

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจาก ในปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก เพื่อความสะดวกสบายในการดำรงชีวิต พลังงานที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ พลังงานไฟฟ้า ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานที่จะขาดไม่ได้เลย เพราะสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆจะใช้ไฟฟ้าเป็นหลักในการทำงาน เช่น เครื่องปรับอากาศ เครื่องทำความร้อน ตู้เย็น เป็นต้น ค่าใช้จ่ายก็จะแปรผันตามปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า การที่จะจำกัดการใช้ไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ทำได้ยากมาก แม้ว่าจะมีมาตรการประหยัดพลังงานในรูปแบบต่างๆ แต่ก็ไม่สามารถที่จะลดการใช้ไฟฟ้าลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ดังที่ทราบกันดีว่า เครื่องทำความเย็นที่มีการใช้อยู่เกือบทุกครัวเรือนก็เป็นสาเหตุทางอ้อมให้เกิดภาวะโลกร้อนได้ด้วย เนื่องจากการใช้สารซีเอฟซี (CFCs) เป็นสารทำความเย็น

แนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้านั้น คือ การใช้วัสดุเก็บความร้อน (Heat storage materials) โดยเฉพาะวัสดุเก็บความร้อนแฝง (Latent heat storage materials) หรือวัสดุเปลี่ยนวัฏภาค (Phase change materials) มาช่วยในการกักเก็บพลังงานหรือความร้อนในระหว่างวัน ซึ่งในปัจจุบันได้มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากทำการศึกษา วัสดุเก็บความร้อนแฝงจะมีหลักการทำงาน คือ วัสดุจะดูดพลังงานความร้อน เมื่ออุณหภูมิในสิ่งแวดล้อมมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ (Transition temperature) ของวัสดุ และจะคายพลังงานความร้อนออกมาเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะของวัสดุ วัสดุเก็บความร้อนแฝงที่ดีจะต้องมีความจุความร้อนสูง มีค่าการนำความร้อนที่สูง หลอมเหลวที่อุณหภูมิในช่วงของการใช้งาน แข็งตัวโดยเกิดการเย็นตัวยิ่งยวดน้อยที่สุด (การเย็นต่ำกว่าปกติของอุณหภูมิในการแข็งตัวของวัสดุ: Supercooling) มีความเสถียรทางความร้อน ราคาต่ำ ไม่เป็นพิษ และไม่เกิดการกัดกร่อน [1] การเลือกวัสดุเก็บความร้อนแฝงขึ้นกับอุณหภูมิการใช้งาน และปริมาณความจุความร้อน โดยทั่วไป ควรเลือกใช้สารที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะใกล้เคียงกับอุณหภูมิการใช้งาน [1, 2] เนื่องจากมีวัสดุเก็บความร้อนแฝงจำนวนมากซึ่งหลอมเหลวและแข็งตัวในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง จึงทำให้สารเหล่านี้ได้รับความสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

2.1 ชนิดและสมบัติของวัสดุเก็บความร้อน

วัสดุเก็บความร้อนหรือวัสดุที่เปลี่ยนแปลงวัฏภาคได้ เป็นสารที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี โดยจะมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สารจะดูดซับความร้อนไว้ จนถึงอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะจะเกิดการหลอมเหลว แต่เมื่ออุณหภูมิลดลง สารจะคายความร้อนออกมาจนถึงอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะจะเกิดการแข็งตัวเป็นของแข็ง เกิดเป็นวัฏจักรเช่นนี้ตลอดเวลา จากพฤติกรรมนี้จึงได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในการเก็บความร้อนในธรรมชาติในรูปแบบต่างๆ

2.1.1 ชนิดและสมบัติของวัสดุเก็บความร้อน [2-4]

วัสดุเก็บความร้อน มีด้วยกันหลายชนิดซึ่งมีกระบวนการทำงานคล้ายกัน วัสดุเก็บความร้อนที่ดีจะต้องมีความจุความร้อนสูง มีค่าการนำความร้อนที่สูง หลอมเหลวที่อุณหภูมิในช่วงของการใช้งาน แข็งตัวโดยเกิดการเย็นตัวที่ยาวนน้อยที่สุด มีความเสถียรต่อสารเคมี ราคาต่ำ ไม่เป็นพิษ และไม่เกิดการกัดกร่อน การเลือกวัสดุเก็บความร้อนขึ้นกับอุณหภูมิการใช้งานและความจุความร้อน ควรเลือกใช้สารที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะใกล้เคียงกับอุณหภูมิการใช้งาน มีวัสดุเก็บความร้อนจำนวนมากซึ่งหลอมเหลวและแข็งตัวในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง และวัสดุเก็บความร้อนที่ได้รับความนิยม คือ สารกลุ่มพาราฟิน (Paraffin)

วัสดุเก็บความร้อนแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. สารอนินทรีย์ (Inorganic Compounds) ส่วนมากจะเป็นพวกเกลือ เช่น เกลือโซเดียมซัลเฟต แคลเซียมคลอไรด์ โดยข้อดีของสารกลุ่มนี้คือ มีค่าความจุความร้อน หรือ ค่าความร้อนแฝง (Latent heat) ที่สูง แต่มีข้อเสีย คือ เกิดการเย็นตัวอย่างยิ่งยวด ได้ง่ายและไม่มีความเสถียรทางความร้อน คือ การนำไปใช้งาน เมื่อใช้งานไปนาน ๆ ก็จะเกิดการเสื่อมสลายได้เร็ว ไม่สามารถดูดหรือคายความร้อนได้ดังเดิมอีก [5]

จากข้อเสียของสารกลุ่มอนินทรีย์ดังกล่าว จึงมีผู้นิยมใช้วัสดุเก็บความร้อนที่เป็นสารอินทรีย์มากกว่าสารกลุ่มอนินทรีย์

2. สารอินทรีย์ (Organic Compounds) วัสดุเก็บความร้อนประเภทอินทรีย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

2.1 กลุ่มที่ไม่ใช่พาราฟิน (Non-Paraffin) เช่น พอลิเอทธีลีน ไกลคอล (Polyethyleneglycol)

2.2 กลุ่มพาราฟิน (Paraffin) หรือ อัลเคน คือไฮโดรคาร์บอนที่ยึดกันด้วยพันธะเดี่ยว และเป็นสารประกอบอะลิฟาติก (Aliphatic) สูตรของอัลเคนโดยทั่วไปคือ C_nH_{2n+2} ซึ่งจะมีด้วยกันหลายชนิด แต่ที่นิยมศึกษาส่วนใหญ่จะเป็นคาร์บอนที่มีเลขคู่ เช่น Hexadecane Octadecane Tetradecane เป็นต้น

