



รายงานการวิจัยเรื่อง

**การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์แคปซูล
ที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนโดยใช้ยางธรรมชาติ**

**(Improvement of Polymer Capsule Encapsulated
Heat Storage Materials with Natural Rubber)**

ผู้วิจัย

ดร.ปริยาภรณ์ ไชยสัตย์

ดร.อมร ไชยสัตย์

ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พฤษภาคม 2554

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อน โดยใช้ยางธรรมชาติ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ทีมผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย (รหัสโครงการ 44703) และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนปัจจัยต่างๆในการดำเนินงานวิจัย

ขอบคุณ นางสาวเกศราพร สงครามรอด นางสาวจันทร์ฉาย วารี นางสาวปิยวรรณ ศิริทิพย์ และนางสาววิลาวัลย์ วรรณช ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยในการดำเนินงานและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยส่วนหนึ่ง นอกจากนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เตรียมได้

ท้ายที่สุด ขอขอบคุณที่ปรึกษาโครงการ และผู้สนับสนุนงานวิจัยทุกท่านที่ให้คำแนะนำจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัย

พฤษภาคม 2554

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ศึกษาการเตรียมพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดคเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อนด้วยวิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอยที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงโดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และมีพอลิไควนิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นสารป้องกันการรวมตัวกันของหยดมอนอเมอร์ และใช้อัตราการปั่นเตรียมหยดมอนอเมอร์ที่ 5,000 รอบต่อนาที เวลา 5 นาที ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ คือ น้ำหนักโมเลกุลและปริมาณของยางธรรมชาติ โดยลดน้ำหนักยางธรรมชาติที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธีการออกซิเดชัน ซึ่งมีสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นสารออกซิไดซ์โดยใช้ปริมาตรต่างๆ ร่วมกับการเขย่าด้วยคลื่นความถี่ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (308,130 g/mol) ไม่สามารถเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลได้ แต่เมื่อใช้ยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol และมีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2 โดยใช้ปริมาณ 1 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเตรียมเป็นพอลิเมอร์แคปซูลได้ เมื่อทำการทดสอบหาค่าอุณหภูมิและค่าความร้อนในการเปลี่ยนสถานะของออกตะเดคเคนพบว่า ออกตะเดคเคนที่อยู่ภายในพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล มีค่าความร้อนในการหลอมเหลวและแข็งตัวประมาณ 153.0 J/g-OD และมีค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวและแข็งตัวประมาณ 19-33 องศาเซลเซียส และ 23-10 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่ค่าความร้อนในการหลอมเหลวและแข็งตัวของออกตะเดคเคนที่อยู่ภายในพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลมีค่าลดลง ในขั้นตอนสุดท้าย ได้ทดลองนำแคปซูลที่เตรียมได้ไปเคลือบผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการ Pad-Dry-Cure โดยใช้อะคริลิกอิมัลชันเป็นสารตัวเชื่อม

คำสำคัญ ออกตะเดคเคน วัสดุเก็บความร้อน ยางธรรมชาติ พอลิเมอร์แคปซูล

ABSTRACT

In this project, the preparation of polydivinylbenzene/natural rubber (PDVB/NR) capsule encapsulated octadecane as heat storage material by suspension polymerization was studied at 80 °C for 8 hours. Benzoyl peroxide 8 weight percent of DVB and 1 weight percent polyvinyl alcohol were used as initiator and stabilizer, respectively. The monomer droplets were prepared using homogenization at 5,000 rpm for 5 minutes. The influences of molecular weight and amount of NR were considered using lowered molecular weight NR prepared by oxidation with 3% v/v hydrogen peroxide and 5 %w/v potassium persulphate solution combination with the sonication. It was found that using high molecular weight NR (308,130 g/mol) could not prepared polymer capsule. In contrast, the polymer capsules were formed with NR having lower molecular weight about 162,519 g/mol and polydispersity index about 2 using 1 and 2.5 %weight of DVB. The heats of melting and solidification of octadecane in PDVB capsule were about 153.0 J/g-OD whereas the melting and solidification temperatures were about 19-33 and 23-10 °C, respectively. However, heats of melting and solidification of octadecane in PDVB/NR capsule were decreased. Finally, the prepared capsule was coated on cotton fabric by pad-dry-cure method using acrylic emulsion as binder.

Keywords: Octadecane, Heat storage materials, Natural rubber, Polymer capsule

คำนำ

โครงการวิจัยเรื่อง การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนโดยใช้ยางธรรมชาติ (รหัสโครงการ 44703) เป็นการศึกษาการเตรียมพอลิไดไวนิลเบนซีนและยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดเคนโดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอย ซึ่งอาศัยกลไกการแยกวัฏภาคภายในของพอลิไดไวนิลเบนซีนและยางธรรมชาติกับออกตะเดเคน เกิดเป็นชั้นของพอลิไดไวนิลเบนซีนชั้นนอกและยางธรรมชาติเป็นเปลือกชั้นในหุ้มออกตะเดเคนอยู่ใน พอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้นี้ สามารถนำไปใช้งานในด้านต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้ มีจุดมุ่งหมายในการลดการใช้มอนอเมอร์ที่มาจากปิโตรเลียมและปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงและยืดหยุ่นของแคปซูล เพื่อให้มีความคงทนและป้องกันการแตกระหว่างการใช้งานโดยการใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ คือ ยางธรรมชาติ ซึ่งมีสมบัติยืดหยุ่นสูง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งทอ เช่น เตรียมผ้าที่ปรับสภาพตามอุณหภูมิได้ งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์พอลิเมอร์แคปซูลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียม และนำพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติด้วยเทคนิคต่างๆ จากนั้น ได้นำพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้ไปทดลองเคลือบผ้า

ทีมผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะมีประโยชน์ทั้งทางการศึกษา การวิจัย และอุตสาหกรรม โดยให้ข้อมูลและเป็นแนวทางในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆต่อไป

ผู้วิจัย

พฤษภาคม 2554

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
คำนำ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของที่มาและปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ชนิดและสมบัติของวัสดุเก็บความร้อน	5
2.2 เทคนิคในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูล	6
2.3 สมบัติทางความร้อนของวัสดุเก็บความร้อนแฝงในพอลิเมอร์แคปซูล	11
2.4 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุเก็บความร้อน	13
2.5 ยางธรรมชาติ	15
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์	19
3.2 การทดลอง	
3.2.1 การเตรียมมอนอเมอร์ให้บริสุทธิ์	20
3.2.2 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 1%w/v	21
3.2.3 การลดน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติ	22
3.2.4 การสังเคราะห์อนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีน	22
3.2.5 การสังเคราะห์พอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติ แคปซูลที่หุ้ม ออกตะเดกเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อน	23
3.2.6 การหาลักษณะเฉพาะและทดสอบสมบัติของอนุภาคพอลิเมอร์และ พอลิเมอร์แคปซูล	26
3.2.7 การเคลือบผ้าด้วยพอลิเมอร์แคปซูล	27

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	
4.1 การเตรียมอนุภาคพอลิไดไวนิลเบนซีนด้วยกระบวนการสังเคราะห์ พอลิเมอร์แบบแขวนลอย	29
4.2 การเตรียมพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้ม ออกตะเดกเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อนด้วยกระบวนการสังเคราะห์ พอลิเมอร์แบบแขวนลอย	30
4.2.1 การศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ	32
4.2.2 การศึกษาผลของปริมาณของยางธรรมชาติ	35
4.3 การหาลักษณะเฉพาะและทดสอบสมบัติของอนุภาคพอลิเมอร์และ พอลิเมอร์แคปซูล	37
4.4 การเคลือบผ้าด้วยพอลิเมอร์แคปซูล	42
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	44
เอกสารอ้างอิง	46
ภาคผนวก	

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การเกิดการลดลงของประสิทธิภาพในการเก็บและถ่ายเทความร้อน และการเกิดการเย็นตัวยิ่งยวดของแคปซูลของพอลิไคไวนิลเบนซีนที่หุ้มเฮกซะเดเคน	2
1.2 Scanning electron micrograph แสดงการแตกของพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้ม ออกตะเดเคน	2
2.1 การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลของพอลิไคไวนิลเบนซีนที่หุ้มออกตะเดเคน โดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอย	6
2.2 Optical micrograph ของพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มออกตะเดเคน โดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอย	7
2.3 Optical micrograph ของพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มเฮกซะเดเคน ที่เตรียมหดยคมอนอเมอร์ด้วยซิระซู พอร์ส กลาส เมมเบรน แล้วสังเคราะห์แบบแขวนลอย	8
2.4 รูป TEM ของพอลิสไตรีนที่หุ้มออกตะเดเคนซึ่งเตรียมโดยการสังเคราะห์ แบบมินิอิมัลชัน	8
2.5 รูป SEM ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่หุ้มออกตะโคเซนซึ่งเตรียมโดย การสังเคราะห์แบบอิมัลชัน	9
2.6 กลไกการเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคอิมัลชัน	10
2.7 ค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของเฮกซะเดเคนที่อยู่ใน โคพอลิเมอร์ แคปซูลของไคไวนิลเบนซีน-อะคริเลต ชนิดของอะคริเลตมอนอเมอร์: ○ เมทิลอะคริเลต □ เอทิลอะคริเลต และ Δ บิวทิลอะคริเลต	11
2.8 ภาพตัดขวางของอนุภาคพอลิเมอร์แคปซูลของพอลิไคไวนิลเบนซีน (a) และ พอลิไคไวนิลเบนซีน-บิวทิลอะคริเลต (b) ที่หุ้มเฮกซะเดเคน	12
2.9 การเกิดการเย็นตัวอย่างยิ่งยวดของเฮกซะเดเคนที่อยู่ในพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูล	13
2.10 ต้นยางพาราและน้ำยางพารา	15
2.11 โครงสร้างทางเคมีของ cis-1,4-polyisoprene	17
2.12 ลักษณะทางกายภาพของน้ำยางธรรมชาติ	17
3.1 การเตรียมไคไวนิลเบนซีนให้บริสุทธิ์	21
3.2 การสังเคราะห์พอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้ม ออกตะเดเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อน	25
3.3 แผนภาพการสังเคราะห์พอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้ม ออกตะเดเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อน โดยการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 Optical micrograph ของอนุภาคพอลิไควนิลเบนซีน	29
4.2 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคพอลิไควนิลเบนซีนที่เตรียมได้เมื่อตั้งทิ้งไว้: a) อนุภาคพอลิไควนิลเบนซีน และ b) พอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล	30
4.3 Optical micrograph ของอนุภาคพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูลที่สังเคราะห์ได้: a) อนุภาคพอลิไควนิลเบนซีน และ b) พอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล	31
4.4 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติ และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 308,130 g/mol)	33
4.5 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติที่มี H ₂ O ₂ 20 ml เป็นตัวออกซิไดซ์ ในการลดน้ำหนักโมเลกุล และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol)	33
4.6 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติที่มี H ₂ O ₂ 40 ml เป็นตัวออกซิไดซ์ ในการลดน้ำหนักโมเลกุล และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 146,001 g/mol)	34
4.7 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติที่มี KPS 40 ml เป็นตัวออกซิไดซ์ ในการลดน้ำหนักโมเลกุล และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 119,876 g/mol)	34
4.8 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติที่มี KPS 80 ml เป็นตัวออกซิไดซ์ ในการลดน้ำหนักโมเลกุล และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 89,923 g/mol)	35
4.9 Optical micrograph ของพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่เตรียม โดยใช้ยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol ปริมาณต่างๆ (%wt) : a) 0, b) 1, c) 2.5, และ d) 5	36
4.10 FTIR spectra ของ (a) ออกตะเดกเคน (b) พอลิไควนิลเบนซีน และ (c) พอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล	37
4.11 TGA thermogram ของ (a) ออกตะเดกเคน (b) ยางธรรมชาติลาเท็กซ์ (c) อนุภาคพอลิไควนิลเบนซีน และ (d) พอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล ที่เตรียมโดยใช้ปริมาณยางธรรมชาติ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ อัตราเร็ว และเวลาในการป้อนเตรียมหอคมอนอเมอร์ที่ 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 DSC Thermogram ของออกตะเดกเคน (เส้นสีดำ) และออกตะเดกเคน ที่ถูกหุ้มอยู่ในพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล (เส้นสีแดง) (อัตราการสแกน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จาก 0-40 องศาเซลเซียส)	39
4.13 DSC thermogram ของออกตะเดกเคนในพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติ แคปซูลที่เตรียมได้โดยใช้ปริมาณยางธรรมชาติต่างๆ โดยใช้อัตราการสแกน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จาก 0-40 องศาเซลเซียส	40
4.14 SEM micrograph ของพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	41
4.15 Optical micrograph ของฝ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติ แคปซูลที่อัตราส่วนต่างๆ แคปซูล:สารตัวเชื่อม a) 1:5 b) 1:1 c) 2:1 d) 5:1 และ e) 10:1	43

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บความร้อนของวัสดุเก็บความร้อนกลุ่มต่างๆ	4
2.2 สมบัติทางความร้อนของสารกลุ่มพาราฟินที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเก็บความร้อน	5
3.1 ปริมาตรตัวออกซิไดซ์ที่ใช้ในการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ	22
3.2 สภาพะที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคพอลิไดไวนิลเบนซีน	23
3.3 สภาพะที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล ที่หุ้มออกตะเดกเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อน ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของยางธรรมชาติ	24
3.4 สภาพะในการเคลือบผ้าด้วยพอลิเมอร์แคปซูล	28
4.1 ผลการศึกษาการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ปริมาตรต่างๆ	32
4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของออกตะเดกเคนที่อยู่ในพอลิไดไวนิลเบนซีน/ ยางธรรมชาติแคปซูลที่ใช้ยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol ปริมาณต่างๆ	41
4.3 ผลการเคลือบพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล (ยางธรรมชาติ 2.5% โดยน้ำหนัก) บนผ้าฝ้าย	42

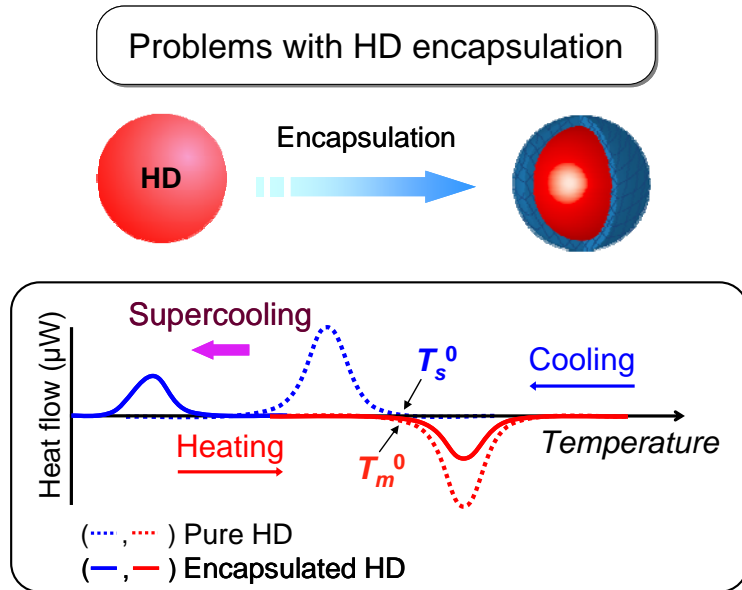
บทที่ 1

บทนำ

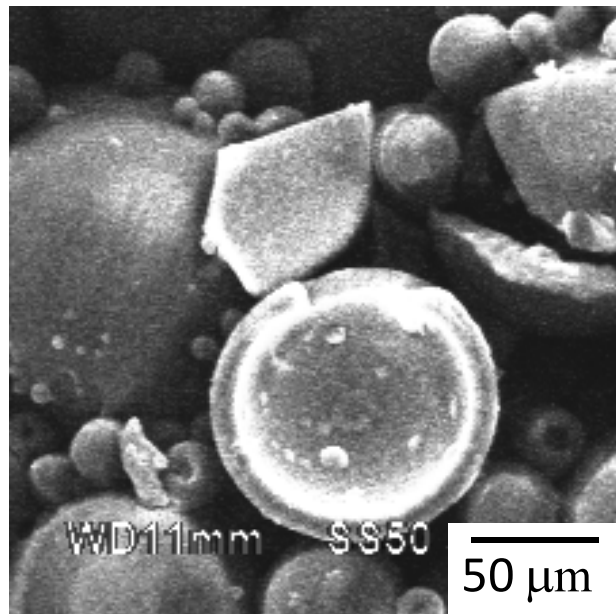
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบัน พอลิเมอร์แคปซูลมีการศึกษาและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น สิ่งทอ สี การเคลือบ การแพทย์ เป็นต้น สารที่นำมาหุ้มด้วยพอลิเมอร์แคปซูลมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับการใช้งาน วัสดุที่เปลี่ยนแปลงวัฏภาคได้ (Phase change materials; PCMs) หรือวัสดุเก็บความร้อน (Heat storage materials) เป็นสารชนิดหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำมาหุ้มด้วยพอลิเมอร์เพื่อใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ด้านพลังงาน ด้านการเกษตร และด้านสิ่งทอ เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับความร้อนได้มากกว่าน้ำหนักสลิบเท่า ตัวอย่างเช่น เมื่อใส่เสื้อผ้าที่มีแคปซูลของวัสดุเก็บความร้อนในเนื้อผ้า (Thermal adaptable clothes) ออกไปภายนอกอาคารที่มีอุณหภูมิต่ำ ความร้อนที่สะสมอยู่ในวัสดุเก็บความร้อนภายในแคปซูลจะค่อยๆ ปล่อยออกมาจากเนื้อผ้าและให้ความอบอุ่นแก่ผู้สวมใส่ ในขณะที่เดียวกันหากอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง แคปซูลที่มีสารเก็บความร้อนจะเริ่มกระบวนการสะสมความร้อนเข้าไปในตัวเอง ทำให้ผู้สวมใส่ยังรู้สึกเย็นอยู่ ทำให้รู้สึกเย็นสบายเมื่อสวมใส่กันร้อนกันหนาว ซึ่งหมายถึงใส่ในที่ร้อนก็ไม่ร้อน ใส่ในที่เย็นก็ไม่หนาว อย่างไรก็ตาม จากประสบการณ์วิจัยของทีมผู้วิจัยพบว่า การหุ้มสาร (Encapsulation) ด้วยเทคนิคต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ยังคงเป็นที่สนใจศึกษาของนักวิจัยในการพัฒนาแคปซูลนี้ นอกจากนี้ การถ่ายเทความร้อนของสารกลุ่มนี้จะให้ประสิทธิภาพที่ต่ำเมื่ออยู่ในแคปซูลเปรียบเทียบกับเมื่อเป็นสารบริสุทธิ์ที่ไม่มีการห่อหุ้มด้วยวัสดุต่างๆ จะเห็นได้จากการที่มีการเลื่อนตำแหน่งของอุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c) ซึ่งเรียกว่า “การเกิดการเย็นตัวอย่างยิ่งยวด” (Supercooling) ขณะเดียวกันประสิทธิภาพของการเก็บความร้อนของวัสดุเก็บความร้อนก็ยังลดลงด้วย ดังเช่น ในการเตรียมแคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีน (Polydivinylbenzene) ที่หุ้มเฮกซะเดเคน (Hexadecane) (รูปที่ 1) และในการเตรียมแคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีนที่หุ้มออกตะเดเคน (Octadecane) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

นอกจากนี้ ทีมผู้วิจัยยังพบว่าเปลือก (Shell) ของพอลิเมอร์แคปซูลซึ่งมีโครงสร้างแบบร่างแห (Crosslink) จะมีความแข็งแรงสูง แต่มีความยืดหยุ่นต่ำ ซึ่งถ้าได้รับการปรับปรุงให้มีความยืดหยุ่นสูงขึ้นจะสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางและมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 1.1 การเกิดการลดลงของประสิทธิภาพในการเก็บและถ่ายเทความร้อน และการเกิดการเย็นตัวยิ่งยวดของแคปซูลของพอลิไคไวนิลเบนซีนที่หุ้มเฮกซะเดคเคน



รูปที่ 1.2 Scanning electron micrograph แสดงการแตกของพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มออกตะเดคเคน

ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ในสถานะอสัณฐาน (Amorphous) ที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากมีค่าอุณหภูมิกลายแก้ว (Glass Transition Temperature; Tg) อยู่ที่ประมาณ -70 องศาเซลเซียส ทำให้มีสมบัติเด่นในแง่ของความยืดหยุ่น เหมาะแก่การนำไปทำเป็นวัสดุรับแรงกระแทกหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง

ดังนั้น การใช้ยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงสมบัติของแคปซูลโดยการเพิ่มความยืดหยุ่นของเปลือกพอลิเมอร์จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจอย่างยิ่ง ซึ่งนอกจากจะช่วยในการปรับปรุงสมบัติของแคปซูลให้ดีขึ้นแล้ว ยังจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุจากธรรมชาติและพืชเศรษฐกิจของประเทศได้อีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนโดยใช้ไดไวนิลเบนซีนมอนอเมอร์และยางธรรมชาติ ด้วยวิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้ในข้อ 2.1 กับพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมโดยใช้ไดไวนิลเบนซีนมอนอเมอร์ชนิดเดียว

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลของไดไวนิลเบนซีนมอนอเมอร์และยางธรรมชาติที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อน โดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอย
- 1.3.2 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้ เช่น ประสิทธิภาพการหุ้มวัสดุเก็บความร้อนของพอลิเมอร์ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเก็บความร้อนที่อยู่ในแคปซูล เป็นต้น
- 1.3.3 เปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้ในข้อ 3.1 กับพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมโดยใช้ไดไวนิลเบนซีนมอนอเมอร์ชนิดเดียว

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจาก ในปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก เพื่อความสะดวกสบายในการดำรงชีวิต พลังงานที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ พลังงานไฟฟ้า ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานที่จะขาดไม่ได้เลย เพราะสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆจะใช้ไฟฟ้าเป็นหลักในการทำงาน เช่น เครื่องปรับอากาศ เครื่องทำความร้อน ตู้เย็น เป็นต้น ค่าใช้จ่ายก็จะแปรผันตามปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า การที่จะจำกัดการใช้ไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ไม่ทำได้ยากมาก แม้ว่าจะมีมาตรการประหยัดพลังงานในรูปแบบต่างๆ แต่ก็ไม่สามารถที่จะลดการใช้ไฟฟ้าลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ดังที่ทราบกันดีว่า เครื่องทำความเย็นที่มีการใช้ตู้เย็นเกือบทุกครัวเรือนก็เป็นสาเหตุทางอ้อมให้เกิดภาวะโลกร้อนได้ด้วย เนื่องจากมีการใช้สารซีเอฟซี (CFCs) เป็นสารทำความเย็น

แนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า คือ การใช้วัสดุเก็บความร้อน โดยเฉพาะวัสดุเก็บความร้อนแฝง (Latent heat storage materials) หรือวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค มาช่วยในการกักเก็บพลังงานหรือความร้อนในระหว่างวัน ซึ่งในปัจจุบันได้มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากทำการศึกษา วัสดุเก็บความร้อนแฝงจะมีหลักการทำงาน คือ วัสดุจะดูดพลังงานความร้อน เมื่ออุณหภูมิในสิ่งแวดล้อมมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ (Transition temperature) ของวัสดุ และจะคายพลังงานความร้อนออกมาเมื่ออุณหภูมิจนต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะของวัสดุ วัสดุเก็บความร้อนแฝงที่ดีจะต้องมีความจุความร้อนสูง มีค่าการนำความร้อนที่สูง หลอมเหลวที่อุณหภูมิในช่วงของการใช้งาน แข็งตัวโดยเกิดการเย็นตัวยิ่งยวดน้อยที่สุด (การเย็นตัวต่ำกว่าปกติของอุณหภูมิในการแข็งตัวของวัสดุ) มีความเสถียรทางความร้อน ราคาต่ำ ไม่เป็นพิษ และไม่เกิดการกัดกร่อน [1] การเลือกวัสดุเก็บความร้อนแฝงขึ้นกับอุณหภูมิการใช้งาน และปริมาณความจุความร้อน โดยทั่วไป ควรเลือกใช้สารที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะใกล้เคียงกับอุณหภูมิการใช้งาน [1, 2] เนื่องจากมีวัสดุเก็บความร้อนแฝงจำนวนมากซึ่งหลอมเหลวและแข็งตัวในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง จึงทำให้สารเหล่านี้ได้ ได้รับความสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บความร้อนของวัสดุเก็บความร้อนกลุ่มต่างๆ [1]

Property	Rock	Water	Organic PCM	Inorganic PCM
Density, kg/m ³	2240	1000	800	1600
Specific heat, kJ/kg	1.0	4.2	2.0	2.0
Latent heat, kJ/kg	–	–	190	230
Latent heat, kJ/m ³	–	–	152	368
Storage mass for 10 ⁶ J, kg	67,000	16,000	5300	4350
Storage volume for 10 ⁶ J, m ³	30	16	6.6	2.7
Relative storage mass	15	4	1.25	1.0
Relative storage volume	11	6	2.5	1.0

2.1 ชนิดและสมบัติของวัสดุเก็บความร้อน

วัสดุเก็บความร้อน สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มเก็บความร้อนแบบเซนซิเบิล (Sensible heat storage) ได้แก่ หิน และน้ำ และกลุ่มเก็บความร้อนแฝง ซึ่งได้แก่ สารกลุ่มอนินทรีย์ (Inorganic compounds) และกลุ่มอินทรีย์ (Organic compounds) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกักเก็บความร้อนแล้ว จะพบว่ากลุ่มเก็บความร้อนแฝงจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ากลุ่มเก็บความร้อนแบบเซนซิเบิล ดังตารางที่ 2.1 ในขณะที่ในกลุ่มเก็บความร้อนแฝง สารกลุ่มอนินทรีย์จะมีประสิทธิภาพการเก็บความร้อนดีกว่าสารกลุ่มอินทรีย์ โดยสามารถดูได้จากปริมาตรและน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ในการเก็บความร้อนหนึ่งลิตร

สารกลุ่มอนินทรีย์ที่นิยมใช้ คือ เกลือที่มีน้ำ (Hydrated salts) เช่น $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ $\text{NaCO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ในขณะที่สารกลุ่มอินทรีย์คือ พาราฟิน (Paraffin) และพวกที่ไม่ใช่พาราฟิน เช่น กรดไขมัน (Fatty acid) ถึงแม้ว่า ความสามารถในการเก็บความร้อนของสารอนินทรีย์จะดีกว่าสารอินทรีย์ แต่สารอนินทรีย์ก็มีข้อด้อยอยู่หลายอย่างด้วยกัน เช่น มีราคาค่อนข้างสูงกว่าสารอินทรีย์บางชนิด (พาราฟิน) และเกิดการเย็นตัวยิ่งยวดมาก นอกจากนี้ สารเหล่านี้สามารถเกิดการเกาะกันเป็นผลึกในระหว่างใช้งาน ซึ่งจะส่งผลให้อายุการใช้งาน และสมบัติการกักเก็บความร้อนลดลง

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางความร้อนของสารกลุ่มพาราฟินที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเก็บความร้อน [3]

