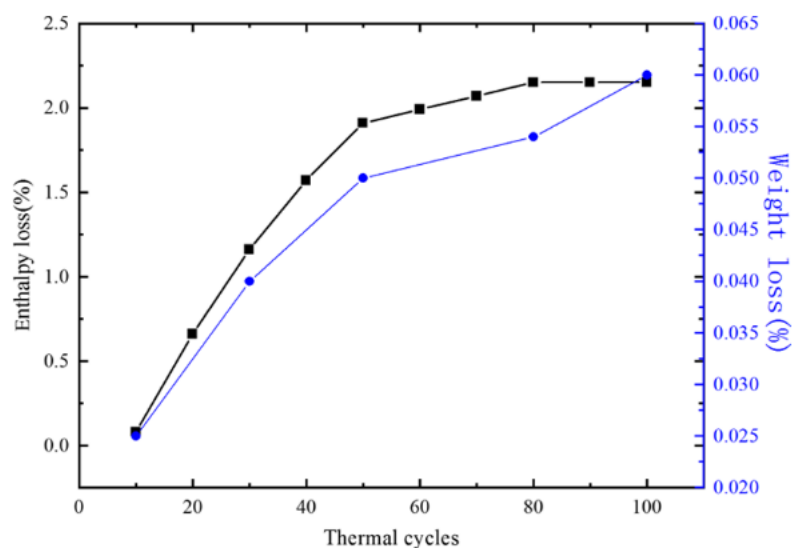
(melting enthalpy: ΔH_m) เท่ากับ 216.6 จูลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 20.3 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาทำไมโครแคปซูลพบว่าไมโครแคปซูลที่ได้มีเอนทาลปีของการหลอมเหลว 81.5 จูลต่อกรัมที่อุณหภูมิ 18.2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.9 DSC เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคน(ซ้าย) ไมโครแคปซูล(ขวา)[16]

Palanikunmaran และคณะ[17] ทำการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรแบบอินซิทูพอลิเมอไรเซชันโดยมีออกตะเดคเคน (n-octadecane) เป็นสารแกนกลางและเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสารเปลือกไมโครแคปซูล นักวิจัยศึกษาอัตราส่วนของเมลามีนต่อฟอร์มัลดีไฮด์ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:3.5 และ 1:8 นอกจากนั้นมีการเตรียมอิมัลชันสามแบบคือ วิธีที่หนึ่งเติมพรีพอลิเมอร์ลงในอิมัลชัน วิธีที่สองเติมอิมัลชันลงในพรีพอลิเมอร์และวิธีที่สามเตรียมอิมัลชันในพรีพอลิเมอร์ หลังจากนั้นค่อยๆ ลดค่า pH ลงช้าๆ เพื่อให้เกิดการพอลิเมอไรเซชัน การทดลองพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของเมลามีนต่อฟอร์มัลดีไฮด์ 1:8 ได้ผล core content เท่ากับ 70.2 เปอร์เซ็นต์ และ encapsulation efficiency 87.3 เปอร์เซ็นต์และยังทนทานต่อการล้างด้วยน้ำร้อนและล้างด้วยตัวทำละลายอีกด้วย

Wang และคณะ[18] ทำการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรที่มีออกตะเดคเคนอยู่ด้านในและเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์อยู่ด้านนอกด้วยกระบวนการอินซิทูพอลิเมอไรเซชัน พบว่าไมโครแคปซูลมีรูปร่างทรงกลมผิวเรียบและมีประสิทธิภาพในการกักเก็บและปลดปล่อยความร้อน นอกจากนี้ยังมีเสถียรภาพในการดูดซับแม้ว่าจะทำการทดลอง heating-cooling ทั้งหมด 100 ครั้ง เอนทาลปีของ heating-cooling ครั้งที่ 1 ต่างจากครั้งที่ 100 เพียง 2.1 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การวิเคราะห์จาก DSC เทอร์โมแกรมของไมโครแคปซูลเมื่อทดสอบซ้ำ 100 ครั้ง[18]

Amol และคณะ[19] ทำการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรที่บรรจุเตตระโคเซนโดยเปลือกหุ้มเป็นเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการอินซิทูพอลิเมอไรเซชัน เมื่อได้แคปซูลระดับไมโครเมตร นำแคปซูลมาผสมกับ Epoxy-PU ในอัตราส่วน 5 10 15 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์และเคลือบลงบนแผ่นเหล็ก นำแผ่นเหล็กที่เคลือบด้วยสารเคลือบที่มีแคปซูลมาทดสอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จำลอง พบว่าแคปซูลปริมาณมากขึ้นจะทำให้มีความสามารถในการดูดซับความร้อนได้มากขึ้นและการทำ heating-cooling 100 ครั้งพบว่าค่าความร้อนแฝงจำเพาะเปลี่ยนแปลงจากเดิมเล็กน้อย

Irani และคณะ[20] สังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรโดยเฮปตะเดคเคนถูกล้อมรอบด้วยแป้ง นักวิจัยศึกษาการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรโดยปรับความเร็วในการกวนและปริมาณแป้ง นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติทางความร้อนของไมโครแคปซูลอีกด้วย ผลการศึกษาพบว่าแคปซูลระดับไมโครเมตรมีลักษณะทรงกลมและมีเปลือกที่สมบูรณ์ หากเพิ่มความเร็วการกวนมากขึ้นขนาดของแคปซูลจะมีขนาดเล็กลง ในทางกลับกัน ปริมาณแป้งต่อน้ำมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดของเฟสน้ำมากขึ้นส่งผลให้ขนาดของแคปซูลมีขนาดใหญ่ขึ้น อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อเฮปตะเดคเคนมากขึ้นจะส่งผลให้มีขนาดแคปซูลที่เล็กลงเนื่องจากปริมาณของแป้งมีมากพอที่จะคลุมหดยเฮปตะเดคเคน ในขณะที่เดียวกันที่อัตราส่วนน้อยลงหดยเฮปตะเดคเคนที่ยังถูกคลุมด้วยวัสดุเปลือกไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันกลายเป็นไมโครแคปซูลขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าประสิทธิภาพของการแคปซูลสูงถึง 78.16 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อ

ทำซ้ำด้วยเทคนิค DSC 100 ครั้ง พบว่าประสิทธิภาพของแคปซูลวัสดุเปลี่ยนเฟสลดลงเพียง 0.9 เปอร์เซ็นต์



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. เฮปตะเดคเคน (n-heptadecane: $C_{17}H_{36}$) จากบริษัท Sincere Chemical (ประเทศจีน)
2. พอลิออกซีเอทิลีนซอร์บิกแทนมอโนโอลีเอต (Tween 80) จากบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด (ประเทศไทย)
3. เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท (melamine formaldehyde condensate) 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากบริษัทสตาร์เทค เคมีคอล อินดัสเทรียล จำกัด (ประเทศไทย)
4. กรดซิตริก (citric acid) จากบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด (ประเทศไทย)
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) จากบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด (ประเทศไทย)
6. น้ำปราศจากประจุ (deionized water)
7. แבקทีเรียเซลลูโลส

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สังเคราะห์ไมโครแคปซูล
 1. ปีกเกอร์ขนาด 50, 100 และ 250 มิลลิลิตร
 2. แท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
 3. เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (hotplate stirrer)
 4. หลอดหยดสาร (dropper)
 5. ชุดกรองสุญญากาศ (funnel filtration)
 6. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump)
 7. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
 8. ตู้อบสาร (hot air oven)

3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

1. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) ของบริษัท Thermo Fisher Scientific รุ่น Nicolet 6700-FTIR (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน, ทีจีเอ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC 3+ (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ของบริษัท JOEL รุ่น JSM-6480LV (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
5. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) ของบริษัท Malvern Instrument รุ่น Mastersizer 2000 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
6. เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Temperature data logger) ของบริษัท Elitech รุ่น RC-5

3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

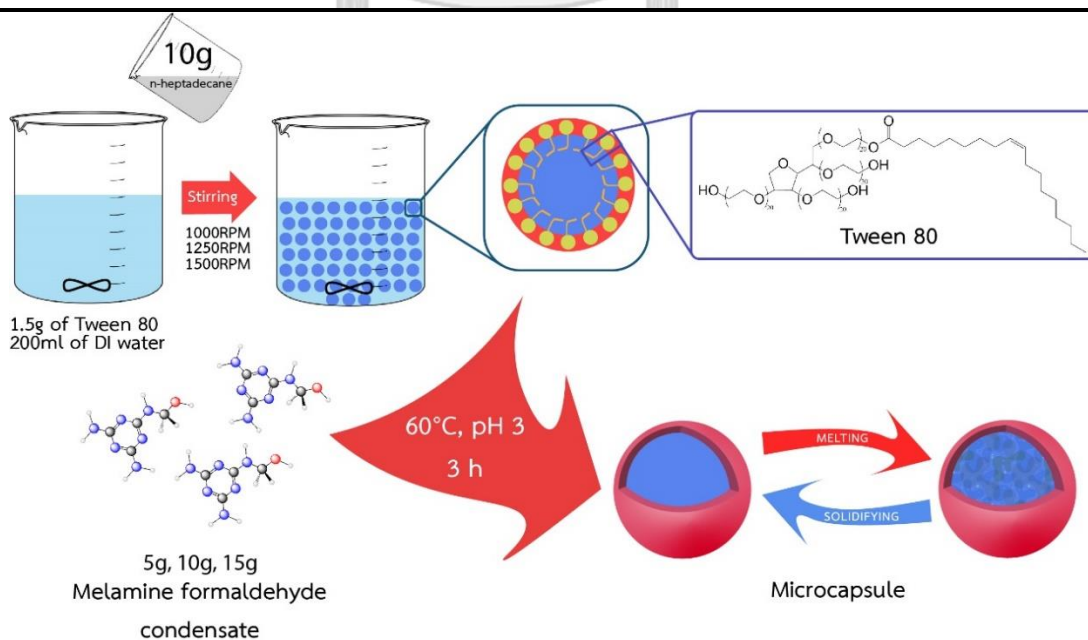
3.3.1 ตัวอย่างการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสด้วยวิธี In-situ polymerization MC1

เตรียมสารละลายอิมัลชันโดยเริ่มจากนำน้ำปราศจากประจุปริมาณ 200 มิลลิลิตรลงปิกเกอร์ จากนั้นเติม Tween80 ปริมาณ 1.5 กรัม และเฮปตะเดคเคน 10 กรัม กวนสารด้วย magnetic bar ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาทีให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเติมเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสทปริมาณ 5 กรัม ต่อมาหยุดกรดซิตริก 1 หยดทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียสและคงอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียสอีก 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นปิดตัวให้ความร้อนและกวนสารต่อไป

ข้ามคืน สุดท้ายนำมากรองด้วยชุดกรองสุญญากาศและล้างด้วยอะซิโตนเพื่อล้างเฮปตะเดเคน เคนที่ไม่ถูกแคปซูลอีกทั้งเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยา ตามด้วยล้างด้วยน้ำปราศจาก ประจุ จากนั้นนำไปอบให้แห้งในตู้อบสารที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ขั้นตอน การสังเคราะห์เป็นไปตามรูปที่ 3.1 และสูตรการสังเคราะห์ไมโครแคปซูลอื่นเป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงตัวแปรของการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตร

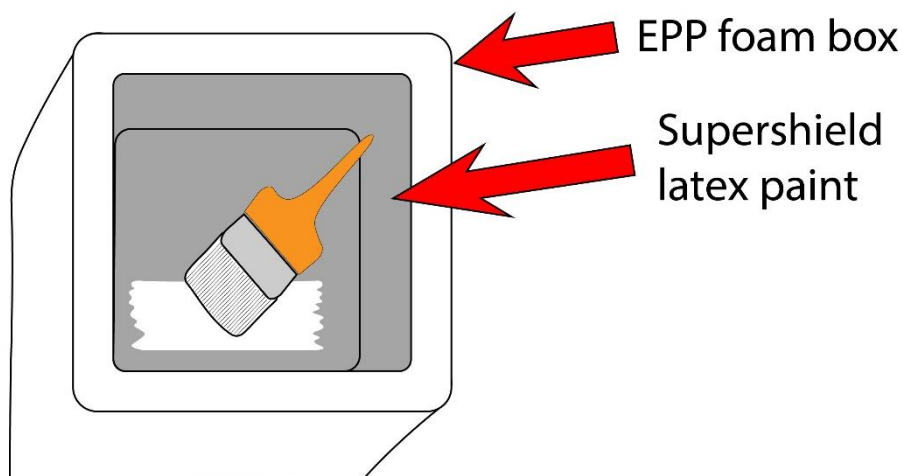
Sample	DI water (L)	melamine formaldehyde (g)	n-heptadecane (g)	Stirring speed (RPM)	Stabilizer concentration (g)	Reaction temperature (°C)
MC1	0.2	5	10	1000	1.5	60
MC2	0.2	5	10	1250	1.5	60
MC3	0.2	5	10	1500	1.5	60
MC4	0.2	10	10	1000	1.5	60
MC5	0.2	10	10	1250	1.5	60
MC6	0.2	10	10	1500	1.5	60
MC7	0.2	15	10	1000	1.5	60
MC8	0.2	15	10	1250	1.5	60
MC9	0.2	15	10	1500	1.5	60



รูปที่ 3.1 รูปภาพการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรที่บรรจุเฮปตะเดเคน

3.3.2 การเตรียมกล่องโฟมทาศีด้วยสีซูเปอร์ชิลด์ดัดแปร

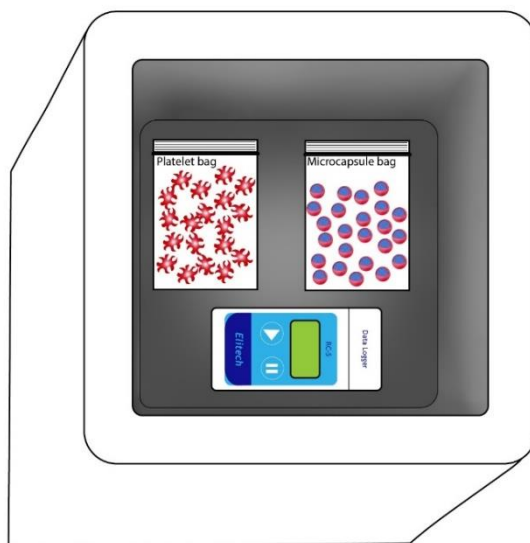
การทดลองนี้มีการเตรียมกล่องโฟมทั้งหมดสองแบบ ในเบื้องต้นได้ทำการทดลองเติมเฮปตะเดคเคนลงไปนีสีซูเปอร์ชิลด์ในอัตราส่วนต่างๆแล้ว ซึ่งได้ผลว่าอัตราส่วนเฮปตะเดคเคนต่อสีซูเปอร์ชิลด์เท่ากับ 4:6 โดยน้ำหนักเป็นอัตราส่วนที่สูงที่สุดและได้ฟิล์มสีที่แห้ง โดย box 1 ใช้สีดัดแปรทาลงบนผิวด้านในของกล่องโฟม EPP (13.5cm x 20cm x 13.5cm) ให้มีความหนา 0.38 มิลลิเมตร (ทาจำนวน 5 รอบ) การทาสีเป็นไปตามรูปที่ 3.2 และ box 2 ทำการเตรียมเหมือน box 1 เพียงแต่เพิ่มฟิล์มแบคที่เรียเซลล์ูโลสที่ชั้นบนสุดของผิวด้านในกล่อง



รูปที่ 3.2 รูปแสดงการทาสีผสมภายในกล่องโฟม EPP

3.3.3 การวัด temperature profile ของกล่องโฟม

การวัด temperature profile จะใช้ data logger Elitech รุ่น RC-5 ในการบันทึกอุณหภูมิภายในกล่องโฟม ทำการทดลองที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อมเท่ากับ 25 ถึง 27 องศาเซลเซียส โดยนำกล่องโฟม box0 (กล่องโฟมเปล่า) box1 และ box2 มาทำการทดลองโดยบรรจุถุงชิปลี่คของน้ำปราศจากประจุหนัก 250 กรัม เครื่องบันทึกอุณหภูมิและถุงชิปลี่คของไมโครแคปซูลดังรูปที่ 3.3 โดยน้ำหนักของไมโครแคปซูลที่บรรจุจะแสดงดังตาราง 3.2



รูปที่ 3.3 รูปแสดงการจัดวางการทดลองเพื่อวัด temperature profile ของกล่องโคมที่บรรจุไมโครแคปซูล

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงอุปกรณ์ที่ใส่ในกล่องโคม

Sample	ชนิดกล่องโคม	Data logger	DI water 250 (g)	Microcapsule MC3 (g)	Heptadecane (g)*
FB1	Box0	✓	✓	-	-
FB2	Box1	✓	✓	-	-
FB3	Box2	✓	✓	-	-
FB4	Box0	✓	✓	15	-
FB5	Box0	✓	✓	30	-
FB6	Box0	✓	✓	50	-
FB6.1	Box0	✓	✓	150	-
FB6.2	Box0	✓	✓	200	-
FB7	Box1	✓	✓	-	15
FB8	Box1	✓	✓	50	-
FB9	Box2	✓	✓	-	15
FB10	Box2	✓	✓	50	-
FB11	Box1	✓	✓	-	60
FB12	Box1	✓	✓	200	-
FB13	Box2	✓	✓	-	60
FB14	Box2	✓	✓	200	-

* น้ำหนักของ heptadecane อิสระเทียบเท่ากับน้ำหนัก heptadecane ในไมโครแคปซูล

3.3.3 การคิดปริมาณร้อยละยี่ลต์ของการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล

การหาปริมาณร้อยละยี่ลต์ของไมโครแคปซูล โดยนำไปอบในตู้อบสารด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและนำน้ำหนักของไมโครแคปซูลมาคำนวณตามสมการ (1)

$$\text{ร้อยละยี่ลต์} = (m_1 \div m_0) \times 100 \quad (1)$$

m_1 คือ น้ำหนักของไมโครแคปซูล

m_0 คือ น้ำหนักของสารตั้งต้นเฮปตะเดคเคนและเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์

3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ (Characterization)

3.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค FT-IR

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของเฮปตะเดคเคนและไมโครแคปซูลด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) รุ่น Nicolet 6700-FTIR โหมด Attenuated total reflectance (ATR mode) โดยพิสูจน์ในช่วงเลขคลื่น (wavenumber) ตั้งแต่ 400 ถึง 4000 cm^{-1}



รูปที่ 3.4 เครื่องฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

3.4.2 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค SEM

วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-6480LV โดยนำตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเพื่อกำจัดความชื้น นำตัวอย่างติดกับแท่นวางชิ้นงาน จากนั้นฉาบผิวด้วยทองผ่านเครื่อง sputter-coater ที่มีศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ทำการทดสอบที่กำลังขยาย 20,000



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.4.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลด้วย Particle size analyzer

วิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูลด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) รุ่น Mastersizer 2000 โดยนำตัวอย่างใส่ในบีกเกอร์ปริมาณหนึ่งให้เครื่องสามารถอ่านค่าได้



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดขนาดอนุภาค Mastersizer 2000

3.4.4 การวิเคราะห์สัดส่วนของเฮปตะเดกเคนไนไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค TGA
 วิเคราะห์สัดส่วนของเฮปตะเดกเคนไนไมโครแคปซูลด้วยการหำร้อยละการระเหยตัว
 ของเฮปตะเดกเคน ด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric
 analyzer, TGA) รุ่น TGA/SDTA (TGA) โดยนำตัวอย่างหนักประมาณ 2-4 มิลลิกรัม ใส่ลงใน
 crucible แล้วนำไปวิเคราะห์ในเครื่อง thermogravimetric analyzer ทำการวัด wt%
 เทียบกับอุณหภูมิในช่วง 50–500 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน (heating rate)
 10 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA)