คุณสมบัติของอัลเคน

1. ไม่ละลายน้ำเนื่องจากเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว
2. ไม่นำไฟฟ้าเพราะเป็นไมสารถิเล็กโตรไลต์ (Non-electrolyte)
3. มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ
4. จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงขึ้นตามจำนวนคาร์บอนอะตอมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคาร์บอนยิ่งมาก มวลโมเลกุลยิ่งมากทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่ามาก

ดังนั้น พาราฟิน จึงเป็นสารกลุ่มหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างมาก และนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเก็บความร้อน ซึ่งมีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ข้อดีของสารกลุ่มพาราฟิน คือ ราคาถูก มีค่าความร้อนแฝงสูง ไม่เป็นพิษ ไม่กัดกร่อน และมีความเสถียรทางความร้อนสูง

ข้อเสียของสารกลุ่มพาราฟิน คือ มีค่าการนำความร้อนต่ำ การถ่ายเทความร้อนไม่ดี

2.1.2 การประยุกต์ใช้งาน [1]

แคลซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อน ได้รับความสนใจและมีการศึกษากันมากขึ้น แคลซูลเหล่านี้ได้ถูกนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของอาคาร ใช้เก็บพลังงานแสงอาทิตย์และนิวเคลียร์ ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิและสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูก เป็นต้น

2.1.2.1 ใช้เก็บพลังงานแสงอาทิตย์

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

ประเทศที่มีภูมิอากาศหนาวเย็นมีการใช้วัสดุเปลี่ยนแปลงวัฏภาคได้ (PCMs) ในลักษณะของการจัดการพลังงาน โดยมีวัตถุประสงค์ คือ การนำเอาพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยวัสดุ PCMs จะฝังตัวและแพร่กระจายอยู่ในโครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง ซึ่งวัสดุ PCMs จะทำหน้าที่ดูดซับ (Adsorb) พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวัน ทำให้สามารถป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารที่พักอาศัยได้ และในเวลากลางคืนอุณหภูมิภายในอาคารและสิ่งแวดล้อมภายนอกจะต่ำกว่าอุณหภูมิของวัสดุ PCMs ทำให้วัสดุ PCMs สามารถปลดปล่อย (Release) พลังงานความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารที่พักอาศัยเพื่อสร้างความอบอุ่นแก่ผู้พักอาศัยได้ นอกจากนี้การใช้ PCMs ยังสามารถเลื่อนการใช้พลังงานจากช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานสูงสุดมาเป็นช่วงเวลาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดได้ จึงทำให้ค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้สำหรับการผลิตพลังงานลดลงได้ เนื่องจากประเทศที่มีภูมิอากาศร้อน เช่น ประเทศไทย การปลดปล่อยพลังงานความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารในเวลากลางคืนนั้นไม่เป็นที่ต้องการ แต่สามารถใช้คุณสมบัติในการดูดซับพลังงานความร้อนเพื่อป้องกันความร้อนในช่วงเวลากลางวันของวัสดุ PCMs ให้เกิด ประโยชน์ได้ ดังนั้นการศึกษาการใช้งานวัสดุ PCMs สำหรับประเทศที่มีภูมิอากาศร้อนนั้นจึงมีความจำเป็น เพราะสามารถลดการใช้พลังงานได้

2.1.2.2 วัสดุควบคุมอุณหภูมิในอาคาร

การใช้วัสดุควบคุมอุณหภูมิในอาคารควบคู่กับเครื่องปรับอากาศ ซึ่งในอนุภาคหรือแคปซูลนี้จะมีการบรรจุสารสำคัญอยู่ภายใน โดยจะมีการหุ้มสารเหล่านี้ด้วยพอลิเมอร์ที่เหมาะสมบางชนิด เช่น พอลิไคไวนิลเบนซีน พอลิยูเรีย การสังเคราะห์โดยทั่วไปจะใช้วิธีแบบแขวนลอย (Suspension Polymerization) โดยอนุภาคแคปซูลที่ได้จะอยู่ในระดับไมโครเมตร โดยวัสดุควบคุมอุณหภูมิในอาคาร ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจะแพร่กระจายอยู่ในท่อสำหรับใส่สารนี้ โดยเฉพาะตามโครงสร้างต่างๆของอาคาร ซึ่งวัสดุควบคุมอุณหภูมิในอาคารจะทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อนเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมสูงกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อนและเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อนก็จะคายพลังงานความร้อนออกมาทำให้สามารถป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารที่พักอาศัยได้

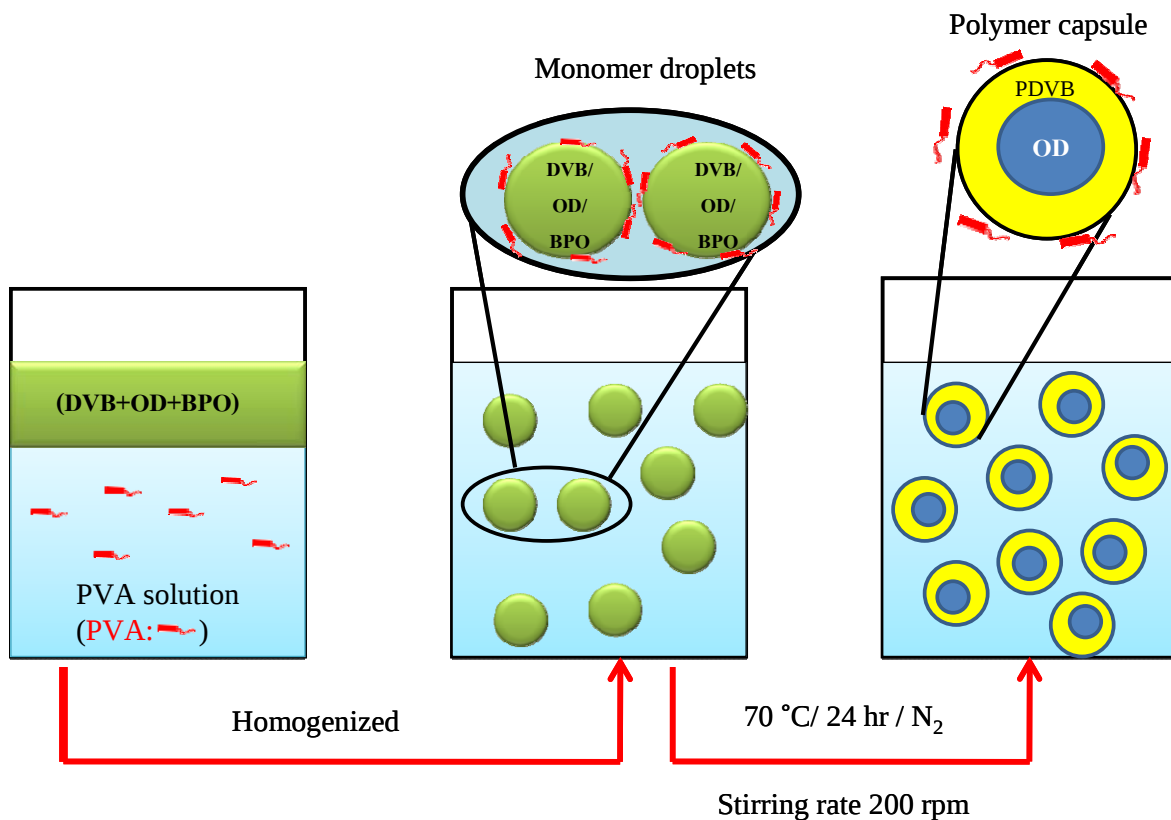
2.2 เทคนิคในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูล

เทคนิคในการเตรียมแคปซูลที่มีพอลิเมอร์เป็นเปลือก (Shell) และมีพาราฟินซึ่งเป็นวัสดุเก็บความร้อนแฝงทั้งในสถานะของเหลวหรือของแข็งเป็นแกน (Core) มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน รวมทั้งมีชนิดของพอลิเมอร์และพาราฟินที่ใช้หลายชนิด โดยขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานพอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนแฝง เทคนิคสำคัญๆที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย มีดังนี้

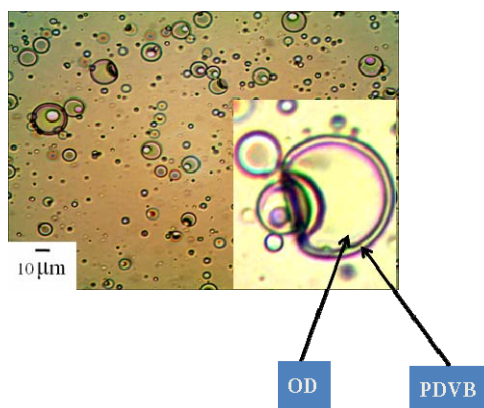
2.2.1 การเตรียมแคปซูลโดยใช้กลไกการแยกวัฏภาคภายใน (Internal phase separation)

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) พอลิเมอร์จะไม่สามารถละลายเข้ากันได้กับวัสดุเก็บความร้อนแฝงจึงเกิดการแยกวัฏภาคภายในแคปซูลขึ้น โดยที่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่ออกมาที่ด้านนอกของหยดมอนอเมอร์เกิดเป็นเปลือก ในขณะที่วัสดุเก็บความร้อนแฝงจะอยู่ด้านในกลายเป็นแกน อย่างไรก็ตาม การเกิดตามกลไกนี้จะต้องพิจารณาค่าแรงตึงระหว่างผิว (Interfacial tension) ของพอลิเมอร์กับน้ำและวัสดุเก็บความร้อนแฝงกับน้ำ (ถ้าพูดให้เข้าใจง่ายก็คือ ความสามารถในการเข้าไกล้ำน้ำของทั้งพอลิเมอร์และวัสดุเก็บความร้อนแฝง) โดยที่พอลิเมอร์จะต้องเข้าไกล้ำน้ำได้มากกว่าวัสดุเก็บความร้อนแฝง หรือมีค่าแรงตึงระหว่างผิวของพอลิเมอร์-น้ำ ต่ำกว่าวัสดุเก็บความร้อนแฝง-น้ำ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถดูได้จากเอกสาร

อ้างอิงต่างๆ หรือสามารถวัดได้จากค่าแรงตึงผิว (Surface tension) ของสารแต่ละคู่ การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลในระบบกระจาย มีอยู่หลายกระบวนการด้วยกัน เช่น การสังเคราะห์แบบแขวนลอย (Suspension polymerization) [4-8] แบบมินิมัลชัน (Miniemulsion polymerization) [9, 10] และแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) [11-14]



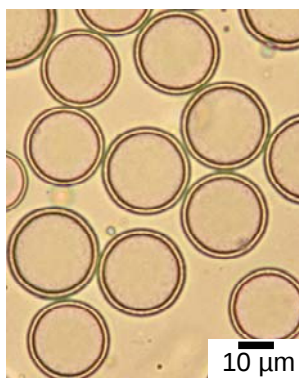
รูปที่ 2.1 การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลของพอลิไคไวนิลเบนซีนที่หุ้มออกตะเดเคน โดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอย



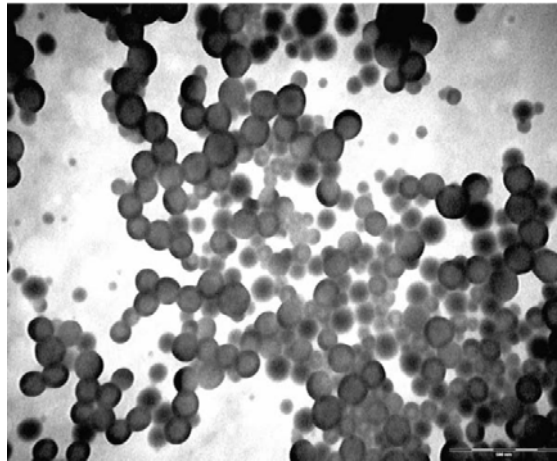
รูปที่ 2.2 Optical micrograph ของพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มออกตะเดเคน โดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอย

ตัวอย่างการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลด้วยการสังเคราะห์แบบแขวนลอยแสดงดังรูปที่ 2.1 เป็นการเตรียมแคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีน (Polydivinyl benzene; PDVB) ที่หุ้มออกตะเดเคน (Octadecane) โดยนำไดไวนิลเบนซีน (Divinyl benzene; DVB) ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ ออกตะเดเคน และ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide; BPO) ซึ่งเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา มาผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วเทลงในสารละลายของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) (เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ทำหน้าป้องกันการรวมตัวกันของหยดมอนอเมอร์) จากนั้นทำการปั่นสารผสมที่ความเร็วสูง จะทำให้ได้หยดมอนอเมอร์ที่มีออกตะเดเคนและตัวเริ่มปฏิกิริยาละลายอยู่ด้วย เมื่อทำการสังเคราะห์ที่เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม จะได้พอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูล โดยแคปซูลที่ได้จากวิธีนี้จะมีขนาดในระดับไมโครเมตร และให้การกระจายของขนาดอนุภาคที่กว้าง (Polydisperse particles) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 อย่างไรก็ตาม ได้มีการพัฒนาเทคนิคการเตรียมหยดมอนอเมอร์ให้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยการให้วัสดุภาชนะอินทรีย์ผ่านเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใกล้เคียงกัน เรียกเมมเบรนนี้ว่า ชิระสุ พอร์ัส กลาส (Shirasu porous glass; SPG) ก่อนลงสู่วัสดุภาชนะต่อเนื่องและทำการพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งจะทำให้ได้พอลิเมอร์แคปซูลที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (Monodisperse particles)