Carbon Number	Name Formula (mol weight)	Melting Temperature (°C)	Latent Heat (kJ/kg)	Thermal Conductivity (W/(m K)) solid/liquid	Density (kg/m ³) solid/liquid
C(8)	n-Octane C ₈ H ₁₈ (114.23)	-57 (-56.5)	181	-/0.128	-/703.6
C(10)	n-Decane C ₁₀ H ₂₂ (142.28)	-30	201	-/0.1349	-/730
C(12)	n-Dodecane C ₁₂ H ₂₆ (170.34)	-9.5 (-12)	216	0.21/0.14	-/750
C(14)	n-Tetradecane C ₁₄ H ₃₀ (198.39)	6	226	0.21/0.15	825/771
C(16)	n-Hexadecane C ₁₆ H ₃₄ (226.44)	18	237	0.21/0.151	835/776
C(18)	n-Octadecane C ₁₈ H ₃₈ (254.50)	28	243	0.35/0.151	840/778
C(20)	n-Eicosane C ₂₀ H ₄₂ (282.55)	37	247	0.23/0.151	856/780
C(22)	n-Docosane C ₂₂ H ₄₆ (310.61)	44.5	249	0.22/0.151	864/780
C(24)	n-Tetracosane C ₂₄ H ₅₀ (338.66)	52 (51)	255	0.25/0.15	897/774

เมื่อพิจารณาที่สารกลุ่มอินทรีย์ พบว่ากลุ่มพาราฟินเป็นกลุ่มที่น่าสนใจมากกว่ากรดไขมัน เนื่องจากมีค่าความจุความร้อนค่อนข้างสูง และมีลักษณะเฉพาะสำคัญที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุเก็บความร้อนแฝง เช่น ไม่เป็นพิษ ไม่เกิดการกัดกร่อน มีความเสถียรในระยะยาวและมีราคาถูก สมบัติทางความร้อนของสารกลุ่มพาราฟินที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเก็บความร้อนแฝง แสดงดังตารางที่ 2.2 อย่างไรก็ตาม พาราฟินมีการนำความร้อนที่ต่ำ (น้อยกว่า 0.35 W/m K) [3] เมื่อเปรียบเทียบกับเกลือที่มีน้ำ

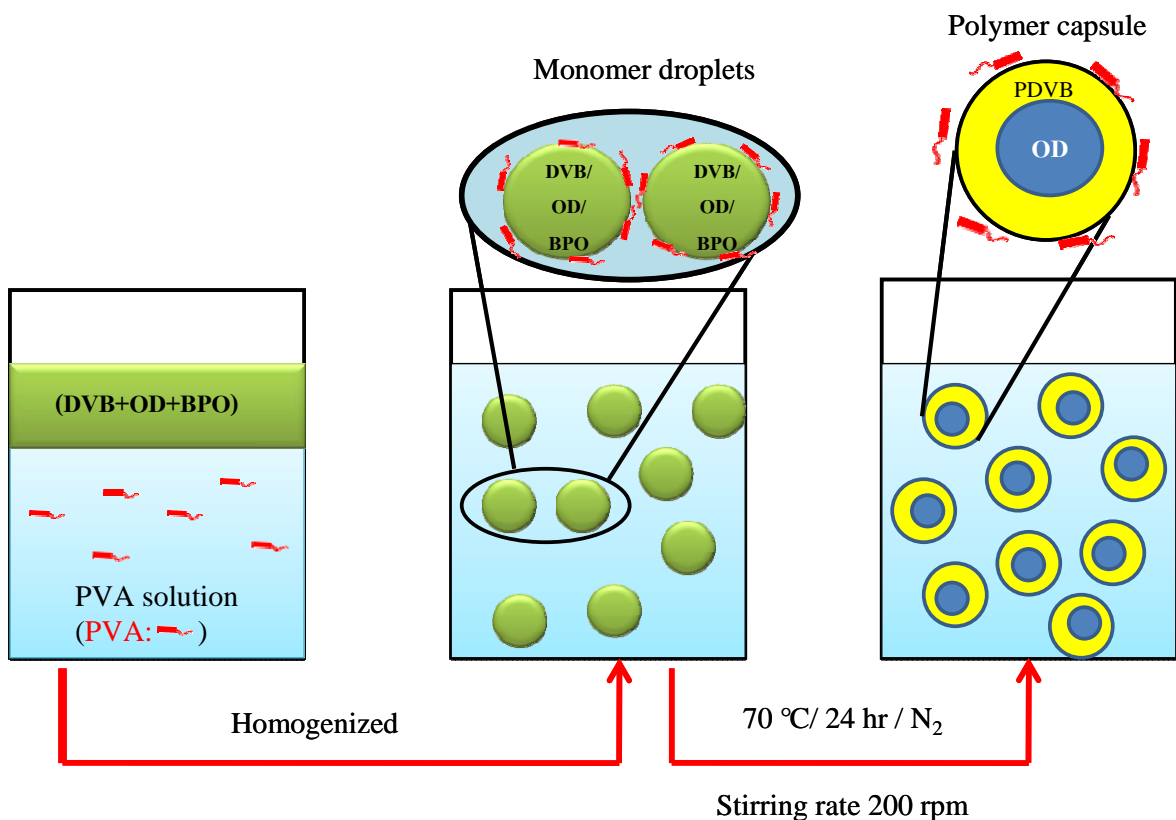
ดังนั้น ในการใช้งานจึงต้องการพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนมาก ซึ่งการหุ้มสารเหล่านี้ให้เป็นแคลซูลขนาดเล็กรายจำนวนมาก เป็นเทคนิคหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว และส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้อย่างมาก เมื่อเทียบกับการใช้งานโดยตรง

2.2 เทคนิคในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูล

เทคนิคในการเตรียมแคปซูลที่มีพอลิเมอร์เป็นเปลือก (Shell) และมีพาราฟินซึ่งเป็นวัสดุเก็บความร้อนแฝงทั้งในสถานะของเหลวหรือของแข็งเป็นแกน (Core) มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน รวมทั้งมีชนิดของพอลิเมอร์และพาราฟินที่ใช้หลายชนิด โดยขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานพอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนแฝง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลโดยกลไกการแยกวัฏภาคภายใน

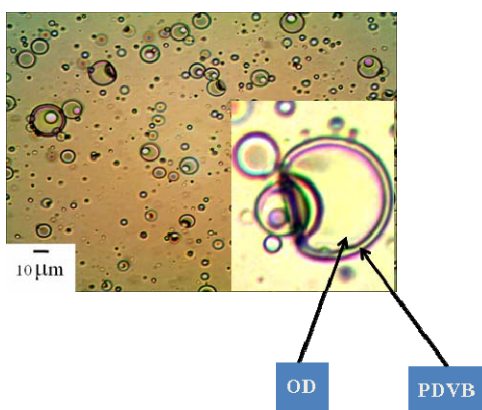
การเตรียมแคปซูลโดยใช้กลไกการแยกวัฏภาคภายใน (Internal phase separation)

การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลที่อาศัยหลักการของการแยกวัฏภาคภายใน ส่วนมากจะเตรียมในระบบกระจาย (Dispersed systems) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้น้ำเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) โดยจะเริ่มต้นด้วยการนำวัสดุเก็บความร้อนแฝงมาผสมกับมอนอเมอร์ (Monomer) และตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) เรียกว่า วัฏภาคอินทรีย์ (Organic phase) จากนั้นทำให้เป็นหยดมอนอเมอร์ ซึ่งสารทั้งหมดจะละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปกระจายในน้ำ ในระหว่างการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (มอนอเมอร์เปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์) ภายในหยดมอนอเมอร์ ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการเข้ากัน (Miscibility) ของพอลิเมอร์กับวัสดุเก็บความร้อนแฝงค่อยๆ ลดลงจนถึงค่าความยาววิกฤต (Critical chain length) พอลิเมอร์จะไม่สามารถละลายเข้ากันได้อีกกับวัสดุเก็บความร้อน



รูปที่ 2.1 การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซินที่หุ้มออกตะเดคเคน โดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอย

แสงจึงเกิดการแยกวัฏภาคภายในแคปซูลขึ้น โดยที่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่ออกมาที่ด้านนอกของหยดมอนอเมอร์เกิดเป็นเปลือก ในขณะที่วัสดุเก็บความร้อนแสงจะอยู่ด้านในกลายเป็นแกน อย่างไรก็ตาม การเกิดตามกลไกนี้จะต้องพิจารณาค่าแรงตึงระหว่างผิว (Interfacial tension) ของพอลิเมอร์กับน้ำและวัสดุเก็บความร้อนแสงกับน้ำ (ถ้าพูดให้เข้าใจง่ายก็คือ ความสามารถในการเข้าใกล้กันของทั้งพอลิเมอร์และวัสดุเก็บความร้อนแสง) โดยที่พอลิเมอร์จะต้องเข้าใกล้กันได้มากกว่าวัสดุเก็บความร้อนแสง หรือมีค่าแรงตึงระหว่างผิวของพอลิเมอร์-น้ำ ต่ำกว่าวัสดุเก็บความร้อนแสง-น้ำ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถดูได้จากเอกสารอ้างอิงต่างๆ หรือสามารถวัดได้จากค่าแรงตึงผิว (Surface tension) ของสารแต่ละคู่ การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลในระบบกระจาย มีอยู่หลายกระบวนการด้วยกัน เช่น การสังเคราะห์แบบแขวนลอย (Suspension polymerization) [4-8] แบบมินิอิมัลชัน (Miniemulsion polymerization) [9, 10] และแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) [11-14]

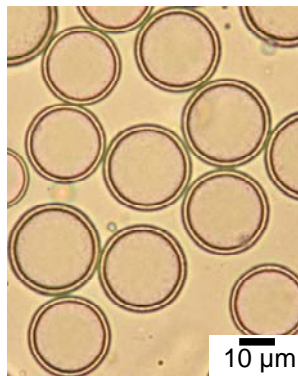


รูปที่ 2.2 Optical micrograph ของพอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มออกตะเดเคน โดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอย

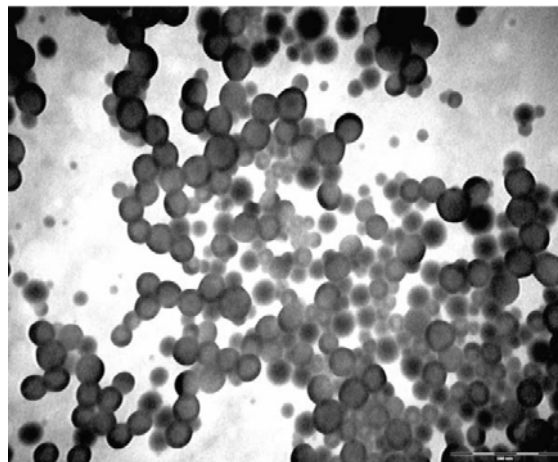
ตัวอย่างการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลด้วยการสังเคราะห์แบบแขวนลอยแสดงดังรูปที่ 2.1 เป็นการเตรียมแคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีน (Polydivinyl benzene; PDVB) ที่หุ้มออกตะเดเคน (Octadecane) โดยนำไดไวนิลเบนซีน (Divinyl benzene; DVB) ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ ออกตะเดเคน และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide; BPO) ซึ่งเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา มาผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วเทลงในสารละลายของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) (เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ทำหน้าป้องกันการรวมตัวกันของหยดมอนอเมอร์) จากนั้นทำการปั่นสารผสมที่ความเร็วสูง จะทำให้ได้หยดมอนอเมอร์ที่มีออกตะเดเคนและตัวเริ่มปฏิกิริยาละลายอยู่ด้วย เมื่อทำการสังเคราะห์ที่เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม จะได้พอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูล โดยแคปซูลที่ได้จากวิธีนี้จะมีขนาดในระดับไมโครเมตร และให้การกระจายของขนาดอนุภาคที่กว้าง (Polydisperse particles) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 อย่างไรก็ตาม ได้มีการพัฒนาเทคนิคการเตรียมหยดมอนอเมอร์ให้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยการให้วัฏภาค

อินทรีย์ผ่านเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใกล้เคียงกัน เรียกเมมเบรนนี้ว่า ชิระสุ พอร์ส กลาส (Shirasu porous glass; SPG) ก่อนลงสู่วัฏภาคต่อเนื่องและทำการพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งจะทำได้พอลิเมอร์แคปซูลที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (Monodisperse particles)

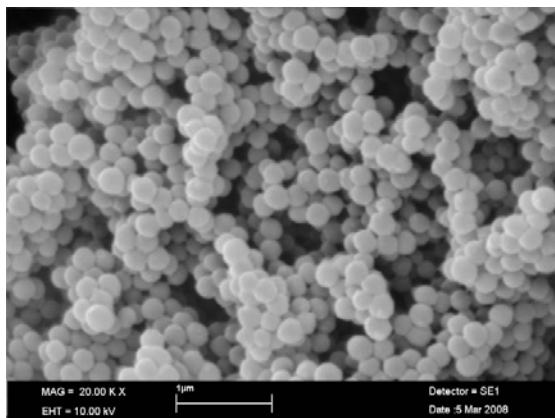
Okubo และคณะ [15] ได้เสนอเทคนิคการเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์แบบร่างแหที่มีช่องว่าง (Hollow crosslinked polymer particles) ด้วยชิระสุพอร์ส กลาส เมมเบรน แล้วทำการสังเคราะห์แบบแขวนลอย โดยใช้เทคนิคการจัดเรียงตัวเองของพอลิเมอร์ที่แยกวัฏภาค (Self-assembling of Phase Separated Polymer; SaPSeP) และต่อมาได้มีการพัฒนาเทคนิคนี้ และนำมาใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มเฮกซะเดเคน (Hexadecane) ซึ่งเป็นสารกลุ่มพาราฟินเช่นกัน โดยมีขนาดอนุภาคที่เตรียมได้ในระดับไมโครเมตร และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ [6-8, 16] ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 Optical micrograph ของพอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มเฮกซะเดเคน ที่เตรียมโดย Okubo และคณะ [15]



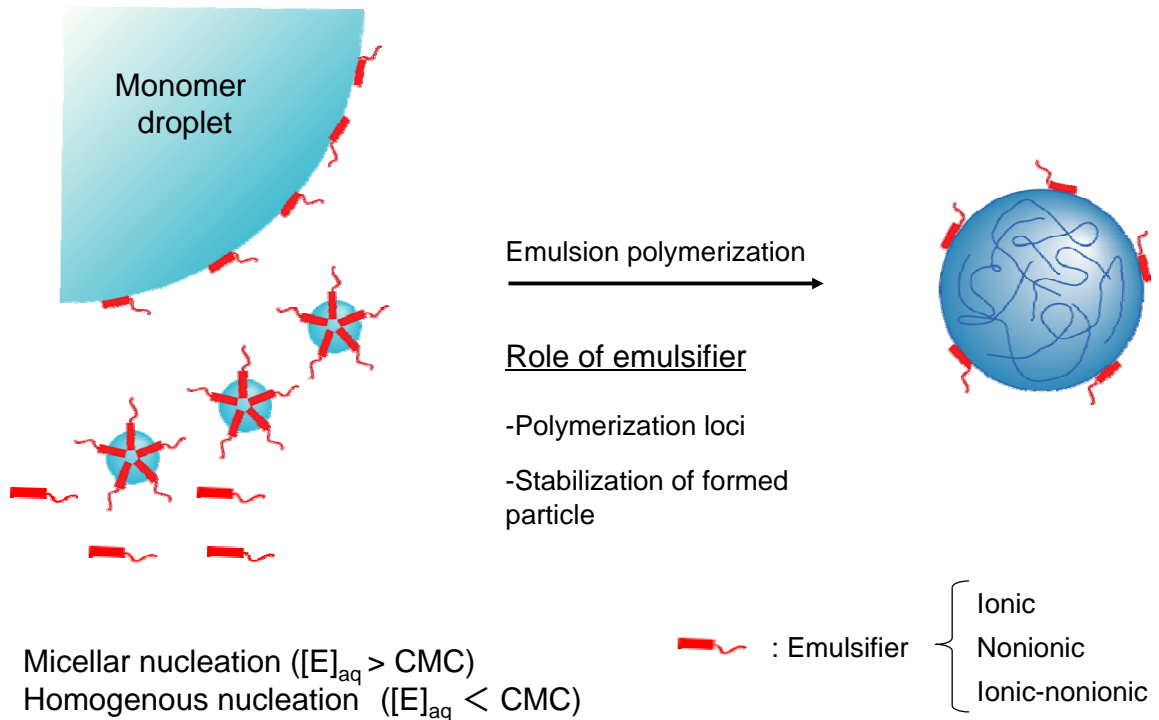
รูปที่ 2.4 รูป TEM ของพอลิสไตรีนที่หุ้มออกตะเดเคนซึ่งเตรียมโดยการสังเคราะห์แบบมินิมัลชัน [9]



รูปที่ 2.5 รูป SEM ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่หุ้มออกตะโคเซน ซึ่งเตรียมโดยการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน [12]

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลโดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอยนั้น จะให้ขนาดในระดับไมโครเมตร ดังนั้น ถ้าต้องการแคปซูลในระดับนาโนเมตร การสังเคราะห์แบบมินิอิมัลชันและอิมัลชันจะเหมาะสมกว่า ดังขนาด (124 nm) ของพอลิสไตรีน (Polystyrene) ที่หุ้มออกตะโคเคน [9] และแคปซูลของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate) ที่หุ้มออกตะโคเซน (Octacosane) [12] ที่เตรียมด้วยการสังเคราะห์แบบมินิอิมัลชันและอิมัลชัน ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

การเตรียมแคปซูลด้วยเทคนิคมินิอิมัลชันจะมีกลไกเหมือนกับแบบแขวนลอย แต่จะแตกต่างกันในส่วนของการเตรียมหยดมอนอเมอร์ ซึ่งในวิธีนี้จะใช้ความเร็วที่สูงมากในการปั่นวัฏภาคอินทรีย์ ทำให้ได้หยดมอนอเมอร์ที่มีขนาดระดับนาโนเมตร ในขณะที่การสังเคราะห์แบบอิมัลชัน จะมีกลไกแตกต่างจากทั้งแบบแขวนลอยและแบบมินิอิมัลชันอย่างมาก เทคนิคนี้การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันจะเกิดในไมเซลล์ (Micelle) เรียกว่า ไมเซลล์พอลิเมอร์ไรเซชัน (Micelle polymerization) ดังนั้นตัวเริ่มปฏิกิริยาจะละลายในวัฏภาคต่อเนื่อง ในขณะที่การสังเคราะห์แบบแขวนลอยและมินิอิมัลชัน จะเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันในหยดมอนอเมอร์ ตัวเริ่มปฏิกิริยาจะละลายในวัฏภาคอินทรีย์ กลไกการสังเคราะห์อนุภาคพอลิเมอร์แบบอิมัลชันแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกการเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคอิมัลชัน

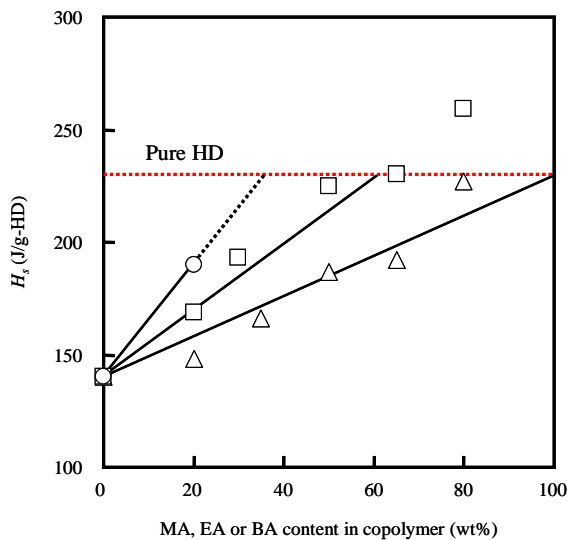
การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของเทคนิคการสังเคราะห์แบบอิมัลชันมีอยู่สองรูปแบบ คือ การเกิดนิวเคลียสแบบไมเซลล์ลาร์ (Micellar nucleation) และโฮโมจีเนียส (Homogeneous nucleation) ในกรณีแรกจะเติมสารลดแรงตึงผิว (Emulsifier) ลงในวัฏภาคต่อเนื่อง (ที่มีตัวเริ่มปฏิกิริยาละลายอยู่) ให้มีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเกิดไมเซลล์ได้ (Critical micelle concentration; CMC) สายโซ่พอลิเมอร์ที่เริ่มต้นเกิดในวัฏภาคต่อเนื่อง เมื่อมีการเพิ่มจำนวนมอนอเมอร์ขึ้นเรื่อยๆ ในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความไม่มีขั้วเพียงพอที่จะเข้าไปอยู่ในไมเซลล์ เนื่องจากจำนวนของไมเซลล์ที่มีมากกว่าหดยมอนอเมอร์ (เกิดจากการปั่นความเร็วต่ำ) อย่างมาก (มากกว่า 10^4 เท่า) และจะเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันต่อไปจนได้อนุภาคพอลิเมอร์ (มอนอเมอร์ในหดยมอนอเมอร์จะเคลื่อนที่เข้าไปในไมเซลล์จนหมด) กรณีที่สอง จะไม่มีสารลดแรงตึงผิวหรือมีน้อยกว่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเกิดไมเซลล์ สายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดในวัฏภาคต่อเนื่อง เมื่อมีความยาวจนถึงจุดวิกฤต (Critical chain length; J_{crit}) จะไม่สามารถละลายน้ำได้ จะรวมตัวกันโดยใช้ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (พอลิเมอร์) อยู่ภายใน ส่วนที่ชอบน้ำ (มาจากตัวเริ่มปฏิกิริยา) อยู่ภายนอก และเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันในน้ำจนได้อนุภาคพอลิเมอร์ สำหรับการเตรียมพอลิเมอร์แคลซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนแฝงด้วยเทคนิคนี้ มอนอเมอร์และวัสดุเก็บความร้อนแฝงจะถูกผสมกันก่อน ดังนั้นในระหว่างการพอลิเมอร์ไรเซชัน (ในไมเซลล์) วัสดุเก็บความร้อนแฝงที่ละลายกับมอนอเมอร์ภายในหดยมอนอเมอร์จะเคลื่อนที่เข้าไปในไมเซลล์ แล้วเกิดการแยกวัฏภาคภายในเมื่อสายโซ่พอลิเมอร์

ยาวขึ้น (มีความไม่มีขั้วมากขึ้น) ทำให้ได้พอลิเมอร์แคปซูลที่มีวัสดุเก็บความร้อนแฝงเป็นแกน และพอลิเมอร์เป็นเปลือก ดังการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่หุ้มเฮกซะเดเคน [12]

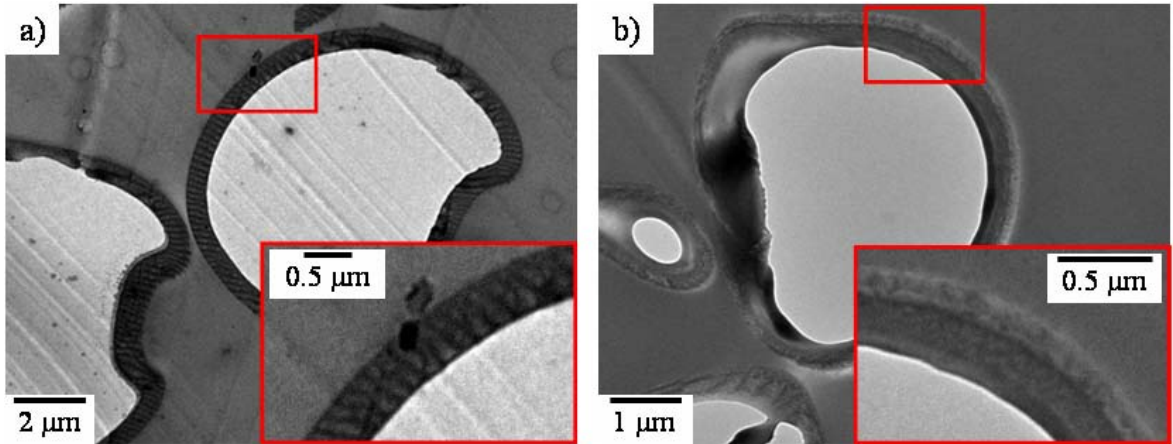
2.3 สมบัติทางความร้อนของวัสดุเก็บความร้อนแฝงในพอลิเมอร์แคปซูล

อย่างไรก็ตาม พบว่าการหุ้มสารด้วยเทคนิคต่างๆให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ยังคงเป็นสิ่งที่น่าสนใจศึกษา ในการพัฒนาแคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนแฝง เนื่องจากพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้มีข้อด้อยที่สำคัญอยู่สองประการ คือ ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะทั้งการหลอมเหลวและการเกิดผลึก (Heat of melting; H_m และ Heat of crystallization; H_c) ของสารกลุ่มนี้จะให้ค่าต่ำลงเมื่ออยู่ในแคปซูล และมีการเลื่อนตำแหน่งของอุณหภูมิการเกิดผลึก ซึ่งเรียกว่า “การเกิดการเย็นตัวอย่างยิ่งยวด” เมื่อเปรียบเทียบกับสารบริสุทธิ์ที่ไม่มีการห่อหุ้ม

สำหรับในกรณีของการลดลงของค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ สาเหตุที่เป็นไปได้ น่าจะมาจากกรณีที่มีพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Oligomer) ที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์ รวมทั้งสารลดแรงตึงผิวบางส่วนเข้าไปอยู่ในแกน (วัสดุเก็บความร้อนแฝง) หรือระหว่างชั้นของพอลิเมอร์ (เปลือก) กับวัสดุเก็บความร้อนแฝงในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคที่ไม่สมบูรณ์ ระหว่างเปลือกพอลิเมอร์กับแกนวัสดุเก็บความร้อนแฝง ทำให้วัสดุเก็บความร้อนแฝงมีพฤติกรรมไม่เหมือนสารที่ไม่ได้ถูกหุ้ม พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจึงลดลง ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยบางงาน ที่สามารถปรับปรุงค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อนแฝงที่อยู่ในแคปซูลได้ [8] เช่น กรณีเฮกซะเดเคนที่ถูกหุ้มด้วยพอลิไดไวนิลเบนซีน มีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะเท่ากับ 140 J/g-HD ซึ่งลดลงจากเฮกซะเดเคนที่ไม่มีการห่อหุ้มที่มีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะเท่ากับ 230 J/g-HD



รูปที่ 2.7 ค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของเฮกซะเดเคนที่อยู่ใน โคพอลิเมอร์แคปซูลของไดไวนิลเบนซีน-อะคริเลต ชนิดของอะคริเลตมอนอเมอร์: O เมทิลอะคริเลต □ เอทิลอะคริเลต และ Δ บิวทิลอะคริเลต [8]