3.4.5 การวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการแข็งตัวด้วยเทคนิค DSC การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนทั้งอุณหภูมิและเอนทัลปีของเฮปตะเดคเคน และไมโครแคปซูลด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) โดยนำตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 1 มิลลิกรัม ใส่ลงในภาชนะอะลูมิเนียม โดยแบ่งช่วงการทดสอบเป็นสองช่วง การทดสอบแรกเริ่มจากให้ความร้อนจาก 10 องศาเซลเซียสจนถึง 30 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 1 องศาเซลเซียสต่อ นาที เพื่อวิเคราะห์เอนทัลปีของการหลอมเหลว (Enthalpy of melting: ΔH_m) อุณหภูมิของการหลอมเหลว (melting temperature: T_m) การทดสอบที่สองเริ่มจากการลดอุณหภูมิจาก 30 องศาเซลเซียสจนถึง 10 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเย็นตัว 1 องศาเซลเซียสต่อ นาที เพื่อวิเคราะห์เอนทัลปีของการแข็งตัว (Enthalpy of solidifying: ΔH_s) และอุณหภูมิของการแข็งตัว (solidifying temperature: T_s)



รูปที่ 3.8 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

3.4.5.1 วัฏจักรการให้ความร้อนและความเย็น (Heating-cooling cycles)

การทดสอบความเสถียรภาพเมื่อไมโครแคปซูลผ่านการให้ความร้อนและความเย็น 50 รอบ ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) โดยใช้สารน้ำหนักประมาณ 1 มิลลิกรัมใส่ลงภาชนะอะลูมิเนียมและทดสอบช่วงอุณหภูมิจาก 10 ถึง 30 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิลง

จาก 30 ถึง 10 องศาเซลเซียสเป็น 1 วัฏจักร ให้ความร้อนและความเย็นเป็นวัฏจักร
ซ้ำทั้งหมด 50 วัฏจักร ทดสอบด้วยอัตราให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

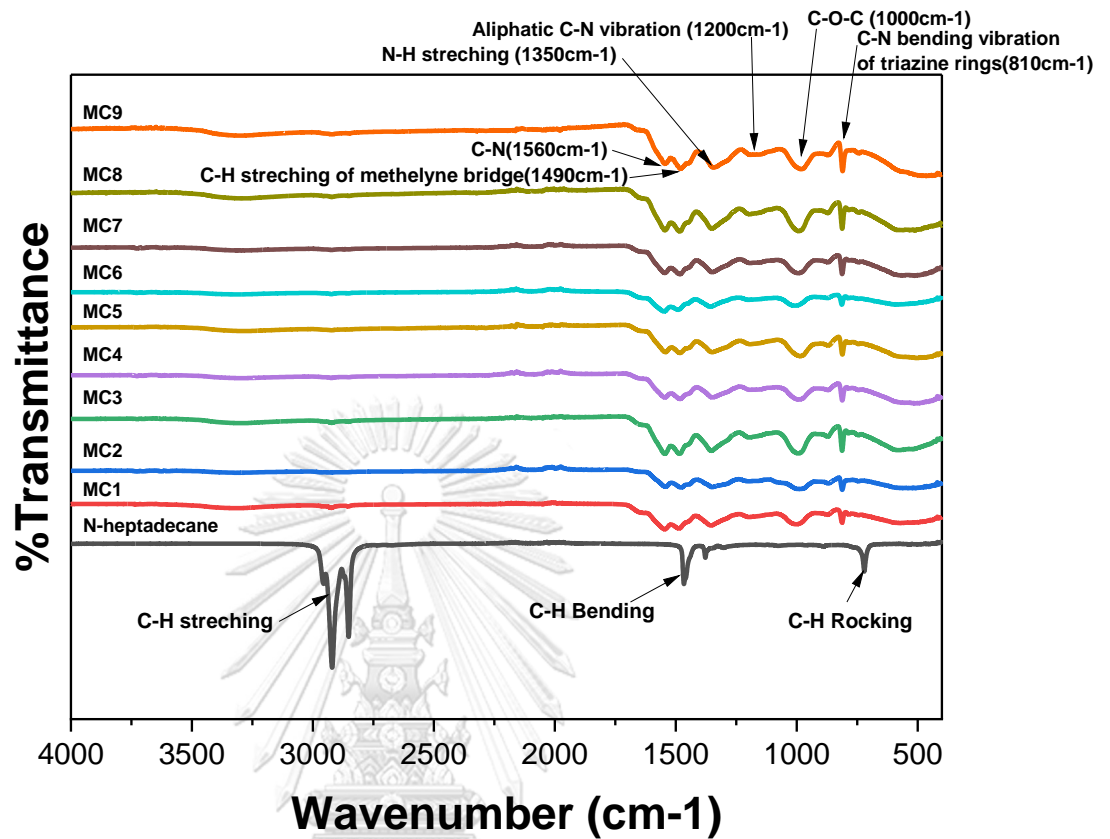
4.1 การคิดปริมาณร้อยละยี่ลต์ของการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล

การคิดปริมาณร้อยละยี่ลต์ของการสังเคราะห์เพื่อทราบผลผลิตของการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตร ตารางที่ 4.1 แสดงผลร้อยละยี่ลต์ของการสังเคราะห์ไมโครแคปซูล ผลปรากฏว่าที่อัตราการกวนต่ำจะทำให้มีการกระจายตัวของหยดน้ำมันเฮปตะเดเคนได้ดี ซึ่งส่งผลให้หยดน้ำมันเฮปตะเดเคนกลับไปรวมตัวกันใหม่และเกิดการคลุ้มของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ได้ไม่สมบูรณ์ ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์มากขึ้นทำให้เกิดการคลุ้มของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ได้สมบูรณ์ ที่อัตราการกวนสูงจะส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของหยดน้ำมันเฮปตะเดเคนได้ดีขึ้นทำให้เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ตกตะกอนลงบนหยดน้ำมันได้ทั่วถึงและเกิดเป็นไมโครแคปซูลได้อย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 4.1 ตารางร้อยละผลผลิตของไมโครแคปซูล

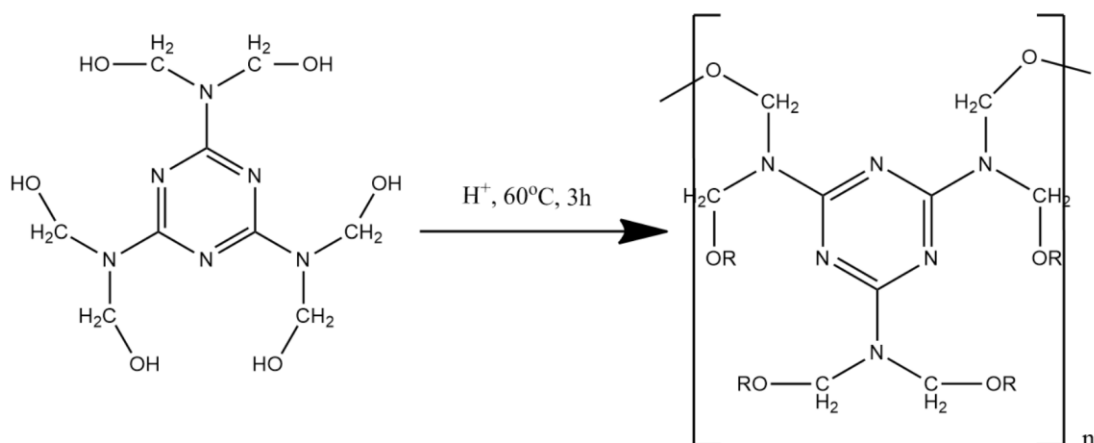
Sample	melamine formaldehyde (g)	n-heptadecane (g)	product (g)	% yield microcapsule
MC1	5	10	4.1	27.3
MC2	5	10	5.0	33.3
MC3	5	10	4.4	29.3
MC4	10	10	5.9	29.5
MC5	10	10	11	55.0
MC6	10	10	9.1	45.5
MC7	15	10	13.8	55.2
MC8	15	10	13	52.0
MC9	15	10	13.2	52.8

4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค FT-IR



รูปที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของเฮปตะเดเคนและไมโครแคปซูลที่สังเคราะห์

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค FTIR เพื่อต้องการดูการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรให้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยสังเกตจากหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลง จากรูปที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของเฮปตะเดเคนมีเอกลักษณ์ของไฮโดรคาร์บอนปรากฏที่เลขคลื่น 2996-2814, 1466 และ 720 cm⁻¹ ตามลำดับ [16, 20, 21] (แสดงดังตารางที่ 4.2) เมื่อเฮปตะเดเคนผ่านการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรจะสังเกตได้จาก FTIR สเปกตรัมเอกลักษณ์ของเฮปตะเดเคนหายไปเพราะถูกคลุมด้วยเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์กลายเป็นไมโครแคปซูล โดยแสดงเอกลักษณ์ของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์แทน ปรากฏที่เลขคลื่น 1560, 1490, 1350, 1200, 1000 และ 810 cm⁻¹ ตามลำดับ [22] (แสดงดังตารางที่ 4.2) ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่าเกิดกระบวนการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรแบบอินซิทูพอลิเมอไรเซชัน โดยเฮปตะเดเคนถูกห่อหุ้มด้วยเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์และกลายเป็นไมโครแคปซูล



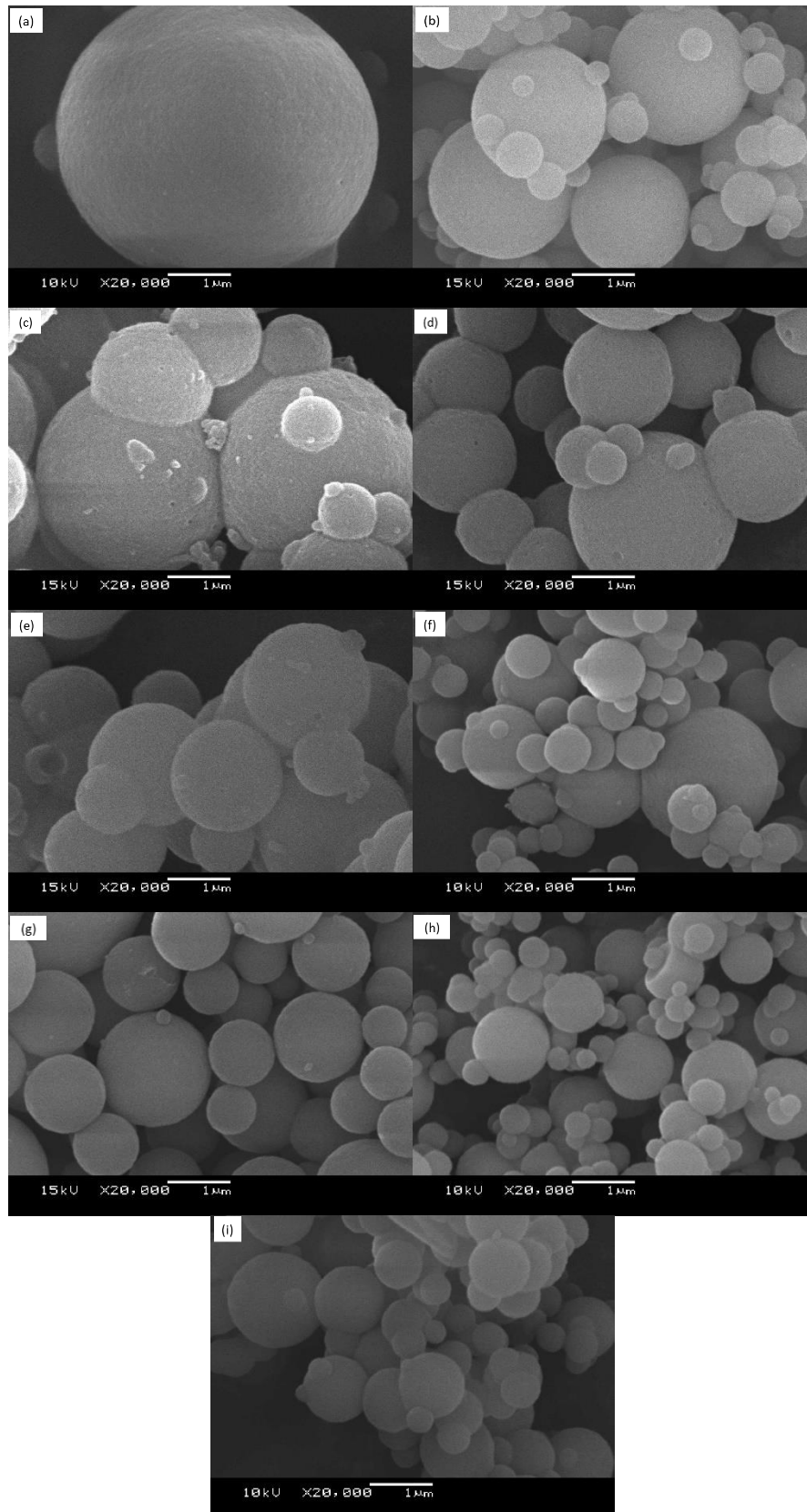
รูปที่ 4.2 ปฏิกิริยาการพอลิเมอไรเซชันของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงตำแหน่งเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันที่วิเคราะห์โดยเทคนิค FTIR

Wavenumber(cm^{-1})	Functional group
2996-2814	C-H stretching
1466	C-H bending
720	C-H rocking
1560	C-H stretching of methylene bridge
1490	C-N
1350	N-H stretching
1200	Aliphatic C-N vibration
1000	C-O-C
810	C-N bending of triazine rings

4.3 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค SEM

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค SEM เพื่อสังเกตรูปร่างของไมโครแคปซูลและขนาดของไมโครแคปซูลเบื้องต้น จากรูปที่ 4.3 รูปร่างของไมโครแคปซูลทั้ง 9 แคปซูลเป็นทรงกลมและผิวของไมโครแคปซูลมีลักษณะเรียบและมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1 ถึง 5 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของไมโครแคปซูล (MC1-MC9 : a-i ตามลำดับ) ที่กำลังขยาย 20000 เท่า

4.4 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูล

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลเพื่อศึกษาการส่งผลต่อไมโครแคปซูลเมื่ออัตราการกวนและปริมาณเมลามีนพอร์มัลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคนเปลี่ยนแปลง ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไมโครแคปซูลทั้ง 9 สูตร โดย MC1, MC2 และ MC3 มีขนาด 26.230, 16.035 และ 14.456 ไมโครเมตรตามลำดับ ที่อัตราส่วนระหว่างเมลามีนพอร์มัลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคนที่ 0.5 ต่อ 1 และใช้อัตราการกวนระหว่างสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรต่างกันที่ 1000, 1250 และ 1500 รอบต่อนาทีตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราการกวนส่งผลให้ขนาดของไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กลงเนื่องจากการเพิ่มอัตราการกวนส่งผลให้หยดน้ำมันเฮปตะเดคเคนในสารละลายอิมัลชันเกิดการแตกตัวเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็กลง เมื่อเกิดการพอลิเมอไรเซชันของเมลามีนพอร์มัลดีไฮด์ขึ้นจะตกตะกอนลงบนหยดน้ำมัน ทำให้ได้ไมโครแคปซูลขนาดที่เล็กลงอีกด้วย [20, 23, 24] เมื่อเทียบอัตราส่วนเมลามีนพอร์มัลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคนที่ 0.5:1, 1:1 และ 1.5:1 โดยเทียบที่อัตราการกวนสารเท่ากันที่ 1000 รอบต่อนาที จากตารางที่ 4.3 ที่ MC1, MC4 และ MC7 มีขนาด 26.230, 13.933 และ 13.038 ไมโครเมตรตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเมลามีนพอร์มัลดีไฮด์จะส่งผลให้ขนาดไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กลงเนื่องจากที่ปริมาณเมลามีนพอร์มัลดีไฮด์ 1.5:1 มีเมลามีนพอร์มัลดีไฮด์มากเพียงพอสำหรับการห่อหุ้มหยดเฮปตะเดคเคน ในทางกลับกันหากลดปริมาณเมลามีนพอร์มัลดีไฮด์ลงจะส่งผลให้มีปริมาณไม่เพียงพอสำหรับการห่อหุ้ม เมื่อห่อหุ้มไม่สำเร็จหยดเฮปตะเดคเคนจะกลับมารวมตัวกันเพื่อให้พื้นที่ผิวของหยดน้ำมันเฮปตะเดคเคนลดลงจนเพียงพอต่อการห่อหุ้มของเมลามีนพอร์มัลดีไฮด์ [20]

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของไมโครแคปซูล

Sample	Average diameter(μm)
MC1	26.230
MC2	16.035
MC3	14.456
MC4	13.933
MC5	13.199
MC6	12.609
MC7	13.038
MC8	12.869
MC9	11.737

4.5 การวิเคราะห์สัณฐานของเฮปตะเดคเคนในไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค TGA

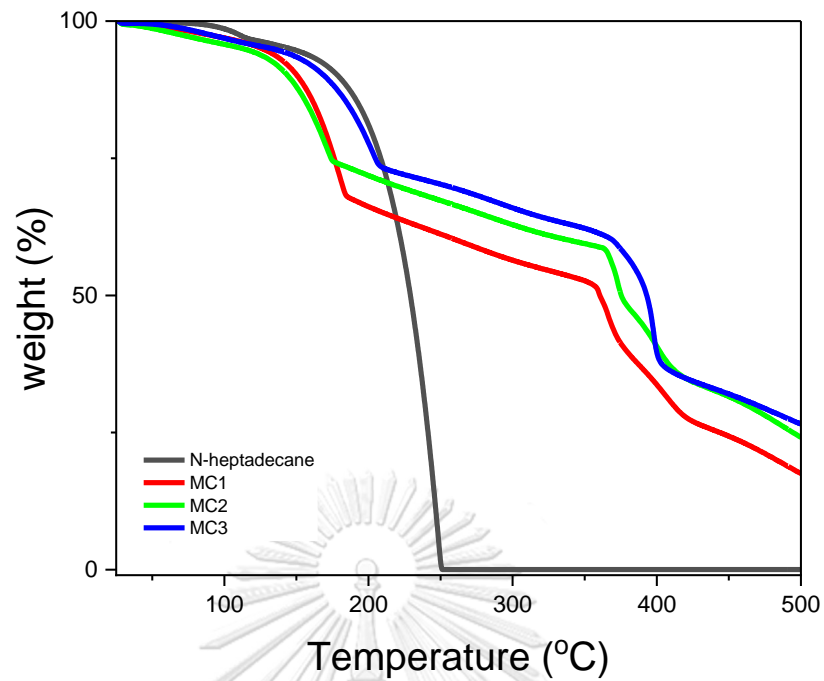
การวิเคราะห์สัณฐานของเฮปตะเดคเคนในไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค TGA เพื่อต้องการทราบปริมาณของเฮปตะเดคเคนที่อยู่ภายในไมโครแคปซูลและนำไปคำนวณในการทดลองต่อไป จากรูปที่ 4.4 ถึง 4.9 สังเกตได้ว่าไมโครแคปซูลมีการสลายตัวทางความร้อนทั้งหมด 2 ชั้น โดยสรุปอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนดังแสดงในตารางที่ 4.4

การสลายตัวขั้นแรกของไมโครแคปซูลเป็นการระเหยของเฮปตะเดคเคน ซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มระเหย (T_{onset}) ตั้งแต่ 115.12 ถึง 159.59 องศาเซลเซียส อุณหภูมิระเหยสูงสุด (T_{max}) ระหว่าง 143.43 ถึง 197.16 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิระเหยสุดท้าย (T_{endset}) ตั้งแต่ 182.44 ถึง 265.64 องศาเซลเซียส