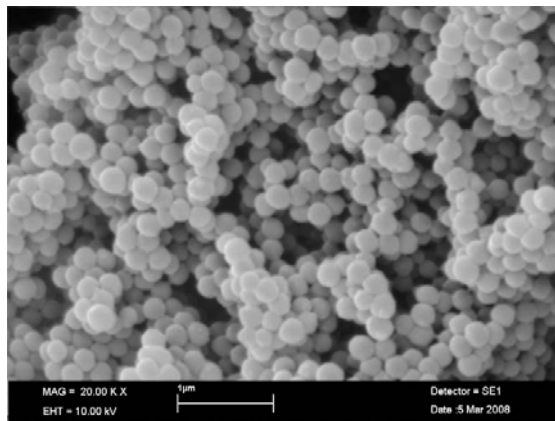
Okubo และคณะ [15] ได้เสนอเทคนิคการเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์แบบร่างแหที่มีช่องว่าง (Hollow crosslinked polymer particles) ด้วยชิระสุพอร์ัส กลาส เมมเบรน แล้วทำการสังเคราะห์แบบแขวนลอย โดยใช้เทคนิคการจัดเรียงตัวเองของพอลิเมอร์ที่แยกวัฏภาค (Self-assembling of Phase Separated Polymer; SaPSeP) และต่อมาได้มีการพัฒนาเทคนิคนี้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



รูปที่ 2.3 Optical micrograph ของพอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มเฮกซะเดเคน ที่เตรียมหยดมอนอเมอร์ด้วยชิระสุ พอร์ัส กลาส เมมเบรน แล้วสังเคราะห์แบบแขวนลอย [7]



รูปที่ 2.4 รูป TEM ของพอลิสไตรีนที่หุ้มออกตะเดเคนซึ่งเตรียมโดยการสังเคราะห์แบบมินิอิมัลชัน [9]

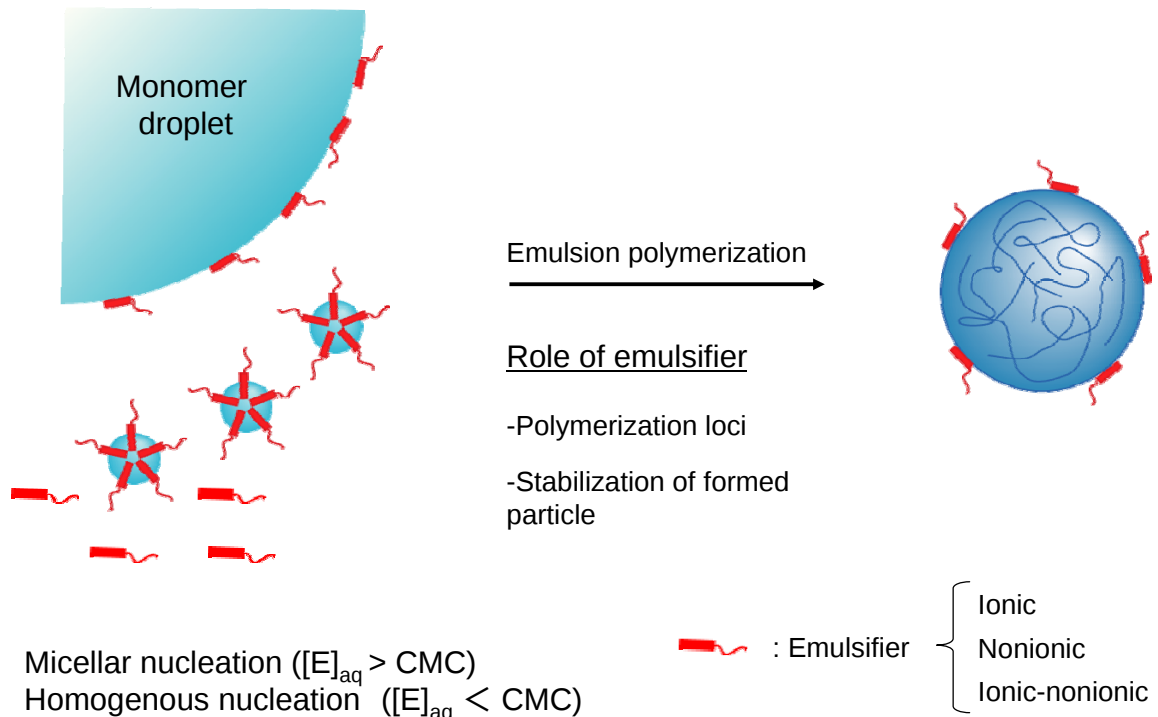


รูปที่ 2.5 รูป SEM ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่หุ้มออกตะโคเซน ซึ่งเตรียมโดยการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน [12]

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น การเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลโดยการสังเคราะห์แบบแขวนลอย นั้น จะให้ขนาดในระดับไมโครเมตร ดังนั้น ถ้าต้องการแคปซูลในระดับนาโนเมตร การสังเคราะห์แบบมินิอิมัลชันและอิมัลชันจะเหมาะสมกว่า ดังขนาด (124 nm) ของพอลิสไตรีน (Polystyrene) ที่หุ้มออกตะเดเคน [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 จะเกิดพอลิ

เมอร์ไรเซชันในหยดมอนอเมอร์ 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 ในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความไม่มีขั้วเพียงพอที่จะเข้าไปอยู่ในไมเซลล์ เนื่องจากจำนวนของไมเซลล์ที่มีมากกว่าหยดมอนอเมอร์ (เกิดจากการปั่นความเร็วต่ำ) อย่างมาก (มากกว่า 10^4 เท่า) และจะเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันต่อไปจนได้อนุภาคพอลิเมอร์ (มอนอเมอร์ในหยดมอนอเมอร์จะเคลื่อนที่เข้าไปในไมเซลล์ทั้งหมด) กรณีที่สอง จะไม่มีสารลดแรงตึงผิวหรือมีน้อยกว่าความเข้มข้นวิกฤตที่จะเกิดไมเซลล์ สายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดในวัฏภาคต่อเนื่อง เมื่อมีความยาวจนถึงจุดวิกฤต (Critical chain length; J_{crit}) จะไม่สามารถละลายน้ำได้ จะรวมตัวกันโดยใช้ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (พอลิเมอร์) อยู่ภายใน ส่วนที่ชอบน้ำ (มาจากตัวเริ่มปฏิกิริยา) อยู่ภายนอก และเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันในน้ำจนได้อนุภาคพอลิเมอร์ สำหรับการเตรียมพอลิเมอร์แคลปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนแฝงด้วยเทคนิคนี้ มอนอเมอร์และวัสดุเก็บความร้อนแฝงจะถูกผสมกันก่อน ดังนั้นในระหว่างการพอลิเมอร์ไรเซชัน (ในไมเซลล์) วัสดุเก็บความร้อนแฝงที่ละลายกับมอนอเมอร์