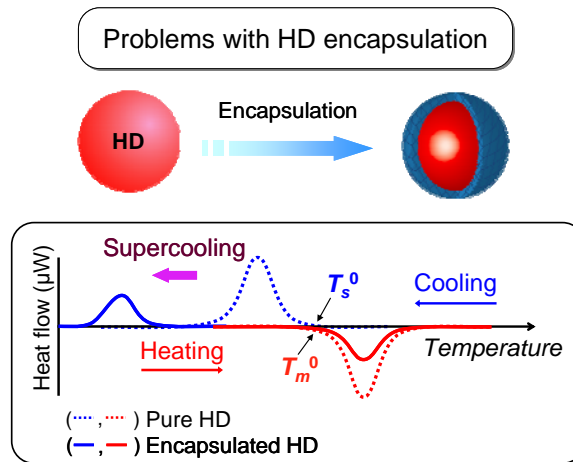


รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของอนุภาคพอลิเมอร์แคปซูลของพอลิไคไวนิลเบนซีน (a) และ พอลิไคไวนิลเบนซีน-บิวทิลอะคริเลต (b) ที่หุ้มเฮกซะเดคเคน [8]

ค่าความร้อนแฝงที่ต่ำลงนี้ เนื่องมาจากการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิไคไวนิลเบนซีนกับเฮกซะเดคเคนไม่สมบูรณ์ เพราะมีสมบัติความไม่มีขั้วเหมือนกัน จึงมีการศึกษาการเพิ่มมอนอเมอร์ที่มีขั้วมากขึ้น เช่น บิวทิลอะคริเลต (Butyl acrylate) เข้าไปโคพอลิเมอร์กับไคไวนิลเบนซีน และพบว่าทำให้ค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของเฮกซะเดคเคนที่อยู่ในแคปซูลของโคพอลิเมอร์ของไคไวนิลเบนซีน-บิวทิลอะคริเลตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแคปซูลของพอลิไคไวนิลเบนซีน และเข้าใกล้เฮกซะเดคเคนที่ไม่ถูกหุ้ม ดังรูปที่ 2.7 และเมื่อพิจารณาจากรูปของแคปซูลที่มีการตัดขวางอนุภาค ที่ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM) จะเห็นได้ว่า มีชั้นของพอลิบิวทิลอะคริเลตเพิ่มขึ้นด้านในของเปลือกพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาการเตรียมแคปซูล เพื่อลดการเกิดปรากฏการณ์เหล่านี้ ยังเป็นสิ่งที่นักวิจัยในปัจจุบันให้ความสนใจศึกษาและปรับปรุงกันต่อไป

ในกรณีการเกิดการเย็นตัวอย่างยิ่งยวดของวัสดุเก็บความร้อนแฝงที่อยู่ในพอลิเมอร์แคปซูล จนถึงปัจจุบันก็ยังไม่มีความชัดเจน ทฤษฎีที่น่าจะเป็นไปได้ คือ ในวัสดุเก็บความร้อนแฝงที่ไม่มีการหุ้ม จะเกิดผลึกแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous nucleation) โดยทั่วไป ในวัสดุเก็บความร้อนแฝงจะมีสารปนเปื้อนอยู่ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสารปนเปื้อนเหล่านี้จะเป็นตัวเหนี่ยวนำในการเกิดผลึก (Nucleating agent) ของวัสดุเก็บความร้อนแฝงที่ยังไม่ได้หุ้ม เนื่องจากสารเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้น เมื่อมีการเกิดผลึกจากสารปนเปื้อนแม้มีปริมาณน้อย จะทำให้สารทั้งหมดเกิดผลึกได้ง่าย ในขณะที่วัสดุเก็บความร้อนแฝงที่อยู่ในแคปซูล จะเกิดผลึกทั้งแบบวิวิธพันธ์และแบบเอกพันธ์ (Homogeneous nucleation) เนื่องจาก สารปนเปื้อนมีปริมาณน้อยและกระจายตัวอยู่ในบางแคปซูลเท่านั้น (จะเกิดผลึกแบบวิวิธพันธ์) ในขณะที่แคปซูลส่วนใหญ่ไม่มีตัวเหนี่ยวนำให้เกิดผลึก จะเกิดผลึกแบบเอกพันธ์ จึงทำให้อุณหภูมิในการแข็งตัวเลื่อนต่ำกว่าสารที่ไม่มีการหุ้ม (ลดพลังงานอิสระเพื่อให้เกิดผลึกมีความเสถียร) เช่นในกรณีเฮกซะเดคเคนในพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูล จะมีอุณหภูมิในการเกิดผลึกต่ำกว่าของเฮกซะเดคเคนที่ไม่มีการ

หุ้มดังรูปที่ 2.9 ได้มีรายงานการวิจัย [22, 23] ที่ศึกษาการปรับปรุงการเกิดการเย็นตัวอย่างยิ่งยวดของวัสดุเก็บความร้อนแฝงที่อยู่ในพอลิเมอร์แคปซูล โดยการใช้สารหนึ่ยวนำในการเกิดผลึกผสมเข้าไปกับวัสดุเก็บความร้อนแฝงในขั้นตอนการเตรียมแคปซูล ซึ่งสามารถลดการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของสารหนึ่ยวนำในการเกิดผลึกที่เพิ่มขึ้น ก็ทำให้ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อนลดลงเช่นกัน ดังนั้นปริมาณและชนิดของสารหนึ่ยวนำในการเกิดผลึกก็ยังคงเป็น โจทย์ที่จะต้องทำการศึกษากันต่อไป



รูปที่ 2.9 การเกิดการเย็นตัวอย่างยิ่งยวดของเฮกซะเดคเคนที่อยู่ในพอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูล

2.4 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุเก็บความร้อน

จากสมบัติของวัสดุเก็บความร้อนแฝงดังกล่าวมาข้างต้น จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ในการอนุรักษ์และปรับปรุงการใช้พลังงานจากธรรมชาติในรูปแบบต่างๆ เช่น นำไปใช้ควบคู่กับเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ในการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมีเฉพาะในเวลากลางวัน และนำพลังงานนั้นมาใช้ในช่วงเวลากลางคืน [1, 24-26] และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อน (เพิ่มปริมาณความร้อน) แคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนแฝง จึงได้รับความสนใจและมีการศึกษาพัฒนาขึ้นมา แคปซูลเหล่านี้ได้ถูกนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของอาคาร [1, 3, 16, 27, 28] ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องปรับอากาศ ใช้เก็บพลังงานแสงอาทิตย์และนิวเคลียร์ [11, 29] ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิและสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูก [30] ใช้ทำเป็นระบบควบคุมอุณหภูมิ (Secondary refrigeration loop) [3] ทำงานควบคู่กับสารทำความเย็นของตู้เย็น และใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น

2.4.1 ใช้เก็บพลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐานทั้งทางตรงและทางอ้อมของมนุษย์ กิจกรรมทุกระดับของมนุษย์ต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น และยิ่งมนุษย์ต้องการความสะดวกสบายยิ่งขึ้นก็ต้องใช้พลังงานมากขึ้น แหล่งกำเนิดพลังงานในปัจจุบัน คือ เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ พลังงานจากเชื้อเพลิงต่างๆ เหล่านี้นอกจากจะมีจำกัดแล้ว ก็ยังสร้างปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงทำลายชั้นบรรยากาศของโลกด้วย ปัจจุบันประเทศต่างๆ ในโลกได้ให้ความสนใจในการแก้ปัญหาเหล่านี้โดยวิธีหนึ่งที่ได้รับคามสนใจเป็นอย่างมาก คือ การจัดการพลังงาน (Energy management) เนื่องจากในประเทศที่มีอุณหภูมิหนาวเย็นนั้น มีการใช้พลังงานเพื่อสร้างความอบอุ่นให้กับที่พักอาศัย โดยพลังงานที่ใช้คิดเป็น 47% ของพลังงานทั้งหมดที่ผลิตได้ ซึ่งจะเห็นว่าพลังงานที่ใช้มีปริมาณสูงมาก การจัดการพลังงานเหมาะสมสามารถลดการใช้พลังงานในส่วนนี้ได้โดยการนำเอาพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ซึ่งมีอยู่อย่างไม่จำกัดมาใช้ให้เกิดประโยชน์

ประเทศที่มีอุณหภูมิหนาวเย็นมีการใช้วัสดุเปลี่ยนแปลงวัฏภาคได้ (PCMs) ในลักษณะของการจัดการพลังงาน โดยมีวัตถุประสงค์ คือ การนำเอาพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยวัสดุ PCMs จะฝังตัวและแพร่กระจายอยู่ในโครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง ซึ่งวัสดุ PCMs จะทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวัน ทำให้สามารถป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารที่พักอาศัยได้ และในเวลากลางคืนอุณหภูมิภายในอาคารและสิ่งแวดล้อมภายนอกจะต่ำกว่าอุณหภูมิของวัสดุ PCMs ทำให้วัสดุ PCMs สามารถปลดปล่อยพลังงานความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารที่พักอาศัยเพื่อสร้างความอบอุ่นแก่ผู้พักอาศัยได้ นอกจากนี้การใช้ PCMs ยังสามารถเลื่อนการใช้พลังงานจากช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานสูงสุดมาเป็นช่วงเวลาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดได้ จึงทำให้ค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้สำหรับการผลิตพลังงานลดลงได้ เนื่องจากประเทศที่มีอุณหภูมิร้อน เช่น ประเทศไทยนั้นการปลดปล่อยพลังงานความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารในเวลากลางคืนนั้นไม่เป็นที่ต้องการแต่สามารถใช้คุณสมบัติในการดูดซับพลังงานความร้อนเพื่อป้องกันความร้อนในช่วงเวลากลางวันของวัสดุ PCMs ให้เกิดประโยชน์ได้ ดังนั้นการศึกษาการใช้งานวัสดุ PCMs สำหรับประเทศที่มีภูมิอากาศร้อนนั้นมีความจำเป็นเพราะสามารถลดการใช้พลังงานได้

2.4.2 วัสดุควบคุมอุณหภูมิในอาคาร

การใช้วัสดุควบคุมอุณหภูมิในอาคารควบคู่กับเครื่องปรับอากาศ ซึ่งในอนุภาคหรือแคปซูลนี้จะมีการบรรจุสารสำคัญอยู่ภายในโดยจะมีการหุ้มสารเหล่านี้ด้วยพอลิเมอร์ที่เหมาะสมบางชนิด เช่น พอลิไคไวนิลเบนซีน พอลิยูเรีย การสังเคราะห์โดยทั่วไปจะใช้วิธีแบบแขวนลอย (Suspension polymerization) โดยอนุภาคแคปซูลที่ได้จะอยู่ในระดับไมโครเมตร โดยวัสดุควบคุมอุณหภูมิในอาคารจะมีลักษณะเป็นอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจะแพร่กระจายอยู่ในท่อสำหรับใส่สารนี้โดยเฉพาะตามโครงสร้างต่างๆ ของอาคาร ซึ่งวัสดุควบคุมอุณหภูมิในอาคารจะทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อน เมื่อ

อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมสูงกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อนและเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อนก็จะคายพลังงานความร้อนออกมาทำให้สามารถป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารที่พักอาศัยได้

2.4.3 ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น ใช้สำหรับผ้าปรับสภาพความร้อน (Thermal adaptable clothes) โดยเมื่อใส่เสื้อผ้าที่เคลือบ หรือผสมด้วยแคปซูลของวัสดุเก็บความร้อนแฝงออกไปภายนอกอาคารที่มีอุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อน) ความร้อนที่สะสมอยู่ในวัสดุเก็บความร้อนแฝงภายในแคปซูลจะค่อยๆ ปลดปล่อยออกมาจากเนื้อผ้า และให้ความอบอุ่นแก่ผู้สวมใส่ ในขณะที่หากอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง สารเก็บความร้อนจะเริ่มกระบวนการสะสมความร้อนเข้าไปในตัวเอง ทำให้ผู้สวมใส่ยังรู้สึกเย็น ทำให้รู้สึกเย็นสบายเมื่อสวมใส่กันร้อนกันหนาว [2, 31, 32]

2.5 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)



รูปที่ 2.10 ต้นยางพาราและน้ำยางพารา [33]

ยางธรรมชาติ คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่มีต้นกำเนิดจากของเหลวของพืชบางชนิด ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว คล้ายน้ำมัน มีสมบัติเป็นคอลลอยด์ อนุภาคเล็ก มีตัวกลางเป็นน้ำ [34]

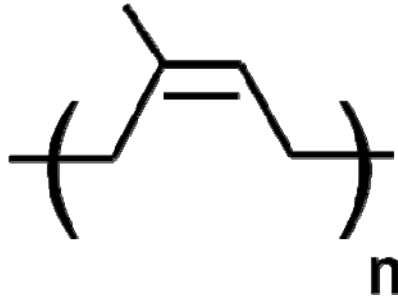
2.5.1 ประวัติยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นน้ำยางจากต้นไม้ยืนต้น มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่ง คือยางพาราหรือต้นยางพารา [10] ยางพารามีต้นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำอเมซอน ประเทศบราซิล และเปรู ทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งชาวอินเดียแดงเผ่ามายันในอเมริกาได้รู้จักการนำยางพารามาใช้ก่อนปี พ.ศ. 2000 โดยการจุ่มเท้าลงในน้ำยางดิบเพื่อทำเป็นรองเท้า ส่วนเผ่าอื่นๆก็นำยางไปใช้ประโยชน์ในการทำผ้ากันฝน ทำขวดใส่น้ำ และทำลูกบอลขงเล่นเกมต่างๆ เป็นต้น จนกระทั่ง คริสโตเฟอร์ โคลัมบัส ได้เดินทางมาสำรวจทวีปอเมริกาใต้ ในระหว่างปี พ.ศ. 2036-2039 และได้พบชาวพื้นเมืองเกาะไฮติที่กำลังเล่นลูกบอลขงซึ่งสามารถกระดอนได้ ทำให้คณะผู้เดินทางสำรวจประหลาดใจจึงเรียกว่า “ลูกบอลผีสิง”

ต่อมาในปี พ.ศ. 2279 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ ชาลส์ มาริเดอลา คอนดามิน (Charles Meriede la Condamine) ได้ให้ชื่อเรียกยางตามคำพื้นเมืองของชาวไมกา ว่า “คาโอชู” (Caoutchouc) ซึ่งแปลว่า ดันไม้ร้องไห้ และให้ชื่อเรียกของเหลวที่มีลักษณะข้นขาวคล้ายน้ำมันซึ่งไหลออกมาจากต้นยางเมื่อกรีดเป็นรอยแผลว่า ลาเท็กซ์ (Latex) และในปี พ.ศ. 2369 ฟาราเดย์ (Faraday) ได้รายงานว่ายางธรรมชาติเป็นสารที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน มีสูตรเอมไพริคัล คือ C_5H_8 หลังจากนั้นจึงได้มีการปรับปรุงสมบัติของยางพารา เพื่อให้ใช้งานได้อย่างกว้างขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ [33]

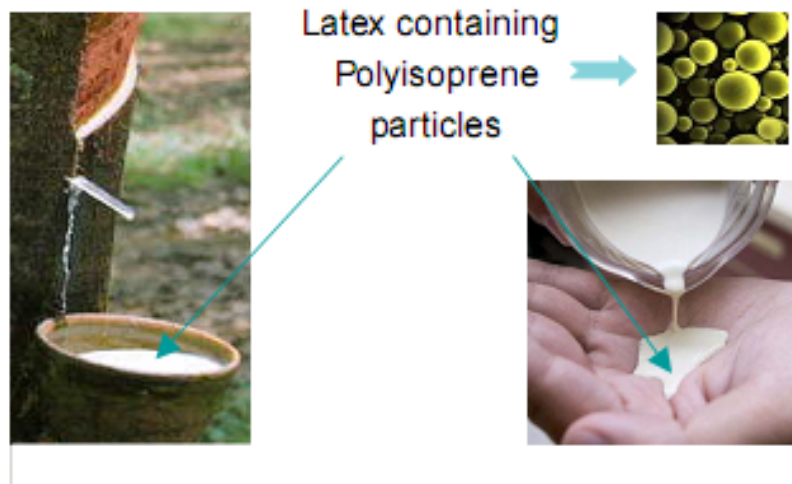
ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ยางพาราเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ที่มีอายุยืนยาวนานร้อยปี มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* [35, 36] น้ำยางพาราเป็นของเหลวสีขาวถึงขาวปนเหลือง ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ในสถานะอสัณฐาน ที่อุณหภูมิห้อง เหมาะแก่การนำไปทำเป็นวัสดุรับแรงกระแทกหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรง และความยืดหยุ่นสูง ยางพาราจัดอยู่ใน [37]

Division	Spermatophyta
Sub – division	Pteropsida
Class	Angiosperm
Sub – class	Dicotyledon
Order	Euphorbiales
Family	Euphorbiaceae
Genus	Hevea
Species	Brasiliensis



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของ cis-1,4-polyisoprene

Hevea brasiliensis tree



รูปที่ 2.12 ลักษณะทางกายภาพของน้ำยางธรรมชาติ [33]

2.5.2 น้ำยาง (Latex)

น้ำยางเป็นของเหลวสีขาวถึงขาวปนเหลือง ขุ่นข้นอยู่ในท่อน้ำยางออกจากต้นยางซึ่งเรียงตัวกันอยู่ในเปลือกของต้นยาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านในซึ่งอยู่กับเยื่อเจริญ การเอาน้ำยางออกจากต้นยางจะต้องทำให้ท่อน้ำยางขาดออกจากกัน ในน้ำยางจะมีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยางและส่วนที่ไม่ใช่ยาง [38] ตามปกติในน้ำยางจะมีเนื้อยางแห้งประมาณ 25-45% เนื้อยางแห้งนี้เองเป็นวัสดุผสมหัตถกรรมที่มนุษย์นำไปใช้ประโยชน์ต่อการดำรงชีวิต จนกลายเป็นสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิตประจำวันของสังคมมนุษย์ในปัจจุบัน [39]

น้ำยางมีอนุภาคต่างๆ แขนงลอยอยู่ในของเหลว อนุภาคเหล่านี้มีประจุเป็นลบมาจากโปรตีน ที่อยู่บนผิว ผลักกันอยู่ตลอดเวลา ทำให้อนุภาคเหล่านี้แขวนลอยและคงสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้ จนกว่าจะมีสภาพแวดล้อมและปัจจัยต่างๆมารบกวนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งทำให้น้ำยางเสียเสถียรภาพ และจับตัวกันเป็นก้อนน้ำยางพารา ส่วนประกอบของน้ำยางพารา สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

(1) ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Rubber) ประมาณ 35% ซึ่งประกอบด้วย ยาง (Hydrocarbons) 21% น้ำ (กระจายอยู่ใน hydrocarbons) 10% สารพวกไขมัน 3% และสารพวกโปรตีน 1%

(2) ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber) ประมาณ 65% ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นน้ำ หรือที่เรียกว่า ซีรัม (Serum) ประมาณ 55% และส่วนของลูตอยด์และสารอื่นๆ หรือที่เรียกว่า อนุภาคเฟรยวาลิ่ง (Frey wyssling) ประมาณ 10% [39]

บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

สารเคมี	เกรด	ยี่ห้อ
1. ไดไวนิลเบนซีน (Divinylbenzene ; DVB)	Technical grade 80%	Aldrich
2. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol ; PVA)	Technical grade 80%	Aldrich
3. ออกตะเดเคน (Octadecane ; OD)	Analytical grade 99%	Merck
4. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide ; BPO)	Technical grade 80%	Merck
5. ยางธรรมชาติ (Natural rubber ; NR)	Commercial grade	Thai rubber latex
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide ; NaOH 1 M)	Analytical grade	BDH
7. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride ; CaCl ₂)	Analytical grade	Univar
8. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide ; H ₂ O ₂ 30% v/v)	Analytical grade	Univar
9. โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate ; K ₂ S ₂ O ₈ 5% w/v)	Analytical grade	Univar
10. เมทานอล (Methanol)	Analytical grade	BDH
11. โทลูอีน (Toluene)	Analytical grade	RCI Labscan
12. เทตระไฮโดรฟิวแรน (Tetrahydrofuran ; THF)	Analytical grade	QReC™

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์	รุ่น	ยี่ห้อ
1. ชุคไบพัดปั่น	RW 20 digital	IKA
2. เครื่องกวนแม่เหล็กแบบใช้ความร้อน	C-MAG HS7	IKA
3. เครื่องทำน้ำหล่อเย็น (Cooling bath)	-	Boss tech
4. เครื่องกวนด้วยคลื่นความถี่ (Ultrasonic sonicator)	Digital	Elma
5. เครื่อง Gel Permeation Chromatography (GPC)	Water 2414	Water
6. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)	DSC 4000	Perkin Elmer
7. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA)	TGA 4000	Perkin Elmer
8. ตู้อบสูญญากาศ (Vacumn Oven)	DZE-6051 model	DZE

3.2 การทดลอง

3.2.1 การเตรียมมอนอเมอร์ให้บริสุทธิ์

การเตรียมมอนอเมอร์ให้บริสุทธิ์นั้น เป็นการกำจัดตัวยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor) ที่มีการเติมลงในมอนอเมอร์ เพื่อช่วยในการรักษาสภาพของมอนอเมอร์ในระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา ก่อนการนำมอนอเมอร์ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์จะต้องทำการกำจัดออกก่อนเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ได้ ซึ่งการเตรียมไดไวนิลเบนซีนให้บริสุทธิ์จะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

การสกัดไดไวนิลเบนซีนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เตรียมชุดอุปกรณ์การสกัดสาร โดยการใส่กรวยแยก ดวงสาร DVB:NaOH 1 M ในอัตราส่วนปริมาตรที่ 100:100 (มิลลิลิตร) ใส่ในกรวยแยก เขย่ากรวยแยกแล้วตั้งทิ้งไว้ให้สารเกิดการแยกชั้น เมื่อสารมีการแยกชั้นที่สมบูรณ์จึงใช้ชั้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทิ้ง (ชั้นล่าง) สกัด

สารซ้ำอีก 2 ครั้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 M ครั้งละ 100 มิลลิลิตร นำสารละลายในชั้นของไดไวนิลเบนซีนที่ได้จากการสกัด (ชั้นบน) ไปทำการล้างด้วยน้ำในชั้นตอนต่อไป

การล้างไดไวนิลเบนซีนด้วยน้ำ

ตวง $H_2O:DVB$ โดยใช้อัตราส่วนปริมาตรที่ 50:50 (มิลลิลิตร) สกัดโดยใช้กรวยแยกและตั้งทิ้งไว้ให้สารเกิดการแยกชั้น เมื่อแยกชั้นได้สมบูรณ์จึงไขชั้นน้ำทิ้ง (ชั้นล่าง) สกัดซ้ำด้วย H_2O ครั้งละ 50 มิลลิลิตร อีก 2 รอบ นำชั้นของไดไวนิลเบนซีนที่สกัดได้ (ชั้นบน) เดิมด้วย $CaCl_2$ เพื่อทำการกำจัดน้ำส่วนที่ขังเหลืออยู่ออกจากไดไวนิลเบนซีน นำไดไวนิลเบนซีนที่ได้เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 0-5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.1 การเตรียมไดไวนิลเบนซีนให้บริสุทธิ์

3.2.2 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol solution) ความเข้มข้น 1% w/v

การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ สามารถเตรียมจากการนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายในน้ำ แต่เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายน้ำได้ยากจึงต้องมีการปั่นกวนสารเพื่อที่จะให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายได้ดียิ่งขึ้น สารละลายที่ได้นี้จะใช้เป็นสาร Stabilizer เพื่อป้องกันการรวมตัวกันของหยดมอนอเมอร์

วิธีการเตรียมสารละลายทำได้ดังนี้ ชั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์หนัก 5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากนั้นกวนสารโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็ก แล้วจึงนำสารละลายที่ได้ไปเก็บใส่ขวด โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

3.2.3 การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ

การเตรียมยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ร่วมกับการเขย่าโดยใช้คลื่นความถี่ (Sonication) ซึ่งจะทำให้สายโซ่ของยางธรรมชาติแตกออก และมีขนาดสั้นลง ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ซึ่งมีวิธีการดังนี้ ชั่งน้ำยางพารา 20 กรัมผสมกับตัวออกซิไดซ์ดังตารางที่ 3.1 แล้วทำการกวนด้วยเครื่องคลื่นความถี่ (Sonication) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตกตะกอนยางธรรมชาติที่ได้ด้วยเมธานอล จากนั้นละลายด้วยโทลูอินแล้วตกตะกอนซ้ำอีกครั้ง นำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศ แล้วจึงนำยางธรรมชาติไปสังเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 3.1 ปริมาตรตัวออกซิไดซ์ที่ใช้ในการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ชนิดของตัวออกซิไดซ์	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
H ₂ O ₂ (30% w/w)	20
H ₂ O ₂ (30% w/w)	40
K ₂ S ₂ O ₈ (5% w/v)	20
K ₂ S ₂ O ₈ (5% w/v)	40

3.2.4 การสังเคราะห์อนุภาคพอลิไวนิลเบนซีน

การสังเคราะห์อนุภาคพอลิไวนิลเบนซีน ใช้กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย ซึ่งการสังเคราะห์อนุภาคพอลิไวนิลเบนซีนนี้จะประกอบด้วย มอนอเมอร์ ตัวริเริ่ม ปฏิกิริยาชนิดละลายในสารอินทรีย์ (Oil soluble initiator) สารป้องกันการรวมตัวของหยดมอนอเมอร์ และน้ำ เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับพอลิไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อน ซึ่งมีวิธีการดังนี้

ซัง DVB และ BPO ตามตารางที่ 3.2 ละลายให้เป็นสารเนื้อเดียวกัน เเทลงไปในสารละลาย PVA ปริมาตร 150 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ (Homoginizer) อัตราการปั่น 5,000 รอบต่อนาที (rpm) เวลา 5 นาที เพื่อเตรียมหยดมอนอเมอร์ จากนั้น นำสารละลายที่ได้เทลงในชุดสังเคราะห์พอลิเมอร์ ที่ให้อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะของแก๊สไนโตรเจน และใช้เวลาในการสังเคราะห์ 8 ชั่วโมง เมื่อครบ 8 ชั่วโมงแล้ว ทำการกรองพอลิไดไวนิลเบนซีนที่ได้ และเก็บใส่ขวดไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่อไป

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคพอลิไดไวนิลเบนซีน

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (g)
DVB	15.0
BPO (8% wt)	1.2
PVA	1.5
H ₂ O	150.0

หมายเหตุ สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 8 ชั่วโมง
อัตราเร็วในการปั่น 5,000 รอบต่อนาที เวลา 5 นาที

3.2.5 การสังเคราะห์พอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อน

การสังเคราะห์พอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อนนั้น ใช้การสังเคราะห์แบบแขวนลอย ซึ่งในการสังเคราะห์จะประกอบด้วย มอนอเมอร์ ยางธรรมชาติวัสดุเก็บความร้อน ตัวริเริ่มปฏิกิริยา สารป้องกันการรวมตัวของหยดมอนอเมอร์ และน้ำ โดยในงานวิจัยนี้ จะทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล โดยจะทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ

- น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ
- ปริมาณยางธรรมชาติ

กระบวนการสังเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้

ชั่ง DVB NR OD BPO ตามตารางที่ 3.3 จากนั้นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เติงลงในสารละลาย PVA ปริมาตร 150 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ เพื่อเตรียมหยดมอนอเมอร์ แล้วนำสารละลายที่ได้เทลงในชุดสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่มีแก๊สไนโตรเจน โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ 8 ชั่วโมง เมื่อครบ 8 ชั่วโมงจึงทำการเก็บพอลิเมอร์แคปซูลที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปวิเคราะห์และทดสอบต่อไป