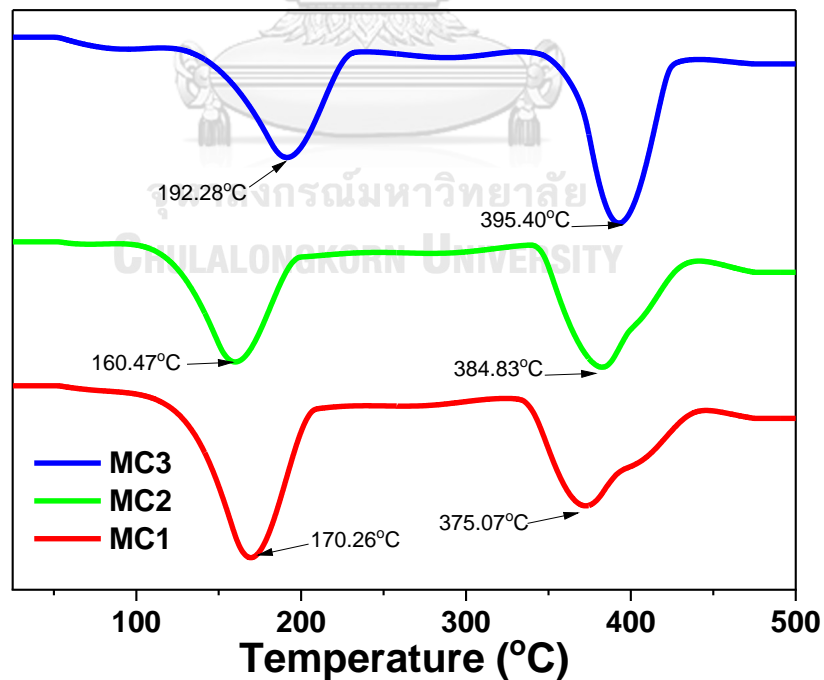
การสลายตัวขั้นที่สองของไมโครแคปซูลเป็นการสลายตัวของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_{onset}) ตั้งแต่ 343.22 ถึง 385.03 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสลายตัวสูงสุด (T_{max}) ระหว่าง 371.86 ถึง 416.33 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิสลายตัวสุดท้าย (T_{endset}) ตั้งแต่ 397.83 ถึง 448.83 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของไมโครแคปซูล

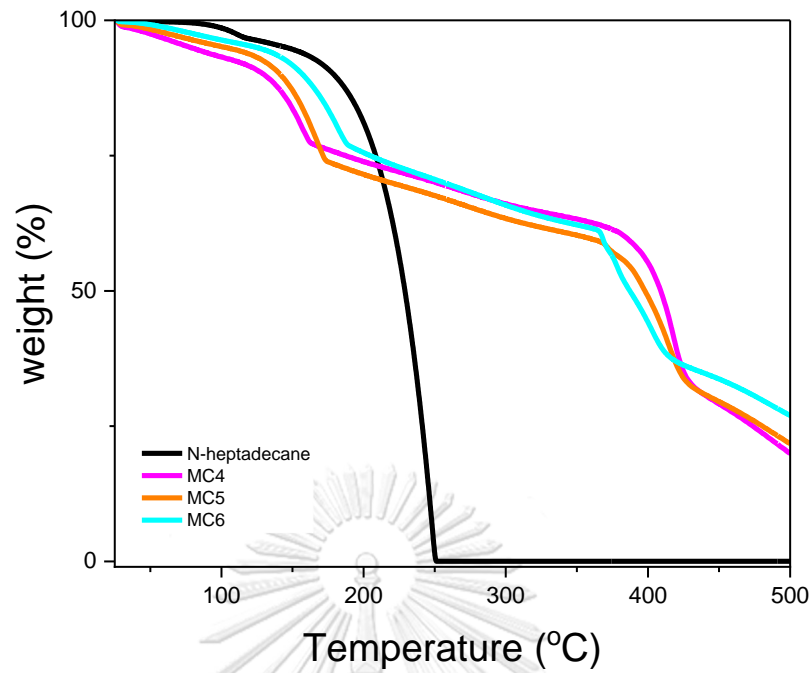
Sample	1 st step			2 nd step		
	T_{onset}	T_{max}	T_{endset}	T_{onset}	T_{max}	T_{endset}
MC1	133.15	170.26	206.14	343.52	375.07	416.85
MC2	123.6	160.47	196.97	351.15	384.83	422.44
MC3	151.71	192.28	227.12	368.07	395.40	425.92
MC4	118.38	149.69	183.08	385.03	416.33	448.38
MC5	123.27	158.79	193.82	371.15	410.78	445.67
MC6	132.63	173.26	211.35	354.21	390.59	432.01
MC7	159.59	200.29	265.64	343.22	371.86	397.95
MC8	115.12	143.43	182.44	344.63	372.82	397.83
MC9	150.55	197.16	264.58	344.53	372.89	398.89



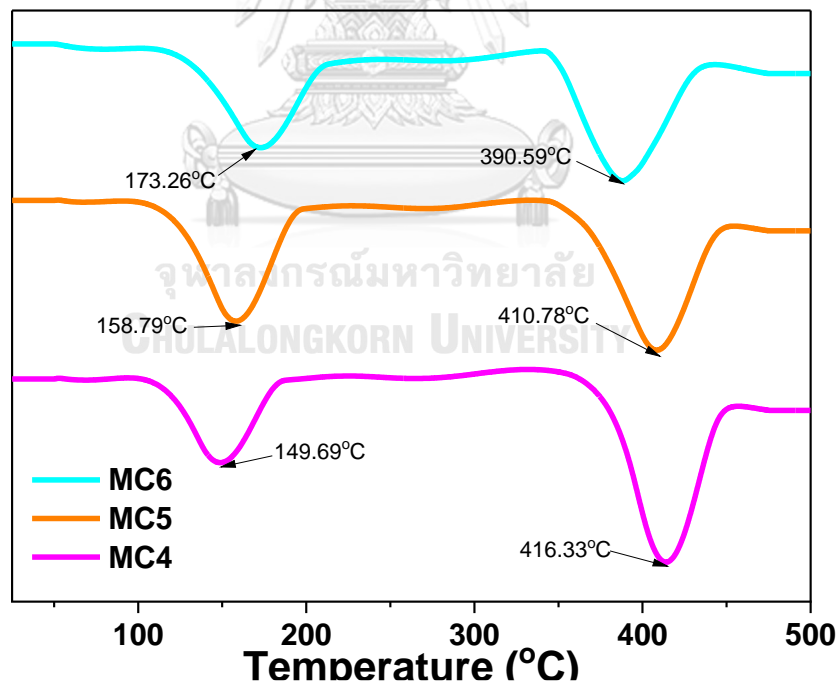
รูปที่ 4.4 TGA เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดเคนและไมโครแคปซูล (MC1, MC2 และ MC3) ที่มีอัตราส่วนของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดเคน 0.5:1



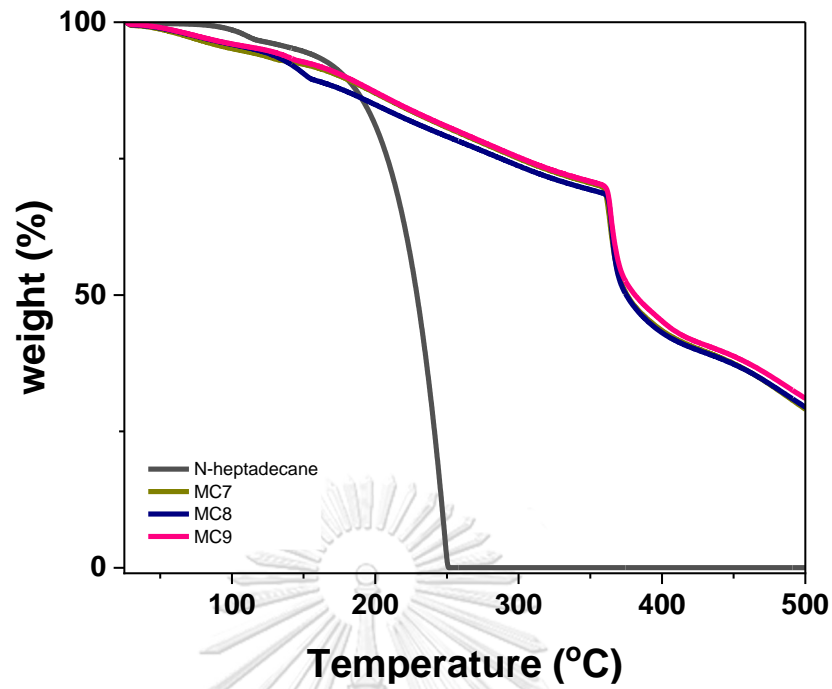
รูปที่ 4.5 DTG เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดเคนและไมโครแคปซูล (MC1, MC2 และ MC3) ที่มีอัตราส่วนของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดเคน 0.5:1



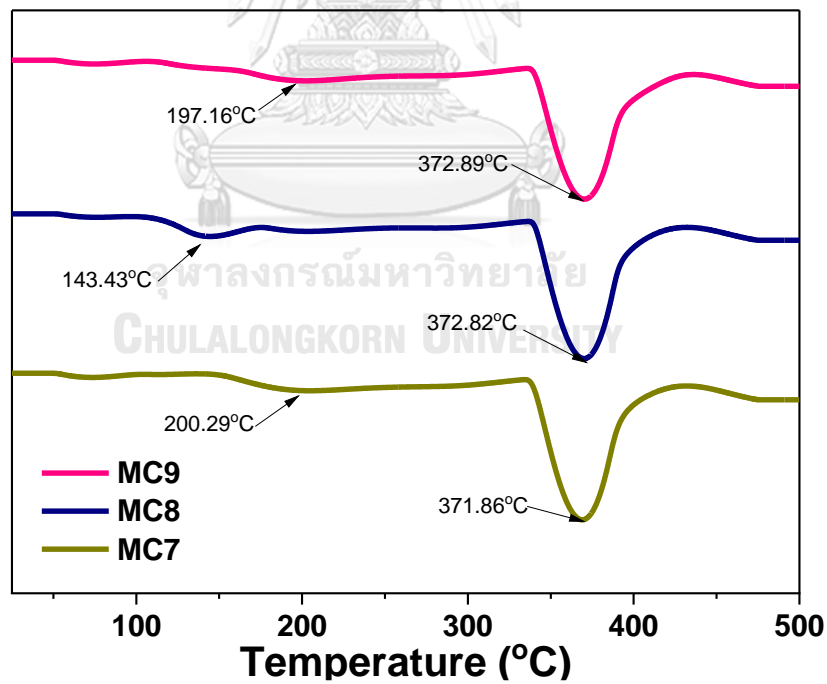
รูปที่ 4.6 TGA เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดเคนและไมโครแคปซูล (MC4, MC5 และ MC6) ที่มีอัตราส่วนของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดเคน 1:1



รูปที่ 4.7 DTG เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดเคนและไมโครแคปซูล (MC4, MC5 และ MC6) ที่มีอัตราส่วนของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดเคน 1:1



รูปที่ 4.8 TGA เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคนและไมโครแคปซูล (MC7, MC8 และ MC9) ที่มีอัตราส่วนของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคน 1.5:1



รูปที่ 4.9 DTG เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคนและไมโครแคปซูล (MC7, MC8 และ MC9) ที่มีอัตราส่วนของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคน 1.5:1

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงร้อยละการระเหยของเฮปตะเดคเคนในไมโครแคปซูล

Sample	% 1 st step weight loss
MC1	38.5083
MC2	30.8814
MC3	28.7044
MC4	25.2971
MC5	29.9335
MC6	28.3422
MC7	17.4382
MC8	19.819
MC9	18.2352

จากกราฟ TGA สามารถสรุปน้ำหนักที่ระเหยของเฮปตะเดคเคนภายในไมโครแคปซูลซึ่งสามารถนำมาคำนวณน้ำหนักของเฮปตะเดคเคนได้ดังตารางที่ 4.5 สังเกตได้ว่าจากตารางสัดส่วนของเฮปตะเดคเคนใน MC1, MC2 และ MC3 ได้ค่า 38.51 , 30.88 และ 28.70 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับและสัดส่วนของเฮปตะเดคเคนใน MC4, MC5 และ MC6 ได้ค่า 25.30 , 29.93 และ 28.34 เปอร์เซ็นต์และสัดส่วนของเฮปตะเดคเคนใน MC7, MC8 และ MC9 ได้ค่า 17.44 , 19.82 และ 18.24 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากผลข้างต้นพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ในสารตั้งต้นส่งผลให้สัดส่วนของเฮปตะเดคเคนในไมโครแคปซูลน้อยลง เนื่องจากเมื่อปริมาณของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์มากขึ้นทำให้เปลือกของไมโครแคปซูลมีความหนาเพิ่มขึ้น

4.6 การวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการแข็งตัวด้วยเทคนิค DSC

การวิเคราะห์ไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค DSC เพื่อหาเอนทัลปีของการหลอมเหลวและแข็งตัวของไมโครแคปซูล เอนทัลปีบ่งบอกถึงการดูดซับความร้อนขณะหลอมเหลว ยิ่งค่าเอนทัลปีมากจะยิ่งดูดซับความร้อนได้มาก นอกจากนี้สามารถนำค่าเอนทัลปีมาคำนวณประสิทธิภาพการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตร จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.13 แสดง DSC เทอร์โมแกรมซึ่งสามารถสรุปข้อมูลได้ดังตารางที่ 4.6

จากตารางพบว่าเฮปตะเดคเคนมีการหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิ 20.99 ถึง 24.99 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 22.43 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมินี้มีเอนทัลปีเท่ากับ -135.85 จูล

ต่อกรัมและมีการแข็งตัวในช่วงอุณหภูมิ 18.74 ถึง 22.03 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิแข็งตัวที่ 21.51 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมินี้มีเอนทาลปีเท่ากับ 137.16 จูลต่อกรัม

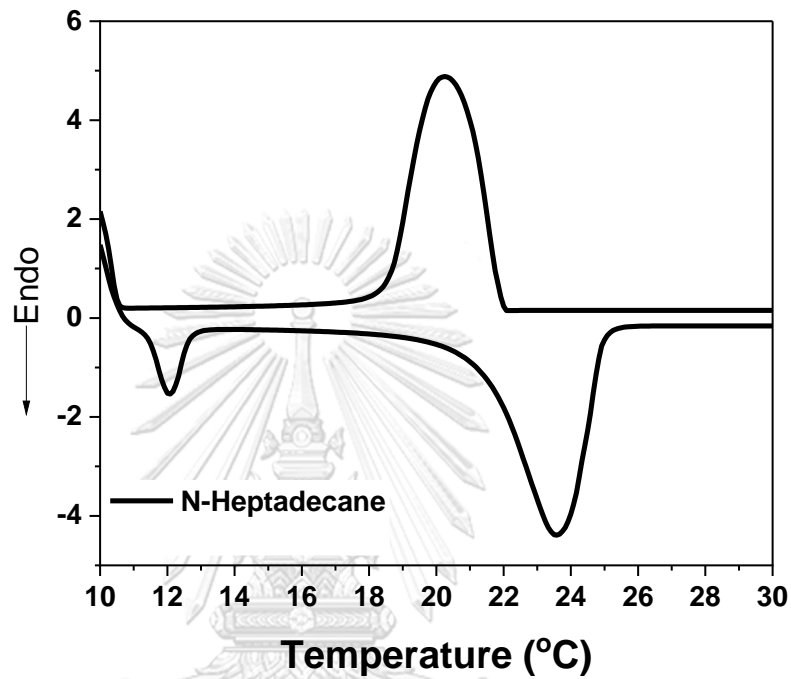
ที่อัตราส่วน MF:PCM ต่างกัน MC1, MC4 และ MC7 พบว่า MC1 มีค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลวเท่ากับ -95.16 จูลต่อกรัมในช่วงอุณหภูมิ 21.23 ถึง 22.98 องศาเซลเซียสและมีค่าเอนทาลปีของการแข็งตัวเท่ากับ 101.56 จูลต่อกรัมในช่วงอุณหภูมิ 19.63 ถึง 21.37 องศาเซลเซียส MC4 มีค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลวเท่ากับ -60.06 จูลต่อกรัมในช่วงอุณหภูมิ 21.24 ถึง 22.81 องศาเซลเซียสและมีค่าเอนทาลปีของการแข็งตัวเท่ากับ 64.81 จูลต่อกรัมในช่วงอุณหภูมิ 19.85 ถึง 21.40 องศาเซลเซียสและ MC7 มีค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลวเท่ากับ -51.17 จูลต่อกรัมในช่วงอุณหภูมิ 21.19 ถึง 22.36 องศาเซลเซียสและมีค่าเอนทาลปีของการแข็งตัวเท่ากับ 50.01 จูลต่อกรัมในช่วงอุณหภูมิ 20.31 ถึง 21.19 องศาเซลเซียส จากผลข้างต้นพบว่าเมื่อปริมาณของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้เอนทาลปีของการเปลี่ยนสถานะลดลงเนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ทำให้เปลือกของไมโครแคปซูลมีความหนามากขึ้นส่งผลให้ขีดขวางการละลายและการแข็งตัวของเฮปตะเดคเคนในไมโครแคปซูล [20, 25]

ในขณะเดียวกัน เมื่อเพิ่มอัตราการกวนตอนสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรโดยเทียบระหว่าง MC1, MC2 และ MC3 พบว่า MC1 มีค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลวเท่ากับ -95.16 จูลต่อกรัมในช่วงอุณหภูมิ 21.23 ถึง 22.98 องศาเซลเซียสและมีค่าเอนทาลปีของการแข็งตัวเท่ากับ 101.56 จูลต่อกรัมในช่วงอุณหภูมิ 19.63 ถึง 21.37 องศาเซลเซียส MC2 มีค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลวเท่ากับ -96.30 จูลต่อกรัมในช่วงอุณหภูมิ 21.47 ถึง 23.92 องศาเซลเซียสและมีค่าเอนทาลปีของการแข็งตัวเท่ากับ 102.44 จูลต่อกรัมในช่วงอุณหภูมิ 19.32 ถึง 21.76 องศาเซลเซียสและ MC3 มีค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลวเท่ากับ -120.89 จูลต่อกรัมในช่วงอุณหภูมิ 21.29 ถึง 22.98 องศาเซลเซียสและมีค่าเอนทาลปีของการแข็งตัวเท่ากับ 122.94 จูลต่อกรัมในช่วงอุณหภูมิ 19.92 ถึง 21.53 องศาเซลเซียส ผลจากการวิเคราะห์กราฟ DSC พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการกวนในการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรทำให้ไมโครแคปซูลมีค่าเอนทาลปีที่สูงขึ้นเนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการกวนส่งผลให้มีความเสถียรของหยดน้ำมันเฮปตะเดคเคนในอิมัลชันและทำให้กระจายตัวได้ดีขึ้น [26]

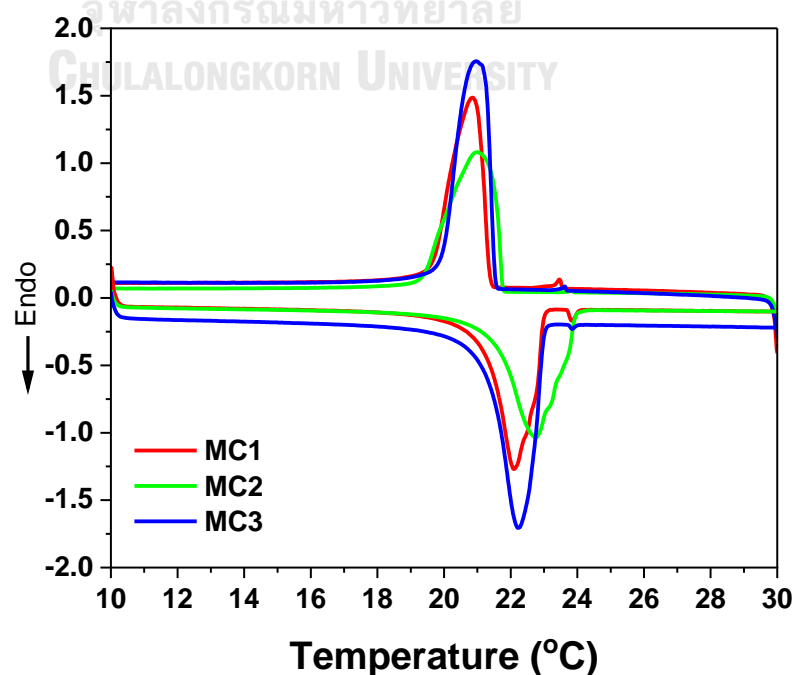
นอกจากนี้ไมโครแคปซูล MC3 มีประสิทธิภาพไมโครแคปซูลสูงที่สุดที่ 89.31 เปอร์เซ็นต์โดยสามารถคำนวณจากค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลวและการแข็งตัวของไมโครแคปซูลเทียบกับเอนทาลปีของเฮปตะเดคเคนดังสมการที่ 2

$$\%E = \frac{(\Delta H_m + \Delta H_s) \text{ of microcapsule}}{(\Delta H_m + \Delta H_s) \text{ of PCM}} \times 100 \quad (2)$$