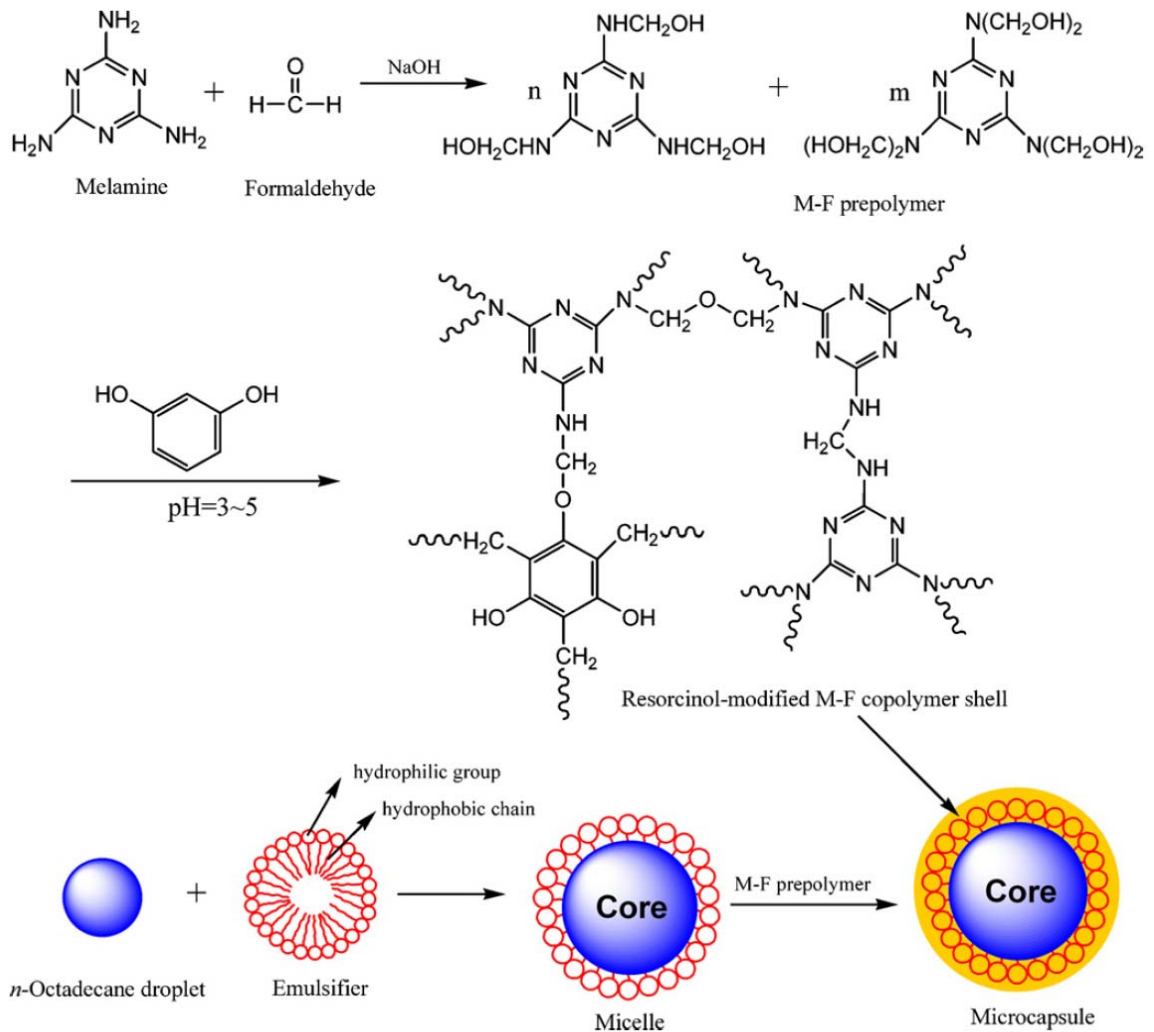
ภายในหยดมอนอเมอร์จะเคลื่อนที่เข้าไปในไมเซลล์ แล้วเกิดการแยกตัวภายในเมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ยาวขึ้น (มีความไม่มีความชื้นมากขึ้น) ทำให้ได้พอลิเมอร์แคปซูลที่มีวัสดุเก็บความร้อนแฝงเป็นแกน และพอลิเมอร์เป็นเปลือก ดังการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่หุ้มเฮปตะเดเคน [12]

2.2.2 การพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างผิวที่รอยต่อ (Interfacial polymerization)

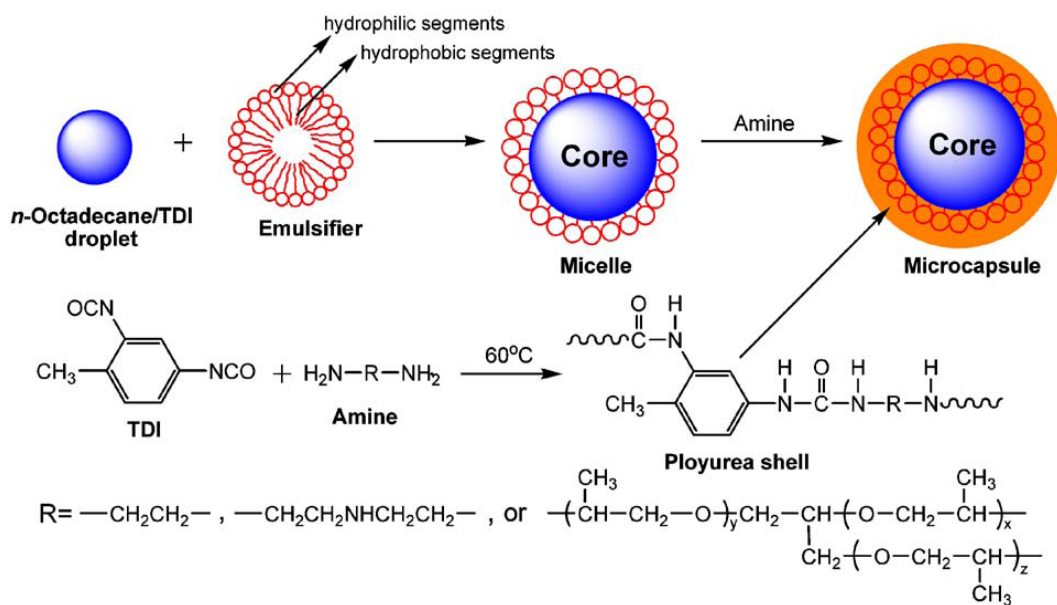
การเตรียมแคปซูลด้วยวิธีนี้ โดยทั่วไปมีอยู่สองรูปแบบใหญ่ๆ คือ การสังเคราะห์แบบอินซิตู (In situ polymerization) [17-19] และแบบควบแน่น (Polycondensation) [20, 21]