โดยในโครงการนี้จะทำการศึกษา ผลของปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่มีต่อการเกิดพอลิเมอร์แคปซูล

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อน ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของยางธรรมชาติ

%NR สารเคมี	0	0.5	1	2.5	5
DVB (g)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
NR (mg)	-	37.5	75.0	187.5	375.0
OD (g)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
BPO (g)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
PVA (g)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
H₂O (ml)	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0

หมายเหตุ

a) NR = Natural rubber, DVB = Divinyl benzene

OD = Octadecane, BPO = Benzoyl peroxide

PVA = Polyvinyl Alcohol

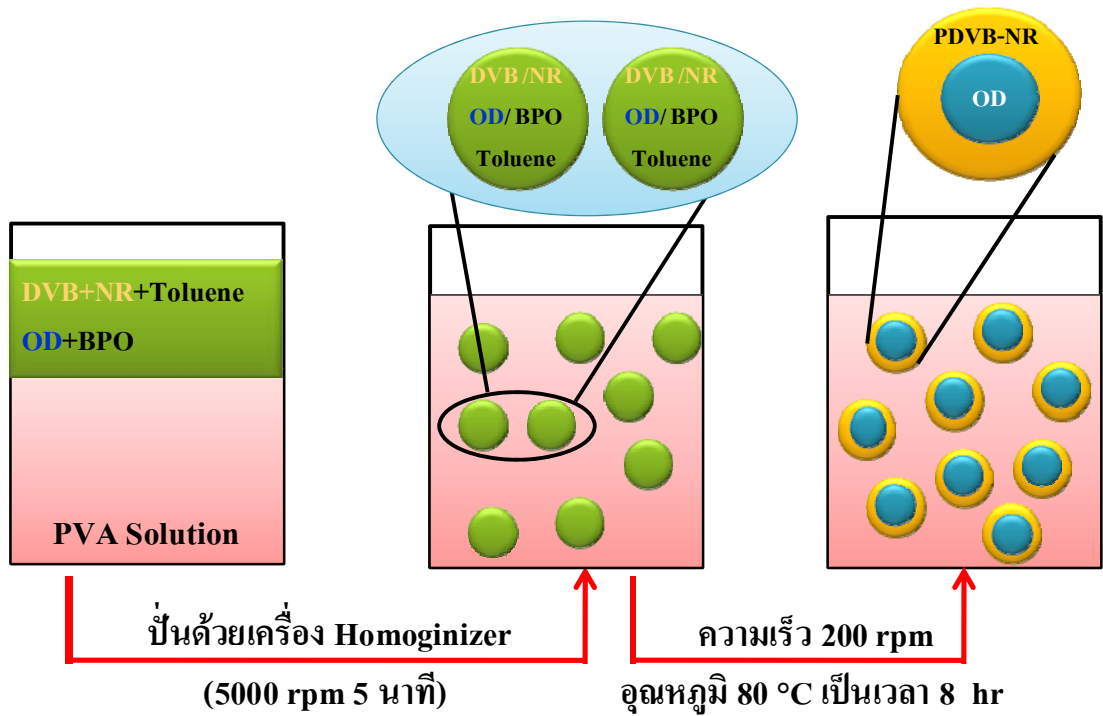
b) NR มีน้ำหนักโมเลกุล (g/mol): 308,130 , 162,519



ก. กระบวนการปั่นเตรียมหยดมอนอเมอร์ด้วย
เครื่องโฮโมจีไนเซอร์

ข. กระบวนการสังเคราะห์พอลิไดไวนิล-
เบนซีนแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคน
เป็นวัสดุเก็บความร้อน

รูปที่ 3.2 การสังเคราะห์พอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อน



รูปที่ 3.3 แผนภาพการสังเคราะห์พอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อน โดยการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย

3.2.6 การหาลักษณะเฉพาะและทดสอบสมบัติของอนุภาคพอลิเมอร์และพอลิเมอร์แคปซูล

3.2.6.1 การหา% Conversion

เป็นการหาเปอร์เซ็นต์ที่มอนอเมอร์เปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอร์ในการสังเคราะห์ ซึ่งทำได้โดยชั่งด้วยอวลูมิเนียมและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน หยดพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ลงในอวลูมิเนียมประมาณ 2 กรัม และบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำอวลูมิเนียมมาชั่ง บันทึกน้ำหนัก แล้วนำมาอบต่อจนน้ำหนักคงที่ แล้วคำนวณเพื่อหา % Conversion

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\% \text{ Conversion} = \left[\frac{\text{น้ำหนักหลังอบ} \times \text{น้ำหนักรวมของสารผสม - OD - BPO - PVA}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}} \right] \times 100$$

$$\frac{\text{น้ำหนัก DVB}}{\text{น้ำหนัก DVB}}$$

3.2.6.2 การตรวจดูรูปร่างของพอลิเมอร์แคปซูล

เป็นการศึกษารูปร่างและลักษณะลักษณะของแคปซูลที่เตรียมได้ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงซึ่งทำได้ดังนี้ หยดพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ลงบนสไลด์ 1-2 หยด แล้วหยดน้ำกลั่นลงไปเล็กน้อย จากนั้นนำแผ่นสไลด์ไปตรวจสอบด้วยกล้อง Optical microscope โดยตั้งกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตาที่ 10x และเลนส์ใกล้วัตถุที่ 40x แล้วตรวจดูรูปร่าง

3.2.6.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ในโครงการนี้ ได้ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของออกตะเดคเคนที่ถูกหุ้มอยู่ในพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลเปรียบเทียบกับออกตะเดคเคนที่ไม่ถูกหุ้ม ดังนี้

การหาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะและค่าความร้อนในการเปลี่ยนสถานะ

อุณหภูมิและปริมาณความร้อนในการเปลี่ยนสถานะสามารถหาได้ โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (DSC 4000, Perkin Elmer, USA) โดยใช้สภาวะดังต่อไปนี้

ช่วงอุณหภูมิในการทดสอบ 0 -40 °C

อัตราเร็วในการสแกน 5 °C / min

ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน

ปริมาณความร้อนในการเปลี่ยนสถานะสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$J/g-OD = (A/B) \times 100$$

เมื่อ

A = H_c or H_m ของออกตะเดกเคนที่ถูกหุ้ม (J/g-sample)

B = %OD ในแคปซูลที่ได้จาก TGA เทอร์โมแกรม

การสลายตัวเนื่องจากความร้อน

อุณหภูมิในการสลายตัวของออกตะเดกเคนและองค์ประกอบของพอลิเมอร์แคปซูลสามารถหาได้โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) (TGA 4000, Perkin Elmer, USA)

โดยใช้สภาวะดังต่อไปนี้ ช่วงอุณหภูมิในการทดสอบ 50-550 °C

อัตราเร็วในการให้ความร้อน 20 °C/min

ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน

3.2.6.4 การตรวจหาน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ

การตรวจหาน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติสามารถตรวจหาได้โดยใช้เครื่อง Gel Permeation Chromatograph (GPC) โดยใช้สภาวะดังนี้

Column : Thermostatted Column Compartment TCC-100

Mobile phase : Tetrahydrofuran (THF)

Flow rate : 1.00 ml/min

Temperature : 40°C

3.2.7 การเคลือบผ้าด้วยพอลิเมอร์แคปซูล

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเคลือบผ้าฝ้าย (Cotton 100%) ด้วย PDVB/OD/NR แคปซูลที่เตรียมได้โดยกระบวนการ Pad-Dry-Cure และใช้อะคริลิก อิมัลชัน (Acrylic emulsion) เป็นสารตัวเชื่อม (Binder) โดยมีขั้นตอนดังนี้

ทำการผสม PDVB/OD/NR แคปซูลกับสารตัวเชื่อมที่อัตราส่วนต่างๆดังตารางที่ 3.4 จากนั้นนำผ้าฝ้ายที่ขนาด กว้าง 2.5 cm ยาว 6 cm จำนวน 5 ชิ้น ซึ่งชั่งน้ำหนักแล้วจุ่มลงในสารผสมทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อระเหยน้ำ ออบต่อที่อุณหภูมิ

130 °C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดโครงร่างแหเป็นการยึดแคปซูลให้ติดกับผ้า จะได้ผ้าที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์แคปซูล นำมาชั่งน้ำหนักหลังเคลือบ และนำไปทดสอบสมบัติต่อไป

ทำการตรวจดูลักษณะของผ้าที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์แคปซูลโดยใช้กล้องอิเล็คตรอนแบบส่องกราด แล้วทำการหาเปอร์เซ็นต์การเคลือบติดของพอลิเมอร์แคปซูลในผ้าดังสมการ

การหาเปอร์เซ็นต์การเคลือบ (%Add on)

$$\% \text{ การเคลือบติด (\%Add on)} = \frac{\text{น้ำหนักผ้าหลังเคลือบ} - \text{น้ำหนักผ้าก่อนเคลือบ}}{\text{น้ำหนักผ้าหลังเคลือบ}}$$

ตารางที่ 3.4 สภาวะในการเคลือบผ้าด้วยพอลิเมอร์แคปซูล

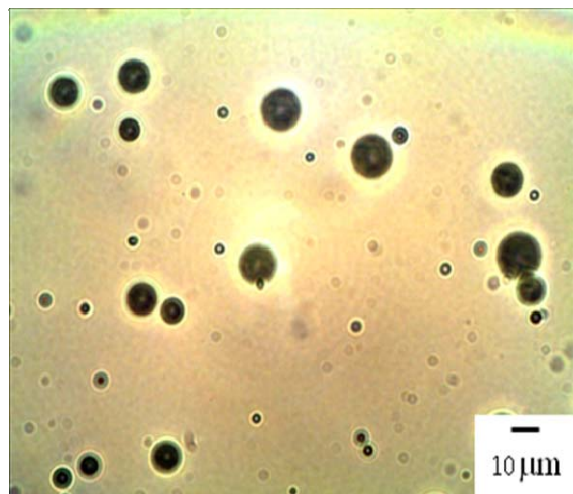
	แคปซูล : สารตัวเชื่อม				
	1:5	1:1	2:1	5:1	10:1
แคปซูล (g)	0.05	0.25	0.50	1.25	2.50
สารตัวเชื่อม (g)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 การเตรียมอนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีนด้วยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมอนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีนด้วยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอยตามสถานะในตารางที่ 3.1 พบว่าพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ (% Conversion) เท่ากับ 100 ซึ่งแสดงว่าการที่มอนอเมอร์เปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อนำไปตรวจดูรูปร่างและลักษณะของอนุภาคที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง Optical microscope ได้ผลดังรูปที่ 4.1

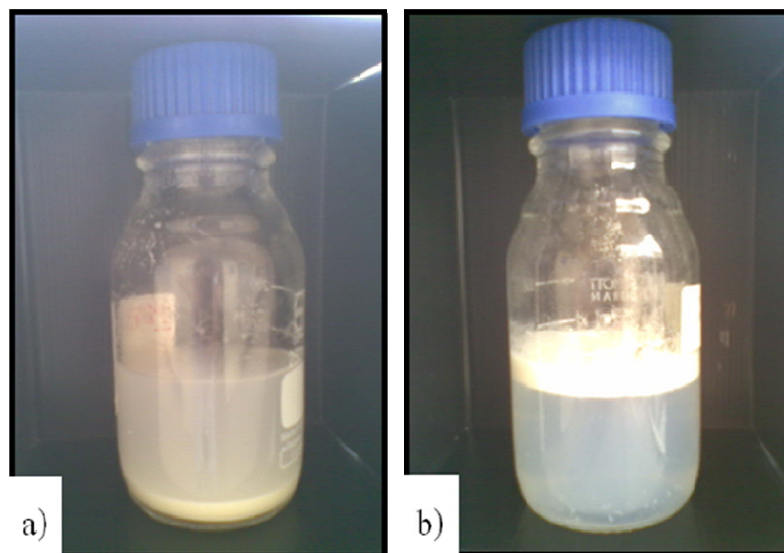


รูปที่ 4.1 Optical micrograph ของอนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีน

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าอนุภาคของพอลิไคไวนิลเบนซีนที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นทรงกลม โดยที่ตลอดทั้งอนุภาคเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีการแยกชั้น โดยมีขนาดของอนุภาคอยู่ในระดับไมโครเมตรและมีการกระจายของขนาดอนุภาคค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของอนุภาคที่เตรียมโดยใช้เครื่องไฮโมจิโนเซอร์ในการเตรียมหยดมอนอเมอร์ อนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้นี้จะใช้เป็นตัวแทนเปรียบเทียบกับพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูลและพอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคน ซึ่งจะทำการเตรียมในขั้นตอนต่อไป

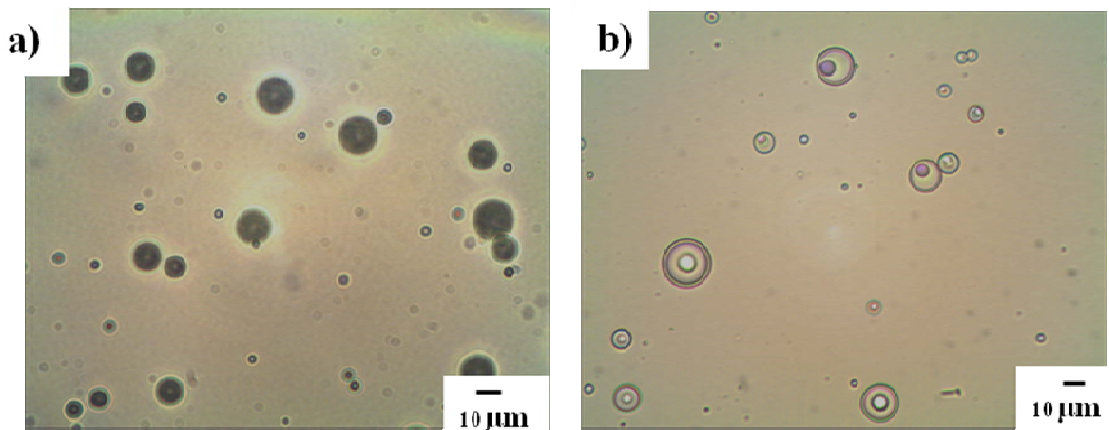
4.2 การเตรียมพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อนด้วยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย

การทดลองนี้ เป็นการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อน ด้วยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย ซึ่งในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลนี้ ใช้กลไกการแยกวัฏภาคภายในหยดมอนอเมอร์ (Internal phase separation) ซึ่งมีหลักการ คือ เริ่มต้นภายในหยดมอนอเมอร์จะมี ออกตะเดกเคน เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ และไดไวนิลเบนซีน ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อเกิดการพอลิเมอไรเซชัน เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์จะแตกตัวเกิดเป็นเรดิคัลเนื่องจากความร้อน จากนั้นจะทำปฏิกิริยากับไดไวนิลเบนซีนและเกิดเป็นสายโซ่ของพอลิเมอร์ เมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ยาวขึ้น จนถึงจุดๆหนึ่งที่เรียกว่า จุดวิกฤต (Critical chain length) สายโซ่พอลิเมอร์จะไม่สามารถละลายอยู่ภายในต่อไปได้อีก จึงมีการแยกตัวออกจากส่วนไดไวนิลเบนซีนและออกตะเดกเคน และเมื่อทำการพิจารณาความสามารถในการเข้าใกล้ตัวของพอลิไดไวนิลเบนซีนกับออกตะเดกเคน พบว่าพอลิไดไวนิลเบนซีนสามารถอยู่ใกล้ชั้นน้ำได้มากกว่า เนื่องจากค่าแรงตึงระหว่างผิว (Interfacial tension) ของพอลิไดไวนิลเบนซีนกับน้ำ ต่ำกว่าของออกตะเดกเคนกับน้ำ ดังนั้น การที่พอลิไดไวนิลเบนซีน อยู่ชั้นนอกจะมีความเสถียรมากกว่า พอลิไดไวนิลเบนซีนจึงเคลื่อนที่ออกไปอยู่ด้านนอกและเกิดการตกตะกอนเป็นชั้นของพอลิไดไวนิลเบนซีนหุ้มออกตะเดกเคนซึ่งอยู่ด้านใน เพื่อเป็นการยืนยันว่าสามารถเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลได้จริง จึงได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะและรูปร่างของอนุภาคพอลิไดไวนิลเบนซีน และพอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคน ได้ผลดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคพอลิไดไวนิลเบนซีนที่เตรียมได้เมื่อตั้งทิ้งไว้: a) อนุภาคพอลิไดไวนิลเบนซีน และ b) พอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูล

หลังจากการสังเคราะห์ เมื่อนำอนุภาคพอลิไควนิลเบนซีนและพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล ตั้งทิ้งไว้มากกว่า 1 ชั่วโมง จะพบว่า อนุภาคพอลิไควนิลเบนซีนจะเกิดการตกตะกอนที่ก้นขวด ในขณะที่พอลิไควนิลเบนซีนแคปซูลจะลอยขึ้นด้านบนเกิดเป็นชั้นของแคปซูลที่มีลักษณะคล้ายครีม (Creaming) เนื่องจากเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของ PDVB เทียบกับน้ำ พบว่า PDVB จะมีความหนาแน่นมากกว่าจึงทำให้อนุภาคของ PDVB ตกตะกอนอยู่ที่ก้นขวด ในขณะที่ เมื่อพิจารณา PDVB-OD เทียบกับน้ำ ความหนาแน่นของทั้งอนุภาคจะต่ำกว่าน้ำ มีผลทำให้อนุภาคเกิดการลอยตัว และเกิดเป็นชั้นของแคปซูลที่มีลักษณะคล้ายครีมนั่นเอง



รูปที่ 4.3 Optical micrograph ของอนุภาคพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูลที่สังเคราะห์ได้: a) อนุภาคพอลิไควนิลเบนซีน และ b) พอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าทั้งอนุภาคพอลิไควนิลเบนซีน และพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล จะมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยจะมีความแตกต่างกันที่ ภายในอนุภาคพอลิไควนิลเบนซีนเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด ในขณะที่พอลิไควนิลเบนซีนแคปซูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่อยู่ภายใน คือ ออกตะเดกเคนที่ถูกหุ้มด้วยพอลิไควนิลเบนซีนที่เป็นชั้นนอก

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเอาขบวนการสังเคราะห์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติมาผสมเพื่อเตรียมเป็นเปลือกแคปซูล เพื่อลดการใช้มอนอเมอร์จากปิโตรเคมี และปรับปรุงสมบัติของเปลือกแคปซูลให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ดังนั้น จะต้องทำการศึกษาว่าการเติมขบวนการสังเคราะห์ไปจะมีผลต่อการเกิดแคปซูลอย่างไรบ้าง โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ น้ำหนักโมเลกุลของขบวนการสังเคราะห์ และปริมาณของขบวนการสังเคราะห์

4.2.1 การศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ในขั้นตอนแรกก่อนนำยางธรรมชาติมาใช้จะทำการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ ซึ่งได้ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ โดยการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยสารออกซิไดซ์ คือ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการเขย่าด้วยคลื่นความถี่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดซ์ จะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติดลดลง เนื่องจากสารออกซิไดซ์จะทำให้พันธะคู่ของยางธรรมชาติแตกออก ทำให้กลายเป็นโซ่ที่สั้นลง

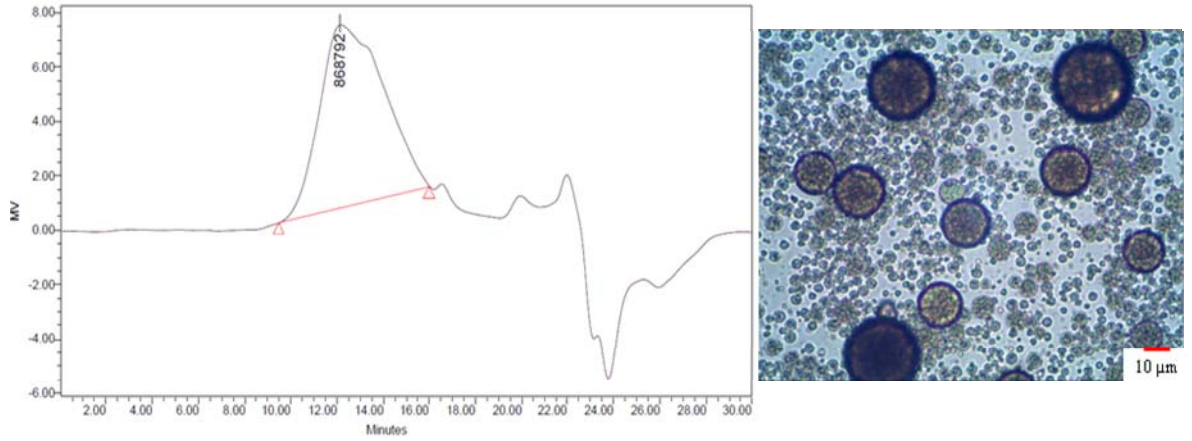
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ปริมาตรต่างๆ

ปริมาตรสารออกซิไดซ์ (มิลลิลิตร)	Mn (g/mol)	Mw (g/mol)	Mw/Mn
0	308,130	886,956	2.87
H ₂ O ₂ : 20	162,519	356,654	2.19
H ₂ O ₂ : 40	146,001	368,508	2.52
KPS : 40	119,876	320,133	2.60
KPS : 80	89,923	1,405,405	15.62

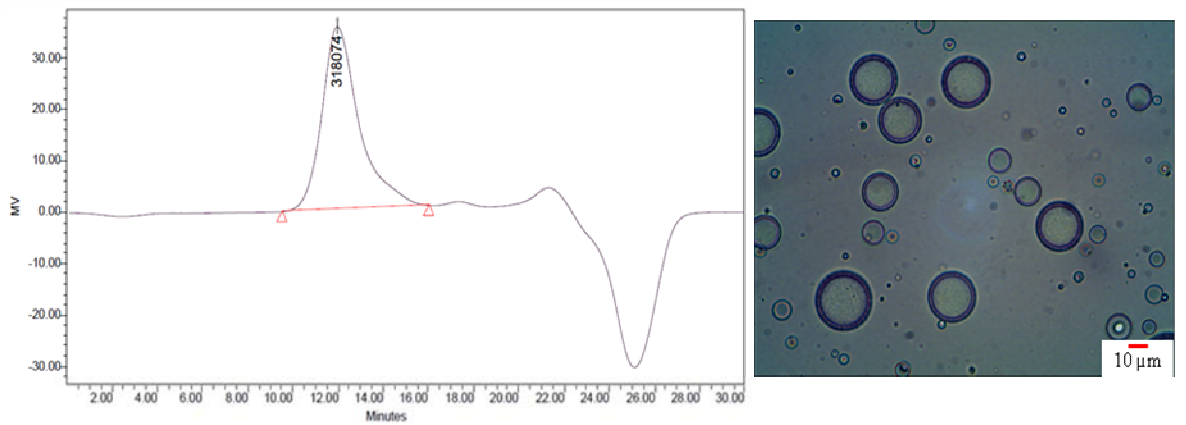
ยางธรรมชาติที่ได้จะนำไปใช้ในการศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่มีต่อการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มออกตะเดเคนต่อไป

ในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลของไดไวนิลเบนซีนและยางธรรมชาตินี้ ได้ทำการเติมยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆลงไปผสมในปริมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์โดยใช้โทลูอินเป็นตัวทำละลาย เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากทำให้ละลายได้ยากและไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้กับไดไวนิลเบนซีน ออกตะเดเคนและเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์จากนั้นเตรียมเป็นหยดมอนอเมอร์โดยการปั่นด้วยความเร็วสูงที่ 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำสารแขวนลอยของหยดมอนอเมอร์ที่ได้ไปทำการสังเคราะห์ต่อทันที โดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งยางธรรมชาติที่เมื่อนำไปสังเคราะห์แล้วทำให้เกิดเป็นแคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติโดยที่พอลิเมอร์แคปซูลนั้นมีการแยกเฟสชัดเจนระหว่างเปลือกพอลิเมอร์กับออกตะเดเคนที่ถูกหุ้มอยู่ข้างใน คือยางธรรมชาติที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

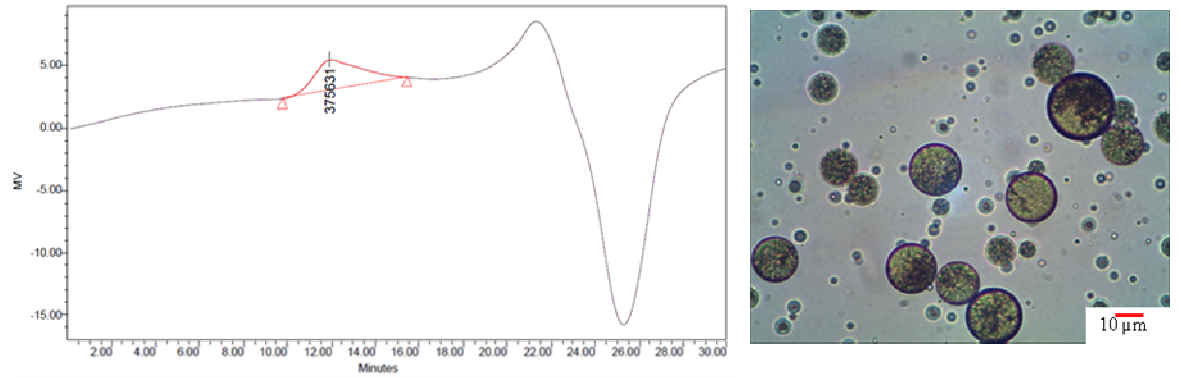
ปริมาณ 20 มิลลิลิตรเป็นสารออกซิไดซ์ ที่ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 ส่วนยางธรรมชาติที่มีสารออกซิไดซ์สภาวะอื่นนั้นไม่สามารถเกิดการแยกเฟสระหว่างเปลือกพอลิเมอร์กับออกตะเดกเคนได้ ดังรูปที่ 4.4, 4.6, 4.7 และ 4.8



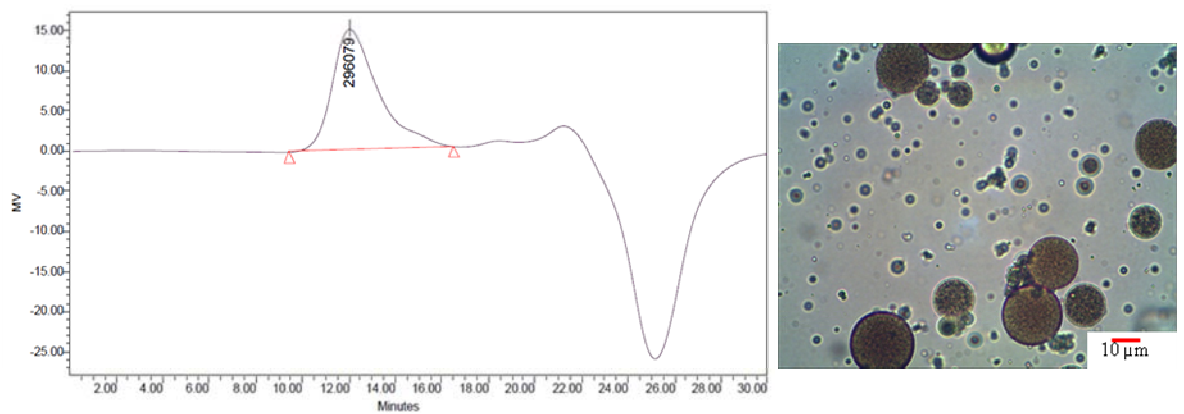
รูปที่ 4.4 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติ และOptical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 308,130 g/mol)