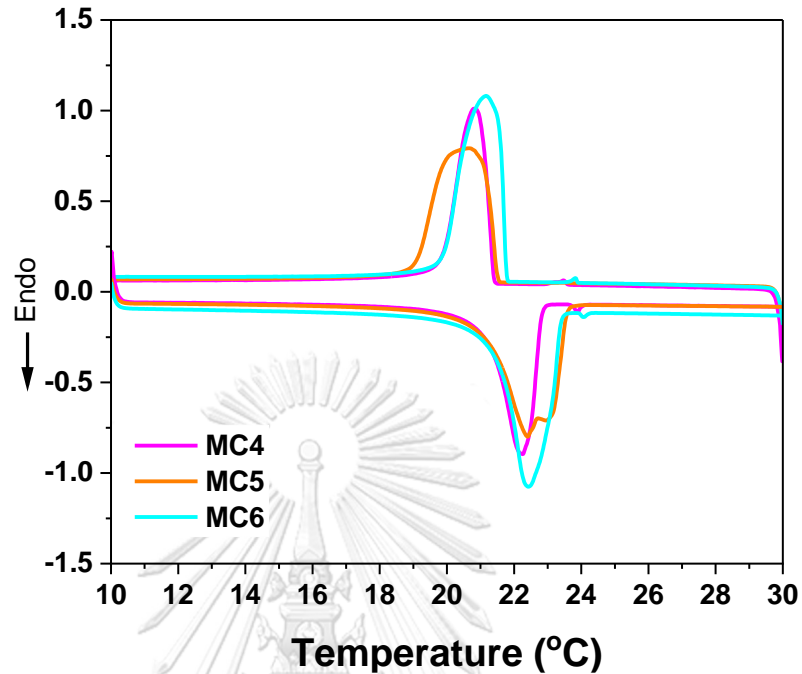
เมื่อ %E คือประสิทธิภาพของไมโครแคปซูล ΔH_m คือเอนทาลปีของการหลอมเหลวและ ΔH_s คือเอนทาลปีของการแข็งตัว



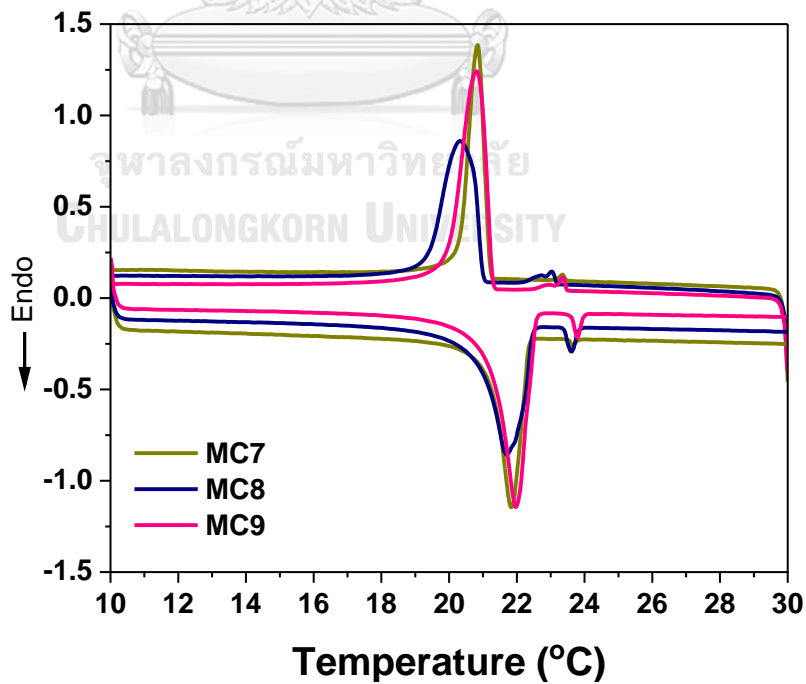
รูปที่ 4.10 DSC เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคนที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 DSC เทอร์โมแกรมของไมโครแคปซูล MC1, MC2 และ MC3 ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 DSC เทอร์โมแกรมของไมโครแคปซูล MC4, MC5 และ MC6 ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 DSC เทอร์โมแกรมของไมโครแคปซูล MC7, MC8 และ MC9 ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียส

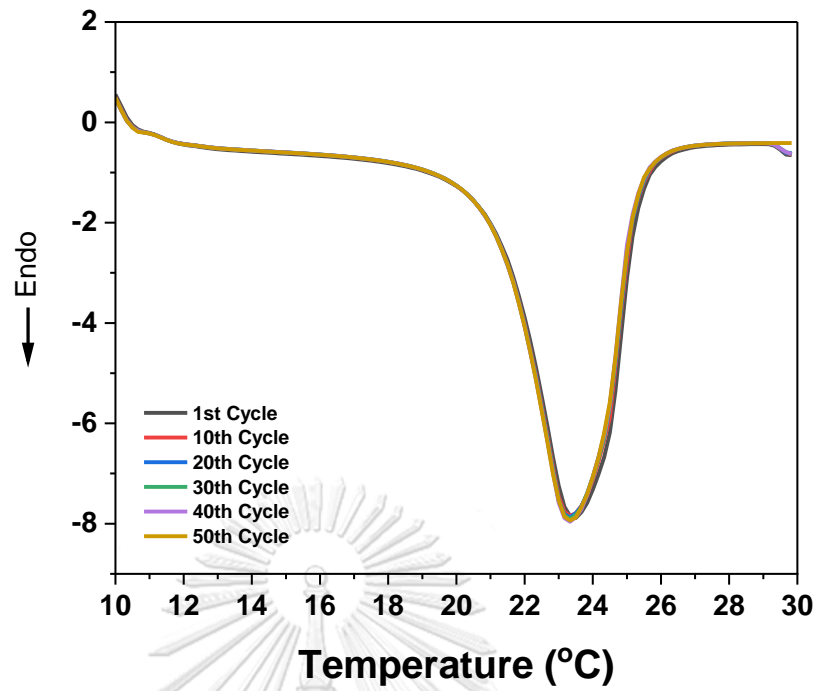
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงเอนทาลปี อุณหภูมิขณะแข็งตัวและหลอมเหลวและประสิทธิภาพของไมโครแคปซูล

Sample	Melting				Solidifying				%E ^c
	ΔH_m^a (J/g)	T _{onset} (°C)	T _m (°C)	T _{endset} (°C)	ΔH_s^b (J/g)	T _{onset} (°C)	T _s (°C)	T _{endset} (°C)	
heptadecane	-135.85	20.99	22.43	24.99	137.16	22.03	21.51	18.74	-
MC1	-95.16	21.23	22.08	22.98	101.56	21.37	20.89	19.63	72.06
MC2	-96.30	21.47	22.69	23.92	102.44	21.76	21.06	19.32	72.80
MC3	-120.89	21.29	22.19	22.98	122.94	21.53	21.01	19.92	89.31
MC4	-60.06	21.24	22.22	22.81	64.81	21.40	20.83	19.85	45.74
MC5	-83.25	21.14	22.35	23.94	83.48	21.51	20.72	19.05	61.07
MC6	-83.85	21.51	22.37	23.38	88.70	21.78	21.23	19.88	63.20
MC7	-51.17	21.19	21.82	22.36	50.01	21.19	20.87	20.31	37.10
MC8	-59.09	20.88	21.68	22.45	60.08	21.00	20.34	19.35	43.65
MC9	-66.86	21.19	21.94	22.49	71.09	21.29	20.84	19.95	50.53

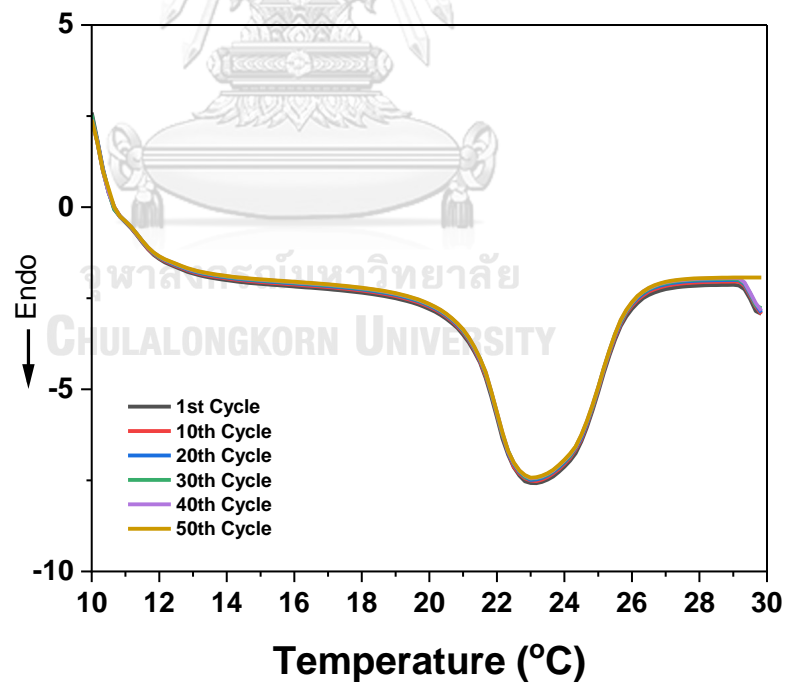
a: เอนทาลปีขณะหลอมเหลว, b: เอนทาลปีขณะแข็งตัว, c: ประสิทธิภาพของไมโครแคปซูล

4.6.1 การวิเคราะห์หัตถจักรการให้ความร้อนและความเย็นด้วยเทคนิค DSC

การวิเคราะห์หัตถจักรการให้ความร้อนและความเย็นเพื่อดูความเสถียรภาพและการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีของไมโครแคปซูลเมื่อผ่านการใช้งานหลายครั้ง รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงกราฟ DSC ของเฮปตะเดคเคนและ MC3 ตามลำดับ โดยการหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียส เทียบการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีครั้งที่ 1, 10, 20, 30, 40 และ 50 ลงในตารางที่ 4.7 พบว่าเฮปตะเดคเคนมีเอนทาลปีของการหลอมเหลรรอบที่ 1 และ 50 เท่ากับ -137.16 และ -135.85 จูลต่อกรัมตามลำดับ เอนทาลปีของการหลอมเหลวเทียบรอบที่ 1 กับ 50 มีการเปลี่ยนแปลง 0.955 เปอร์เซ็นต์ ในทางกลับกันไมโครแคปซูลมีเอนทาลปีของการหลอมเหลรรอบที่ 1 และ 50 เท่ากับ 121.01 และ 120.05 จูลต่อกรัมตามลำดับ เอนทาลปีของการหลอมเหลรรอบที่ 1 กับ 50 มีการเปลี่ยนแปลงเพียง 0.793 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าไมโครแคปซูลมีความเสถียรในการใช้งานได้หลายครั้ง



รูปที่ 4.14 DSC เทอร์โมแกรมของเฮปตะเดคเคน ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียสทั้งหมด 50 รอบ



รูปที่ 4.15 DSC เทอร์โมแกรมของไมโครแคปซูล MC3 ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 30 องศาเซลเซียสทั้งหมด 50 รอบ

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าเอนทาลปีของเฮปตะเดเคนและ MC3 ในการหลอมเหลวเป็นวัฏจักรครั้งที่ 1, 10, 20, 30, 40 และ 50

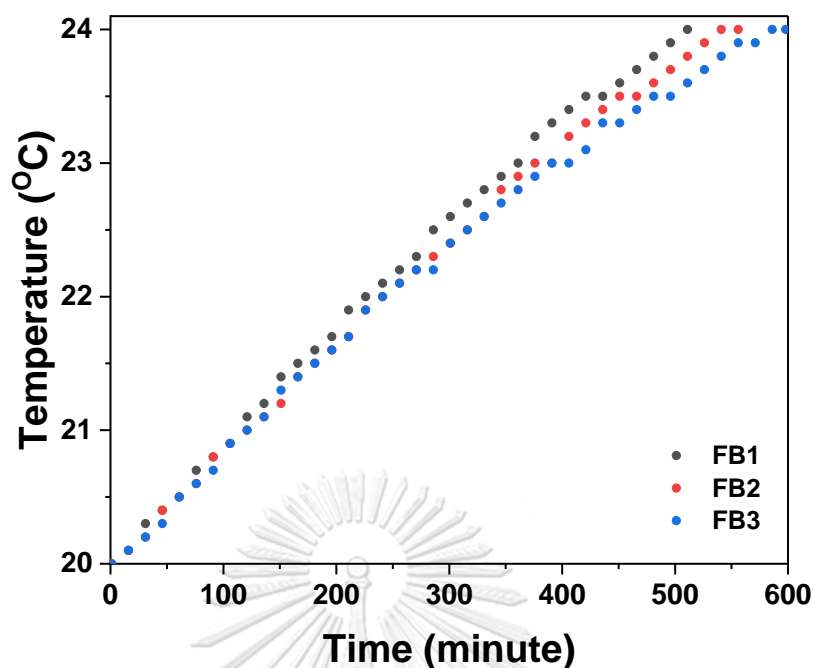
Cycle	ΔH_m of heptadecane(J/g)	ΔH_m of MC3 (J/g)
1	-137.16	-121.01
10	-136.18	-120.88
20	-135.88	-120.81
30	-135.90	-120.59
40	-135.85	-120.37
50	-135.85	-120.05

4.7 การวิเคราะห์การวัด temperature profile

ในการทดลองการวัด temperature profile จะเน้นช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 24 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเก็บเกล็ดเลือดให้ไม่เสื่อมสภาพและมีเป้าหมายในการเก็บรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียสให้ได้ตลอด 24 ชั่วโมง โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อมเท่ากับ 25 ถึง 27 องศาเซลเซียส

4.7.1 การวัด temperature profile ของกล่องโฟม

การวิเคราะห์ temperature profile ของกล่องโฟมเพื่อสังเกตว่าสีทาผสมเฮปตะเดเคนและแบคทีเรียเซลล์โลสมีส่วนช่วยในการรักษาอุณหภูมิ จากรูปที่ 4.16 แสดงถึงอุณหภูมิของ FB1 เก็บรักษาอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียสได้เป็นเวลา 511 นาที หรือ 8 ชั่วโมง 21 นาที เมื่อทาสีผสมเฮปตะเดเคนกับกล่องโฟมพบว่า FB2 สามารถเก็บรักษาอุณหภูมิช่วง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียสได้เป็นเวลา 556 นาทีหรือ 9 ชั่วโมง 16 นาที ในขณะที่เดียวเมื่อใช้แบคทีเรียเซลล์โลสเข้ามาใช้กับกล่องโฟมด้วยพบว่า FB3 สามารถเก็บรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียสได้ถึง 598 นาทีหรือ 9 ชั่วโมง 58 นาที จากผลข้างต้นแสดงว่าการเพิ่มเฮปตะเดเคนลงในสี ช่วยเพิ่มความสามารถในการเก็บรักษาอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียสได้ถึง 55 นาที แต่เมื่อเพิ่มแบคทีเรียเซลล์โลสจะช่วยเก็บรักษาอุณหภูมิได้นานขึ้นจากเดิมอีก 42 นาที



รูปที่ 4.16 กราฟ temperature profile ของ FB1, FB2 และ FB3

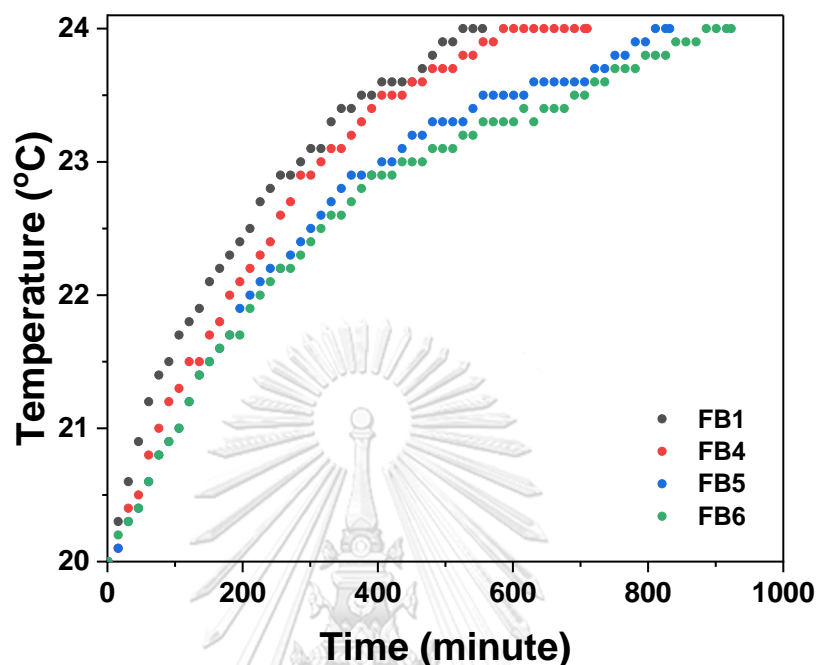
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงเวลาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 24 °C ของกล่องโฟม

Sample	Time (minute)
FB1	511
FB2	556
FB3	598

4.7.2 การวัด temperature profile ของไมโครแคปซูล

การวิเคราะห์ temperature profile ของไมโครแคปซูลเพื่อสังเกตว่าเมื่อปริมาณไมโครแคปซูลมากขึ้นมีผลต่อเวลาการเก็บรักษาอุณหภูมิ จากรูป 4.17 แสดงถึงความสามารถในการเก็บรักษาอุณหภูมิของ FB1 ในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 24 องศาเซลเซียสได้นาน 555 นาที หรือ 9 ชั่วโมง 15 นาที เมื่อเพิ่มไมโครแคปซูลน้ำหนัก 15 กรัมพบว่า FB4 สามารถเก็บรักษาอุณหภูมิช่วง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียสได้มากขึ้นนาน 710 นาทีหรือ 11 ชั่วโมง 50 นาทีและเมื่อเพิ่มไมโครแคปซูลเป็นน้ำหนัก 30 กรัมพบว่า FB5 อุณหภูมิภายในกล่องโฟมมีอุณหภูมิช่วง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียสนาน 832 นาทีหรือ 13 ชั่วโมง 52 นาที ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ

ไมโครแคปซูลเป็น 50 กรัมพบว่า FB6 สามารถเก็บรักษาอุณหภูมิช่วง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียสได้นาน 923 นาทีหรือ 15 ชั่วโมง 23 นาที

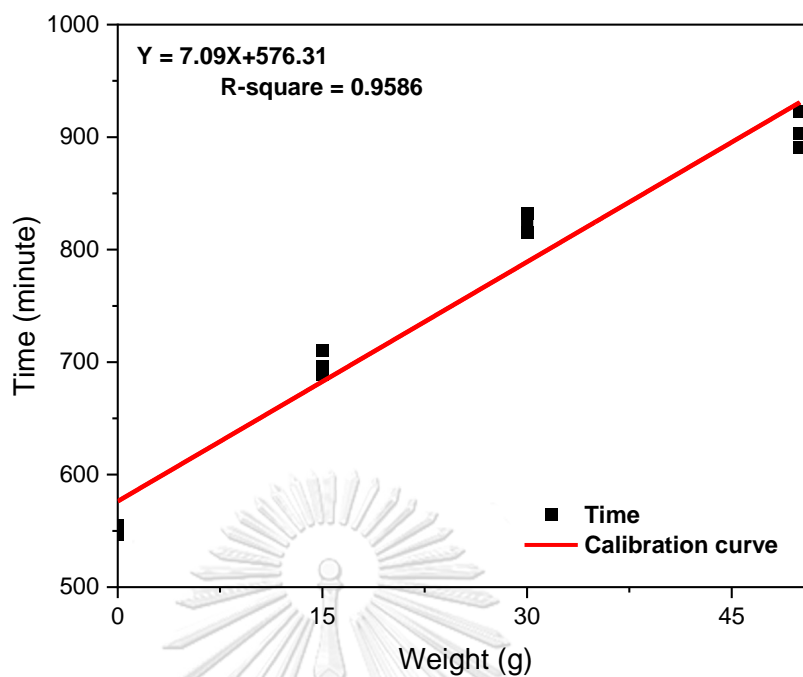


รูปที่ 4.17 กราฟ temperature profile ของ FB1, FB4, FB5 และ FB6

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงเวลาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 24 °C ของไมโครแคปซูล

