

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

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

แนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า คือ การใช้วัสดุเก็บความร้อน โดยเฉพาะวัสดุเก็บความร้อนแฝง (Latent heat storage materials) หรือวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค มาช่วยในการกักเก็บพลังงานหรือความร้อนในระหว่างวัน ซึ่งในปัจจุบันได้มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากทำการศึกษา วัสดุเก็บความร้อนแฝงจะมีหลักการทำงาน คือ วัสดุจะดูดพลังงานความร้อน เมื่ออุณหภูมิในสิ่งแวดล้อมมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ (Transition temperature) ของวัสดุ และจะคายพลังงานความร้อนออกมาเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะของวัสดุ วัสดุเก็บความร้อนแฝงที่ดีจะต้องมีความจุความร้อนสูง มีค่าการนำความร้อนที่สูง หลอมเหลวที่อุณหภูมิในช่วงของการใช้งาน แข็งตัวโดยเกิดการเย็นตัวยิ่งยวดน้อยที่สุด (การเย็นต่ำกว่าปกติของอุณหภูมิในการแข็งตัวของวัสดุ) 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 โดยสามารถดูได้จากปริมาตรและน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ในการเก็บความร้อนหนึ่งล้านจูล

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/(mK)) 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 และมีลักษณะเฉพาะสำคัญที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นตัวเก็บความร้อนแฝง เช่น ไม่เป็นพิษ ไม่เกิดการกัดกร่อน มีความเสถียรในระยะยาวและมีราคาถูก สมบัติทางความร้อนของสารกลุ่มพาราฟินที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเก็บความร้อนแฝง แสดงดังตารางที่ 2.2 อย่างไรก็ตาม พาราฟินมีการนำความร้อนที่ต่ำ (น้อยกว่า 0.35 W/m K) [3] เมื่อเปรียบเทียบกับเกลือที่มีน้ำ

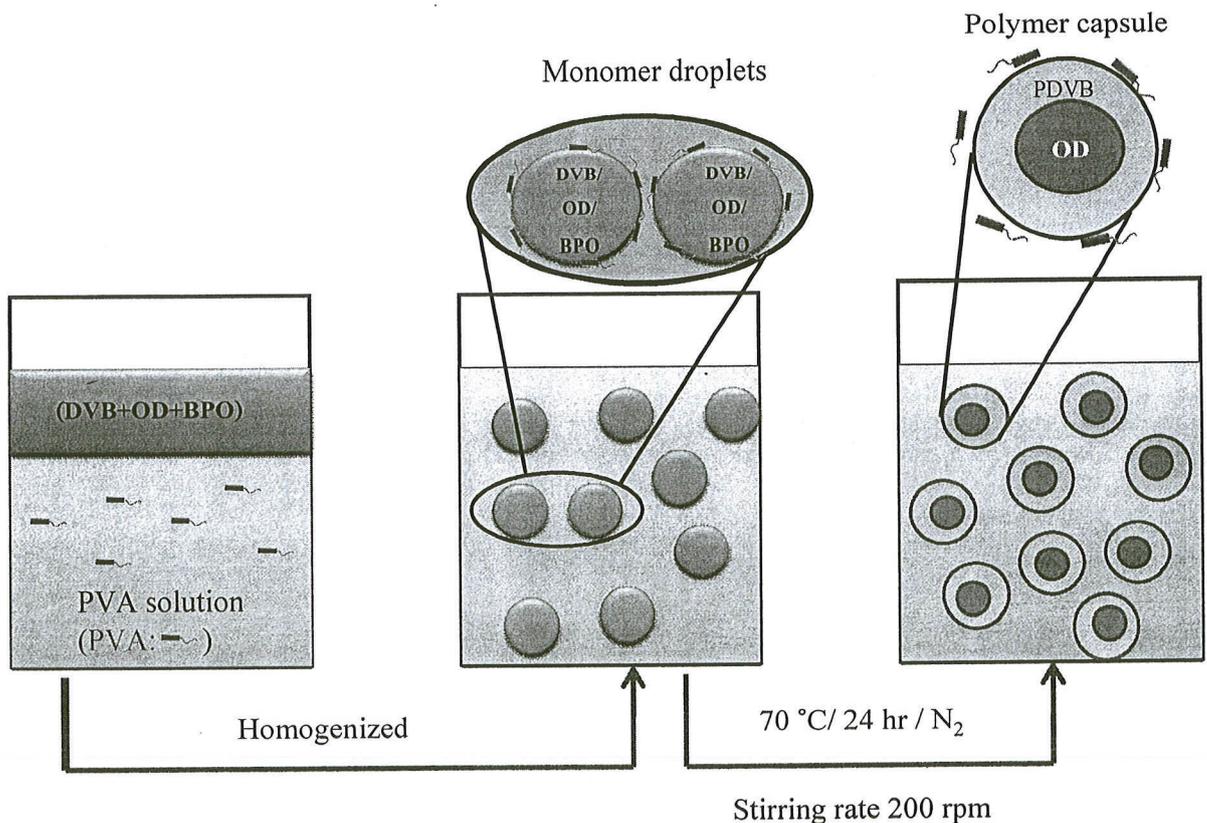
ดังนั้น ในการใช้งานจึงต้องการพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนมาก ซึ่งการหุ้มสารเหล่านี้ให้เป็นแคปซูลขนาดเล็กรายจำนวนมาก เป็นเทคนิคหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว และส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้อย่างมาก เมื่อเทียบกับการใช้งานโดยตรง