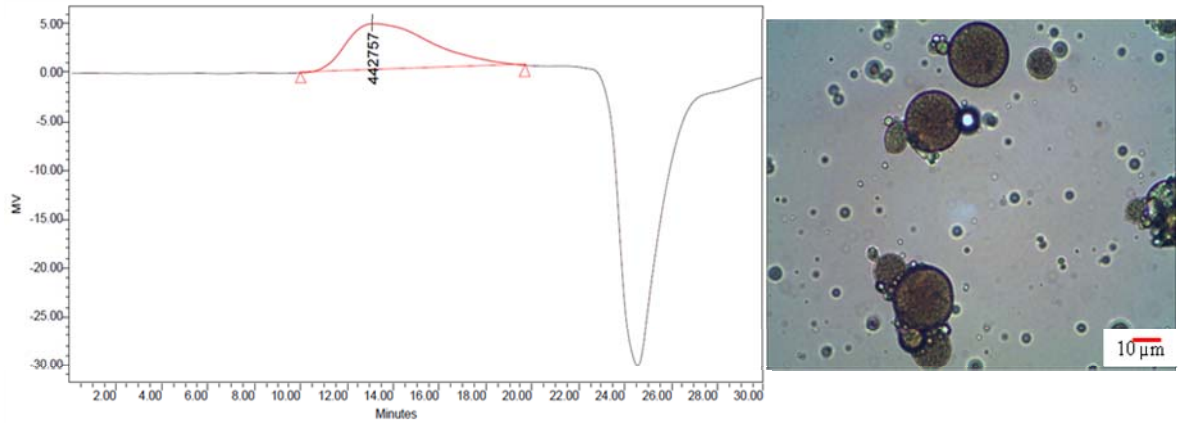
รูปที่ 4.5 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติที่มี H_2O_2 20 ml เป็นตัวออกซิไดซ์ในการลดน้ำหนักโมเลกุล และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol)



รูปที่ 4.6 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติที่มี H_2O_2 40 ml เป็นตัวออกซิไดซ์ในการลดน้ำหนักโมเลกุล และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 146,001 g/mol)



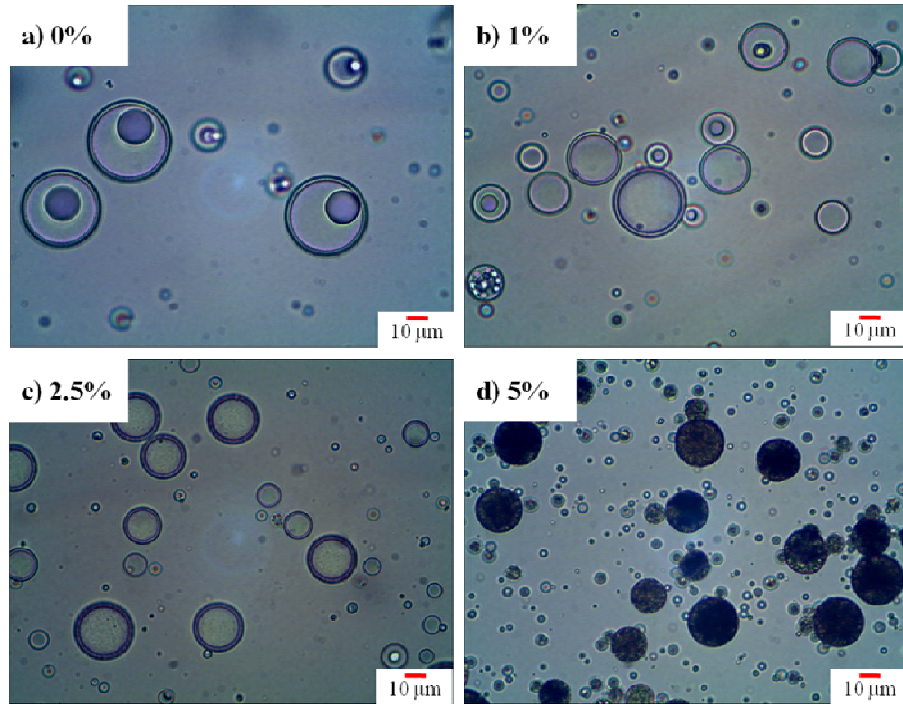
รูปที่ 4.7 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติที่มี KPS 40 ml เป็นตัวออกซิไดซ์ในการลดน้ำหนักโมเลกุล และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 119,876 g/mol)



รูปที่ 4.8 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติที่มี KPS 80 ml เป็นตัวออกซิไดซ์ในการลดน้ำหนักโมเลกุล และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 89,923 g/mol)

4.2.2 การศึกษาผลของปริมาณของยางธรรมชาติ

อีกปัจจัยหนึ่งที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา คือ ผลของปริมาณยางธรรมชาติที่ผสมลงไป โดยได้เลือกใช้ยางธรรมชาติยางธรรมชาติที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 20 มิลลิตรเป็นสารออกซิไดซ์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 162,519 g/mol ผสมลงไป ในปริมาณต่าง ๆ จากนั้นเตรียมเป็นหยดมอนอเมอร์โดยการปั่นด้วยความเร็วสูงที่ 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำสารแขวนลอยของหยดมอนอเมอร์ที่ได้ไปทำการสังเคราะห์ต่อทันที โดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 Optical micrograph ของพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol ปริมาณต่างๆ (%wt) : a) 0, b) 1, c) 2.5, และ d) 5

จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 162,159 g/mol ที่ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะได้พอลิเมอร์แคปซูลที่มีการแยกเฟสชัดเจนระหว่างเปลือกพอลิเมอร์กับออกตะเดคเคนที่ถูกหุ้มอยู่ข้างใน เหมือนกับในกรณีที่ไม่มีการผสมยางธรรมชาติ ดังรูปที่ 4.9 a) เมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติเป็น 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์แคปซูลยังสามารถเกิดขึ้นได้ แต่การแยกเฟสภายในจะไม่สมบูรณ์ สังเกตได้จากภายในจะไม่ใสเหมือนรูปที่ 4.9 a) และ b) เมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติอีกเป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะไม่สามารถเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลได้ แต่จะได้อนุภาคพอลิเมอร์ที่สายโซ่พอลิเมอร์กระจายตัวอยู่ด้านในอนุภาค เนื่องจากการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติเป็นการเพิ่มความหนืดภายในหยดมอนอเมอร์ ซึ่งจะมีผลต่อการแยกเฟสของพอลิไควนิลเบนซีนที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์ สายโซ่ของยางธรรมชาติจะทำให้มีความหนืดภายในหยดมอนอเมอร์ที่สูง จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิไควนิลเบนซีน ไปยังรอยต่อระหว่างผิวของหยดมอนอเมอร์กับน้ำทำให้ไม่สามารถเกิดเป็นเปลือกพอลิเมอร์ได้ จากผลการทดลองนี้จะเห็นได้ว่า ปริมาณของยางธรรมชาติเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลโดยตรงต่อการเกิดแคปซูล จาก optical micrograph จะเห็นได้ว่า แคปซูลที่เตรียมได้มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสูง (Polydisperse) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทั่วไปของการเตรียมหยดมอนอเมอร์ โดยใช้การปั่นกวนความเร็วสูงด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์และ

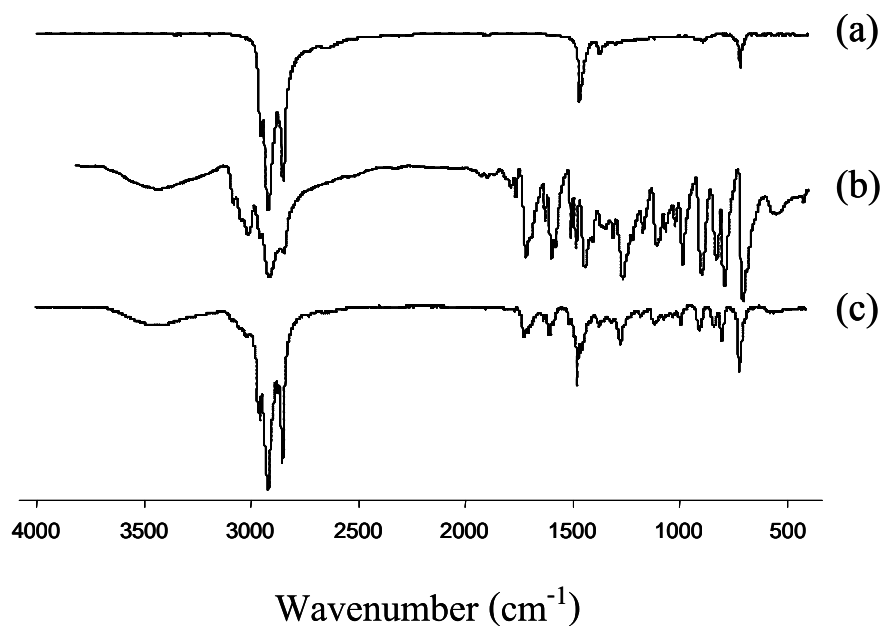
ดังนั้นในการเตรียมพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล จะต้องเลือกใช้ยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณที่เหมาะสม จึงจะเกิดการแยกเฟสได้สมบูรณ์

4.3 การหาลักษณะเฉพาะและทดสอบสมบัติของอนุภาคพอลิเมอร์และพอลิเมอร์แคปซูล

เมื่อเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลได้แล้ว จะทำการศึกษาลักษณะเฉพาะโดยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

4.3.1 โครงสร้างทางเคมี (Chemical structure)

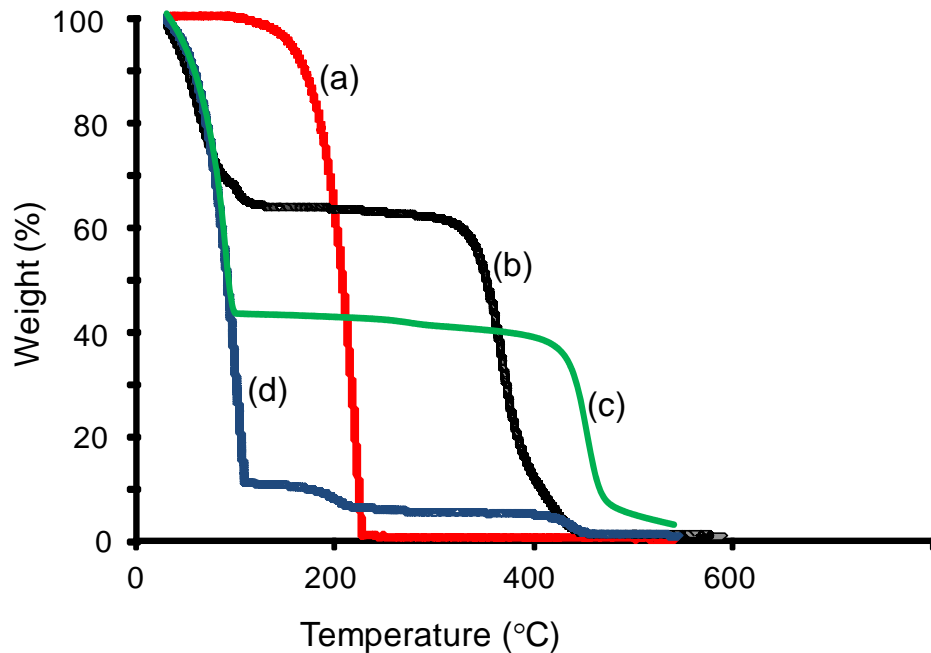
การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูลที่เตรียมได้โดยใช้ Fourier Transform Infrared Spectroscopy ได้ผลดังรูปที่ 4.10 ในกรณีของออกตะเดเคนที่ไม่ถูกหุ้ม (a) สเปกตรัมแสดงพีกของการสั่นที่ 720 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกของ in-plane rocking vibration ของหมู่ methylene group พีกการคูดกลืนที่ 1460 and 1360 cm^{-1} ของ C-H stretching ของ methylene bridges และยังพบ alkyl C-H stretching ของ methyl และ methylene groups ที่ 2920 and 2850 cm^{-1} ในกรณีของพอลิไควนิลเบนซีน (b) จะพบพีกการคูดกลืนที่ $700-750\text{ cm}^{-1}$ ของ benzene ring deformation พีกที่ $1500, 1600\text{ cm}^{-1}$ ของ benzene ring C=C stretching และพบพีกของ aliphatic C-H stretching ที่ 2920 cm^{-1} ในขณะที่ 3030 cm^{-1} เป็นพีกของ aromatic C-H stretching ซึ่งพีกทั้งหมดของออกตะเดเคนและพอลิไควนิลเบนซีนที่กล่าวมานี้ จะพบในสเปกตรัมของพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล (c) เช่นกัน และไม่พบพีกใหม่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงว่าพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูลมีออกตะเดเคนผสมอยู่ด้วย



รูปที่ 4.10 FTIR spectra ของ (a) ออกตะเดเคน (b) พอลิไควนิลเบนซีน และ (c) พอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล

4.3.2 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

เมื่อทำการศึกษาการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของออกตะเดกเคน อนุภาคพอลิไควนิลเบนซีนและพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล ได้ผลดังรูปที่ 4.11

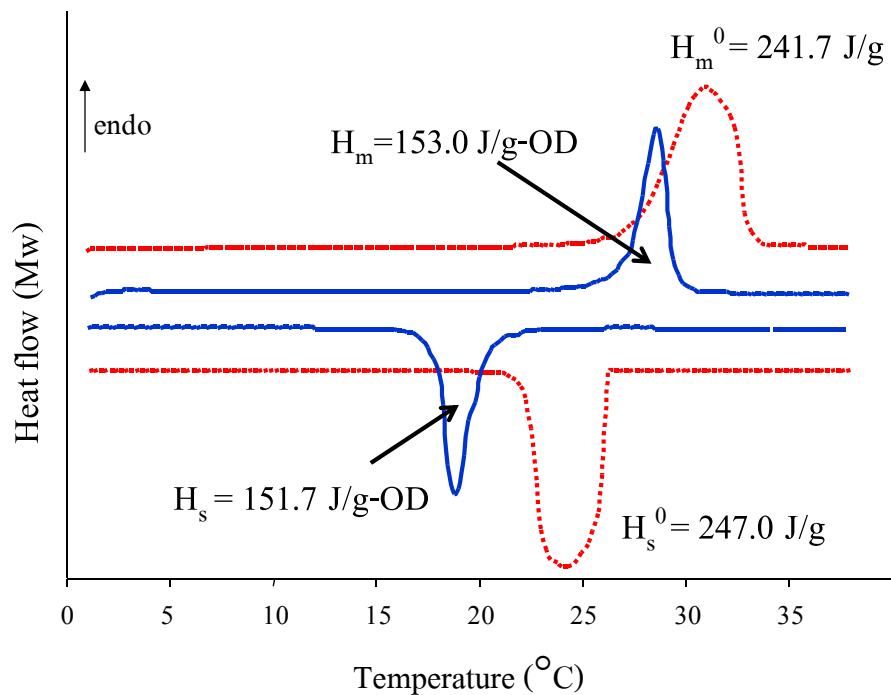


รูปที่ 4.11 TGA thermogram ของ (a) ออกตะเดกเคน (b) ยางธรรมชาติลาเท็กซ์ (c) อนุภาคพอลิไควนิลเบนซีน และ (d) พอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล ที่เตรียมโดยใช้ปริมาณยางธรรมชาติ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ อัตราเร็วและเวลาในการปั่นเตรียมหอดมอนอเมอร์ที่ 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

จากรูปเป็นการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของออกตะเดกเคนและพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล รวมทั้งองค์ประกอบของพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูลที่เตรียมได้ โดยใช้เครื่อง TGA จาก TGA thermogram จะเห็นว่าเส้น (a) ออกตะเดกเคนที่ยังไม่ได้ทำการหุ้มมีอยู่ประมาณ 99.6 % จะมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวระหว่าง 162-305 องศาเซลเซียส เส้น (b) แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติลาเท็กซ์ ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำที่เกิดการสลายตัวในช่วงแรก และยางธรรมชาติที่เกิดการสลายตัวในช่วงที่ 2 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิไควนิลเบนซีน (เส้น (c)) เกิดขึ้นที่ประมาณ 300-500 องศาเซลเซียส ในขณะที่การสลายตัวของพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล จะมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวทั้งหมด 3 ช่วง ช่วงแรกจะเป็นการสลายตัวของน้ำซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) หรือ วัฏภาคน้ำ (Aqueous phase) ที่เป็นตัวกลางในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูล

ด้วยกระบวนการแบบแขวนลอย เนื่องจากน้ำเป็นสาร โมเลกุลเล็กจึงมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวที่ต่ำ คือจะมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวที่ ประมาณ 100 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 จะเป็นการสลายตัวของ ออกตะเดเคนที่ถูกหุ้ม จะมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วง 180-295 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเมื่อ เปรียบเทียบกับออกตะเดเคนที่ยังไม่ได้ทำการหุ้ม ออกตะเดเคนที่อยู่ในแคปซูลจะมีค่าอุณหภูมิ สลายตัวสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากออกตะเดเคนถูกหุ้มด้วยพอลิไคไวนิลเบนซีน และช่วงสุดท้ายเป็น การสลายตัวของพอลิไคไวนิลเบนซีน เนื่องจากพอลิไคไวนิลเบนซีนเป็นพอลิเมอร์ มีโครงสร้างขนาดใหญ่ และเป็นแบบร่างแห จึงเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิสลายตัวของพอลิ ไคไวนิลเบนซีน (c) ส่วนการสลายตัวของยางธรรมชาติ ไม่สามารถมองเห็นได้ เนื่องจากมีปริมาณ ของยางธรรมชาติ น้อยมากในแคปซูล นอกจากนี้ยังสามารถหาปริมาณสารที่เป็นองค์ประกอบได้ คือ มีน้ำ 76.0 % ออกตะเดเคน 12.0 % และพอลิไคไวนิลเบนซีน 10.0 % ซึ่งจะเห็นว่า อัตราส่วนของ พอลิไคไวนิลเบนซีน:ออกตะเดเคน จะใกล้เคียงกับอัตราส่วนที่ใช้ในการสังเคราะห์ (DVB:OD = 50:50 % wt/wt)

เมื่อทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของออกตะเดเคนด้วยเครื่อง DSC พบว่า ออก ตะเดเคนที่ยังไม่ได้ถูกหุ้มมีค่าความร้อนในการหลอมเหลวเท่ากับ 241.7 J/g ค่าอุณหภูมิในการ หลอมเหลว เท่ากับ 29.9 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนในการแข็งตัว มีค่าเท่ากับ 247.0 J/g และค่า อุณหภูมิในการแข็งตัว มีค่าเท่ากับ 25.4 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.12

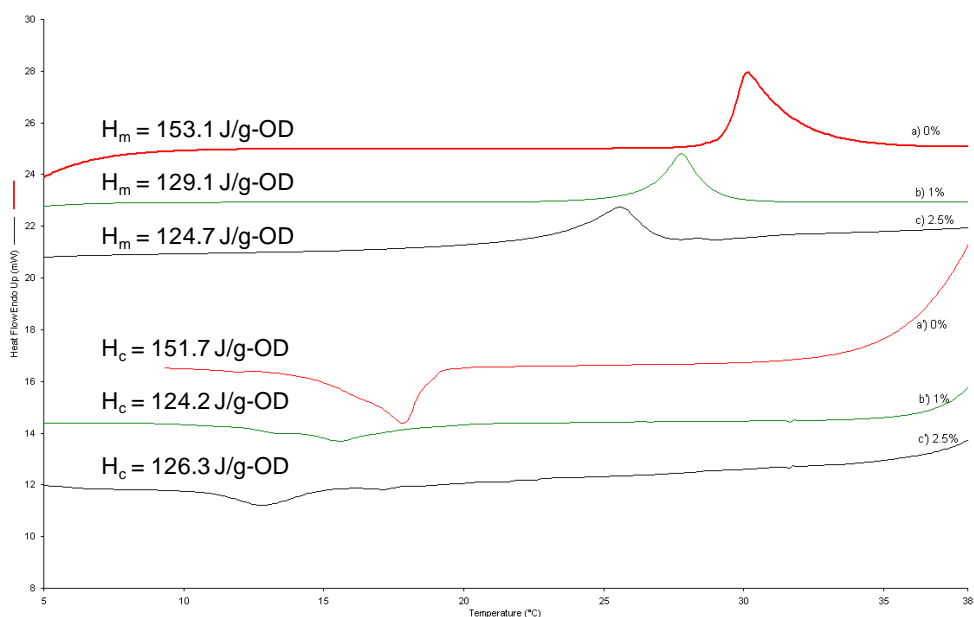


รูปที่ 4.12 DSC Thermogram ของออกตะเดเคน (เส้นสีดำ) และออกตะเดเคนที่ถูกหุ้มอยู่ในพอลิ ไคไวนิลเบนซีนแคปซูล (เส้นสีแดง) (อัตราการสแกน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จาก 0-40 องศา เซลเซียส)

หมายเหตุ ΔH_m คือ ค่าความร้อนในการหลอมเหลว
 ΔH_c คือ ค่าความร้อนในการเกิดผลึก
 T_m คือ อุณหภูมิในการหลอมเหลว
 T_c คือ อุณหภูมิในการเกิดผลึก

ในขณะที่ DSC Thermogram ของออกตะเดคเคนที่อยู่ในพอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูล มีค่าความร้อนในการหลอมเหลวเท่ากับ 153.0 J/g-OD ค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว มีค่าเท่ากับ 28.5 °C ค่าความร้อนในการแข็งตัว มีค่าเท่ากับ 151.7 J/g-OD และ ค่าอุณหภูมิในการแข็งตัว มีค่าเท่ากับ 18.0 °C

เมื่อมีการผสมยางธรรมชาติลงไปเพื่อเตรียมเป็นเปลือกแคปซูล สมบัติทางความร้อนของออกตะเดคเคนที่ถูกหุ้มอยู่มีค่าลดลงจากเดิม (ของพอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูล) น่าจะเกิดเนื่องจากยางธรรมชาติซึ่งจัดเรียงตัวอยู่เปลือกชั้นในขัดขวางการเกิดผลึกของออกตะเดคเคน อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติจาก 1 เปอร์เซ็นต์เป็น 5 เปอร์เซ็นต์ ไม่ได้แสดงผลการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญ

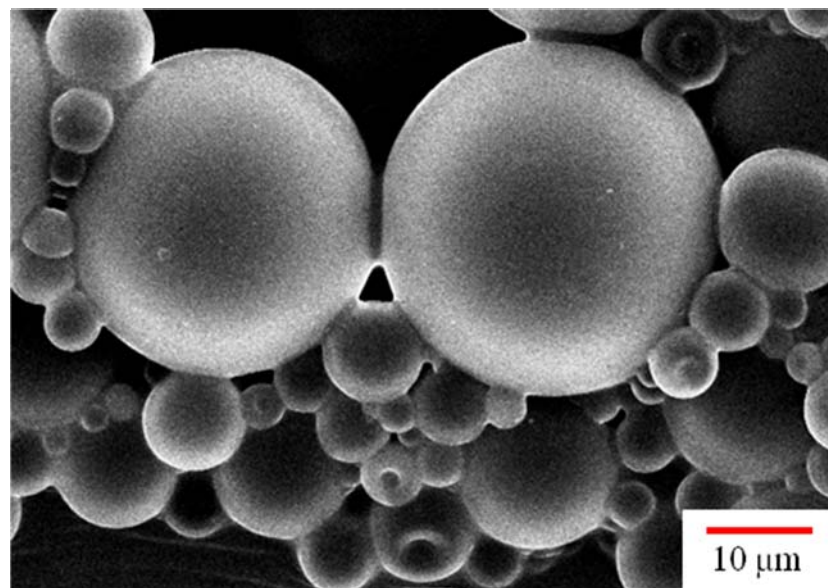


รูปที่ 4.13 DSC thermogram ของออกตะเดคเคนในพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่เตรียมได้โดยใช้ปริมาณยางธรรมชาติต่างๆ โดยใช้อัตราการสแกน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จาก 0-40 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของออกตะเดกเคนที่อยู่ในพอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่ใช้ยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol ปริมาณต่างๆ

NR (%wt)	ค่าความร้อนในการเปลี่ยนสถานะ		อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะ	
	การหลอมเหลว (ΔH_m) (J/g-OD)	การแข็งตัว (ΔH_s) (J/g-OD)	การหลอมเหลว (T_m) ($^{\circ}\text{C}$)	การแข็งตัว (T_s) ($^{\circ}\text{C}$)
0	153.1	-151.7	19.0-33.0	23.0-10.0
1	129.1	-124.2	19.0-31.0	26.0-8.0
2.5	124.7	-126.3	15.0-29.0	20.0-4.0
5	114.5	-106.7	14.0-29.0	26.0-6.0

เมื่อทำการศึกษารูปร่างของพอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ได้ผลดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 SEM micrograph ของพอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากรูป SEM จะเห็นได้ว่าผิวด้านนอกของแคปซูลมีความเรียบและสม่ำเสมอ แสดงว่าเป็นเปลือกพอลิไคไวนิลเบนซีน ส่วนยางธรรมชาติซึ่งจะมีความเหนียวเหนอะเนื่องจากมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าอุณหภูมิห้องจะจัดเรียงตัวเป็นเปลือกชั้นใน

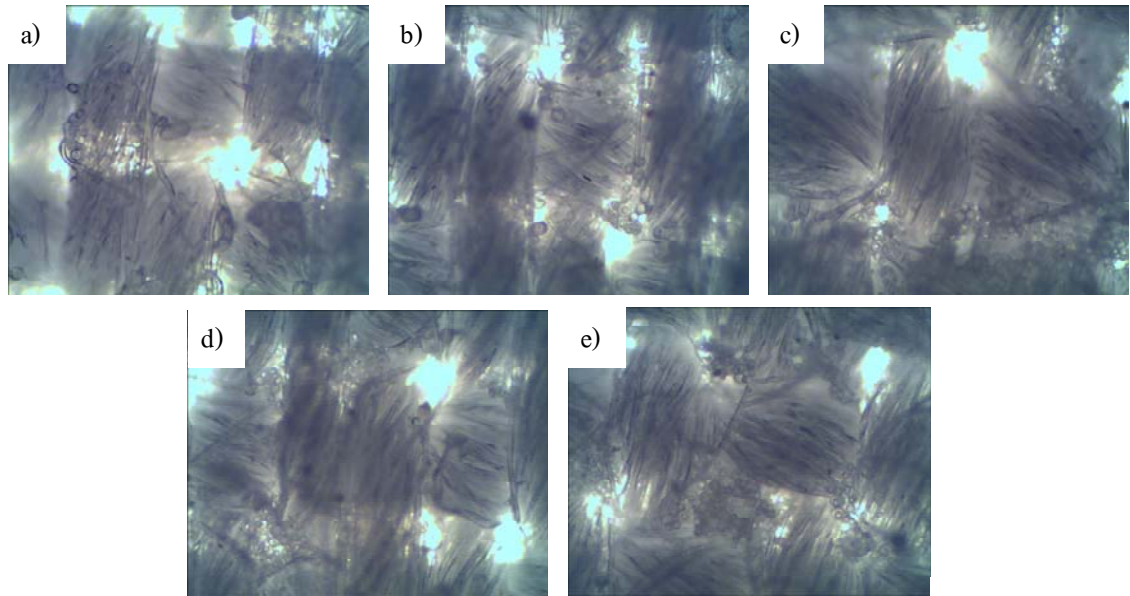
4.4 การเคลือบผ้าด้วยพอลิเมอร์แคปซูล

ในขั้นตอนสุดท้ายของงานวิจัยนี้ ได้ทำการนำแคปซูลที่เตรียมได้มาทดลองเคลือบบนผ้าฝ้าย โดยใช้อะคริลิกอิมัลชันเป็นสารตัวเชื่อม เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์แคปซูลต่อสารตัวเชื่อม จากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเคลือบติดของแคปซูลบนผ้าได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการเคลือบพอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล (ยางธรรมชาติ 2.5% โดยน้ำหนัก) บนผ้าฝ้าย