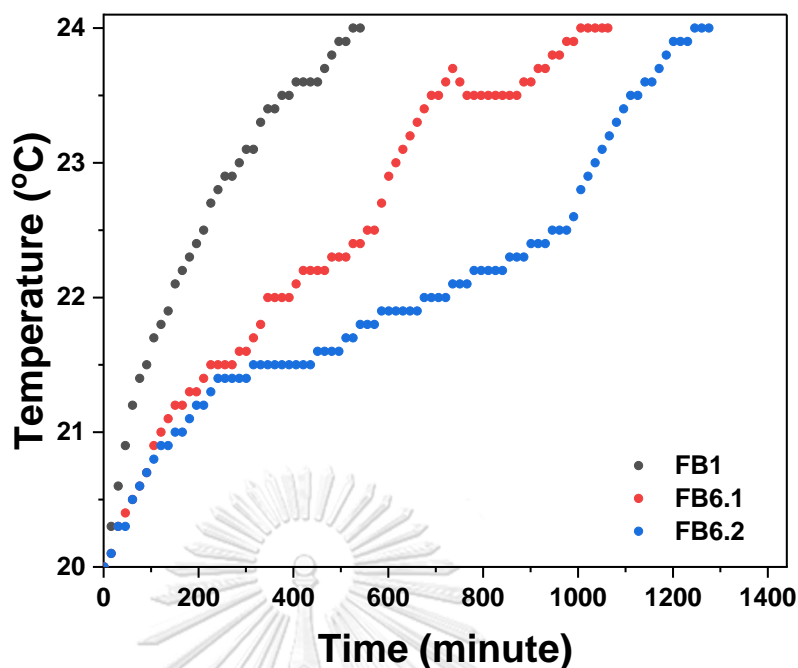
Sample	Time (minute)
FB1	555
FB4	710
FB5	832
FB6	923

เมื่อนำเวลาของกล่องโฟมเปล่าที่บรรจุไมโครแคปซูลที่น้ำหนัก 0, 15, 30, 50 กรัมมาทำกราฟ linear regression เพื่อหาน้ำหนักของไมโครแคปซูลที่จะทำให้เก็บรักษาอุณหภูมิได้ถึง 24 ชั่วโมงจะได้กราฟ linear regression ดังรูป 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟ linear regression ของไมโครแคปซูลที่น้ำหนัก 0, 15, 30, 50 กรัม

พบว่ากราฟ linear regression มีค่า R-square เท่ากับ 0.9586 และเมื่อคำนวณน้ำหนักที่จะทำให้สามารถรักษาอุณหภูมิได้ 24 ชั่วโมงจะต้องใช้ไมโครแคปซูลน้ำหนักประมาณ 150 กรัม ต่อมาเริ่มการทดลอง FB6.1 ซึ่งมีไมโครแคปซูล 150 กรัม และ FB6.2 ซึ่งมีไมโครแคปซูล 200 กรัม พบว่าไมโครแคปซูลน้ำหนัก 150 กรัมสามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 20 ถึง 24 °C ได้ 1063 นาที ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มไมโครแคปซูลให้มีน้ำหนัก 200 กรัมสามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 20 ถึง 24 °C ได้ 1276 นาที



รูปที่ 4.19 กราฟ temperature profile ของ FB1, FB6.1 และ FB6.2

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงเวลาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 24 °C ของไมโครแคปซูล

Sample	Time (minute)
FB1	541
FB6.1	1063
FB6.2	1276

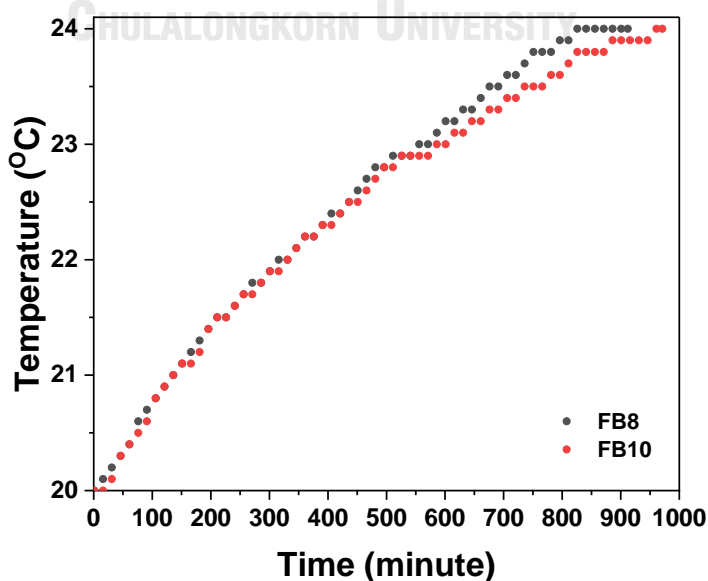
4.7.3 การวัด temperature profile ของกล่องโฟมทาด้วยสตีตแปรและไมโครแคปซูล การวิเคราะห์ temperature profile นี้เพื่อยืนยันว่าการใช้แบคทีเรียเซลล์ูลอสช่วยเสริมความสามารถของไมโครแคปซูลในการรักษาอุณหภูมิได้ดีขึ้น จากรูปที่ 4.20 กราฟ temperature profile เทียบระหว่าง FB8 และ FB10 ที่มีไมโครแคปซูล 50 กรัมและเปลี่ยนจาก box1 กับ box2 ผลปรากฏว่า FB8 สามารถเก็บรักษาอุณหภูมิได้ 912 นาทีหรือ 15 ชั่วโมง 12 นาทีและ FB10 สามารถเก็บรักษาอุณหภูมิได้ 971 นาทีหรือ 16 ชั่วโมง 11 นาที ซึ่งกราฟของ FB10 มีความชันของกราฟ temperature profile ที่ลดลงเมื่อเทียบกับ FB8 ในขณะเดียวกันรูปที่ 4.21 เป็นการเทียบ temperature profile ของ FB12 และ

FB14 พบว่าในช่วงแรกและช่วงหลังของ FB14 มีความชันลดลงเมื่อเทียบกับ FB12 เนื่องจากแบคทีเรียเซลลูโลสมีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อน ซึ่งช่วยส่งเสริมให้ชะลอการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิใน FB14 และมีอุณหภูมิกึ่งที่ในช่วง 21.9 ถึง 22.3 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 470 นาที หรือ 7 ชั่วโมง 50 นาที

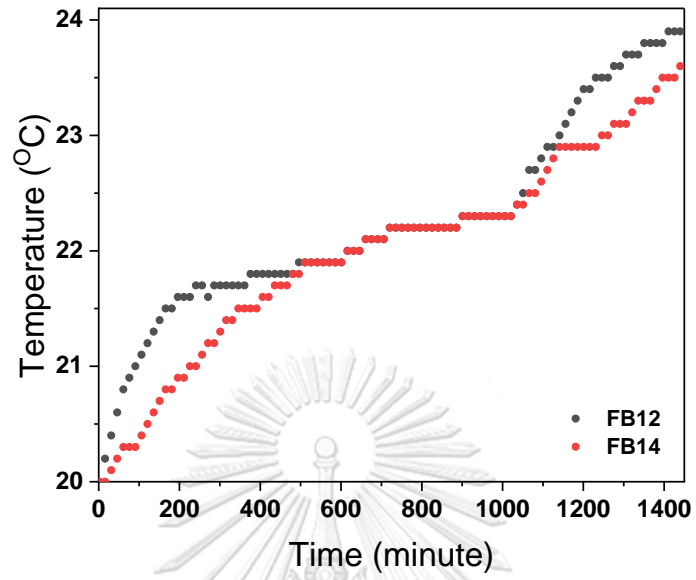
ทั้ง FB12 และ FB14 สามารถเก็บรักษาอุณหภูมิช่วง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียส ได้ถึง 24 ชั่วโมงแต่ FB12 มีอุณหภูมิต่ำสุดที่ 23.9 องศาเซลเซียสและ FB14 มี อุณหภูมิที่ต่ำสุดที่ 23.6 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงเวลาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 24 °C ของกล่องโฟมทาด้วยสียดัดแปรและไมโครแคปซูล

Sample	Time (minute)	Final temperature (°C)
FB8	912	24
FB10	971	24
FB12	1440	23.9
FB14	1440	23.6



รูปที่ 4.20 กราฟ temperature profile ของ FB8 และ FB10



รูปที่ 4.21 กราฟ temperature profile ของ FB12 และ FB14

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยชิ้นนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอินซิทูและนำไมโครแคปซูลวัสดุเปลี่ยนเฟสและแบคทีเรียเซลลูโลสมาประยุกต์ใช้ร่วมกับสีทาคลองโพนเพื่อเก็บรักษาอุณหภูมิช่วง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียสให้ได้ตลอดการขนส่งเคลื่อนที่เคลื่อนซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเก็บเคลื่อนที่เคลื่อนไม่ให้เสื่อมสลาย

1. เตรียมไมโครแคปซูลเฮปตะเดคเคนด้วยเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสทภายใต้สภาวะกรด pH 3 ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง การสังเคราะห์แคปซูลระดับไมโครเมตรเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ยืนยันด้วยการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR ในการสังเคราะห์มีการปรับปริมาณของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคนเป็น 0.5:1, 1:1 และ 1.5:1 นอกจากนั้นยังปรับอัตราการกวนตอนสังเคราะห์แคปซูล ผลปรากฏว่าไมโครแคปซูลที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมและผิวเรียบซึ่งสามารถยืนยันผลด้วยการทดสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM และยังพบว่าอัตราการกวนและปริมาณเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์มีผลต่อขนาดของไมโครแคปซูลจากการทดสอบด้วย Particle size analyzer
2. ผลการศึกษาสัดส่วนของเฮปตะเดคเคนในไมโครแคปซูลพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์มากขึ้นส่งผลให้มีสัดส่วนลดลงเนื่องจากไมโครแคปซูลมีเปลือกที่หนาขึ้น ที่อัตราส่วนของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคน 0.5:1 เป็นอัตราส่วนที่ได้สัดส่วนมากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น
3. ผลการศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลวและแข็งตัวของไมโครแคปซูลแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อเฮปตะเดคเคนน้อยส่งผลให้ได้ไมโครแคปซูลที่มีเอนทัลปีมากที่สุดและอัตราการกวนส่งผลต่อเอนทัลปีเช่นกัน
4. ผลการศึกษาวงจรการให้ความร้อนและความเย็นทั้งหมด 50 รอบพบว่าไมโครแคปซูลมีความเสถียรของเอนทัลปีแม้จะผ่านวัฏจักรทั้งหมด 50 รอบ
5. ผลการทดลอง temperature profile แสดงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองต่อการเก็บรักษาอุณหภูมิ เริ่มจากสีตัดแปรช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและแบคทีเรียเซลลูโลสมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้อีกระดับหนึ่ง ในขณะที่เดียวกันไมโครแคปซูลสามารถดูดซับความร้อนทำให้ช่วยชะลอการ

เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้เช่นกัน เมื่อนำวัสดุทั้งสามมาประยุกต์ใช้ด้วยกันส่งผลให้วัสดุทั้งสามส่งเสริมกันช่วยชะลออุณหภูมิได้มากขึ้นกว่าเดิม

6. เมื่อเพิ่มไมโครแคปซูลมากขึ้นถึง 200 กรัมโดยเทียบระหว่างสีตัดแปร สีตัดแปรกับแบคทีเรียเซลลูโลสพบว่าสามารถเก็บรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 20 ถึง 24 องศาเซลเซียสได้มากกว่า 24 ชั่วโมง แต่แบคทีเรียเซลลูโลสแสดงบทบาทของฉนวนความร้อนได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไมโครแคปซูล

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทหาวิธีผสมไมโครแคปซูลลงไปในสีเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานได้มากขึ้น
2. การควบคุมอุณหภูมิสภาพแวดล้อมควรควบคุมให้มีช่วงที่กว้างมากขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] Zhao, J., et al. Recyclable low-temperature phase change microcapsules for cold storage. Journal of Colloid and Interface Science 564 (2020): 286-295.
- [2] Zhao, Y., Zhang, X., and Xu, X. Application and research progress of cold storage technology in cold chain transportation and distribution. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 139(2) (2020): 1419-1434.
- [3] Olivieri, L., Tenorio, J.A., Revuelta, D., Navarro, L., and Cabeza, L.F. Developing a PCM-enhanced mortar for thermally active precast walls. Construction and Building Materials 181 (2018): 638-649.
- [4] Wang, Q., Wu, R., Wu, Y., and Zhao, C.Y. Parametric analysis of using PCM walls for heating loads reduction. Energy and Buildings 172 (2018): 328-336.
- [5] Mäkinen, M. 3 - Introduction to phase change materials. in Mattila, H.R. (ed.) Intelligent Textiles and Clothing, pp. 21-33: Woodhead Publishing, 2006.
- [6] Kamali, S. Review of free cooling system using phase change material for building. Energy and Buildings 80 (2014): 131-136.
- [7] Pause, B. 9 - Phase change materials and their application in coatings and laminates for textiles. in Smith, W.C. (ed.) Smart Textile Coatings and Laminates, pp. 236-250: Woodhead Publishing, 2010.
- [8] Hassan, A., Laghari, M., and Rashid, Y. Micro-Encapsulated Phase Change Materials: A Review of Encapsulation, Safety and Thermal Characteristics. Sustainability 8 (2016): 1046.
- [9] Ghani, S., Jamari, S., and Abidin, S. Waste materials as the potential phase change material substitute in thermal energy storage system: a review. Chemical Engineering Communications 208 (2020): 1-21.
- [10] Giro-Paloma, J., Martínez, M., Cabeza, L.F., and Fernández, A.I. Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 53 (2016): 1059-1075.
- [11] Huan, L., Wang, X., and Wu, D. Innovative design of microencapsulated phase

- change materials for thermal energy storage and versatile applications: A review. Sustainable Energy & Fuels 3 (2019).
- [12] Zhang, N. and Yuan, Y. Synthesis and thermal properties of nanoencapsulation of paraffin as phase change material for latent heat thermal energy storage. Energy and Built Environment 1(4) (2020): 410-416.
- [13] Merline, D.J., Vukusic, S., and Abdala, A.A. Melamine formaldehyde: curing studies and reaction mechanism. Polymer Journal 45(4) (2013): 413-419.
- [14] Bauer, D.R. Melamine/formaldehyde crosslinkers: characterization, network formation and crosslink degradation. Progress in Organic Coatings 14(3) (1986): 193-218.
- [15] พรทิพย์ รัตจักร์, ว.บ., ทศนีย์ สกุดดำรงคัพพานิช. การบรรจุหีบห่อเพื่อการขนส่งโลहितและส่วนประกอบ โลहितด้วยกล่อง Expandable Polypropylene(EPP box), Gel ทำความเย็น Butanediol Gel(BD gel) และ Gel Ice. วารสารโลहितวิทยาและเวชศาสตร์บริการโลहित 4 (2013): 255-268.
- [16] Sari, A., Alkan, C., and Karaipekli, A. Preparation, characterization and thermal properties of PMMA/n-heptadecane microcapsules as novel solid-liquid microPCM for thermal energy storage. Applied Energy 87(5) (2010): 1529-1534.
- [17] Palanikkumaran, M., Gupta, K., Agrawal, A., and Jassal, M. Effect of emulsion preparation method on microencapsulation of n-octadecane using melamine-formaldehyde pre-polymers. Indian Journal of Fibre and Textile Research 35 (2010): 101-106.
- [18] Wang, Y., Liu, Z., Niu, X., and Ling, X. Preparation, Characterization, and Thermal Properties of Microencapsulated Phase Change Material for Low-Temperature Thermal Energy Storage. Energy & Fuels 33(2) (2019): 1631-1636.
- [19] Naikwadi, A.T., Samui, A.B., and Mahanwar, P.A. Melamine-formaldehyde microencapsulated n-Tetracosane phase change material for solar thermal energy storage in coating. Solar Energy Materials and Solar Cells 215 (2020): 110676.
- [20] Irani, F., Ranjbar, Z., Moradian, S., and Jannesari, A. Microencapsulation of n-heptadecane phase change material with starch shell. Progress in Organic Coatings 113 (2017): 31-38.

- [21] Zhang, G.H., Bon, S.A.F., and Zhao, C.Y. Synthesis, characterization and thermal properties of novel nanoencapsulated phase change materials for thermal energy storage. Solar Energy 86(5) (2012): 1149-1154.
- [22] Butstraen, C., Salaün, F., Devaux, E., Giraud, S., and Vroman, P. Application of Flame-Retardant Double-Layered Shell Microcapsules to Nonwoven Polyester. Polymers 8 (2016): 267.
- [23] Valot, P., Baba, M., Nedelec, J.M., and Sintès-Zydowicz, N. Effects of process parameters on the properties of biocompatible Ibuprofen-loaded microcapsules. International Journal of Pharmaceutics 369(1) (2009): 53-63.
- [24] Wei, Y., Wang, Y., Wang, L., Hao, D., and Ma, G. Fabrication strategy for amphiphilic microcapsules with narrow size distribution by premix membrane emulsification. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 87(2) (2011): 399-408.
- [25] Tumolva, T. and Sabarillo, N. Characterization of MEPCM-Incorporated Paint as Latent Heat Storage System. International Journal of Chemical Engineering and Applications 8 (2017): 203-209.
- [26] Su, J.-F., et al. Fabrication and interfacial morphologies of methanol–melamine–formaldehyde (MMF) shell microPCMs/epoxy composites. Colloid and Polymer Science 289(2) (2011): 169-177.