2.2 เทคนิคในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูล

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

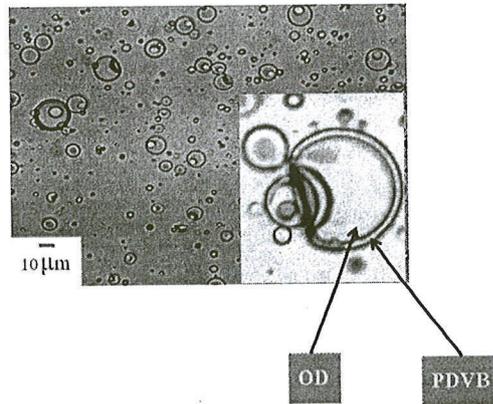
การเตรียมแคปซูลโดยใช้กลไกการแยกวัฏภาคภายใน (Internal phase separation)

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



รูปที่ 2.1 การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีนที่หุ้มออกตะเดเคน โดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอย

แฝงจึงเกิดการแยกวัฏภาคภายในแคปซูลขึ้น โดยที่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่ออกมาที่ด้านนอกของหยดมอนอเมอร์เกิดเป็นเปลือก ในขณะที่วัสดุเก็บความร้อนแฝงจะอยู่ด้านในกลายเป็นแกน อย่างไรก็ตาม การเกิดตามกลไกนี้จะต้องพิจารณาค่าแรงตึงระหว่างผิว (Interfacial tension) ของพอลิเมอร์กับน้ำและวัสดุเก็บความร้อนแฝงกับน้ำ (ถ้าพูดให้เข้าใจง่ายก็คือ ความสามารถในการเข้าใกล้กันของทั้งพอลิเมอร์และวัสดุเก็บความร้อนแฝง) โดยที่พอลิเมอร์จะต้องเข้าใกล้กันได้มากกว่าวัสดุเก็บความร้อนแฝง หรือมีค่าแรงตึงระหว่างผิวของพอลิเมอร์-น้ำ ต่ำกว่าวัสดุเก็บความร้อนแฝง-น้ำ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถดูได้จากเอกสารอ้างอิงต่างๆ หรือสามารถวัดได้จากค่าแรงตึงผิว (Surface tension) ของสารแต่ละคู่ การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลในระบบกระจาย มีอยู่หลายกระบวนการด้วยกัน เช่น การสังเคราะห์แบบแขวนลอย (Suspension polymerization) [4-8] แบบมินิอิมัลชัน (Miniemulsion polymerization) [9, 10] และแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) [11-14]