	แคปซูล:สารตัวเชื่อม				
	1:5	1:1	2:1	5:1	10:1
เปอร์เซ็นต์การเคลือบติด (%)	21.99	25.04	13.28	11.10	12.78

จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อใช้อัตราส่วนแคปซูล:สารตัวเชื่อม เป็น 1:1 จะมีเปอร์เซ็นต์การเคลือบติดสูงที่สุด แสดงว่ามีปริมาณของแคปซูลและสารตัวเชื่อมที่เหมาะสมกับพื้นที่ของผ้า แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแคปซูลขึ้นไปอีก เปอร์เซ็นต์การเคลือบติดลดลง เนื่องจากมีปริมาณแคปซูลมากเกินไป และจากการศึกษาค้นคว้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่ามีกระจายตัวของแคปซูลบนผ้าดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 Optical micrograph ของผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยพอลิไดเมทิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่อัตราส่วนต่างๆ แคปซูล:สารตัวเชื่อม a) 1:5 b) 1:1 c) 2:1 d) 5:1 และ e) 10:1

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

โครงการนี้ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคนโดยใช้ไดไวนิลเบนซีน-นอ-นอเมอร์และยางธรรมชาติด้วยวิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอยโดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง และอัตราการป้อนเตรียมหยดมอนอเมอร์ที่ 5,000 รอบต่อนาที เวลา 5 นาที การใช้ยางธรรมชาติเข้ามาผสมนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้มอนอเมอร์จากปิโตรเลียมและปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเปลือกพอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูลให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ในขั้นตอนการดำเนินงาน ได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล โดยศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณยางธรรมชาติ

ในการศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่มีต่อการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูล พบว่าเมื่อใช้ยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (308,130 g/mol) ไม่สามารถเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลได้ แม้ว่า จะลดปริมาณยางธรรมชาติลงจนถึง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่ยางธรรมชาติ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเกินไป เมื่อละลายอยู่ในหยดมอนอเมอร์ทำให้ภายในหยดมอนอเมอร์มีความหนืดสูง จึงขัดขวางการแยกเฟสของพอลิไดไวนิลเบนซีนที่เกิดขึ้นระหว่างการพอลิเมอไรเซชัน ดังนั้นจึงได้ทำการเตรียมยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงโดยใช้วิธีการออกซิเดชันด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ปริมาณต่างๆ จากการทดลองพบว่า ทั้งน้ำหนักโมเลกุลและค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลมีผลต่อการเกิดแคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร มีน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol และมีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2 เมื่อนำไปเตรียมเป็นพอลิเมอร์แคปซูล โดยใช้ปริมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเตรียมเป็นพอลิเมอร์แคปซูลได้ โดยเกิดการแยกเฟสอย่างสมบูรณ์ระหว่างออกตะเดกเคนที่เป็นแกนภายในกับพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติที่เป็นเปลือกภายนอก ส่วนยางธรรมชาติที่ทำการลดน้ำหนักโมเลกุลที่สภาวะอื่นๆ ไม่สามารถเตรียมเป็นพอลิเมอร์แคปซูลได้ ถึงแม้ว่าจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าก็ตามเนื่องจากมีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลสูง ดังนั้นในขั้นตอนต่อมา จึงได้ทำการศึกษาผลของปริมาณของยางธรรมชาติ พบว่าเมื่อใช้ยางธรรมชาติ 1 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เกิดพอลิเมอร์แคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติที่หุ้มออกตะเดกเคนอยู่ภายใน แต่เมื่อเพิ่มยางธรรมชาติเป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลได้ ซึ่งน่าจะมาจากการที่มีปริมาณของยางธรรมชาติมากเกินไปจะทำให้ความหนืดภายในของหยดมอนอเมอร์สูงเกินไปจึงขัดขวางการแยกเฟสของพอลิไดไวนิลเบนซีน ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล คือ น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัว

ของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณของยางธรรมชาติ เมื่อนำแคปซูลที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อน โดยการศึกษาการสลายตัวเนื่องจากความร้อนพบว่า พอลิเมอร์แคปซูลมีออกตะเดกเคนซึ่งมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่ประมาณ 150-220 องศาเซลเซียส และพอลิไคไวนิลเบนซีนซึ่งมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่ประมาณ 300-500 องศาเซลเซียส เป็นองค์ประกอบ แต่ไม่พบช่วงการสลายตัวของยางธรรมชาติ เนื่องจากปริมาณยางธรรมชาติที่ใช้สังเคราะห์มีน้อยมากเมื่อเทียบกับพอลิไคไวนิลเบนซีน และออกตะเดกเคน เมื่อทำการทดสอบหาค่าอุณหภูมิและค่าความร้อนในการเปลี่ยนสถานะของออกตะเดกเคนพบว่า ออกตะเดกเคนที่อยู่ภายในพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูล มีค่าความร้อนในการหลอมเหลวเท่ากับ 153.0 J/g-OD และมีค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวเท่ากับ 19-33 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนในการแข็งตัวเท่ากับ 151.7 J/g-OD และมีค่าอุณหภูมิในการแข็งตัวเท่ากับ 23-10 องศาเซลเซียส แต่ค่าความร้อนในการหลอมเหลวและแข็งตัวของออกตะเดกเคนที่อยู่ภายในพอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลมีค่าลดลง ซึ่งน่าจะเนื่องจากการที่มียางธรรมชาติปนอยู่ในออกตะเดกเคนจะขัดขวางการหลอมเหลวหรือแข็งตัวของออกตะเดกเคน

ในขั้นตอนสุดท้ายได้ทดลองนำแคปซูลที่เตรียมได้ไปเคลือบผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการ Pad-Dry-Cure โดยใช้อะคริลิกอิมัลชันเป็นสารตัวเชื่อม พบว่าพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้สามารถเคลือบติดบนผ้าและไม่เกิดการแตกระหว่างกระบวนการเคลือบผ้า

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการลดน้ำหนักยางธรรมชาติโดยใช้วิธีอื่น เพื่อควบคุมการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล
2. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติชนิดอื่นที่มีศักยภาพเพิ่มมากขึ้นในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูล
3. ควรใช้เทคนิคในการเตรียมพอลิเมอร์ที่มีการควบคุมขนาดให้ใกล้เคียงกัน

เอกสารอ้างอิง

1. Farid MM, Khudhair AM, Razack SAK, Al-Hallaj S: A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Convers Manage* 2004;45:1597–1615.
2. Sanchez L, Sanchez P, Lucas A, Carmona M, Rodriguez JF: Microencapsulation of PCMs with a polystyrene shell. *Colloid Polym Sci* 2007;285:1377-1385.
3. Zhang P, Ma ZW, Wang RZ: An overview of phase change material slurries: MPCs and CHS. *Renew Sust Energy Rev* 2010;14:598-614.
4. Sánchez-Silva L, Rodríguez JF, Romero A, Borreguero AM, Carmona M, Sánchez P: Microencapsulation of PCMs with a styrene-methyl methacrylate copolymer shell by suspension-like polymerisation. *Chemical Engineering Journal* 2010;157:216-222.
5. Ai Y, Jin Y, Sun J, Wei D: Microencapsulation of n-hexadecane as phase change material by suspension polymerization. *e-Polymers* 2007;no. 098:1-9.
6. Chaiyasat P, Suzuki T, Minami H, Okubo M: Thermal properties of hexadecane encapsulated in poly(divinylbenzene) particles. *J Applied Polym Sci* 2009;112:3257-3266.
7. Chaiyasat P, Ogino Y, Suzuki T, Okubo M: Influence of water domain formed in hexadecane core inside cross-linked capsule particle on thermal properties for heat storage application. *Colloid Polym Sci* 2008;286:753-759.
8. Chaiyasat P, Ogino Y, Suzuki T, Minami H, Okubo M: Preparation of divinylbenzene copolymer particles with encapsulated hexadecane for heat storage application. *Colloid Polym Sci* 2008;286:217-223.
9. Fang Y, Kuang S, Gao X, Zhang Z: Preparation and characterization of novel nanoencapsulated phase change materials. *Energy Convers Manage* 2008;49:3704-3707.
10. Barari M, Faridi-Majidi R, Madani M, Sharifi-Sanjani N, Oghabian MA: Preparation of Nanocapsules via Emulsifier-Free Miniemulsion Polymerization. *J Nanoscience and nanotechnology* 2009; 9:4348-4352.
11. Sarı A, Alkan C, Karaipekli A, Uzun O: Microencapsulated n-octacosane as phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy* 2009; 83:1757-1763.
12. Sarı A, Alkan C, Karaipekli A: Preparation, characterization and thermal properties of PMMA/n-heptadecane microcapsules as novel solid–liquid microPCM for thermal energy storage. *Applied Energy* 2010; 87:1529-1534.

13. McDonald CJ, Devon MJ: Hollow latex particles: synthesis and applications. *Adv Colloid Interface Sci* 2002;99:181-213.
14. Li C, Mei Z, Liu Q, Wang J, Xu J, Sun D: Formation and properties of paraffin wax submicron emulsions prepared by the emulsion inversion point method. *Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects* 2010;356:71-77.
15. Okubo M, Konishi Y, Minami H: Production of hollow polymer particles by suspension polymerization *Colloid Polym Sci* 1998;276:638-642.
16. Ogino Y, Suzuki T, Okubo M: Preparation of poly (divinylbenzene) particles with encapsulated hexadecane for heat storage application. *Kobunshi Ronbunshu* 2007;64:171-176.
17. Zhang H, Wang X: Fabrication and performances of microencapsulated phase change materials based on n-octadecane core and resorcinol-modified melamine-formaldehyde shell. *Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects* 2009;332:129-138.
18. Fang G, Li H, Yang F, Liu X, Wu S: Preparation and characterization of nano-encapsulated n-tetradecane as phase change material for thermal energy storage. *Chemical Engineering Journal* 2009; 153:217-221.
19. Zhang XX, Fan YF, Tao XM, Yick KL: Fabrication and properties of microcapsules and nanocapsules containing n-octadecane. *Mater Chem Phys* 2004;88.:300-307.
20. Yadav SK, Khilar KC, Suresh AK: Release rates from semi-crystalline polymer microcapsules formed by interfacial polycondensation. *J Membrane Sci* 1997;125:213-218.
21. Zhang H, Wang X: Synthesis and properties of microencapsulated n-octadecane with polyurea shells containing different soft segments for heat energy storage and thermal regulation. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2009;93:1366-1376.
22. Zhang XX, Fan YF, Tao XM, Yick KL: Crystallization and prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes. *Journal of Colloid and Interface Science* 2005;281:299-306.
23. Fan YF, Zhang XX, Wang XC, Li J, Zhu QB: Super-cooling prevention of microencapsulated phase change material
Thermochim Acta 2004;413:1-6.
24. Tyagi VT, Buddhi D: PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renew Sustain Energy Rev* 2007;11:1146-1166.
25. Shin Y, Yoo D, Son K: Development of thermoregulating textile materials with microencapsulated phase change materials (PCM). IV. Performance properties and hand of fabrics treated with PCM

microcapsules. J Appl Polym Sci 2005;97:910-915.

26. Khudhair AM, Farid MM: A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. Energy Convers Manage 2004;45:263–275.

27. Borreguero AM, Carmona M, Sánchez ML, Valverde JL, Rodríguez JF: Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing pcms obtained by suspension polymerization with an optimal core/coating mass ratio. Applied Thermal Engineering 2010;doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.1001.1032.

28. Su JF, Wang LX, Ren L: Preparation and characterization of double-MF shell microPCMs used in building materials. J Appl Polym Sci 2005;97:1755-1762.

29. Seng P, Fuchs A, Wirtz RA: Polymeric phase change composites for thermal energy storage J Appl Polym Sci 2004;93:1240-1251.

30. Covin DP, Cartwright DK: Microclimate environmental control on vegetation and seeds employing microencapsulated water and phase change materials and method US Patent. USA, Delta Thermal Systems, Inc. (Wake County, NC) 2000, vol 6,057,266.

31. Shin Y, Yoo D, Son K: Development of thermoregulating textile materials with microencapsulated phase change materials (PCM). II. Preparation and application of PCM microcapsules J Appl Polym Sci 2005;96:2005-2010.

32. Cho JS, Kwon A, Cho CG: Microencapsulation of octadecane as a phase-change materials by interfacial polymerization in an emulsion system. Colloid and Polymer Science 2002;280:260-266.

33. <http://www.rakbankerd.com/agriculture/wb/show.php?Category=agriculture&No=20392>

34. <http://vewweitynyc.blogspot.com>

35. เสาวณีชัย ก่อวุฒิกุลรังสี การผลิตยางธรรมชาติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี 2547

36. <http://www.reothai.co.th>

37. <http://www.electron.rmutphysic.com>

38. พรพรรณ นิธิอุทัย ยาง:เทคนิคการออกสูตร ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2540

39. <http://web.ku.ac.th/agri/rubber/rubber0.1.html>

ภาคผนวก

แบบเสนอโครงการวิจัย

แบบเสนอโครงการวิจัย (research project)

ประกอบการเสนอของงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 ตามมติคณะรัฐมนตรี

ชื่อโครงการวิจัย

การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนโดยใช้ยางธรรมชาติ

Improvement of Polymer Capsule Encapsulated Heat Storage Material with Natural Rubber

(ภายใต้ “โครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี”

กลุ่มเรื่อง: เทคโนโลยีอุตสาหกรรม)

ส่วน ก : ลักษณะโครงการวิจัย

โครงการวิจัยใหม่

โครงการวิจัยต่อเนื่องระยะเวลา 2 ปี ปีนี้เป็นปีที่...1.. รหัสโครงการวิจัย.....

I ระบุความสอดคล้องของโครงการวิจัยกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผน พัฒนา เศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ. 2550-2554) (กรณาระบุความสอดคล้อง เพียง 1 ยุทธศาสตร์ ที่มีความสอดคล้องมากที่สุด โดยโปรดดูรายละเอียดในผนวก 2) ยุทธศาสตร์ การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุลและยั่งยืน.

- ระบุความสำคัญกับเรื่องที่สอดคล้องมากที่สุด ในยุทธศาสตร์นั้นๆ (โปรดดู รายละเอียดในผนวก 2)

การปรับโครงสร้างการผลิตเพื่อเพิ่มผลิตภาพและคุณค่าของสินค้าและบริการบน ความรู้และความเป็นไทย

II ระบุความสอดคล้องของโครงการวิจัยกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2551-2553) (กรณาระบุความสอดคล้องเพียง 1 ยุทธศาสตร์ 1 กลยุทธ์ และ 1 แผนงานวิจัย ที่มีความสอดคล้องมากที่สุด โดยโปรดดูรายละเอียดในผนวก 3)

- ยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 3 การสร้างศักยภาพและความสามารถในการพัฒนาทาง วิชาการและทรัพยากรบุคคล

- กลยุทธ์การวิจัยที่ 1 การพัฒนานวัตกรรมและองค์ความรู้ใหม่ทางวิทยาศาสตร์ ทางสังคมศาสตร์ และการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ในวิทยาการต่าง ๆ
- แผนงานวิจัยที่ 1.1 การวิจัยและพัฒนานวัตกรรมและองค์ความรู้ใหม่ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เช่น เทคโนโลยีชีวภาพ วัสดุศาสตร์ เทคโนโลยีสารสนเทศและสื่อสาร นาโนเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์การแพทย์และสาธารณสุข เทคโนโลยีด้านอวกาศยุทธโศปกรณ์ เป็นต้น

III ระบุความสอดคล้องของโครงการวิจัยกับกลุ่มเรื่องที่ควรวิจัยเร่งด่วนตามนโยบาย

และยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2551-2553) (โปรดดูรายละเอียดในผนวก 3)

- กลุ่มเรื่อง การเพิ่มมูลค่าสินค้าเกษตรเพื่อการส่งออกและลดการนำเข้า

IV ระบุความสอดคล้องของโครงการวิจัยกับนโยบายรัฐบาล (กรณีระบุความสอดคล้องเพียง 1

หัวข้อที่มีความสอดคล้องมากที่สุด โดยโปรดดูรายละเอียดในผนวก 4)

- นโยบายเร่งด่วนที่จะเริ่มดำเนินการในปีแรก : เรื่อง ดำเนินมาตรการลดผลกระทบจากราคาล้างงาน
- นโยบายระยะการบริหารราชการ 4 ปี ของรัฐบาล : นโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม

ส่วน ข : องค์ประกอบในการจัดทำโครงการวิจัย

1. ผู้รับผิดชอบ [คณะผู้วิจัย บทบาทของนักวิจัยแต่ละคนในการทำวิจัย และสัดส่วนที่ทำกรวิจัย (%)] และหน่วยงานประกอบด้วยหน่วยงานหลักและหน่วยงานสนับสนุน

ที่ปรึกษาโครงการ

Prof. Dr. Masayoshi Okubo

(ให้คำปรึกษาทางด้านการสังเคราะห์พอลิเมอร์และสมบัติคอลลอยด์ของพอลิเมอร์)

หัวหน้าโครงการ

ดร. ปริญญา ไชยสัตย์ สัดส่วนที่ทำวิจัย 50%

(สังเคราะห์ หลักขณะเฉพาะและทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์แคปซูล)

ผู้วิจัยหลัก

ดร.อมร ไชยสัตย์ สัดส่วนที่ทำวิจัย 35%

(สังเคราะห์ หลักขณะเฉพาะและทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์แคปซูล)

ผู้ร่วมวิจัย

ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด สัดส่วนที่ทำวิจัย 15%

(สังเคราะห์อนุภาคพอลิเมอร์)

ผู้สนับสนุนงานวิจัย

Prof. Dr. Masayoshi Okubo

Assoc. Prof. Dr. Hideto Minami

Assoc. Prof. Dr. Per B. Zetterlund

Dr. Toyoko Suzuki

(ให้คำปรึกษาแนะนำการสังเคราะห์อนุภาคพอลิเมอร์ และการทดสอบสมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้อง)

หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบงานวิจัย

- คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3404

หน่วยงานร่วม

- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์ 02-549-3480 โทรสาร 02-549-3483

- Department of Chemical Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Kobe University,
Kobe 657-8501, JAPAN, Tel/Fax: +81-78-803-6161

- Centre for Advanced Macromolecular Design, School of Chemical Sciences & Engineering,
The University of New South Wales, UNSW SYDNEY NSW 2052, Australia
Tel: +61 2 9385 4331; Fax: +61 2 9385 6250

2. ประเภทของการวิจัย

การวิจัยประยุกต์ (applied research)

3. สาขาวิชาการและกลุ่มวิชาที่ทำการวิจัย

สาขาวิชาการของสภากวิจัย

สาขาวิทยาศาสตร์เคมีและเภสัช

4. คำสำคัญ (Keywords) ของโครงการวิจัย

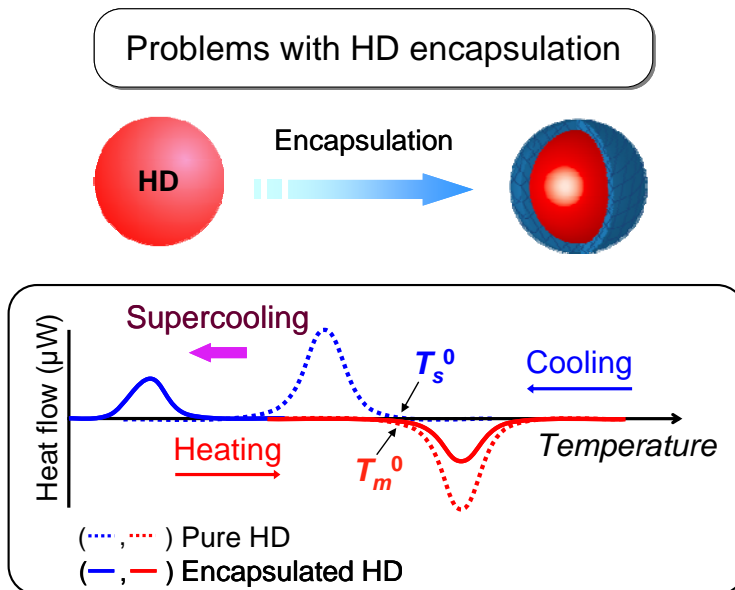
พอลิเมอร์แคปซูล วัสดุเก็บความร้อน พอลิเมอร์ไรเซชันแบบแขวนลอย ยางธรรมชาติ

Polymer capsule, Heat storage material, Suspension polymerization, Natural rubber

5. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบัน พอลิเมอร์แคปซูลมีการศึกษาและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น สิ่งทอ สี การเคลือบ การแพทย์ เป็นต้น สารที่นำมาหุ้มในพอลิเมอร์แคปซูลมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับการใช้งาน วัสดุที่เปลี่ยนแปลงวัฏภาคได้ (Phase Change Materials; PCMs) หรือวัสดุเก็บความร้อน (Heat Storage Materials) เป็น

สารชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมนำมาหุ้มด้วยพอลิเมอร์เพื่อใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ด้านพลังงาน ด้านการเกษตร และด้านสิ่งทอ เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับความร้อนได้มากกว่าน้ำนับสิบเท่า ดังอย่างเช่นเมื่อใส่เสื้อผ้าที่มีแคปซูลของวัสดุเก็บความร้อนในเนื้อผ้า (Thermal adaptable clothes) ออกไปภายนอกอาคารที่มีอุณหภูมิต่ำ ความร้อนที่สะสมอยู่ในวัสดุเก็บความร้อนภายในแคปซูลจะค่อยๆปล่อยออกมาจากเนื้อผ้าและให้ความอบอุ่นแก่ผู้สวมใส่ ในขณะที่เดียวกันหากอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง แคปซูลที่มีสารเก็บความร้อนจะเริ่มกระบวนการสะสมความร้อนเข้าไปในตัวเอง ทำให้ผู้สวมใส่ยังรู้สึกเย็นอยู่ ทำให้รู้สึกเย็นสบายเมื่อสวมใส่กันร้อนกันหนาว ซึ่งหมายถึงใส่ในที่ร้อนก็ไม่ร้อน ใส่ในที่เย็นก็ไม่หนาว [1-3] อย่างไรก็ตาม จากประสบการณ์วิจัยของทีมผู้วิจัยพบว่า การหุ้มสาร (Encapsulation) ด้วยเทคนิคต่างๆให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ยังคงเป็นที่สนใจศึกษาของนักวิจัยในการพัฒนาแคปซูลนี้ นอกจากนี้ การถ่ายเทความร้อนของสารกลุ่มนี้จะให้ประสิทธิภาพที่ต่ำเมื่ออยู่ในแคปซูล เปรียบเทียบกับเมื่อเป็นสารบริสุทธิ์ที่ไม่มีการหุ้มด้วยวัสดุต่างๆ จะเห็นได้จากการที่มีการเลื่อนตำแหน่งของอุณหภูมิแข็งตัว (Solidification temperature, T_s) ซึ่งเรียกว่า “การเกิดการเย็นตัวยิ่งยวด” (Supercooling) ขณะเดียวกันประสิทธิภาพของการเก็บความร้อนของวัสดุเก็บความร้อนก็ยังลดลงด้วย ดังในการเตรียมแคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีน (Polydivinylbenzene) ที่หุ้มเฮกซะเดคเคน (Hexadecane) [4-7] (รูปที่ 1) และในการเตรียมแคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีนที่หุ้มออกตะเดคเคน (Octadecane) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ



รูปที่ 1 การเกิดการลดลงของประสิทธิภาพในการเก็บและถ่ายเทความร้อน และการเกิดการเย็นตัวยิ่งยวดของแคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีนที่หุ้มเฮกซะเดคเคน

นอกจากนี้ ทีมผู้วิจัยยังพบว่าเปลือก (Shell) ของพอลิเมอร์แคปซูลซึ่งมีโครงสร้างแบบร่างแห (Crosslink) จะมีความแข็งแรงสูง แต่มีความยืดหยุ่นต่ำ ซึ่งถ้าได้รับการปรับปรุงให้มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ในสถานะอสัณฐาน (Amorphous) ที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากมีค่าอุณหภูมิกลายแก้ว (Glass Transition Temperature; Tg) อยู่ที่ประมาณ -70 องศาเซลเซียส ทำให้มีสมบัติเด่นในแง่ของความยืดหยุ่น เหมาะแก่การนำไปทำเป็นวัสดุรับแรงกระแทกหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง

ดังนั้น การใช้ยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงสมบัติของแคลปซูลโดยการเพิ่มความยืดหยุ่นของเปลือกพอลิเมอร์จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจอย่างยิ่ง ซึ่งนอกจากจะช่วยในการปรับปรุงสมบัติของแคลปซูลให้ดีขึ้นแล้ว ยังจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุจากธรรมชาติและพืชเศรษฐกิจของประเทศได้ทางหนึ่ง

6. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

6.1 เพื่อเตรียมพอลิเมอร์แคลปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนโดยใช้ไคไวนิลเบนซีนมอนอเมอร์และยางธรรมชาติ ด้วยวิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ในระบบวิวิธพันธ์ เช่น การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบมินิอิมัลชัน และแบบแขวนลอย

6.2 เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์แคลปซูลที่เตรียมได้

6.3 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์แคลปซูลที่เตรียมได้ในข้อ 6.1 กับพอลิเมอร์แคลปซูลที่เตรียมโดยใช้ไคไวนิลเบนซีนมอนอเมอร์ชนิดเดียว

7. ขอบเขตของโครงการวิจัย

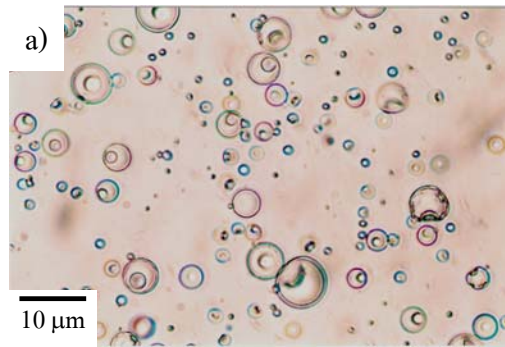
7.1 ทำการเตรียมแคลปซูลพอลิเมอร์ของไคไวนิลเบนซีนมอนอเมอร์และยางธรรมชาติที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อน โดยการสังเคราะห์แบบมินิอิมัลชัน และ การสังเคราะห์แบบแขวนลอย