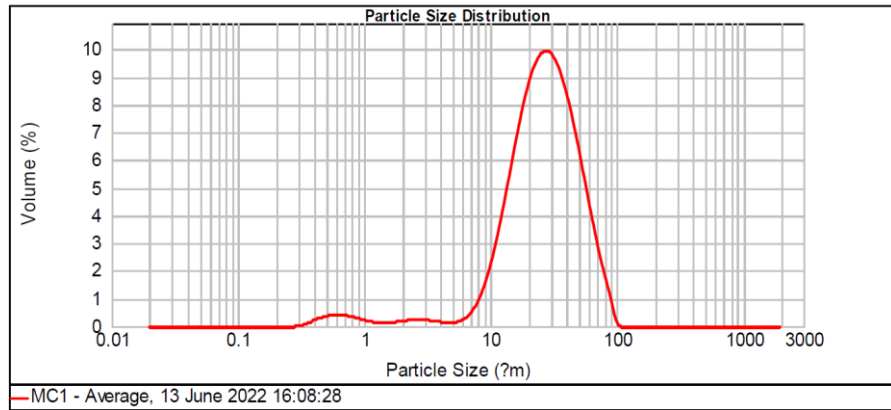


ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

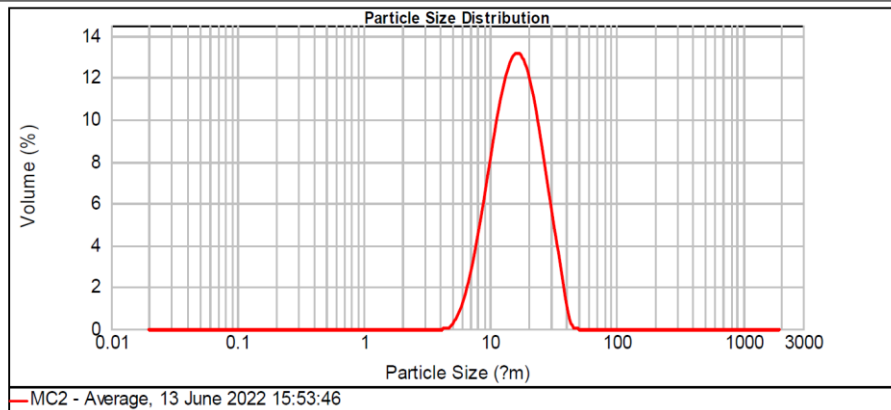
ภาคผนวก ก

d(0.1): 11.347 um d(0.5): 26.230 um d(0.9): 54.384 um



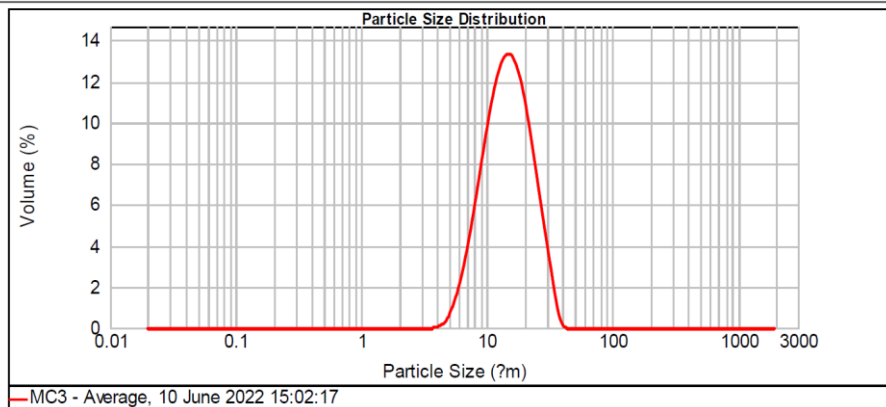
รูปที่ ก.1 รูป Particle size distribution ของ MC1

d(0.1): 8.986 um d(0.5): 16.035 um d(0.9): 27.869 um

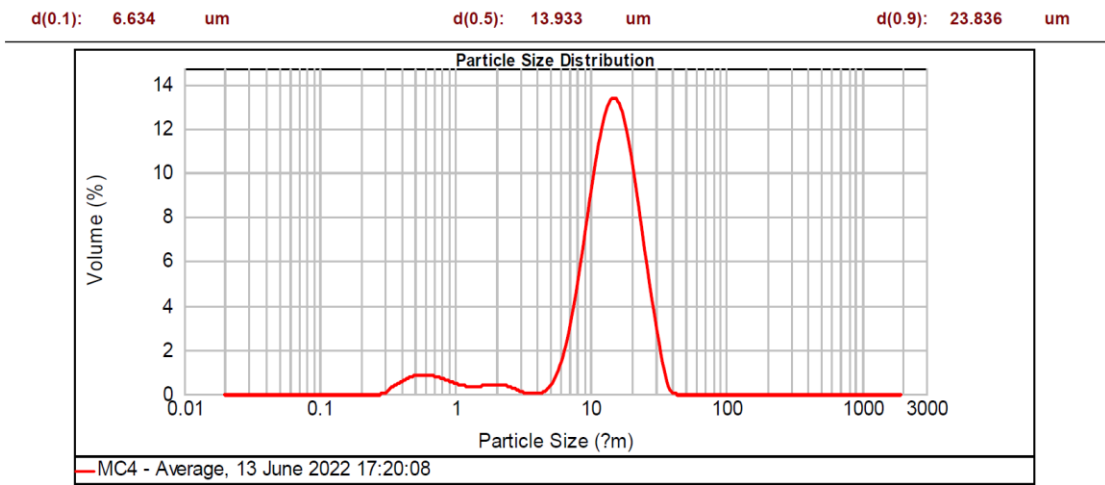


รูปที่ ก.2 รูป Particle size distribution ของ MC2

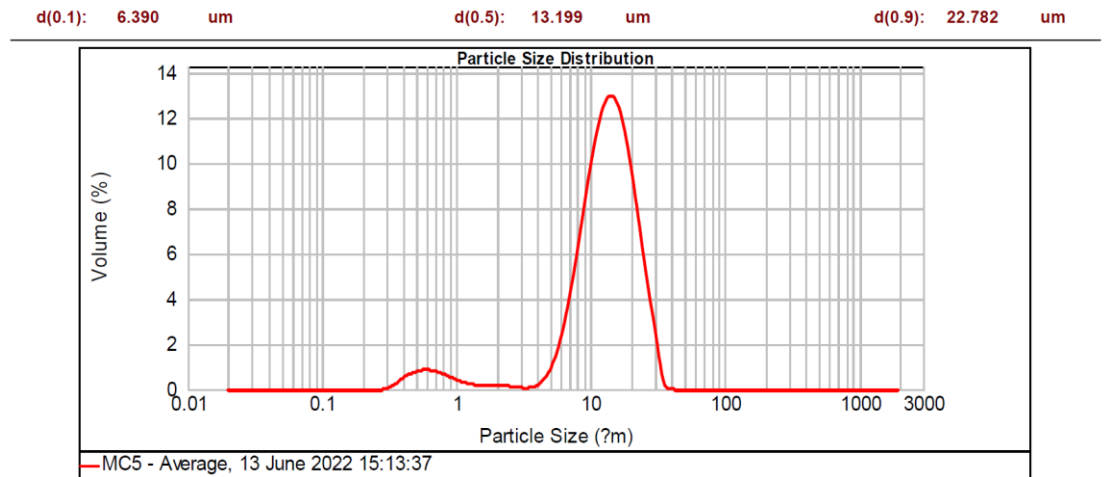
d(0.1): 8.138 um d(0.5): 14.456 um d(0.9): 24.890 um



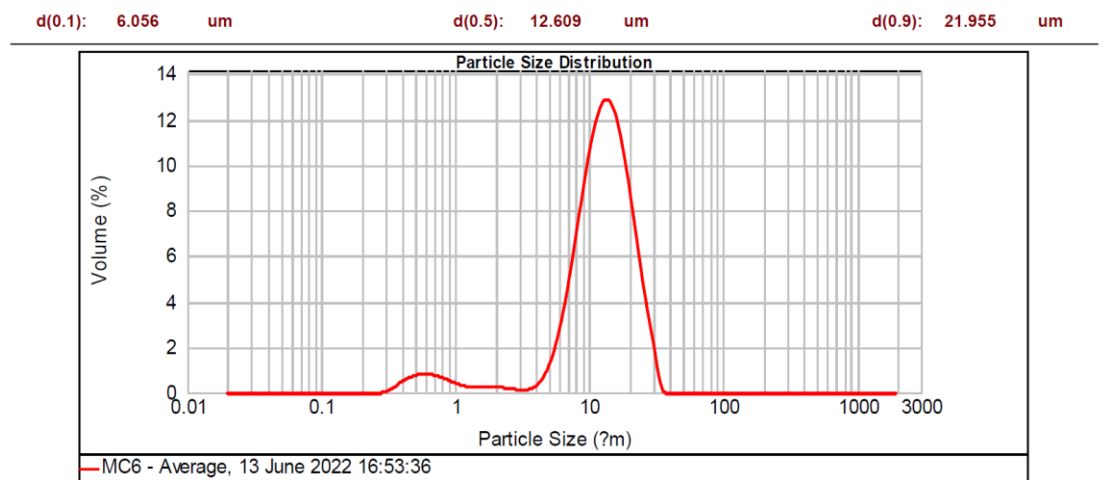
รูปที่ ก.3 รูป Particle size distribution ของ MC3



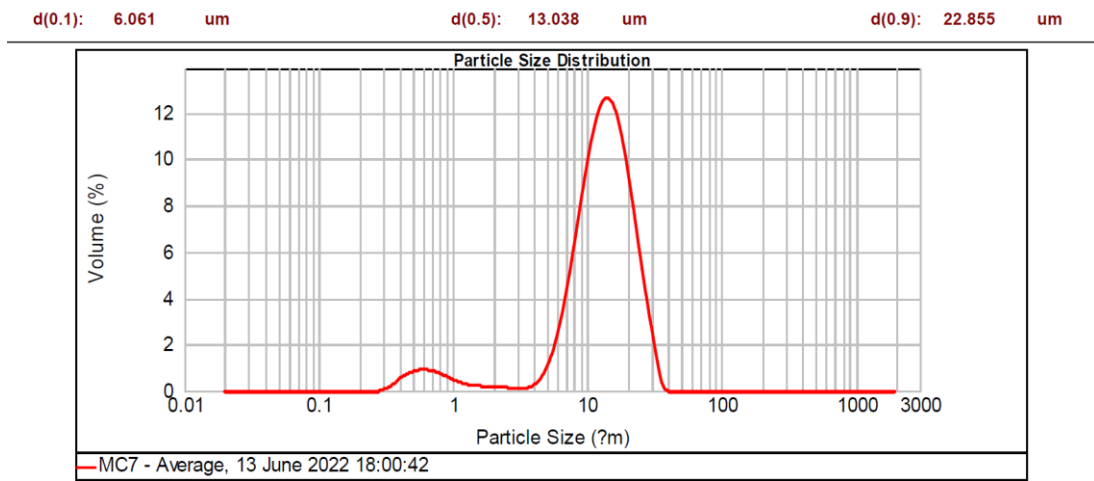
รูปที่ ก.4 รูป Particle size distribution ของ MC4



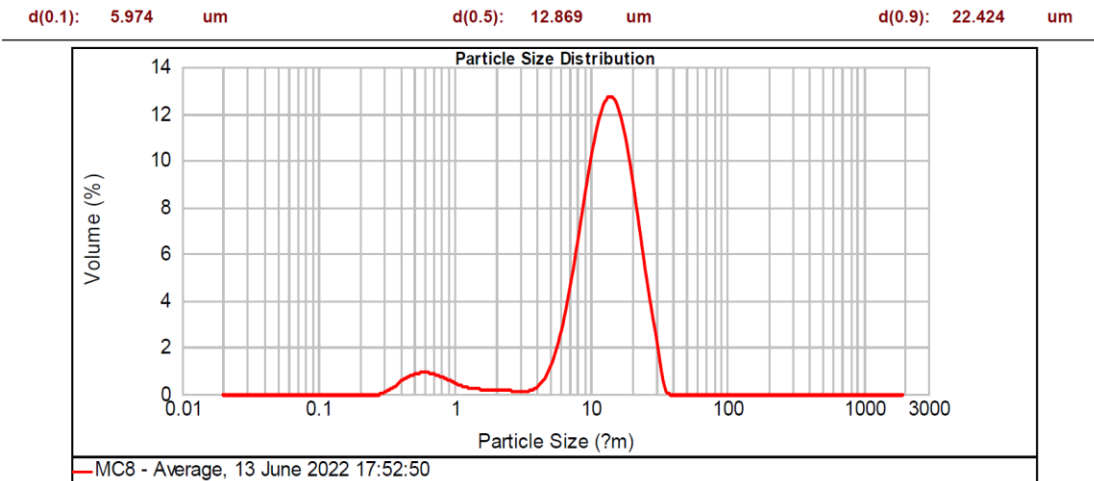
รูปที่ ก.5 รูป Particle size distribution ของ MC5



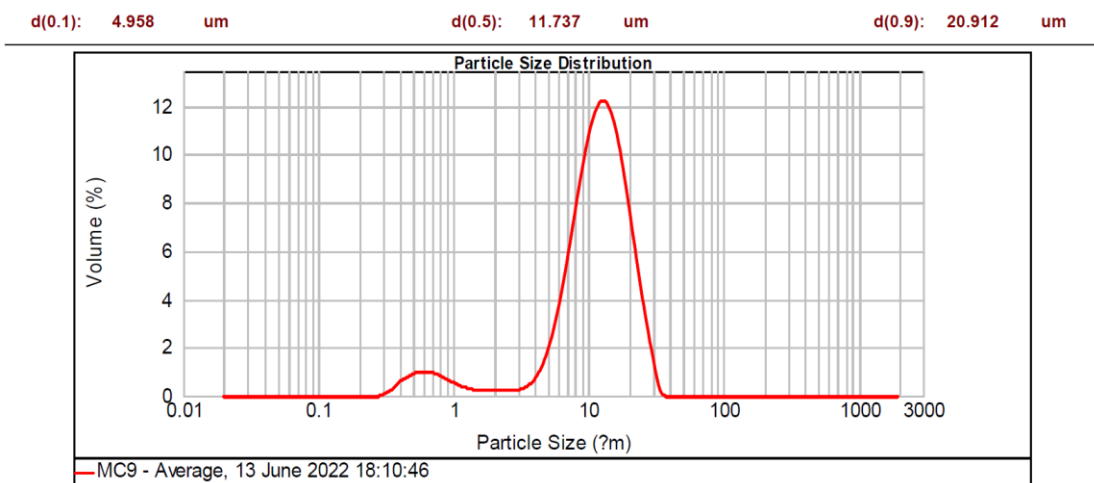
รูปที่ ก.6 รูป Particle size distribution ของ MC6



รูปที่ ก.7 รูป Particle size distribution ของ MC7

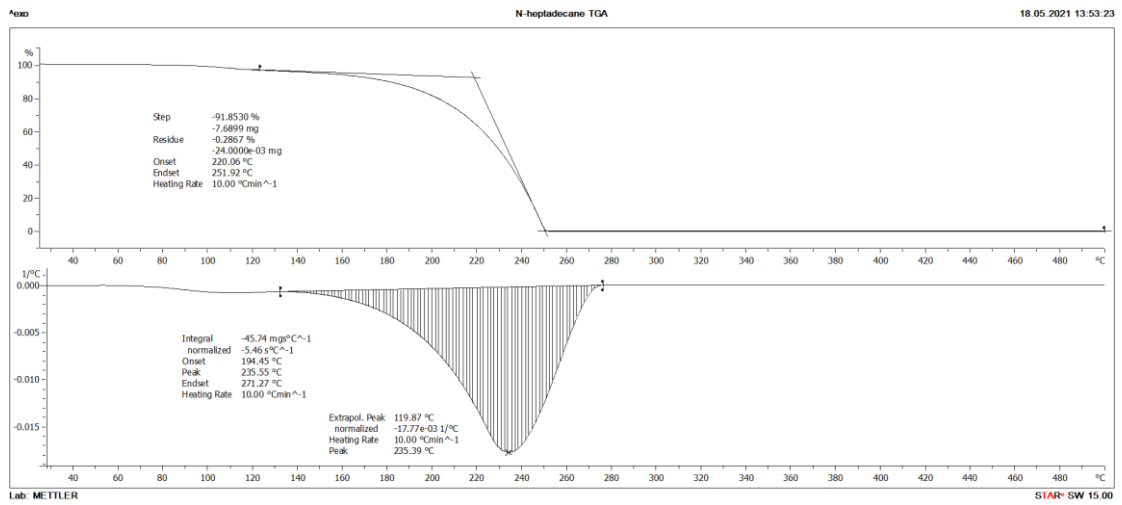


รูปที่ ก.8 รูป Particle size distribution ของ MC8

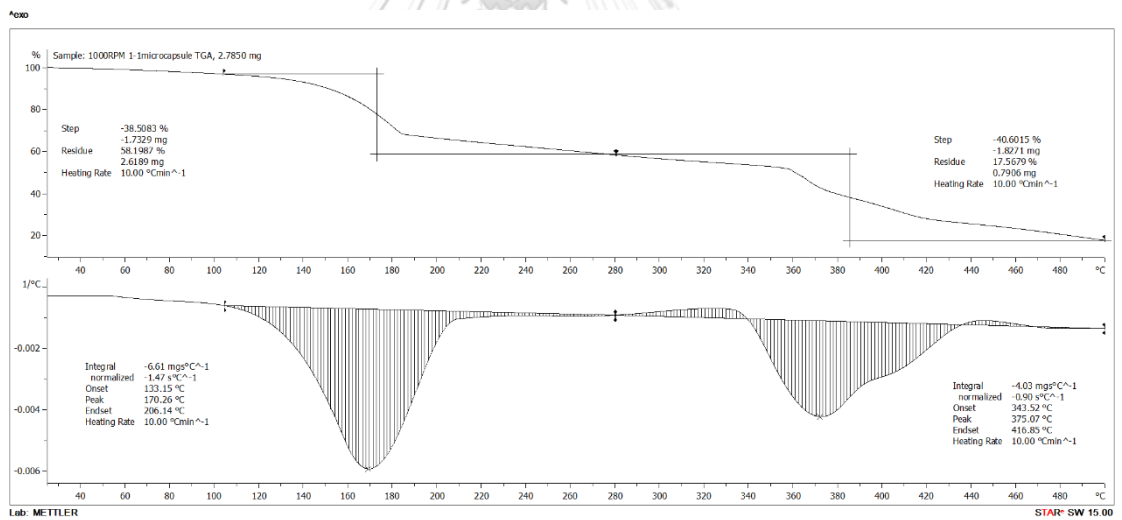


รูปที่ ก.9 รูป Particle size distribution ของ MC9

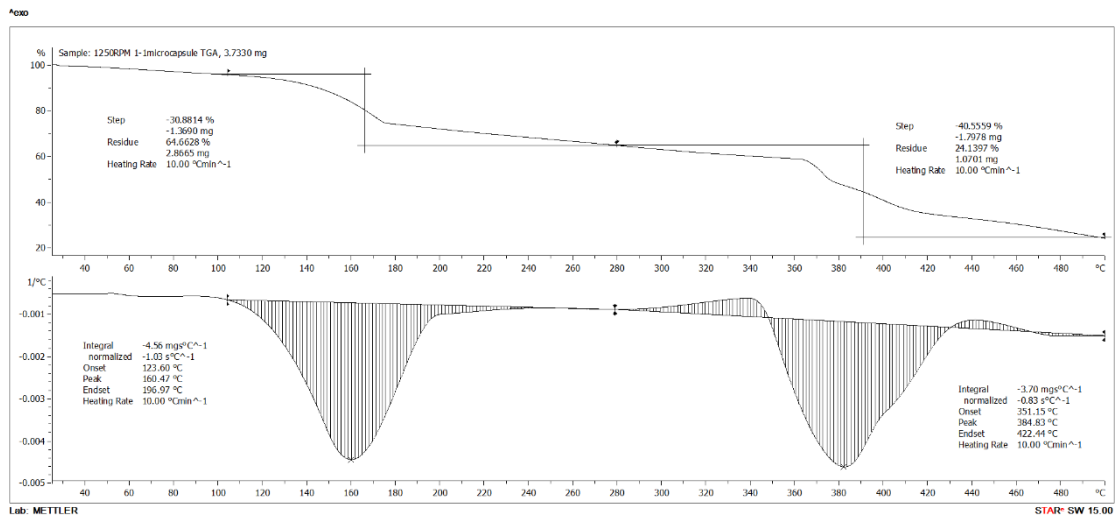
ภาคผนวก ข



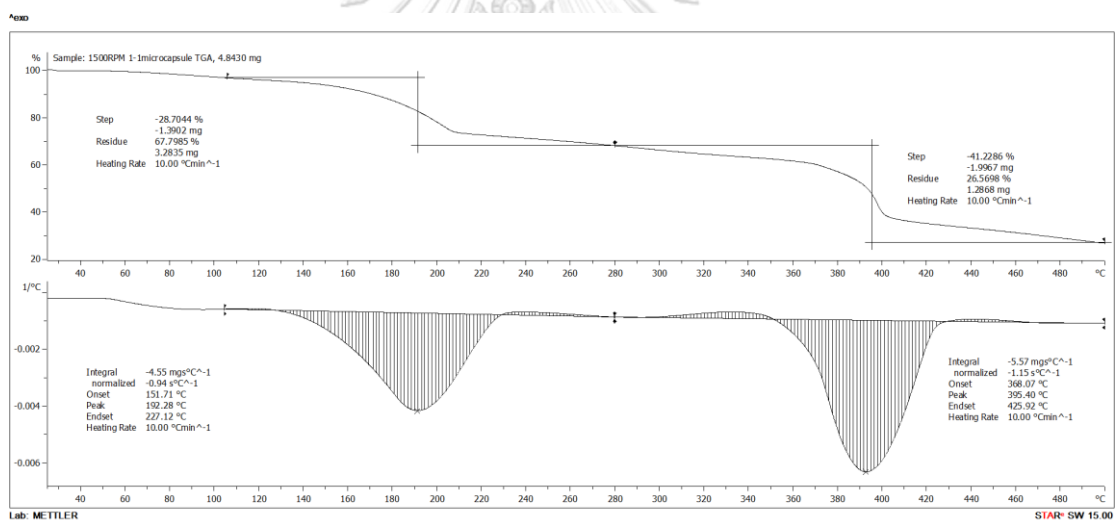
รูปที่ ข.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ n-heptadecane