กรณีการสังเคราะห์แบบอินซิตู จะแบ่งเป็นสองส่วน คือ เตรียมหยดของวัสดุเก็บความร้อนแฝงในระบบกระจายและสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่จะนำมาใช้เป็นเปลือกของแคปซูล แล้วนำสองส่วนมาผสมกัน เช่น ในการเตรียมแคปซูลของเมลามีน-ฟอร์มาลดีไฮด์ (Mela- mine-formaldehyde) ที่หุ้มออกตะเดเคน กลไกในการเตรียมแสดงดังรูปที่ 2.7 ออกตะเดเคนจะถูกเตรียมให้เป็นหยดที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ โดยการนำออกตะเดเคนผสมกับน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic emulsifier) ก่อนทำการปั่นที่ความเร็วสูง สุดท้ายจะได้หยดออกตะเดเคนที่มีประจุลบอยู่บนผิว (ส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวจะจับกับออกตะเดเคนในขณะที่ส่วนที่ชอบน้ำที่มีประจุลบจะสัมผัสกับน้ำ) ในขณะที่จะทำการแยกสังเคราะห์โคพอลิเมอร์แบบร่างแห (Crosslinked copolymer) ของเมลามีน-ฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกลไกแบบควบแน่น โดยใช้เรซอร์ซินอล (Resorcinol) เป็นสารเชื่อมร่างแห (Crosslinking agent) เมื่อนำทั้งสองส่วนมาผสมกันที่สภาวะกรด (พีเอชประมาณ 4.5-5) ที่โคพอลิเมอร์จะแสดงประจุบวกที่มาจากหมู่เอมีน ซึ่งจะสามารถจับกับประจุลบของสารลดแรงตึงผิวที่ล้อมรอบหยดออกตะเดเคน ทำให้ได้พอลิเมอร์แคปซูล

กรณีการสังเคราะห์แบบควบแน่นที่รอยต่อจะไม่แยกส่วนทำเหมือนในกรณีของอินซิตู แต่จะทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่รอยต่อของหยดวัสดุเก็บความร้อนแฝงกับวัสดุต่อเนื่อง หลักการสำคัญของวิธีนี้ คือ จะต้องมียอนอเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ ละลายในวัสดุเก็บความร้อนแฝง และมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำละลายในวัสดุต่อเนื่อง เมื่อเตรียมส่วนของหยดวัสดุเก็บความร้อนแฝง (เหมือนกับขั้นตอนการเตรียมหยดวัสดุเก็บความร้อนแฝงในการสังเคราะห์แบบอินซิตู) มอนอเมอร์ที่ชอบน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกเติมลงในระบบ และเกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันได้พอลิเมอร์แคปซูล ตัวอย่างกลไกการเกิดของวิธีนี้แสดงดังรูปที่ 8 ออกตะเดเคน ไดไอโซไซยานาต (Diisocyanate; TDI) และน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิวจะถูกผสมและปั่นที่ความเร็วสูง หลังจากนั้นเติมเอทิลีน ไดเอมีน (Ethylene diamine; EDA) มอนอเมอร์ และแอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride) ซึ่งเป็นสารเร่งปฏิกิริยา ทำการพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 60°C สุดท้ายจะได้พอลิเมอร์แคปซูล



รูปที่ 2.7 กลไกการเตรียมแคปซูลของเมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ที่หุ้มออกตะเดเคนด้วยการสังเคราะห์แบบอินซิทู [15]

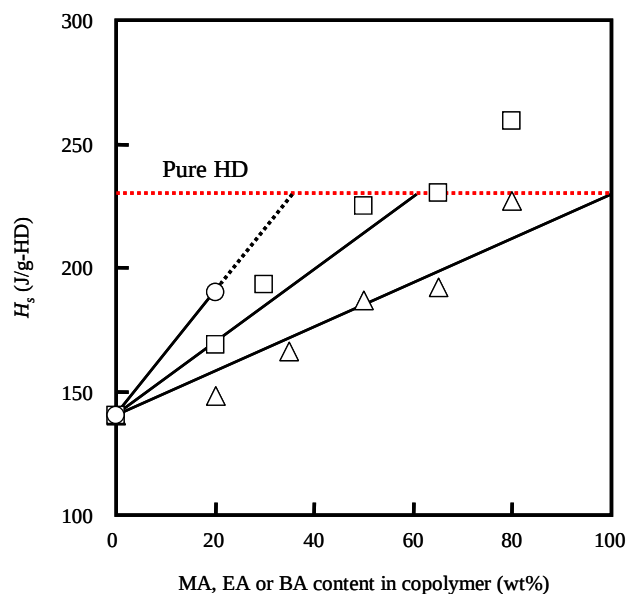


รูปที่ 2.8 กลไกการเตรียมแคปซูลของพอลิยูเรียที่หุ้มออกตะเดเคนด้วยการสังเคราะห์แบบควบแน่นที่รอยต่อ [19]

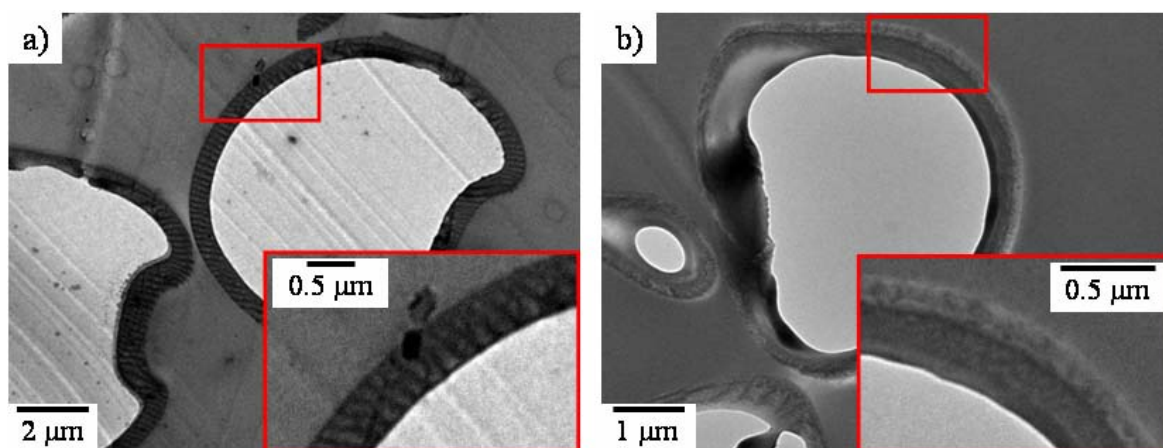
2.3 สมบัติทางความร้อนของวัสดุเก็บความร้อนแฝงในพอลิเมอร์แคปซูล