7.2 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของแคลปซูลพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ เช่น ประสิทธิภาพการหุ้มวัสดุเก็บความร้อนของพอลิเมอร์ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเก็บความร้อนที่อยู่ในแคลปซูล และความคงทนของแคลปซูล เป็นต้น

7.3 เปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์แคลปซูลที่เตรียมได้ในข้อ 7.1 กับพอลิเมอร์แคลปซูลที่เตรียมโดยใช้ไคไวนิลเบนซีนมอนอเมอร์ชนิดเดียว

8. ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ในการศึกษาการเตรียมแคลปซูลของพอลิไคไวนิลเบนซีนที่หุ้มออกตะเดคเคน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (รูปที่ 2) ทีมผู้วิจัยพบว่าเปลือกของพอลิเมอร์แคลปซูลซึ่งมีโครงสร้างแบบร่างแหของไคไวนิลเบนซีน มีความแข็งแรงสูง แต่มีความยืดหยุ่นต่ำ ซึ่งถ้าได้รับการปรับปรุงให้มีความยืดหยุ่นให้สูงขึ้น จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 2 Optical micrograph ของพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มออกตะเดเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อนที่เตรียมได้

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเปลือกพอลิเมอร์แคปซูลโดยการเพิ่มความยืดหยุ่นนั้น สามารถทำได้โดยใช้มอนอเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบออสถฐานมาผสมหรือทำการโคพอลิเมอร์ไรเซชัน เช่น บิวทิล- อะคริเลต เอทิลอะคริเลต เป็นต้น มอนอเมอร์เหล่านี้ได้มาจากปิโตรเคมีซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้แล้วหมดไป ทีมผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าหากสามารถใช้มอนอเมอร์ที่มาจากวัสดุการเกษตรซึ่งมีอยู่มากในประเทศจะเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับประเทศได้อีกทางหนึ่ง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงเป็นสารที่น่าสนใจเนื่องจากมีสมบัติเด่นในแง่ของความยืดหยุ่น หากนำมาผสมกับไคไวนิลเบนซีนมอนอเมอร์ในขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูล โดยวิธีการสังเคราะห์แบบมินิอิมัลชัน และการสังเคราะห์แบบแวนดอลอย น่าจะทำให้แคปซูลที่ได้มีเปลือกที่มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น โดยที่ยังคงมีความแข็งแรงเหมาะแก่การนำไปใช้งานในด้านต่างๆ

9. การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

วัสดุเก็บความร้อน มีบทบาทที่สำคัญในการอนุรักษ์และปรับปรุงการใช้พลังงานจากธรรมชาติ เนื่องจากแหล่งพลังงานต่างๆในธรรมชาติไม่ได้มีความต่อเนื่อง เช่น พลังงานแสงอาทิตย์มีเฉพาะในเวลากลางวัน ดังนั้นการใช้ประโยชน์พลังงานเหล่านี้จึงจำเป็นต้องมีการเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพ เพื่อที่พลังงานที่ถูกเก็บเอาไว้ในช่วงเวลากลางวันจะสามารถนำมาใช้ในช่วงเวลากลางคืน [8] ในปัจจุบันวัสดุเก็บความร้อนได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิจัย เทคโนโลยีของวัสดุเก็บความร้อนได้เริ่มมีการพัฒนาโดยองค์การนาซา (National Aeronautics and Space Administration; NASA) เมื่อช่วงปลายของ ค.ศ. 1970 ถึง ช่วงต้น 1980 [1] วัสดุเก็บความร้อนที่ดีจะต้องมีความจุความร้อนสูง มีค่าการนำความร้อนที่สูง หลอมเหลวที่อุณหภูมิในช่วงของการใช้งาน แข็งตัวโดยเกิดการเย็นตัวยิ่งยวดน้อยที่สุด มีความเสถียรต่อสารเคมี ราคาต่ำ ไม่เป็นพิษ และไม่เกิดการกัดกร่อน [8] การเลือกวัสดุเก็บความร้อนขึ้นกับอุณหภูมิการใช้งานและความจุความร้อน ควรเลือกใช้สารที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะใกล้เคียงกับอุณหภูมิการใช้งาน [8, 2] มีวัสดุเก็บความร้อนจำนวนมากซึ่งหลอมเหลวและแข็งตัวในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง ทำให้สารกลุ่มนี้ได้รับความสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

พาราฟินเป็นสารกลุ่มหนึ่งที่มีค่าความจุความร้อนค่อนข้างสูงและมีลักษณะเฉพาะสำคัญที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุเก็บความร้อน เช่น ไม้เป็นพิษ ไม่เกิดการกัดกร่อน และมีความเสถียรในระยะยาว แต่มีการนำความร้อนที่ต่ำ ดังนั้น จึงต้องการพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนมาก [8] ซึ่งการหุ้มสารเหล่านี้ให้เป็นแคปซูลขนาดเล็กๆจำนวนมากเป็นเทคนิคหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว

แคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อน ได้รับความสนใจและมีการศึกษากันมากขึ้น แคปซูลเหล่านี้ได้ถูกนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของอาคาร [8, 9] ใช้เก็บพลังงานแสงอาทิตย์และนิวเคลียร์ [10] ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิและสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูก [11] เทคนิคในการเตรียมแคปซูลที่มีพอลิเมอร์เป็นเปลือก (Shell) และมีของเหลวหรือของแข็งเป็นแกน (Core) สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นที่พื้นผิว (Interfacial polycondensation) [12, 13] การพอลิเมอไรเซชันแบบอินซิทู (In situ polymerization) [1, 14-16] การแยกวัฏภาคภายใน (Internal phase separation) [17-19] Okubo และคณะ [20-25] ได้นำเสนอเทคนิคการเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์แบบรูปร่างแห่ที่มีช่องว่าง (Hollow crosslinked polymer particles) โดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอย โดยใช้เทคนิคการจัดเรียงตัวเองของพอลิเมอร์ที่แยกวัฏภาค (Self-assembling of Phase Separated Polymer; SaPSeP) และต่อมาเทคนิคนี้ได้มีการพัฒนาและนำมาใช้ในการเตรียมแคปซูลพอลิเมอร์ที่หุ้มเสกเซเดคเคน ซึ่งมีขนาดระดับไมโครเมตร [4-7, 25, 26] Ma และคณะ [27] ได้พัฒนากระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอยเพื่อหุ้มวัสดุเก็บความร้อน

จากสมบัติเด่นของยางธรรมชาติในแง่ของความยืดหยุ่น เหมาะแก่การนำไปทำเป็นวัสดุรับแรงกระแทกหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง แต่เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ไม่เป็นระเบียบ (มีความเป็นอสัณฐานสูง) ทำให้มีความนิ่มหรือมีค่ามอดูลัสต่ำกว่าพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ การนำพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความแข็งแรงและความคงตัวสูงที่อุณหภูมิห้อง เช่น ไวนิล และ อะครีเลตพอลิเมอร์ มาผสม จุดประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของยางธรรมชาติที่ยังคงข้อดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิด [28-35] นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาอย่างแพร่หลายในการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติเพื่อใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เช่นการผลิตถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ท่อนำเลือด ท่อสอดเข้าในร่างกาย เป็นต้น [36-38] โดยเติมผงถ่านกัมมันต์ (carbon black) [39], แคลเซียมคาร์บอเนตขนาดเล็กลง (ultra-fine calcium carbonate) [40] แป้ง (starch) [41] วัสดุเคลย์ (clay materials) [42, 43] ไคติน [44-46] และอนุภาคระดับนาโนเมตรที่มีขนาดใกล้เคียงกันของซิลิกาที่ล้อมรอบด้วยสายโซ่พอลิไดอัลลิควิดเมธิล-แอมโมเนียม คลอไรด์ (poly (diallyldimethylammonium chloride)) ที่มีประจุบวก โดยที่พีเอชที่เหมาะสมจะจับกับประจุลบของของโปรตีนในยางธรรมชาติ [47, 48] ด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต ในการเสริมแรงในยางธรรมชาติชนิดผงและอนุภาค

จากสมบัติของยางธรรมชาติที่สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับวัสดุได้ดี ในงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิไควนินแคปซูลที่หุ้มออกตะเดคเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อน โดยการสังเคราะห์ด้วยวิธีมินิอิมัลชันและแบบแขวนลอย ซึ่งมีเปลือกที่มีความยืดหยุ่นต่ำ โดยการนำยางธรรมชาติมาผสมกับไควนินเบน

ซินมอนอเมอร์ในขั้นตอนการสังเคราะห์ โดยมีจุดประสงค์ในการเพิ่มความยืดหยุ่น (จากยางธรรมชาติ) และยังคงความแข็งแรง (จากไดไวนิลเบนซินมอนอเมอร์) ให้กับเปลือกแคปซูล

10. เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย

1. Shin Y, Yoo D, Son K, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2005; **96**:2005.
2. Sanchez L, Sanchez P, Lucas A, Carmona M, Rodriguez JF, *Colloid Polym Sci.*, 2007; **285**:1377
3. Cho JS, Kwon A, Cho CG, *Colloid Polym. Sci.*, 2002; **280**:260.
4. Ogino Y, Suzuki T, Okubo M, *Kobunshi Ronbunshu*, 2007; **64 (3)**:171.
5. **Chaiyasat P**, Ogino Y, Suzuki T, Minami H, Okubo M., *Colloid Polym. Sci.*, 2008; **286**:217.
6. **Chaiyasat P**, Ogino Y, Suzuki T, Okubo M, *Colloid Polym. Sci.*, 2008; **286**:753.
7. **Chaiyasat P**, Suzuki T, Minami H, Okubo M, *J. Applied Polym. Sci.*, in press.
8. Farid MM, Khudhair AM, Razack SAK, Al-Hallaj S, *Energ. Convers. Manage.*, 2004; **45**: 1597.
9. Su JF, Wang LX, Ren L, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2005; **97**:1755.
10. Peng S, Fuchs A, Wirtz RA, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2004; **93**:124
11. Covin DP, Cartwright DK. USP 2000.
12. Ni P, Zhang M, Yan N, *J. Membrane Sci.*, 1995; **103**: 51.
13. Yadav SK, Khilar KC, Suresh AK, *J. Membrane Sci.*, 1997; **125**: 213.
14. Comiskey B, Albert JD, Yoshizawa H, Jacobson J, *Nature*, 1998; **394**: 253.
15. Zhang XX, Fan YF, Tao XM, Yick KL, *Mater. Chem. Phys.*, 2004; **88**: 300.
16. Zhang XX, Fan YF, Tao XM, Yick KL, *J. Colloid Interface Sci.*, 2005; **281**: 299.
17. Jiang Y, Wang D, Zhao T, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2007; **104**: 2799.
18. Dowding PJ, Atkin R, Vincent B, Bouillot P, *Langmuir*, 2004; **20**: 11374.
19. Dowding PJ, Atkin R, Vincent B, Bouillot P, *Langmuir*, 2005; **21**: 5278.
20. Okubo M, Minami H, Yamashita T, *Macromol. Symp.*, 1996; **101**: 509.
21. Okubo M, Minami H, *Colloid Polym. Sci.*, 1996; **274**: 433.
22. Okubo M, Shiozaki M, Tsujihiro M, Tsukuda Y, *Colloid Polym. Sci.*, 1991; **269**: 222.
23. Okubo M, Shiozaki M, *Polym. Int.*, 1993; **30**: 469.
24. Okubo M, Minami H, *Colloid Polym. Sci.*, 1997; **275**: 992.
25. Okubo M, Konishi Y, Minami H, *Colloid Polym. Sci.*, 1998; **276**: 638.
26. Konishi Y, Okubo M, Minami H, *Colloid Polym. Sci.*, 2003; **281**: 123

27. Ma GH, Su ZG, Omi S, Sundberg D, Stubb J, *J. Colloid Interface Sci.*, 2003; **266**: 282.
28. Nakason C, Kaesaman A, and Supasanthitikul P. *Polymer Testing*, 2004;**23**:35.
29. Kochthongrasamee T, Prasassarakich P, and Kiatkamjornwong S. *J Appl Polym Sci*, 2006;**101**:2587.
30. Kangwansupamonkon W, Gilbert RG, and Kiatkamjornwong S. *Macromol. Chem. Phys.*, 2005;**206**:2450.
31. Lehrle RS and Willist SL. *Polymer*, 1997;**38**:5937.
32. Arayaprane W and Rempel GL. *J Appl Polym Sci*, 2008;**110**:2475.
33. George V, Britto IJ, and Sebastian MS. *Radiation Physics and Chemistry*, 2003;**66**:367.
34. Bogner A, Guimarães A, Guimarães RCO, Santos AM, Thollet G, Jouneau PH, and Gauthier C. *Colloid Polym Sci*, 2008;**286**:1049.
35. Man SHC, Hashim AS, and Akil HM. *J Appl Polym Sci*, 2008;**109**:9.
36. Bode HB, Kerkhoff K, and Jendrossek D. *Biomacromolecules*, 2001;**2**:295.
37. Schwerin M, Walsh D, Richardson D, Kisielewski R, Kotz R, and Routson L. *J Biomed Mater Res*, 2002;**63**:739.
38. Walsh D, Schwerin M, Kisielewski R, Kotz R, Chaput M, and Varney G. *J Biomed Mater Res B*, 2004;**68**:81.
39. Busfield J, Deeprasertkul C, and Thomas A. *Polymer* 2000;**41**:9219.
40. Cai H, Li S, Rian T, Wang H, and Wang J. *J Appl Polym Sci*, 2003;**87**:982.
41. Angellier H, Molina-Boisseau S, and Dufresne A. *Macromolecules*, 2005 **38**:9161.
42. Varghese S and Karger-Kocsis J. *J Appl Polym Sci*, 2004;**91**:813.
43. Varghese S and Karger-Kocsis J. *Polymer*, 2003;**44**:4921.
44. Nair K and Dufresne A. *Biomacromolecules*, 2003;**4**:657.
45. Nair K and Dufresne A. *Biomacromolecules*, 2003;**4**:666.
46. Nair K, Dufresne A, Gandini A, and Belgacem M. *Biomacromolecules*, 2003;**4**:1835.
47. Li S, Peng Z, Kong L, and Zhong J. *J Nanosci Nanotechno*, 2006;**6**:541.
48. Peng Z, Kong LX, Li S-D, Chen Y, and Huang MF. *Composites Science and Technology*, 2007;**67**:3130.

11. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่น่าผล การวิจัยไปใช้ประโยชน์

11.1. ได้พอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทความร้อน และมีความคงทนสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

11.2. ได้พอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนที่สามารถเป็นวัสดุพื้นฐานในการวิจัยพัฒนาสิน-ค้า และผลิตภัณฑ์ที่มีการแข่งขันอย่างมากมายในปัจจุบันและอนาคต

11.3. ได้ความรู้เกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติของเปลือกของพอลิเมอร์แคปซูล

11.4. จัดสิทธิบัตรหรืองานตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ รวมทั้งการนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับชาติหรือนานาชาติที่เป็นที่ยอมรับในทางวิชาการ

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี

สถาบันการศึกษาต่าง ๆ

อุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมด้านวัสดุ พอลิเมอร์ และการแพทย์

12. แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

12.1. เผยแพร่ผลงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกหน่วยงาน เช่น สถานศึกษาที่มีการเปิดสอนในสาขา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และนาโนเทคโนโลยี

ระยะเวลา ภาคเรียนที่ 1 และ 2 ปีการศึกษา 2554 และ 2555

สถานที่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.ธัญบุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ธัญบุรี

ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านการวิจัยและจัดการพลังงานที่ยั่งยืน (ไทย-ญี่ปุ่น) มทร.ธัญบุรี

ผู้รับผิดชอบ ดร.ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์ (หัวหน้าโครงการ)

ดร.อมร ไชยสัตย์ (ผู้วิจัยหลัก)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

12.2. เผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วัสดุศาสตร์ นาโน-เทคโนโลยี

13. วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

13.1. สังเคราะห์พอลิไดไวไนลเบนซินแคปซูลที่หุ้มออกตะเดคเคน ด้วยวิธีการสังเคราะห์แบบแขวนลอยและแบบมินิมัลชัน

13.2. หาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์แคปซูลของพอลิไดไวไนลเบนซินกับยางธรรมชาติที่หุ้มออกตะเดคเคน เช่น อัตราส่วนระหว่างไดไวไนลเบนซินมอนอเมอร์กับยางธรรมชาติ ชนิดและปริมาณของตัวเริ่มปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น

13.3. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้ทั้งสองชนิด เช่น รูปร่างอนุภาคแคปซูล โดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและแบบส่องผ่าน สมบัติการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเก็บความร้อนในแคปซูลเทียบกับที่ไม่ถูกหุ้มด้วยพอลิเมอร์ ความคงทนของเปลือกพอลิเมอร์แคปซูล

สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

- คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0 2549 3404
- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3480 โทรสาร 02-549-3483
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 ถ.พหลโยธิน กม.42 ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทรศัพท์ 0 2564 6500 โทรสาร 0 2564 6501-5
- ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เลขที่ 130 อาคารศูนย์ประชุมอู่ยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทรศัพท์ 0 2564 7100 โทรสาร 0 2564 6985
- Department of Chemical Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Kobe University, Kobe 657-8501, JAPAN, Tel/Fax: +81-78-803-6161

15. ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย (อุปกรณ์การวิจัย, โครงสร้างพื้นฐาน ฯลฯ) ระบุเฉพาะปัจจัยที่ต้องการเพิ่มเติม
- 15.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว
 - 15.1.1 อุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ
 - 15.1.2 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
 - 15.1.3 ตู้อบสูญญากาศ
 - 15.1.4 เครื่อง Thermal Gravimetric Analysis (TGA)
 - 15.1.5 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)
 - 15.1.6 เครื่อง Gel Permeation Chromatography (GPC)
 - 15.1.7 เครื่อง Fourier-transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)
 - 15.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องการเพิ่มเติม
 - 15.2.1 อุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ
 - 15.2.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมนาโนแคปซูลพอลิเมอร์ที่หุ้มสารเรืองแสง เช่น มอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา สารเรืองแสง
 - 15.2.3 เครื่อง Particles Analyzer หรือ Dynamic Light Scattering (DLS)
 - 15.2.4 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)

16. งบประมาณของโครงการวิจัย

16.1 รายละเอียดงบประมาณการวิจัยของข้อเสนอการวิจัย จำแนกตามงบประมาณประเภทต่าง ๆ (ปีงบประมาณที่เสนอขอ)

รายการ	จำนวนเงิน
1. งบบุคลากร	
ค่าจ้างชั่วคราว	-
ฯลฯ	
2. งบดำเนินงาน	139,650
2.1 ค่าตอบแทน ใช้สอยและวัสดุ	14,700
2.1.1 ค่าตอบแทน เช่น ค่าอาหารทำกรนอกเวลา ค่าตอบแทน ผู้ปฏิบัติงานให้ราชการ ค่าเบี้ยประชุมกรรมการ ฯลฯ	44,950
2.1.2 ค่าใช้สอย เช่น	10,000
1) ค่าซ่อมแซมครุภัณฑ์	
2) ค่าจ้างเหมาบริการ เช่น	10,000
- ค่าทดสอบตัวอย่างโดย TEM (5 ตัวอย่าง อัตรา ตัวอย่างละ 2,000 บาท)	5,000
- ค่าทดสอบตัวอย่างโดย DLS (5 ตัวอย่าง อัตรา ตัวอย่างละ 1,000 บาท)	15,000
3) ค่าใช้จ่ายในการนำเสนอผลงานวิชาการ การจดสิทธิบัตร และการตีพิมพ์ในวารสารทั้งในและต่างประเทศ	4,950
4) ค่าใช้สอยอื่น ๆ (ค่าจัดทำรูปเล่มรายงาน ค่าถ่ายเอกสาร)	80,000
2.1.3 ค่าวัสดุ เช่น	5,000
1) วัสดุสำนักงาน	50,000
2) วัสดุดิบ สารเคมี สารมาตรฐานต่าง ๆ	25,000
3) อุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ	7,350
2.2 ค่าสาธารณูปโภค (5%) เช่น	
ค่าไฟฟ้า ค่าน้ำประปา ค่าโทรศัพท์ ค่าไปรษณีย์โทรเลข ค่าบริการด้านสื่อสารและโทรคมนาคม	-
3. งบลงทุน	
ค่าครุภัณฑ์	
ฯลฯ	
รวมงบประมาณที่เสนอขอ	147,000

หมายเหตุ * ค่าใช้จ่ายทั้งหมดขอด้วยเงินใช้จ่ายทุกรายการ

17. ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ผลสำเร็จเบื้องต้น (Preliminary results, P)

17.1 ได้พอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทความร้อน

17.2 ได้แคปซูลที่เปลือกมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย

17.3 จดสิทธิบัตร หรืองานตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ รวมทั้งการนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับชาติหรือนานาชาติที่เป็นที่ยอมรับในทางวิชาการ

18. โครงการวิจัยต่อเนื่องปีที่ 2 ขึ้นไป

18.1 คำรับรองจากหัวหน้าโครงการวิจัยว่าโครงการวิจัยได้รับการจัดสรรงบประมาณจริงใน
ปีงบประมาณที่ผ่านมา

18.2 ระบุว่าโครงการวิจัยนี้อยู่ระหว่างเสนอขอของบประมาณจากแหล่งเงินทุนอื่น หรือเป็นการวิจัย
ต่อยอดจากโครงการวิจัยอื่น (ถ้ามี)

18.3 รายงานความก้าวหน้าของโครงการวิจัย (แบบ ต-1ข/ค)

19. คำชี้แจงอื่น ๆ (ถ้ามี)

20. ลงลายมือชื่อ หัวหน้าโครงการวิจัย พร้อมวัน เดือน ปี

ลงชื่อ.....หัวหน้าโครงการวิจัย

(ดร. ปริญญาภรณ์ ไชยสัตย์)

วันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2553

ส่วน ค : ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

- ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) นางปรียาภรณ์ ไชยสัตย์
ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mrs. Preeyaporn Chaiyasat
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 8205 00059 49 4
- ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ ระดับ 6 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ม.เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์ 02-549-3529 โทรสาร 02-549-3526 E-mail address p_chaiyasat@yahoo.com;
p_chaiyasat@rmutt.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	วุฒิการศึกษา	สาขาวิชา	สถาบัน	ประเทศ
2551	Ph.D.	Material Chemistry and Engineering	Kobe University	ญี่ปุ่น
2544	M.Sc	Chemistry	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ไทย
2540	B.Sc.	Chemistry	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ไทย

- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
Preparation of polymer microcapsule and microspheres; Radical polymerization in dispersed systems;
Preparation of polymers for biomedical applications

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องงานวิจัย

7.1 โครงการวิจัย

- การผลิตแว็กซ์เพื่อใช้เป็นแม่แบบในอุตสาหกรรมอัญมณี
แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (ผู้วิจัยหลัก)
- การผลิตโคโตนานจากเปลือกกุ้ง
แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (หัวหน้าโครงการ)
- การตรวจสอบสารปนเปื้อนบางตัวที่ตกค้างในเครื่องดื่มแอลกอฮอล์
แหล่งทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (ผู้วิจัยหลัก)
- การปนเปื้อนของสารปราบศัตรูพืชในแหล่งน้ำธรรมชาติ
แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (ผู้ร่วมวิจัย)
- การเตรียมพอลิเมอร์แคลซูลระดับนาโนที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อน
แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (ผู้วิจัยหลัก)

7.2 รายการบทความทางวิชาการวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารในประเทศ/ต่างประเทศ

- 1) **P. Chaiyasat**, Y. Ogino, T. Suzuki, H. Minami, M. Okubo, Preparation of divinylbenzene copolymer particles with encapsulated hexadecane for heat storage application, *Colloid Polym. Sci.*, **286**, 217-223 (2008).
- 2) **P. Chaiyasat**, Y. Ogino, T. Suzuki, M. Okubo, Influence of water domain formed in hexadecane core inside cross-linked capsule particle on thermal properties for heat storage application, *Colloid Polym. Sci.*, **286**, 753-759 (2008).
- 3) **P. Chaiyasat**, T. Suzuki, H. Minami, M. Okubo, Thermal properties of hexadecane encapsulated in poly(divinylbenzene) particles, *J. Applied Polym. Sci.*, **112**, 3257-3266 (2009).

7.3 รายการการนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการในประเทศและต่างประเทศ

- 1) Amorn Chaiyasat, **Preeyaporn Sukunthanon** and Churairat Duangduen, “Simplex Aided Optimization for High-Performance Liquid Chromatographic Analysis of Abamectin in Insecticide Samples”, “28th Congress on Science and Technology of Thailand” October 2002, Bangkok, Thailand
- 2) Amorn Chaiyasat and **Preeyaporn Sukunthanon**, “Simplex Optimization of Simultaneous Determination of Some Preservatives by Ion Chromatography”, “29th Congress on Science and Technology of Thailand”, October 2003, Khon kaen, Thailand.
- 3) Amorn Chaiyasat and **Preeyaporn Chaiyasat** “Simultaneous Determination of Methanol Ethanol and Fusel oil in Alcoholic Beverage Samples by High Performance Liquid Chromatography”, “30th Congress on Science and Technology of Thailand”, October 2004, Bangkok, Thailand
- 4) **Preeyaporn Chaiyasat**, Yumiko Ogino, Toyoko Suzuki, Masayoshi Okubo, “Preparation of P(DVB-BA) capsule particles containing hexadecane as heat storage materials by the SaPSeP method”, *The 52th Polymer Research Symposium*, 21 July 2006, Kobe, JAPAN.
- 5) **Preeyaporn Chaiyasat**, Yumiko Ogino, Toyoko Suzuki, Masayoshi Okubo, “Preparation of cross-linked polymer particles with encapsulated hexadecane for heat storage application”, *The 2nd International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers*, 25-28 June 2007, Bangkok, THAILAND.
- 6) **Preeyaporn Chaiyasat**, Yumiko Ogino, Toyoko Suzuki, Masayoshi Okubo, “Preparation of PDVB-based capsule particles containing hexadecane as heat storage materials by the SaPSeP method”, *The 56th SPSJ Symposium on Macromolecules*, 19-21 September 2007, Nagoya, JAPAN.

7) **Preeyaporn Chaiyasat**, Yumiko Ogino, Toyoko Suzuki, Masayoshi Okubo, “Influence of water domain formed in hexadecane core inside cross-linked capsule particle on thermal properties for heat storage application”, *The 10th Pacific Polymer Conference*, 4-7 December 2007, Kobe, JAPAN.

8) **Preeyaporn Chaiyasat**, Yumigo Ogino, Toyoko Suzuki, Masayoshi Okubo “Thermal properties of encapsulated hexadecane in cross-linked capsule particles with water and/or air domain”, *The 57th SPSJ Annual Meeting*, 28-30 May 2008, Yokohama, Japan

ผู้วิจัยหลัก

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นาย อมร ไชยสัตย์
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Amorn Chaiyasat
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 3404 00316 18 0
- ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ ระดับ 6 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ม.เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์ 02-549-3529 โทรสาร 02-549-3526 E-mail address a_chaiyasat@yahoo.com;
a_chaiyasat@rmutt.ac.th

6. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	วุฒิการศึกษา	สาขาวิชา	สถาบัน	ประเทศ
2551	Ph.D.	Material Chemistry and Engineering	Kobe University	ญี่ปุ่น
2543	M.Sc	Chemistry	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ไทย
2539	B.Sc.	Chemistry	ม.มหาสารคาม	ไทย

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

Radical polymerization in dispersed systems; Controlled/living radical polymerization; Preparation of polymer particles for analytical chemistry applications

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องงานวิจัย

7.1 โครงการวิจัย

- การปนเปื้อนของสารปราบศัตรูพืชในแหล่งน้ำธรรมชาติ (Pesticides Contamination in Natural Water in Thunyaburi Agricultural area, Pathumthani) แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (ผู้วิจัยหลัก)
- การตรวจสอบสารปนเปื้อนบางตัวที่ตกค้างในเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ (Determination of Some Contaminants in Alcohol Beverages) แหล่งทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (หัวหน้าโครงการ)
- การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลระดับนาโนที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อน (Preparation of Nanopolymer Capsules Encapsulated Heat Storage Materials) แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (หัวหน้าโครงการ)

7.2 รายการบทความทางวิชาการวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารในประเทศ/ต่างประเทศ

- 1) P. Siwarasak, W. Wiriwuttikorn, **A. Chaiyasat**: Isoflavones extraction from defatted soybean with ethanol, *J. Research and Training: Rajamangala Institute of Technology*, **5**, 53 (2001)
- 2) **A. Chaiyasat**, H. Kobayashi, M. Okubo: Incorporation of nonionic emulsifier inside methacrylic polymer particles in emulsion polymerization, *Colloid Polym. Sci.*, **285**, 557 (2007).
- 3) M. Okubo, **A. Chaiyasat**, M. Yamada, T. Suzuki, H. Kobayashi: Influence of hydrophilic-lipophilic balance of nonionic emulsifiers on emulsion copolymerization of styrene and methacrylic acid, *Colloid Polym. Sci.*, **285**, 1755 (2007).
- 4) **A. Chaiyasat**, M. Yamada, H. Kobayashi, T. Suzuki, M. Okubo: Incorporation of nonionic emulsifiers inside styrene-methacrylic acid copolymer particles prepared by emulsion copolymerization, *Polymer*, **49**, 3042 (2008).
- 5) H. Kobayashi, **A. Chaiyasat**, Y. Oshima, T. Suzuki, M. Okubo: Incorporation of nonionic emulsifier inside carboxylated polymer particles during emulsion copolymerization: influence of methacrylic acid content, *Langmuir*, **25**, 101 (2009).
- 6) Y. Kitayama, **A. Chaiyasat**, M. Okubo: Emulsifier-free, organotellurium-mediated living radical emulsion polymerization of styrene, *Macromol. Symp.*, in press.

7.3 รายการการนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการในประเทศและต่างประเทศ

- 1) **Amorn Chaiyasat** and Monkorn Rayanakorn, "A Systematic Approach to the Determination of Phenols by High Performance Liquid Chromatography", "25th Congress on Science and Technology of Thailand", October 1999, Pitsanuloke, Thailand
- 2) **Amorn Chaiyasat**, Preeyaporn Sukunthanon and Churairat Duangduen, "Simplex Aided Optimization for High-Performance Liquid Chromatographic Analysis of Abamectin in Insecticide Samples", "28th Congress on Science and Technology of Thailand" October 2002, Bangkok, Thailand
- 3) **Amorn Chaiyasat** and Preeyaporn Sukunthanon, "Simplex Optimization of Simultaneous Determination of Some Preservatives by Ion Chromatography", "29th Congress on Science and Technology of Thailand", October 2003, Khon kaen, Thailand.
- 4) **Amorn Chaiyasat** and Preeyaporn Chaiyasat "Simultaneous Determination of Methanol Ethanol and Fusel oil in Alcoholic Beverage Samples by High Performance Liquid Chromatography", "30th Congress on Science and Technology of Thailand", October 2004, Bangkok, Thailand

- 5) Preecha Mansalai, Siriwun Suwunsa-ard, **Amorn Chaiyasat**, Chaiyoot Changsarn and Winai Oungpipat “Determination of Sulfite in Wine by Ion Chromatography After Oxidizes Sulfite to Sulfate with Hydrogen peroxide”, “30th Congress on Science and Technology of Thailand”, October 2004, Bangkok, Thailand
- 6) **Amorn Chaiyasat**, Hiroshi Kobayashi, Masayoshi Okubo, “Incorporation of Nonionic Emulsifier Inside Methacrylic Polymer Particles in Emulsion Polymerization”, *The 55th SPSJ Annual Meeting*, May 2006, Nagoya, JAPAN
- 7) **Amorn Chaiyasat**, Masahiro Yamada, Toyoko Suzuki, Hiroshi Kobayashi, Masayoshi Okubo, “Influence of HLB value of nonionic emulsifiers on the distribution of carboxyl groups within styrene-methacrylic acid copolymer particles prepared by emulsion copolymerization”, *The 2nd International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers*, 25-28 June 2007, Bangkok, THAILAND
- 8) **Amorn Chaiyasat**, Masahiro Yamada, Hiroshi Kobayashi, Masayoshi Okubo, “Incorporation behavior of nonionic emulsifiers inside styrene-methacrylic acid copolymer particles prepared by emulsion copolymerization”, *The 10th Pacific Polymer Conference*, 4-7 December 2007, Kobe, JAPAN
- 9) **Amorn Chaiyasat**, Masahiro Yamada, Hiroshi Kobayashi, Masayoshi Okubo, “Incorporation of Emulsifiers inside Polymer Particles in Emulsion Polymerization”, *The 57th SPSJ Annual Meeting*, 28-30 May 2008, Yokohama, Japan
- 10) **Amorn Chaiyasat**, Preeyaporn Chaiyasat, Toyoko Suzuki, Masayoshi Okubo, “Influence of incorporated nonionic emulsifier inside polymer particles prepared by emulsion polymerization on the glass transition temperature”, *The 15th Polymeric Microspheres Symposium*, 12-14 November 2008, Kobe, Japan
- 11) Yukiya Kitayama, **Amorn Chaiyasat**, Masayoshi Okubo, “Organotellurium-Mediated Living Radical Emulsifier-Free Emulsion Polymerization of Styrene”, *The 2nd International Symposium on Advanced Particles*, 26-29 April 2009, Yokohama, Japan

ผู้ร่วมวิจัย

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ผศ. ดร. สมหมาย ผิวสอาด
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Asst. Prof. Dr. Sommai Pivsa-Art
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 1701 00269 00 5
- ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.
ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-2549-3480-5 โทรสาร 0-2549-3406
- ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	วุฒิการศึกษา	สาขาวิชา	สถาบัน	ประเทศ
2541	Ph.D. in Engineering	Chemical Engineering	Osaka University	ญี่ปุ่น
2538	M. Eng.	Applied Chemistry	Osaka University	ญี่ปุ่น
2527	B.Sc.	Chemistry	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ไทย

- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
Polymer Blends, Organic Synthesis using Transition Metal Catalyst, Biodegradable Polymer Synthesis,
Molecular Imprinting, Plastics degradation

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องงานวิจัย

7.1 โครงการวิจัย

- ทุนโครงการ IPUS ปี 2546 เลขที่โครงการ : FE0143/46 เรื่อง การเตรียมโพลิเมอร์ผสมระหว่างโพลิคาร์บอนเนตและโพลิคาร์บอนเนตโอลิโกเมอร์
- ทุนโครงการ IPUS ปี 2547 เลขที่โครงการ : FE0148/47 เรื่อง การเตรียมและการพัฒนาวัสดุคิบเพื่อใช้ในการผลิตร่องเท้ากอล์ฟและร่องเท้าเบสบอล
- ทุนโครงการ IPUS ปี 2548 เลขที่โครงการ : [14808009](#) เรื่อง การเตรียมและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หนังเทียมจากพลาสติกพีวีซีที่แต่งเติมกลิ่น
- ทุนโครงการ IPUS ปี 2548 เลขที่โครงการ : [148080010](#) เรื่อง การเตรียมพลาสติกผสมจากโพลียูรีเทนเพื่ออุตสาหกรรมชิ้นส่วนรองเท้ากีฬา
- ทุนโครงการ IPUS ปี 2548 เลขที่โครงการ : [148080010](#) เรื่อง การเตรียมวัสดุคิบในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หนังเทียมเพื่อใช้ทดแทนพลาสติกพีวีซี

6. ทูลโครงการ IPUS ปี 2549 เลขที่โครงการ : I24906006 เรื่อง แผ่นวัสดุอัดเรียบจากเศษพลาสติกและกระดาษที่นำกลับมาใช้ใหม่ในโรงงานกระดาษ

7. ทูลโครงการ IPUS ปี 2549 เลขที่โครงการ : I24906007 เรื่อง การนำเศษพีวีซีจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่

8. ทูลโครงการ IPUS ปี 2549 เลขที่โครงการ : I24906013 เรื่อง การควบคุมกระบวนการเป่าขึ้นรูปโดยใช้ระบบควบคุมคุณภาพด้วยวิธีการทางสถิติ

9. ทูลโครงการ IPUS ปี 2550 เลขที่โครงการ : I350A11004 เรื่อง การจำลองกระบวนการผลิตพอลิแลคติกแอซิดเพื่อออกแบบสร้างโรงงานต้นแบบ

10. ทูลโครงการ IPUS ปี 2550 เลขที่โครงการ : I250A05025 เรื่อง การลดปัญหาฟองอากาศในกระบวนการชุบเคลือบพีวีซีเหลว

7.2 รายการบทความทางวิชาการวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารในประเทศ/ต่างประเทศ

1. **S. Pivsa-Art**, K. Okuro, M. Miura, S. Murata, and M. Nomura, "Acylation of 2-Methoxynaphthalene with Acyl Chlorides in the Presence of a Catalytic Amount of Lewis Acids", **J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1**, 1703-1707 (1994).

2. **S. Pivsa-Art**, Y. Fukui, M. Miura, and M. Nomura, "Copper-Promoted Reaction of Aryl Iodides with Activated Methine Compounds", **Bull. Chem. Soc. Jpn.**, 69, 2039-2042 (1996).

3. **S. Pivsa-Art**, T. Satoh, M. Miura, and M. Nomura, "Palladium-Catalyzed Reaction of Aryl Bromides with Dialkylacetylenes to Produce Allenic Compounds", **Chem. Lett.**, 823-824 (1997).

4. **S. Pivsa-Art**, T. Satoh, Y. Kawamura, M. Miura, and M. Nomura, "Palladium-Catalyzed Arylation of Azole Compounds with Aryl Halides in the Presence of Alkali Metal Carbonates and the Use of Copper Iodide in the Reaction", **Bull. Chem. Soc. Jpn.**, 71, 467-473 (1998).

5. M. Miura, **S. Pivsa-Art**, G. Dyker, J. Heiermann, T. Satoh, and M. Nomura, (1998): Palladium-Catalyzed Reaction of Aryl Bromides with Metallocenes to Produce Pentaarylated Cyclopentadienes. **J. Chem. Soc., Chemical Communication**, 1889-1890 (1998).

6. Dyker, G., Heiermann, J., Miura, M., Inoh, J.-I., **Pivsa-Art, S.**, Satoh, T. and Nomura, M. (2000): Palladium-Catalyzed Arylation of Cyclopentadienes. **Chemistry: A European Journal** 6, 3426-3433.

7. **Pivsa-Art, S.**, Nakayama, A., Kawasaki, N., Yamamoto, N. and Aiba, S. (2002): Biodegradability Study of Copolyesteramides based on Diacid Chlorides, Diamines, and Diols, **Journal of Applied Polymer Science**, 85, 4, 774-784.

7.3 รายการการนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการและฝึกอบรมในประเทศและต่างประเทศ

1. September 1991-December 1991; Training on Polymer Materials and Technology at Plastic Engineering Department, Osaka Municipal Technical Research Institute, Osaka, **JAPAN**.
2. May 1999 – August 1999; STA Post-Doctoral Research Fellowship in Department of Organic Materials, Osaka National Research Institute, AIST, Ministry of International Trade and Industry, **JAPAN**.
3. March 2002 – February 2003; Alexander von Humboldt Scholarship, Department of Organic Chemistry, Bochum University, Bochum, **GERMANY**. Research Themes: Synthesis of Nanosized π -Conjugated Compounds.
4. January 2005; Visiting Professor, Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Uji, Kyoto, **JAPAN**. Research Themes: Composite nano-structures for photo-electrochemical functional materials.

การนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ
“Pure and Applied Chemistry International Conferences”
PACCON 2011
January 5-7, 2011
Miracle Grand Convention Hotel, Bangkok, Thailand

Proceeding

PREPARATION OF POLYDIVINYLBENZENE/NATURAL RUBBER CAPSULE ENCAPSULATED HEAT STORAGE MATERIALS

P. Chaiyasat*, A. Chaiyasat, P. Sirithip, V. Voranuch, C. Waree and K. Songkhamrod

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Klong 6,
Thanyaburi, Pathumthani, Thailand 12110

*E-mail: p_chaiyasat@mail.rmutt.ac.th

Abstract: The encapsulation of heat storage materials such as tetradecane, hexadecane and octadecane (OD) has been extensively studied using various techniques. The Self-assembling of Phase Separated Polymer (SaPSeP) method is one of them widely applied for the preparation of polymer capsule encapsulated heat storage materials. In this study, the core-shell polydivinylbenzene (PDVB)/natural rubber (NR) capsules encapsulated OD was prepared using the SaPSeP method by micro-suspension polymerization. The mixture of dispersed phase consisting of DVB, NR, OD and benzoyl peroxide was added in polyvinyl alcohol aqueous solution and then homogenized at 5,000 rpm for 5 minutes. The obtained monomer droplet emulsion was subsequently polymerized at 70 °C for 12 hours resulting in PDVB/NR capsule encapsulated OD. The influence of DVB:NR weight ratio on the encapsulation efficiency and thermal properties of encapsulated OD were investigated. The prepared capsules were observed by the optical and scanning electron microscopes. The thermal properties of encapsulated OD were determined by the differential scanning calorimeter and thermogravimetric analyzer.

Introduction

In recent years, microencapsulation of heat storage materials have attracted for many applications such as air conditions of building, solar heat storage and thermal adaptable fibers [1-3]. Paraffin waxes such as tetradecane (TD), hexadecane (HD), octadecane (OD), nonadecane (ND), and eicosane are useful as one group of numerous numbers of heat storage materials that melt and solidify at a wide range of temperatures, making them attractive for many applications [4]. Several methods have been carried out to prepare heat storage microcapsules. The *in situ* polymerization to fabricate the microcapsules and nanocapsules containing OD core with melamine-formaldehyde shell [5], resorcinol-modified melamine-formaldehyde shell [6] were reported. Three types of paraffin waxes (HD, OD and ND) were encapsulated through complex coacervation of natural and biodegradable polymers, gum arabic-gelatin mixture [7]. PS microcapsules containing paraffin wax were synthesized by suspension like polymerization [8]. The Self-assembling of Phase Separated Polymer (SaPSeP)

method is one of many methods applied for the encapsulation of them [9-12]. The polymer chains formed during polymerization in the monomer droplet are diffused and trapped near the interface based on surface coagulation and gradually piled at the inner interface resulting in a polymer shell. After the completion of polymerization, heat storage material was encapsulated inside as the capsule core. We have prepared the microcapsule of Polydivinylbenzene (PDVB) encapsulated OD (PDVB/OD) by micro-suspension polymerization utilizing the SaPSeP method. The prepared capsules are spherical with smooth outer surface. However, it was found that some of the capsules are broken during drying process possibly due to the hard property of PDVB shell.

Natural rubber (NR) is one of the most important biopolymers in Thailand. It displays excellent elasticity and flexibility widely used in various applications such as medical grove and tubing. Then, the incorporation of NR in PDVB shell is interesting to reduce the utilization of petrochemical monomer and improve the mechanical properties of the capsule.

In this study, the preparation of microcapsule encapsulating OD in polymer composite shell of PDVB and NR (PDVB/NR/OD) was carried out by micro-suspension polymerization utilizing the SaPSeP method. The influence of DVB:NR weight ratio on the encapsulation efficiency and thermal properties of encapsulated OD were investigated.

Materials and Methods

Materials: DVB (Aldrich; purity, 80%) was washed with 1 N sodium hydroxide (NaOH) and distilled water to remove polymerization inhibitors before use. NR (Thai Rubber Co., Ltd.) was oxidized with hydrogen peroxide to reduce the molecular weight. The number-average molecular weight of NR used in this study is 45,000. Poly(vinyl alcohol) (PVA) (Aldrich; degree of saponification, 87-90%) was used as received. Reagent-grade benzoyl peroxide (BPO) was purified by recrystallization. OD (Merck; 99.5%) was used as received.

Microcapsules preparation: The microcapsules of PDVB/NR/OD were prepared by micro-suspension

polymerization under the conditions listed in Table 1. The homogeneous organic phase of DVB/NR and OD at the ratio of 50:50 %wt/wt (approximately 10 %wt of aqueous solution) were mixed with BPO (8 %wt of monomer) and then added to the aqueous phase containing PVA (1.5 g of PVA in 150 g of water). Emulsification was carried out by high shear rate at the speed of 5,000 rpm for 5 min resulting in the organic phase droplets dispersed in the aqueous medium. The resulting emulsions were transferred to the reactor and polymerized at 70 °C for 12 h under N₂ atmosphere.

Table 1: Recipes for the preparation of PDVB/NR capsules with encapsulated OD by microsuspension polymerization^a of DVB/NR/OD droplets prepared by homogenization^b

Ingredient		NR (%w of DVB)			
		0	1	2.5	5
DVB	(g)	7.5	7.5	7.5	7.5
NR	(g)	0.0	0.075	0.188	0.375
OD	(g)	7.5	7.5	7.5	7.5
BPO	(g)	0.8	0.8	0.8	0.8
PVA	(g)	1.5	1.5	1.5	1.5
Water	(g)	150	150	150	150

- a) 70 °C, 12 h, N₂
b) 5,000 rpm, 5 min

Characterization of microcapsules: An optical microscope (OM) (SK-100EB & SK-100ET, Seek, Seek Inter Corporation Ltd., Thailand) were used to investigate the morphology of the surface and the inner structure of the microcapsules. The OD content in microcapsule was determined with thermogravimetric analyzer (TGA) (TGA 4000, Perkin-Elmer, USA) using heating rate of 10 °C/min. The latent heats of solidification (H_s), melting (H_m), solidification (T_s), and melting (T_m) temperatures of OD encapsulated in microcapsule particles in aqueous solution (solid content: ca 10%) were measured with a DSC (DSC 4000, Perkin-Elmer, USA) under a N₂ flow with the scanning temperature range and rate of 0-40 °C and 5 °C/min, respectively. To compare H_s and H_m of the encapsulated OD having different wt% in the capsule particles and also pure OD, the H_s and H_m values were used in the unit of joule per 1 g of encapsulated OD (J/g-OD). They were calculated from the cooling/heating peak area of DSC thermogram and OD content obtained from TGA analysis using the following equation.

$$\text{J/g-OD} = (A/B) \times 100$$

Where

A = H_s or H_m of encapsulated OD in microcapsule dispersion obtained from DSC thermogram (J/g-sample)

B = %OD in microcapsule dispersion obtained from TGA thermogram

Results and Discussion

The PDVB/NR/OD microcapsules prepared with various weight percents of NR were observed with OM as shown in Figure 1. PDVB/OD capsules were shown in Figure 1(a). The particles were spherical and OD core was completely encapsulated with PDVB shell. When low NR contents were incorporated, microcapsules were also prepared. At 1 and 2.5 %wt of NR, the capsules were spherical with complete encapsulation of OD as shown in Figure 1(b) and (c). However, at higher NR content, heterogeneous particles were formed.

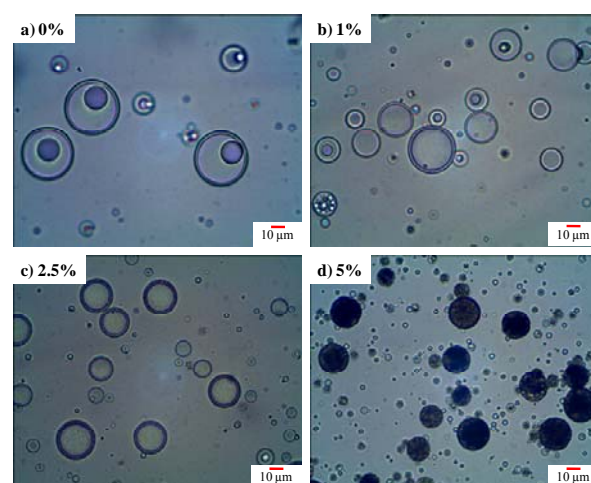


Figure 1. The optical micrographs of PDVB/NR/OD particles. NR (%wt of DVB): (a) 0; (b) 1; (c) 2.5 and (d) 5

These results suggested that the presence of low concentration NR did not inhibit phase separation of PDVB chains formed during polymerization in the monomer droplets. Therefore, polymer capsule could be formed. Nevertheless, the increase of NR until it reaches the critical value reduced phase separation due to high internal viscosity. In this case, the formed PDVB could not diffuse to the droplet interface resulting in heterogeneous morphology particles.

The thermal properties of encapsulated OD were measured with DSC. DSC thermograms of encapsulated OD in PDVB capsules (Figure 2) showed that the H_m (153.0 J/g-OD) and H_s (151.8 J/g-OD) of encapsulated OD were lower than those of the bulk OD (241.7 and 247.0 J/g of H_m and H_s , respectively). In the case of phase transition temperature, T_m of encapsulated OD (28.3 °C) was almost the same as that of bulk OD (30.0 °C). In contrast, T_s was shifted to the lower temperature comparing to bulk OD. This occurrence is namely supercooling.

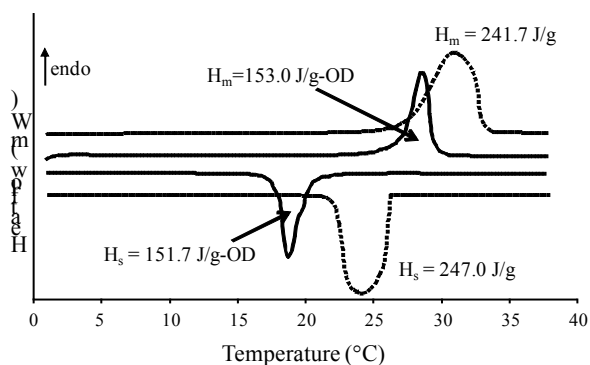


Figure 2. DSC thermograms of bulk OD (dot line) and encapsulated OD (solid line) in PDVB particles measured at the scanning rate of 5°C/min

In the case of PDVB/NR capsules, the thermal properties of encapsulated OD were similar as those of OD in PDVB capsule. H_m and H_s of encapsulated OD were much lower than those of the bulk ones and a little lower than those of OD in PDVB capsule. It may be due to the present of NR in OD matrix reduces the crystallization of encapsulated OD. However, the increase of NR weight percent from 1 to 5 did not show significant effect on the thermal properties of encapsulated OD (Table 2). T_m of encapsulated OD was almost the same as that of bulk OD while T_s was shifted to the lower temperature comparing to bulk OD.

Table 2: Thermal properties of encapsulated OD in PDVB/NR capsule prepared with various weight percent of NR

NR (%wt of DVB)	Heat of transition (J/g-OD)	
	Hs	Hm
0	151.8	153.0
1	124.2	129.2
2.5	126.3	124.8
5	128.1	144.2

TGA analysis showed the degradation temperature and the composition of the capsule. The degradation of PDVB/NR/OD capsule composes of three steps of water, OD and PDVB, respectively (Figure 3(d)). The NR (1 %wt of DVB) degradation was not observed due to low content.

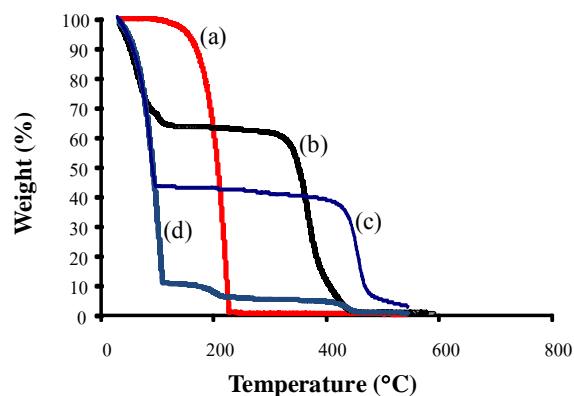


Figure 3. TGA thermograms of (a) bulk OD, (b) NR latex, (c) PDVB and (d) PDVB/NR/OD capsule (1 %wt of DVB) measured at the heating rate of 5°C/min

Conclusions

The microcapsule of PDVB/NR encapsulated OD was successfully prepared by microsuspension polymerization utilizing the SaPSeP method. The increase of NR content gradually reduced phase separation of PDVB formed during polymerization due to the increase of internal viscosity. At low NR content, 1 and 2.5 %wt, the capsules were obtained. However, at 5% wt, only heterogeneous particles were found. The thermal properties of encapsulated OD in the capsule were lower than those of bulk as in the case of PDVB capsule. However, there is no significant influence of NR content on the thermal properties of encapsulated OD.

References

- [1] J.F. Su, L.X. Wang and L. Ren, *J. Appl. Polym. Sci.* **97** (2005), pp. 1755-1762.
- [2] S. Peng, A. Fuchs and R.A. Wirtz, *J. Appl. Polym. Sci.* **93** (2004), pp.1240-1251.
- [3] J. Cho, A. Kwon and C. Cho, *Colloid Polym. Sci.* **280** (2002), pp. 260-260.
- [4] G. Sun and Z. Zhang, *Int J. Pharm.* **242** (2002), pp.307-311.
- [5] X.X. Zhang, Y.F. Fan, X.M. Tao and K.L. Yick, *Mater Chem Phys.* **88** (2004), pp. 300-307.
- [6] H. Zhang and X. Wang, *Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects* **332** (2009), pp. 129-138.
- [7] E. Onder, N. Sarier and E. Cimena, *Thermochim Acta.* **467** (2008), pp. 63-72.
- [8] P. Sánchez, M.V. Sánchez-Fernandez, A. Romero, J.F. Rodríguez and L. Sánchez-Silva, *Thermochim Acta* **498** (2010), pp. 16-21.
- [9] M. Okubo, Y. Konishi and H. Minami, *Progr. Colloid Polym. Sci.* **124** (2003), pp. 54-59.
- [10] P. Chaiyasat, Y. Ogino, T. Suzuki, H. Minami and M. Okubo, *Colloid Polym Sci.* **286** (2008), pp. 217-223.
- [11] P. Chaiyasat, Y. Ogino, T. Suzuki and M. Okubo, *Colloid Polym Sci.* **286** (2008), pp. 753-759.
- [12] P. Chaiyasat, T. Suzuki, H. Minami and M. Okubo, *J Appl Polym Sci.* **112** (2009), pp. 3257-32

Oral Presentation