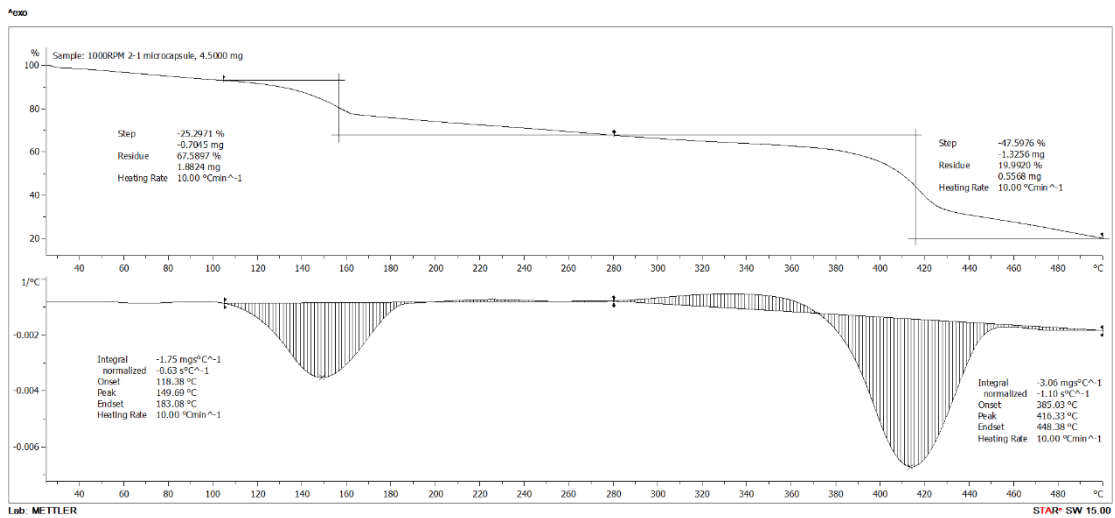
รูปที่ ข.2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ MC1



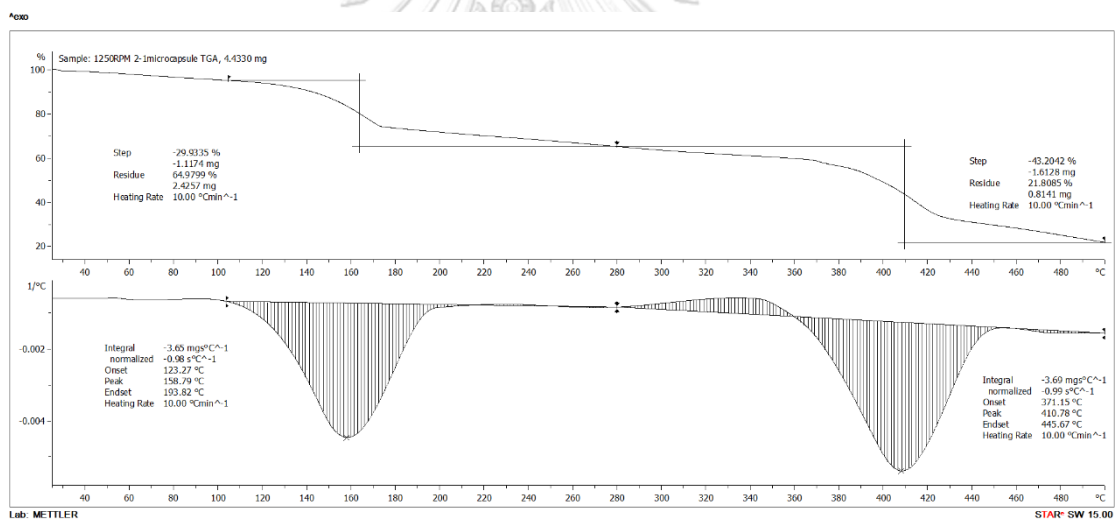
รูปที่ ข.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ MC2



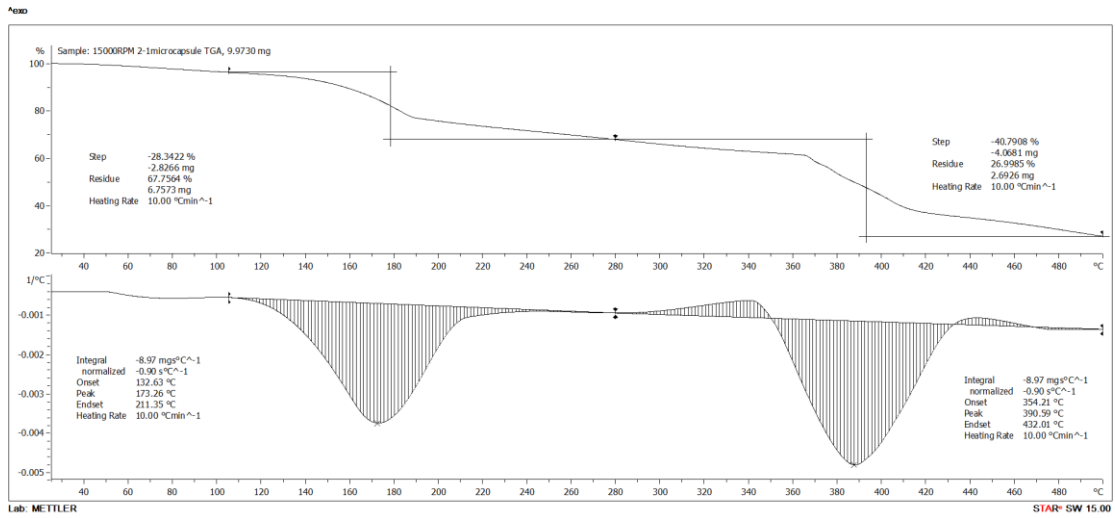
รูปที่ ข.4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ MC3



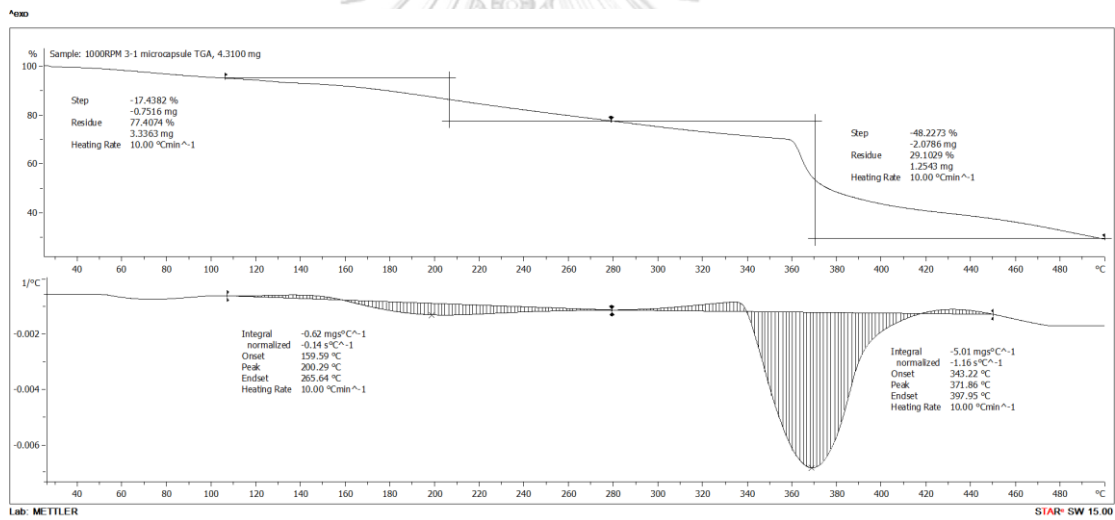
รูปที่ ข.5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ MC4



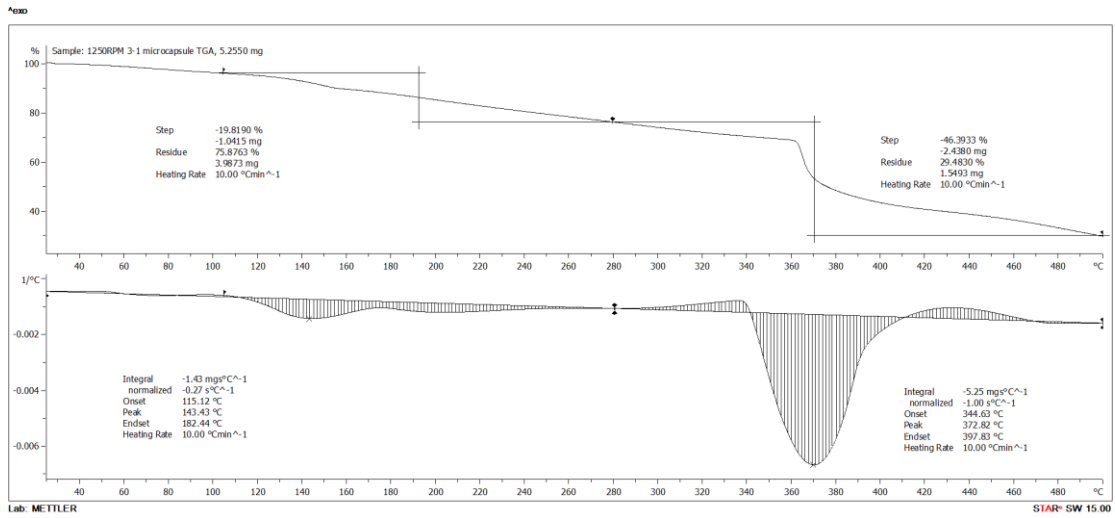
รูปที่ ข.6 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ MC5



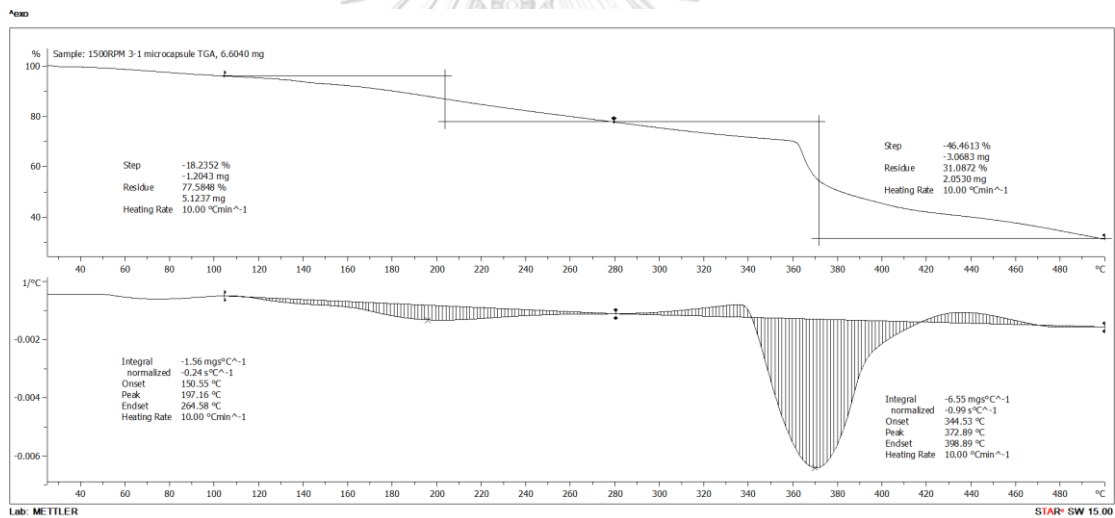
รูปที่ ข.7 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ MC6



รูปที่ ข.8 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ MC7

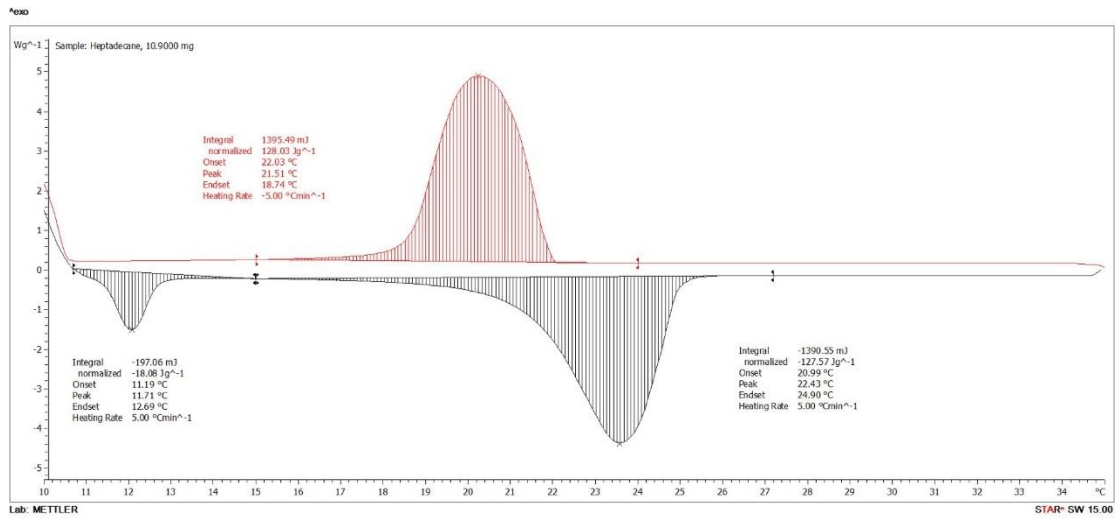


รูปที่ ข.9 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ MC8

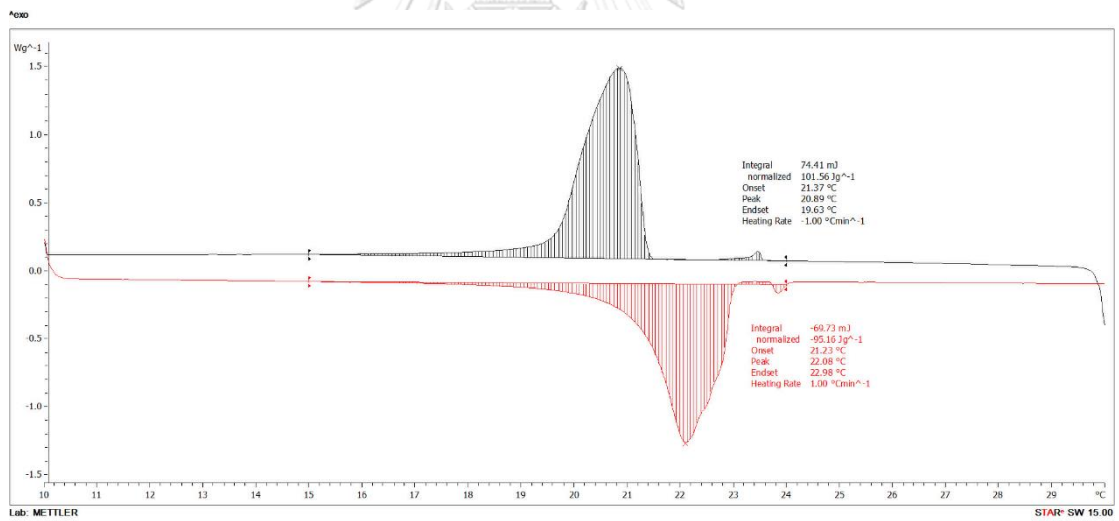


รูปที่ ข.10 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ MC9

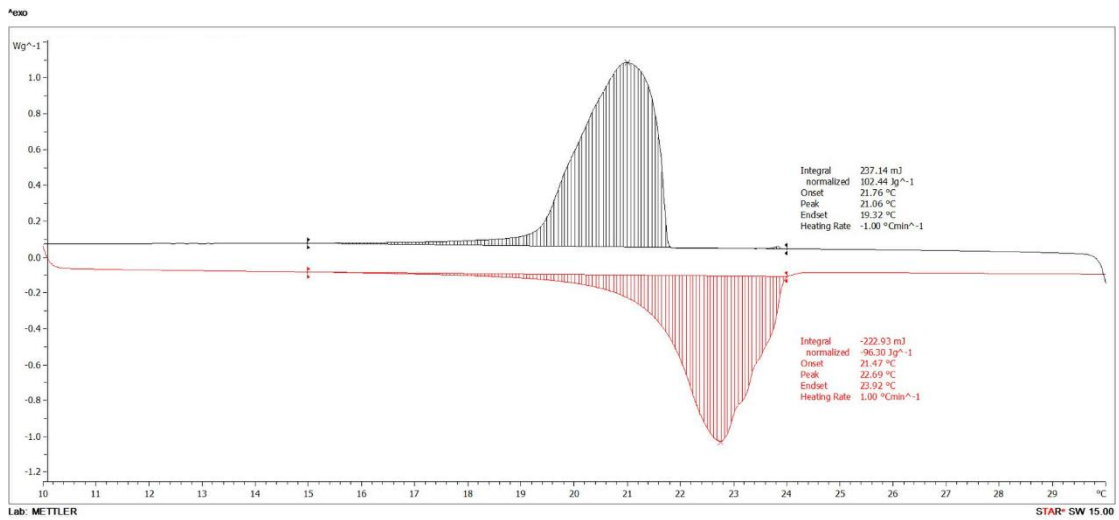
ภาคผนวก ค



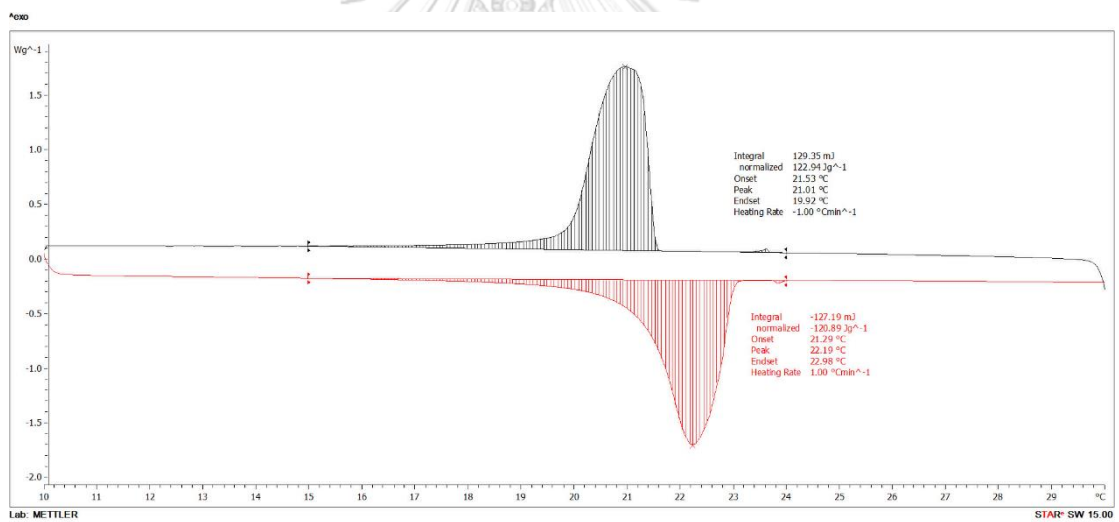
รูปที่ ค.1 DSC เทอร์โมแกรมของ n-heptadecane