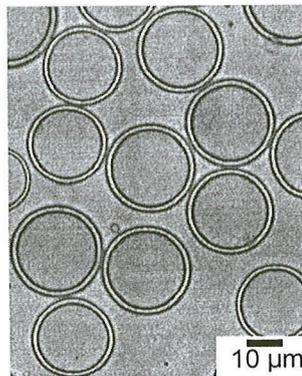


รูปที่ 2.2 Optical micrograph ของพอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มออกตะเดเคน โดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอย

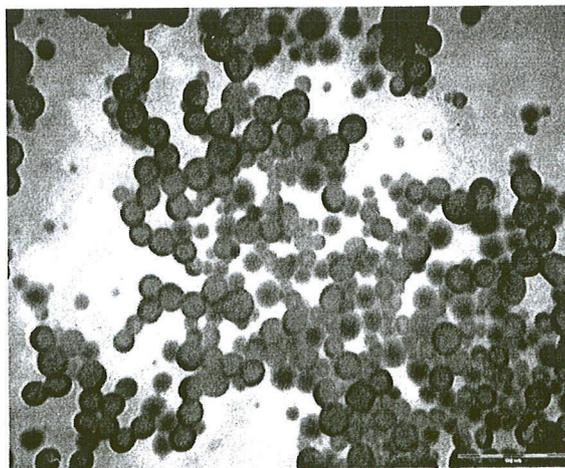
ตัวอย่างการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลด้วยการสังเคราะห์แบบแขวนลอยแสดงดังรูปที่ 2.1 เป็นการเตรียมแคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีน (Polydivinyl benzene; PDVB) ที่หุ้มออกตะเดเคน (Octadecane) โดยนำไดไวนิลเบนซีน (Divinyl benzene; DVB) ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ ออกตะเดเคน และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide; BPO) ซึ่งเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา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

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

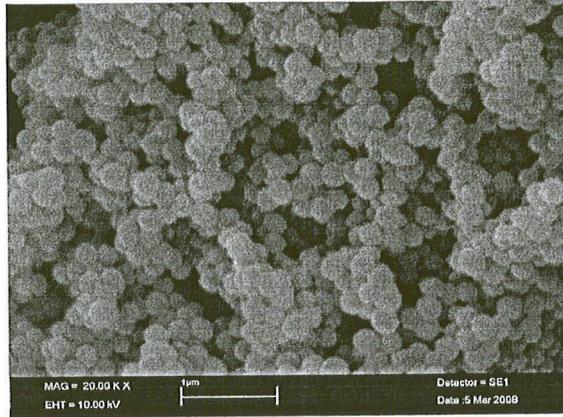
Okubo และคณะ [15] ได้เสนอเทคนิคการเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์แบบร่างแหที่มีช่องว่าง (Hollow crosslinked polymer particles) ด้วยชิระซูพอร์ส กลาส เมมเบรน แล้วทำการสังเคราะห์แบบแขวนลอย โดยใช้เทคนิคการจัดเรียงตัวเองของพอลิเมอร์ที่แยกวัฏภาค (Self-assembling of Phase Separated Polymer; SaPSeP) และต่อมาได้มีการพัฒนาเทคนิคนี้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



รูปที่ 2.3 Optical micrograph ของพอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มเฮกซะเดคเคน ที่เตรียมหยคมอนอเมอร์ด้วยชิระซู พอร์ส กลาส เมมเบรน แล้วสังเคราะห์แบบแขวนลอย [7]



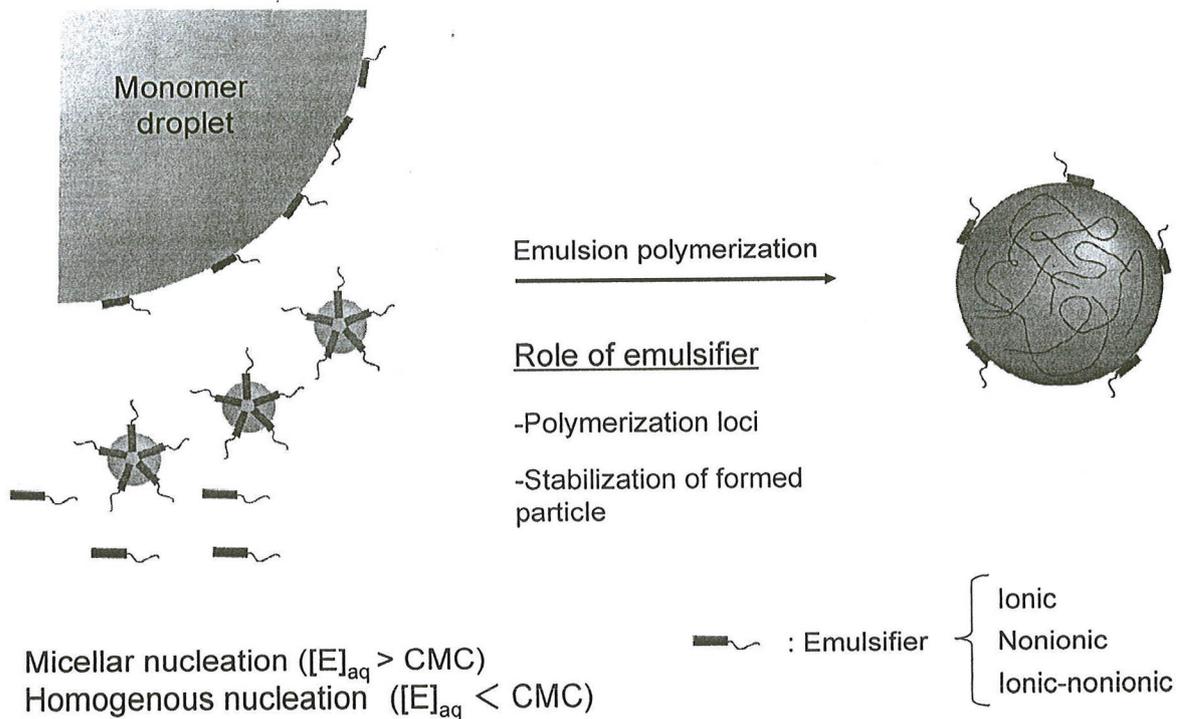
รูปที่ 2.4 รูป TEM ของพอลิสไตรีนที่หุ้มออกตะเดคเคนซึ่งเตรียมโดยการสังเคราะห์แบบมินิมัลชัน [9]



รูปที่ 2.5 รูป SEM ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่หุ้มออกตะ โคะเซน ซึ่งเตรียมโดยการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน [12]

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

การเตรียมแคปซูลด้วยเทคนิคมินิอิมัลชันจะมีกลไกเหมือนกับแบบแขวนลอย แต่จะแตกต่างกันในส่วนของการเตรียมหยคมอนอเมอร์ ซึ่งในวิธีนี้จะใช้ความเร็วที่สูงมากในการปั่นวัฏภาคอินทรีย์ ทำให้ได้หยคมอนอเมอร์ที่มีขนาดระดับนาโนเมตร ในขณะที่การสังเคราะห์แบบอิมัลชัน จะมีกลไกแตกต่างจากทั้งแบบแขวนลอยและแบบมินิอิมัลชันอย่างมาก เทคนิคนี้การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันจะเกิดในไมเซลล์ (Micelle) เรียกว่า ไมเซลล์พอลิเมอร์ไรเซชัน (Micelle polymerization) ดังนั้นตัวเริ่มปฏิกิริยาจะละลายในวัฏภาคต่อเนื่อง ในขณะที่การสังเคราะห์แบบแขวนลอยและมินิอิมัลชัน จะเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันในหยคมอนอเมอร์ ตัวเริ่มปฏิกิริยาจะละลายในวัฏภาคอินทรีย์ กลไกการสังเคราะห์อนุภาคพอลิเมอร์แบบอิมัลชันแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกการเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคอิมัลชัน

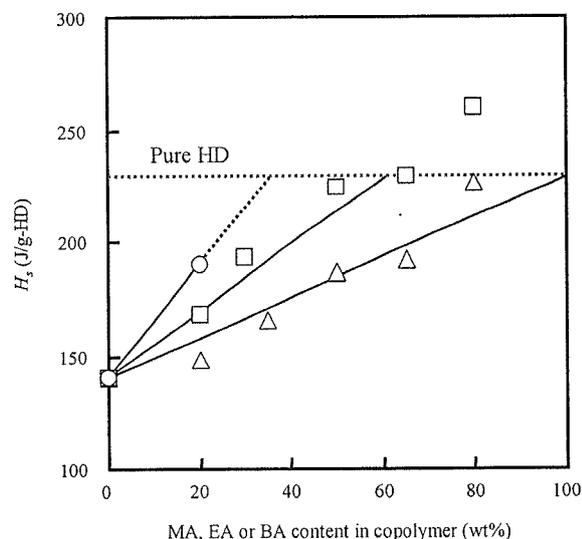
การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของเทคนิคการสังเคราะห์แบบอิมัลชันมีอยู่สองรูปแบบ คือ การเกิดนิวเคลียสแบบไมเซลล์าร์ (Micellar nucleation) และโฮโมจีเนียส (Homogeneous nucleation) ในกรณีแรกจะเติมสารลดแรงตึงผิว (Emulsifier) ลงในวัฏภาคต่อเนื่อง (ที่มีตัวเริ่มปฏิกิริยาละลายอยู่) ให้มีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเกิดไมเซลล์ได้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

ยาวขึ้น (มีความไม่เข้มข้นมากขึ้น) ทำให้ได้พอลิเมอร์แคปซูลที่มีวัสดุเก็บความร้อนแฝงเป็นแกน และพอลิเมอร์เป็นเปลือก คังการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่หุ้มเฮปตะเดคเคน [12]

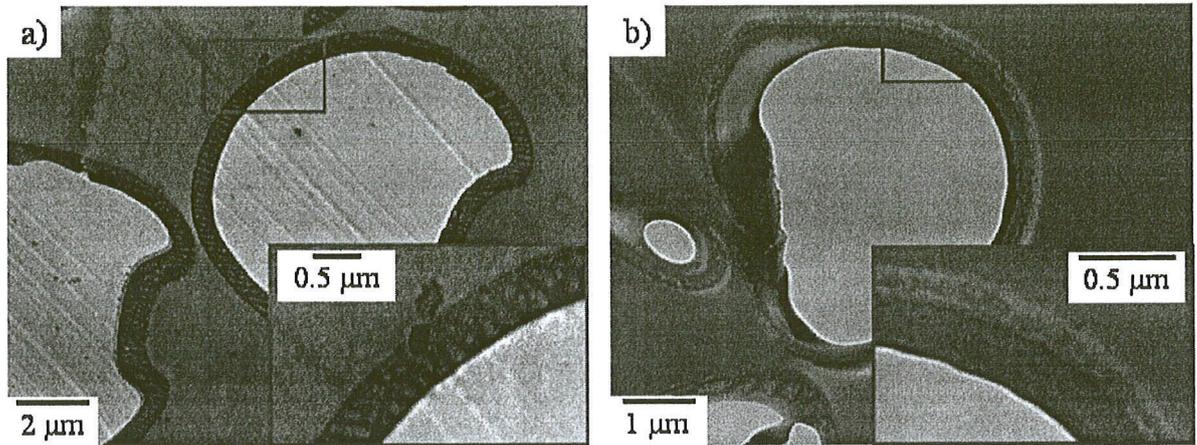
2.3 สมบัติทางความร้อนของวัสดุเก็บความร้อนแฝงในพอลิเมอร์แคปซูล

อย่างไรก็ตาม พบว่าการหุ้มสารด้วยเทคนิคต่างๆให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ยังคงเป็นสิ่งที่น่าสนใจศึกษา ในการพัฒนาแคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนแฝง เนื่องจากพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้มีข้อดีที่สำคัญอยู่สองประการ 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 กรณีเฮกซะเดคเคนที่ถูกหุ้มด้วยพอลิไคโวนิลเบนซีน มีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะเท่ากับ 140 J/g-HD ซึ่งลดลงจากเฮกซะเดคเคนที่ไม่มีการห่อหุ้มที่มีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะเท่ากับ 230 J/g-HD



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

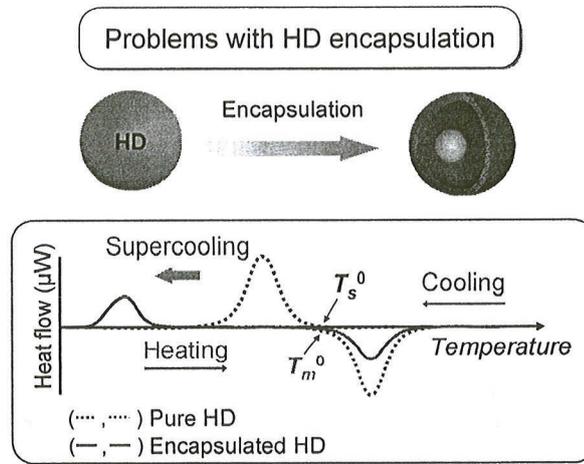


รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของอนุภาคพอลิเมอร์แคปซูลของพอลิไคไวนิลเบนซีน (a) และ พอลิไคไวนิลเบนซีน-บิวทิลอะคริเลต (b) ที่หุ้มเฮกซะเดคเคน [8]

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 จนถึงปัจจุบันก็ยังไม่มีการอธิบายที่ชัดเจน 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 โดยการใช้สารเหนียวนำในการเกิดผลึกผสมเข้าไปกับวัสดุเก็บความร้อนแฝงในขั้นตอนการเตรียมแคปซูล ซึ่งสามารถลดการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของสารเหนียวนำในการเกิดผลึกที่เพิ่มขึ้น ก็ทำให้ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อนลดลงเช่นกัน ดังนั้นปริมาณและชนิดของสารเหนียวนำในการเกิดผลึกก็ยังคงเป็นโจทย์ที่จะต้องทำการศึกษากันต่อไป



รูปที่ 2.9 การเกิดการเย็นตัวอย่างยิ่งยวดของเฮกซะเดคเคนที่อยู่ในพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูล

2.4 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุเก็บความร้อน

จากสมบัติของวัสดุเก็บความร้อนแฝงดังกล่าวมาข้างต้น จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ในการอนุรักษ์และปรับปรุงการใช้พลังงานจากธรรมชาติในรูปแบบต่างๆ เช่น นำไปใช้ควบคู่กับเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ในการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมีเฉพาะในเวลากลางวันและนำพลังงานนั้นมาใช้ในช่วงเวลากลางคืน [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] ทำงานควบคู่กับสารทำความเย็นของผู้เย็น 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 ซึ่งในอนุภาคหรือแคปซูลนี้จะมีการบรรจุสารสำคัญอยู่ภายใน โดยจะมีการหุ้มสารเหล่านี้ด้วยพอลิเมอร์ที่เหมาะสมบางชนิด เช่น พอลิไคโวนิลเบนซีน พอลิยูเรีย การสังเคราะห์โดยทั่วไปจะใช้วิธีแบบแขวนลอย (Suspension polymerization) โดยอนุภาคแคปซูลที่ได้จะอยู่ในระดับไมโครเมตร โดยวัสดุควบคุมอุณหภูมิในอาคารจะมีลักษณะเป็นอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจะแพร่กระจายอยู่ในท่อสำหรับใส่สารนี้โดยเฉพาะตามโครงสร้างต่างๆ ของอาคาร ซึ่งวัสดุควบคุมอุณหภูมิในอาคารจะทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อน เมื่อ

อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมสูงกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อนและเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อนก็จะคายพลังงานความร้อนออกมาทำให้สามารถป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารที่พักอาศัยได้

2.4.3 ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น ใช้สำหรับผ้าปรับสภาพความร้อน (Thermal adaptable clothes) โดยเมื่อใส่เสื้อผ้าที่เคลือบ หรือผสมด้วยแคปซูลของวัสดุเก็บความร้อนแฝงออกไปภายนอกอาคารที่มีอุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อน) ความร้อนที่สะสมอยู่ในวัสดุเก็บความร้อนแฝงภายในแคปซูลจะค่อยๆ ปล่อยออกมาจากเนื้อผ้า และให้ความอบอุ่นแก่ผู้สวมใส่ ในขณะที่เดียวกันหากอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง 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]

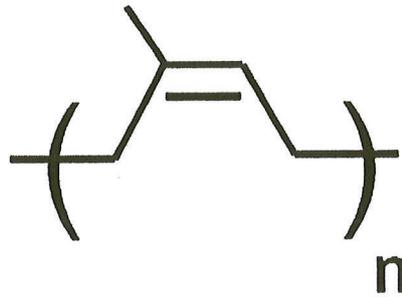
2.5.1 ประวัติยางธรรมชาติ

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

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

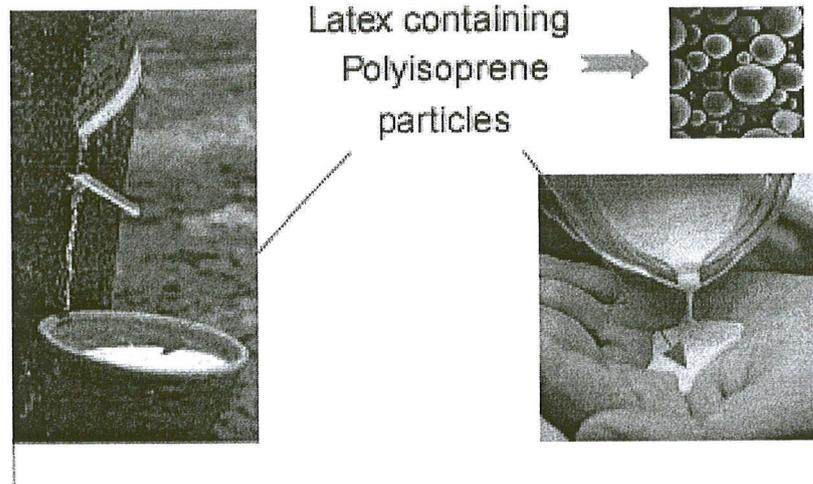
ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ยางพาราเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ที่มีอายุยืนยาวนานร้อยปี มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* [35, 36] น้ำยางพาราเป็นของเหลวสีขาวถึงขาวปนเหลือง ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ในสถานะอสัณฐาน 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 ชุ่มชื้นอยู่ในท่อน้ำยางออกจากต้นยางซึ่งเรียงตัวกันอยู่ในเปลือกของต้นยาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งค้ำในซึ่งอยู่กับเชื้อเจริญ การเอาน้ำยางออกจากต้นยางจะต้องทำให้ท่อน้ำยางขาดออกจากกัน ในน้ำยางจะมีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยางและส่วนที่ไม่ใช่ยาง [38] ตามปกติในน้ำยางจะมีเนื้อยางแห้งประมาณ 25-45% เนื้อยางแห้งนี้เองเป็นวัสดุมหัศจรรย์ที่มนุษย์นำไปใช้ประโยชน์ต่อการดำรงชีวิต 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% และส่วนของลิวทอยด์และสารอื่นๆ หรือที่เรียกว่า อนุภาคเฟรยวีสลิง (Frey wysling) ประมาณ 10% [39]