อย่างไรก็ตาม พบว่าการหุ้มสาร (Encapsulation) ด้วยเทคนิคต่างๆให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ยังคงเป็นสิ่งที่น่าสนใจศึกษา ในการพัฒนาแคปซูลที่หุ้มวัสดุเก็บความร้อนแฝง เนื่องจากพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้ มีข้อด้อยที่สำคัญอยู่สองประการ คือ ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะทั้งการหลอมเหลวและการแข็งตัว (Heat of melting; H_m และ Heat of solidification; H_s) ของสารกลุ่มนี้จะให้ค่าต่ำลงเมื่ออยู่ในแคปซูล และมีการเลื่อนตำแหน่งของอุณหภูมิแข็งตัว (Solidification temperature, T_s) ซึ่งเรียกว่า “การเกิดการเย็นตัวอย่างยิ่งยวด” (Supercooling) เมื่อเปรียบเทียบกับสารบริสุทธิ์ที่ไม่มีการห่อหุ้ม

สำหรับในกรณีของการลดลงของค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ สาเหตุที่เป็นไปได้ น่าจะ มาจากการที่มีพอลิเมอร์น้ำหนักรโมเลกุลต่ำ (Oligomer) ที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์ รวมทั้งสารลดแรงดึงผิวบางส่วนเข้าไปอยู่ในแกน (วัสดุเก็บความร้อนแฝง) หรือระหว่างชั้นของพอลิเมอร์ (เปลือก) กับ วัสดุเก็บความร้อนแฝงในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคที่ไม่สมบูรณ์ ระหว่างเปลือกพอลิเมอร์กับแกนวัสดุเก็บความร้อนแฝง ทำให้วัสดุเก็บความร้อนแฝงมีพฤติกรรมไม่เหมือนสารที่ไม่ได้ถูกหุ้ม พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจึงลดลง ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยบางงาน ที่สามารถปรับปรุงค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อนแฝงที่อยู่ในแคปซูลได้ [8] เช่น กรณีเฮกซะเดเคนที่ถูกหุ้มด้วยพอลิไดไวนิลเบนซีน มีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะเท่ากับ 140 J/g-HD ซึ่งลดลงจากเฮกซะเดเคนที่ไม่มีการห่อหุ้มที่มีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะเท่ากับ 230 J/g-HD



รูปที่ 2.9 ค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของเฮกซะเดเคนที่อยู่ในโคพอลิเมอร์แคปซูลของไดไวนิลเบนซีน-อะคริเลต ชนิดของอะคริเลตมอนอเมอร์: O เมทิลอะคริเลต □ เอทิลอะคริเลต และ Δ บิวทิลอะคริเลต [8]



รูปที่ 2.10 ภาพตัดขวางของอนุภาคพอลิเมอร์แคปซูลของพอลิไควนิลเบนซีน (a) และ พอลิไควนิลเบนซีน-บิวทิลอะคริเลต (b) ที่หุ้มเฮกซะเดเคน [8]

ค่าความร้อนแฝงที่ต่ำลงนี้ เนื่องมาจากการแยกตัวระหว่างพอลิไควนิลเบนซีนกับเฮกซะเดเคนไม่สมบูรณ์ เพราะมีสมบัติความไม่เข้ากันเหมือนกัน จึงมีการศึกษาการเพิ่มมอนอเมอร์ที่มีเข้ามากขึ้น เช่น บิวทิลอะคริเลต (Butyl acrylate) เข้าไปโคพอลิเมอร์กับไควนิลเบนซีน และพบว่าทำให้ค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของเฮกซะเดเคนที่อยู่ในแคปซูลของโคพอลิเมอร์ของไควนิลเบนซีน-บิวทิลอะคริเลตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแคปซูลของพอลิไควนิลเบนซีน และเข้าใกล้เฮกซะเดเคนที่ไม่ถูกหุ้ม ดังรูปที่ 2.9 และเมื่อพิจารณาจากรูปของแคปซูลที่มีการตัดขวางอนุภาค ที่ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM) จะเห็นได้ว่า มีชั้นของพอลิบิวทิลอะคริเลตเพิ่มขึ้นด้านในของเปลือกพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 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) เช่นในกรณีเฮกซะเดเคนในพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล จะมีอุณหภูมิในการเกิดผลึกต่ำกว่าของเฮกซะเดเคนที่ไม่มีการ

หุ้มดังรูปที่ 2.11 ได้มีรายงานการวิจัย [22, 23] ที่ศึกษาการปรับปรุงการเกิดการยื่นตัวอย่างยิ่งยวดของวัสดุเก็บความร้อนแฝงที่อยู่ในพอลิเมอร์แคปซูล โดยการใช้สารเหนียวมาในการเกิดผลึกผสมเข้าไปกับวัสดุเก็บความร้อนแฝงในขั้นตอนการเตรียมแคปซูล ซึ่งสามารถลดการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของสารเหนียวมาในการเกิดผลึกที่เพิ่มขึ้น ก็ทำให้ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเก็บความร้อนลดลงเช่นกัน ดังนั้นปริมาณและชนิดของสารเหนียวมาในการเกิดผลึกก็ยังคงเป็นโจทย์ที่จะต้องทำการศึกษากันต่อไป

2.4 พิกเกอร์ริง อิมัลชัน (Pickering Emulsion) [24, 25]

จากการศึกษาของ Ramdom ในปี 1903 และ Pickering ในปี 1907 มีการระบุว่า Pickering Emulsion คือ อิมัลชันที่มีอนุภาคที่มีความเสถียร (เช่น ซิลิกา คอลลอยด์) เป็นอิมัลซิไฟเออร์ เมื่อเติมสารชนิดนี้เข้าไปจะทำให้ลดแรงตึงผิว มีผลต่อปลายสายโซ่ทั้งสองด้าน และจะดูดซับอยู่บนพื้นผิวระหว่างเฟสสองเฟส S.U. Pickering เป็นบุคคลแรกที่อธิบายปรากฏการณ์พิกเกอร์ริง อิมัลชันว่า เมื่อน้ำและน้ำมันผสมเข้าด้วยกัน จะได้หยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กและกระจายตัวอยู่ในน้ำ สุดท้ายหยดน้ำมันจะรวมกันเพื่อลดพลังงานในระบบ อย่างไรก็ตาม ถ้ามีการเติมอนุภาคของแข็งลงในของผสม จะทำให้อนุภาคของแข็งเชื่อมกับพื้นผิวระหว่างเฟสสองเฟส และสามารถป้องกันการรวมตัวของหยดน้ำมัน จึงทำให้เกิดอิมัลชันที่มีความเสถียรมากขึ้น ดังนั้น กลุ่มสารอิมัลชันดังกล่าว จึงถูกเรียกเป็น “Pickering Emulsion” ซึ่งอนุภาคของแข็งจะมีขนาดกลางในช่วงระดับนาโนเมตรถึงระดับไมโครเมตร

กลไกการสังเคราะห์แบบอิมัลชันแบบดั้งเดิม นั้น Harkins ได้เสนอว่าการเกิดของนิวเคลียสมีด้วยกัน 3 แบบ ได้แก่

- แบบ ที่ 1 Micell Nucleation
- แบบ ที่ 2 Homogeneous Coagulative Nucleation
- แบบ ที่ 3 Droplet Nucleation

สำหรับการเกิดแบบ Micell Nucleation จะเกิดที่ไมเซลล์ มอนอเมอร์จะมีส่วนที่สามารถละลายน้ำได้บางส่วนและเมื่อเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาลงไป ตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะแตกตัวเป็นแรดิคัลซึ่งสามารถละลายน้ำได้เช่นกัน เมื่อมอนอเมอร์ละลายในน้ำเรื่อยๆ จะเกิดเป็นพอลิเมอร์สั้นๆทำให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น ซึ่งจะไม่สามารถละลายในน้ำได้อีก ก็จะเคลื่อนที่เข้าไปในไมเซลล์ ดังนั้น การเกิดที่ไมเซลล์ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) หรืออิมัลซิไฟเออร์จะต้องมีความเข้มข้นมากกว่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์

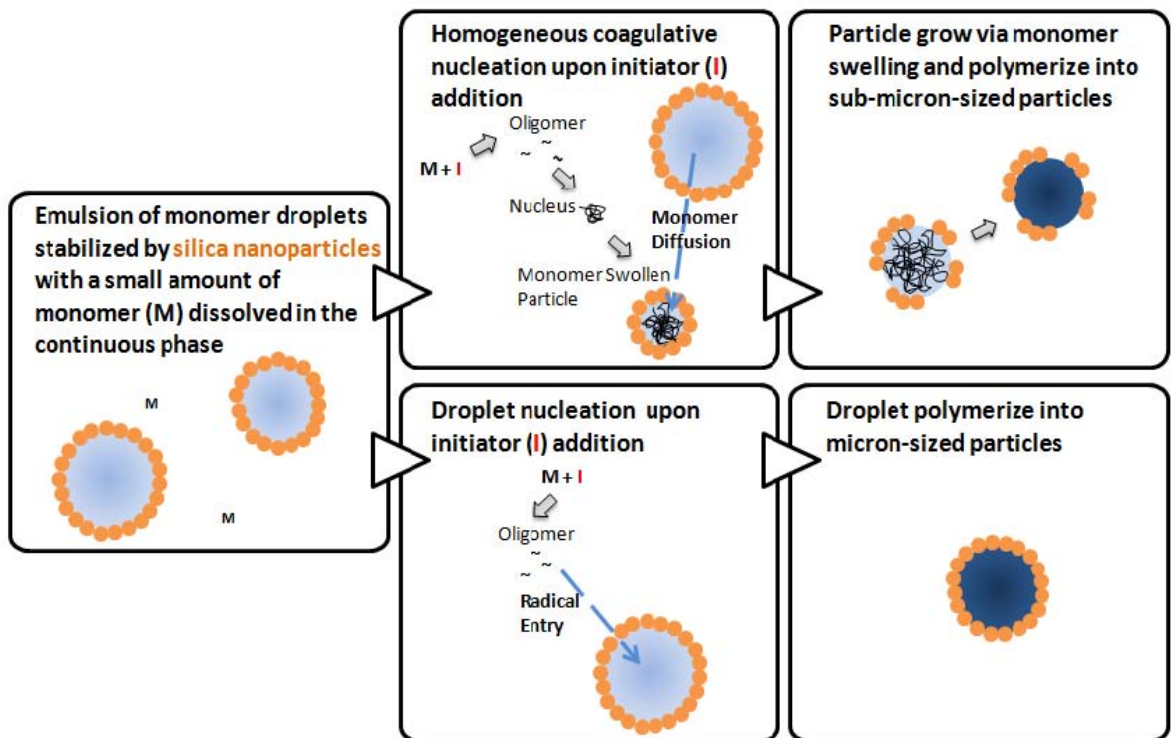
ส่วนการเกิดแบบ Homogeneous Coagulative Nucleation ในกรณีนี้จะไม่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์หรือมีการเติมน้อยมาก มอนอเมอร์จะต่อกันเป็นสายโซ่และจะเกิดการรวมกันเป็นก้อนและการเกิดแบบ Droplet Nucleation จะสามารถเกิดพอลิเมอร์เช่ในหยดมอนอเมอร์ได้เลย แต่จะมีโอกาสการ

เกิดน้อยกว่าที่ตำแหน่งไมเซลล์ เนื่องจากการเกิดที่หยดมอนอเมอร์ซึ่งมีขนาดใหญ่ จะมีพื้นที่ผิวสัมผัส น้อย ดังนั้น จึงเลือกเกิดที่ตำแหน่งไมเซลล์มากกว่า

สำหรับกลไกของวิธีพิกเกอร์ริง อิมัลชันจะสามารถเกิดได้ 2 แบบคือ Homogeneous Cogulative Nucleation และ Droplet Nucleation จะสังเกตได้ว่า ไม่มีการเกิดที่ไมเซลล์เพราะการ สังเคราะห์วิธีพิกเกอร์ริง อิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้จะเป็นอนุภาคของแข็งแทนการใช้อิมัลซิไฟเออร์แบบเดิมซึ่ง คุณสมบัติของอนุภาคของแข็งจะไม่มีส่วนที่โหนที่เป็น hydrophobic หรือ ส่วนที่เป็น hydrophilic

การเกิดแบบ Homogeneous Cogulative Nucleation มอนอเมอร์จะรวมตัวกับตัวริเริ่มปฏิกิริยา ที่แตกตัวเป็นเรดิคัลกลายเป็นโอลิโกเมอร์โดยจะหันส่วนที่เป็นนิวเคลียสรวมกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งจะทำ ให้ขนาดของอนุภาคที่มีอนุภาคของแข็งถูกห่อหุ้มใหญ่ขึ้น จนทำให้อนุภาคที่ห่อหุ้มไม่สามารถห่อหุ้มชั้น แรกได้หมดและขนาดของอนุภาคที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าไมโครเมตร

การเกิดแบบ Droplet Nucleation มอนอเมอร์จะรวมตัวกับตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวเป็นเรดิคัล กลายเป็นโอลิโกเมอร์และจะผ่านเข้าไปยังหยดมอนอเมอร์ขนาดใหญ่ เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ภายในหยดมอนอเมอร์ทำให้ได้อนุภาคมีขนาดระดับไมโครเมตร



รูปที่ 2.11 กลไกที่เป็นไปได้ของการพอลิเมอไรเซชันแบบพิกเกอร์ริง อิมัลชัน [25]