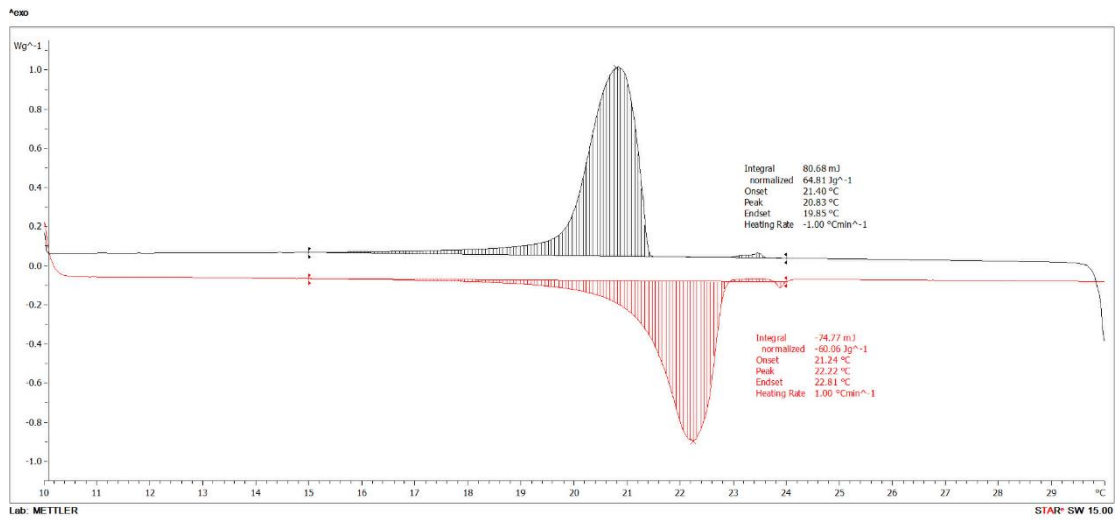
รูปที่ ค.2 DSC เทอร์โมแกรมของ MC1



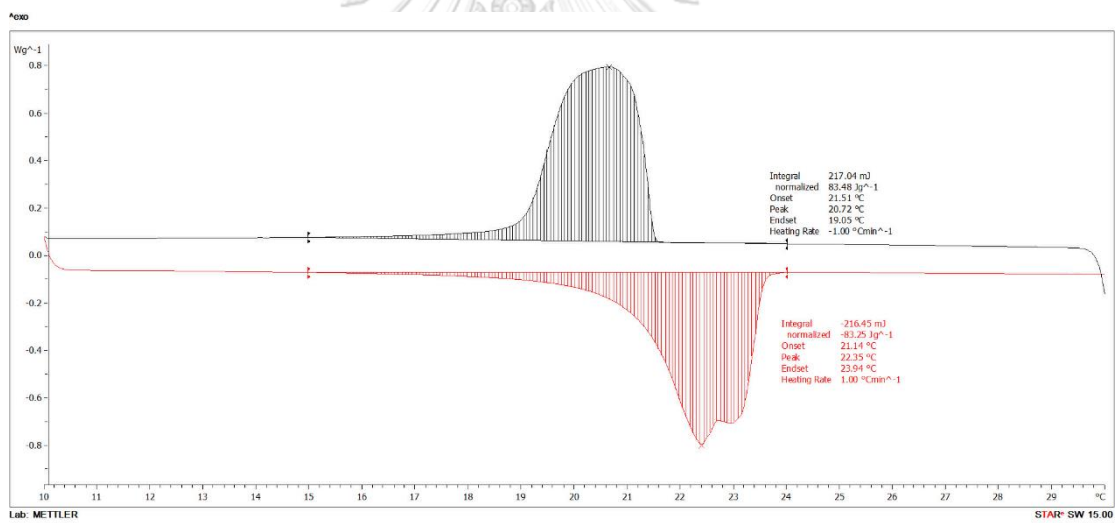
รูปที่ ค.3 DSC เทอร์โมแกรมของ MC2



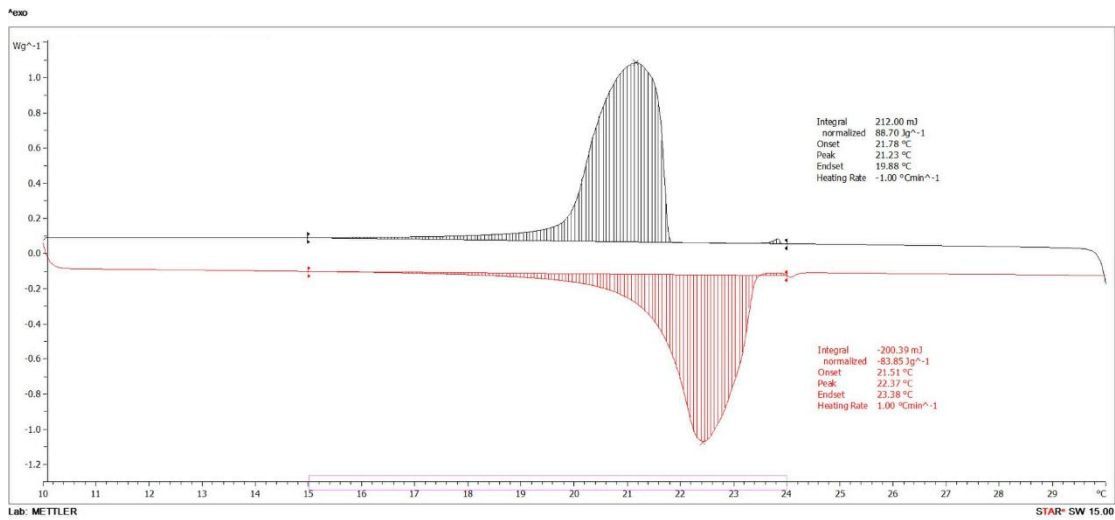
รูปที่ ค.4 DSC เทอร์โมแกรมของ MC3



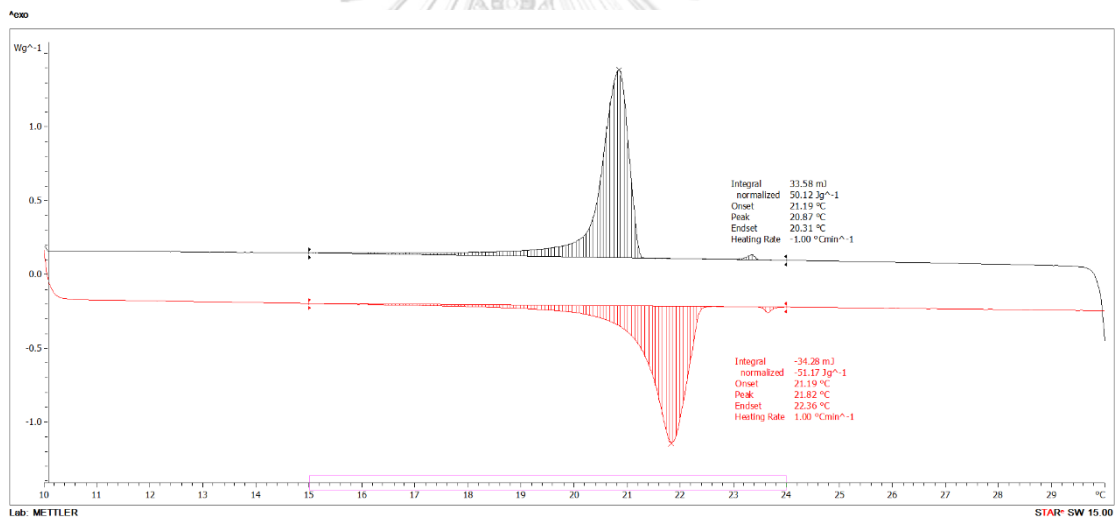
รูปที่ ค.5 DSC เทอร์โมแกรมของ MC4



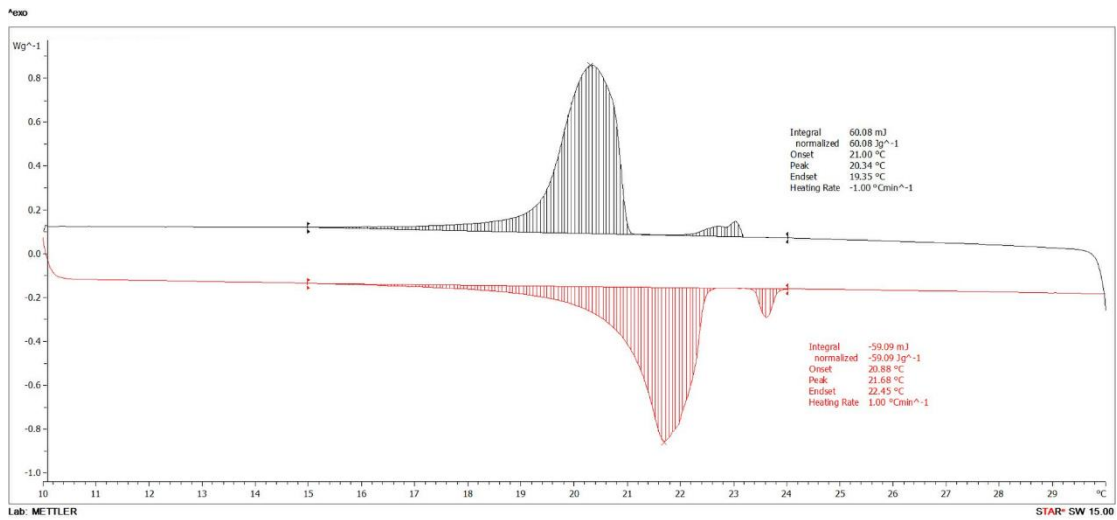
รูปที่ ค.6 DSC เทอร์โมแกรมของ MC5



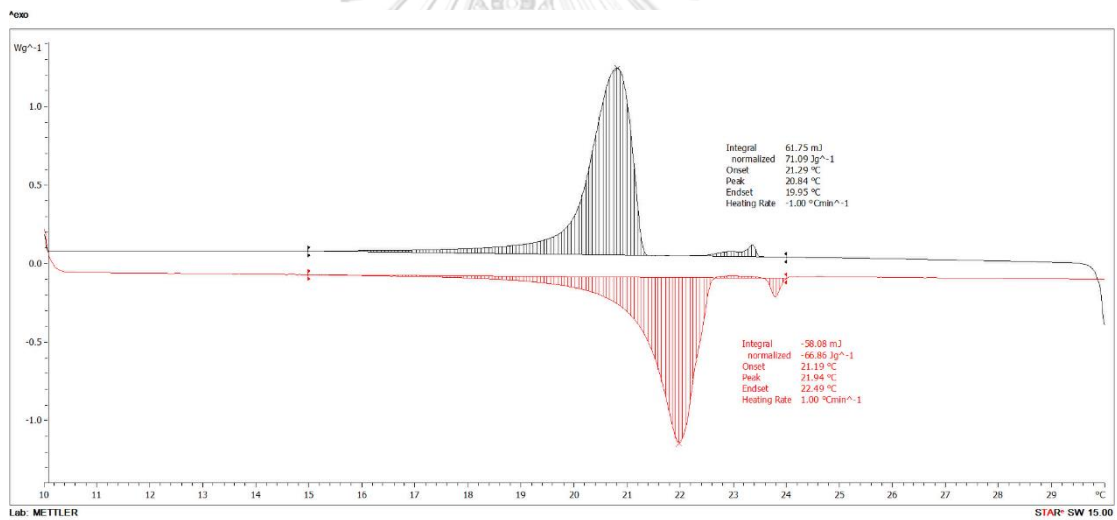
รูปที่ ค.7 DSC เทอร์โมแกรมของ MC6



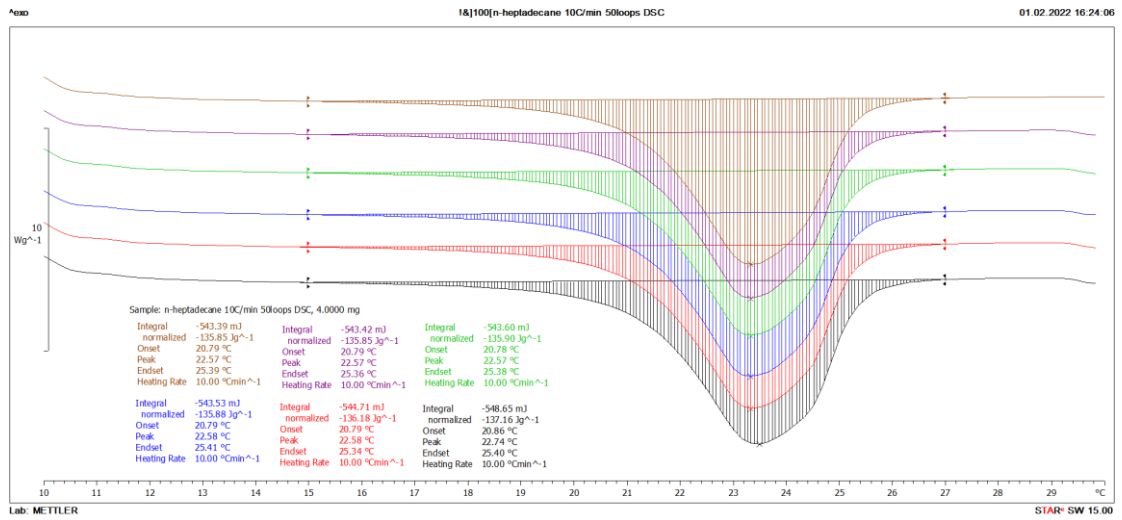
รูปที่ ค.8 DSC เทอร์โมแกรมของ MC7



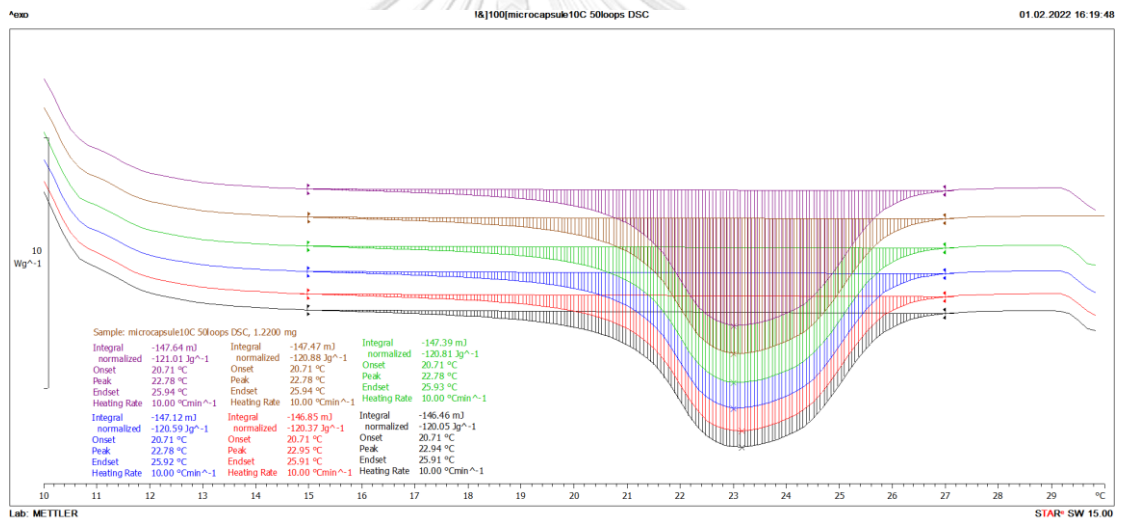
รูปที่ ค.9 DSC เทอร์โมแกรมของ MC8



รูปที่ ค.10 DSC เทอร์โมแกรมของ MC9

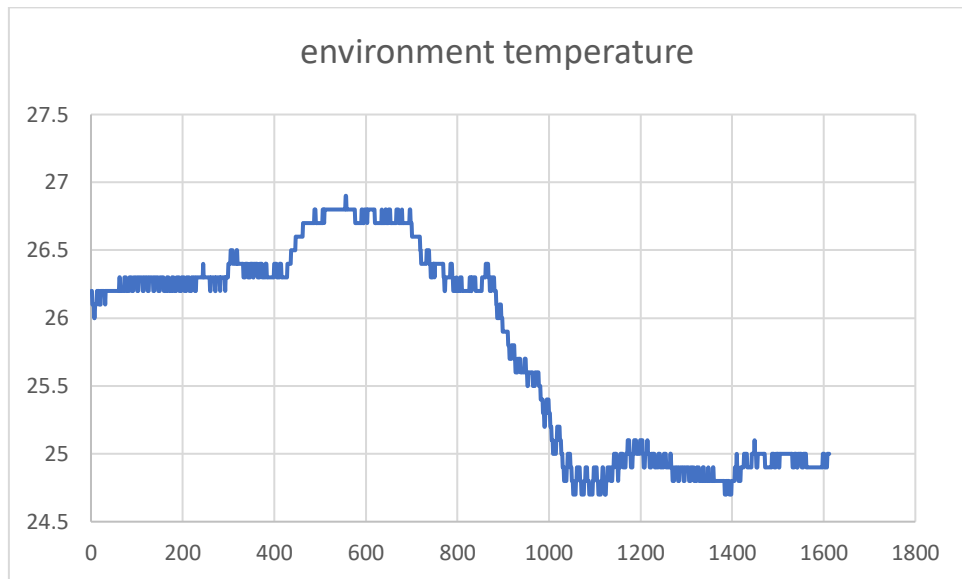


รูปที่ ค.11 DSC เทอร์โมแกรมของ n-heptadecane ทดลอง heating-cooling cycle 50 รอบ

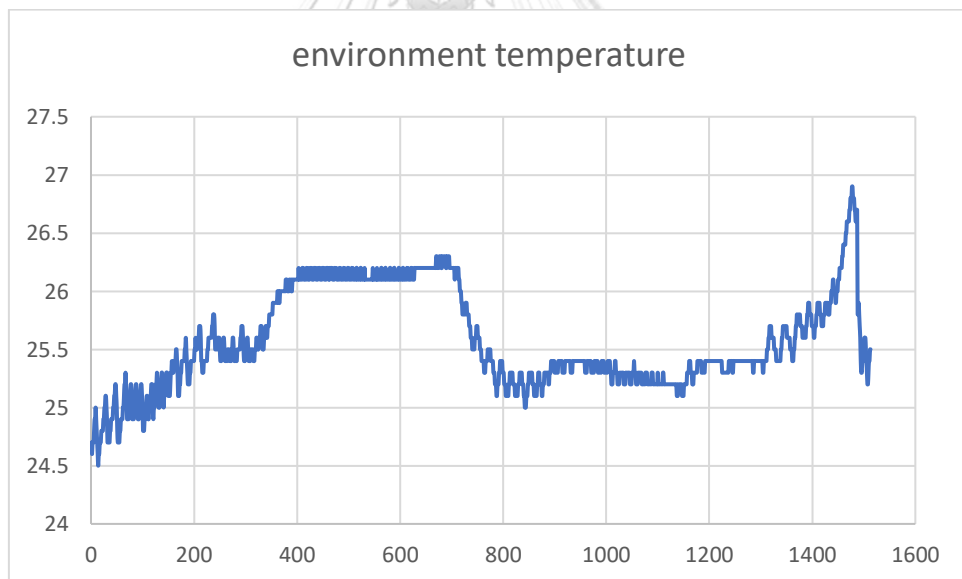


รูปที่ ค.12 DSC เทอร์โมแกรมของ MC3 ทดลอง heating-cooling cycle 50 รอบ

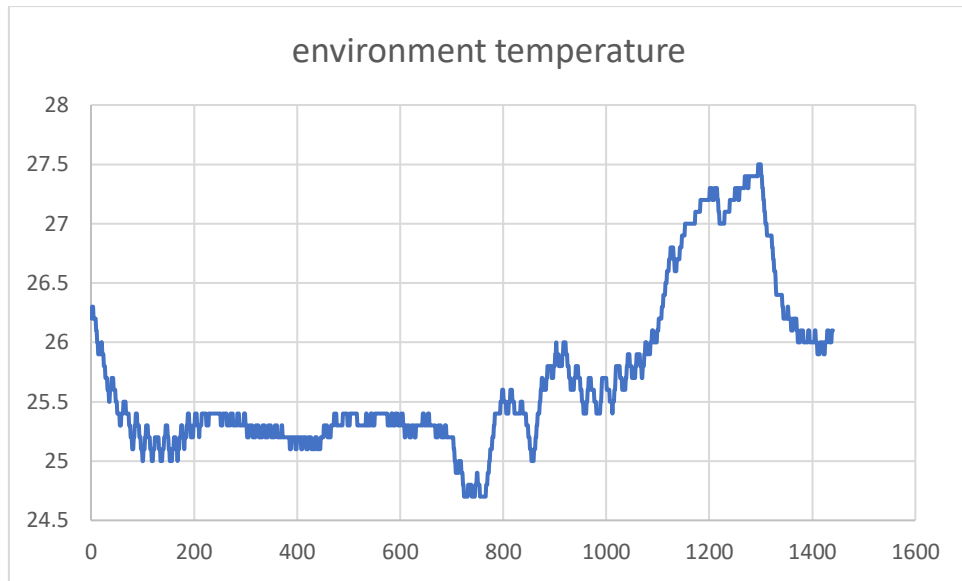
ภาคผนวก ง



รูปที่ ง.1 รูป temperature profile ของอุณหภูมิภายนอกกล่องของการทดลอง รูปที่ 4.16



รูป ง.2 รูป temperature profile ของอุณหภูมิภายนอกกล่องของการทดลอง รูปที่ 4.17



รูป ง.2 รูป temperature profile ของอุณหภูมิภายนอกกล่องของการทดลอง รูปที่ 4.18 และ 4.19



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พสธร ลิ้มปธนโชติ
วัน เดือน ปี เกิด	17 เมษายน 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์
ที่อยู่ปัจจุบัน	45/33 ถนนกัลปพฤกษ์ แขวงบางหว้า เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY