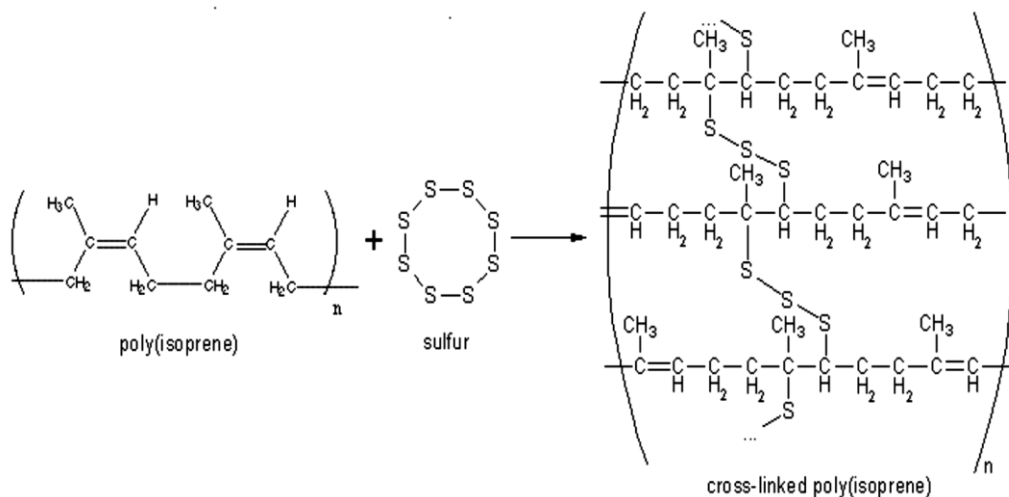


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ยางธรรมชาติ [1] หรือยางดิบก่อนนำมาปรับสภาพ มีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-Polyisoprene มีสูตรเคมี คือ $(C_5H_8)_n$ โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน (Amorphous) เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของ Polyisoprene พบว่าภายในโครงสร้างประกอบไปด้วยพันธะคู่ จึงทำให้ยางดิบไม่เสถียรตัว มีสมบัติเชิงกลต่ำ และง่ายต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติของยางดิบด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่าวัลคาไนเซชันด้วยกำมะถัน เพื่อทำปฏิกิริยาและยึดโครงสร้างของยางให้เสถียรตัว ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ดีของยางธรรมชาติ ดังรูปที่ 2.1

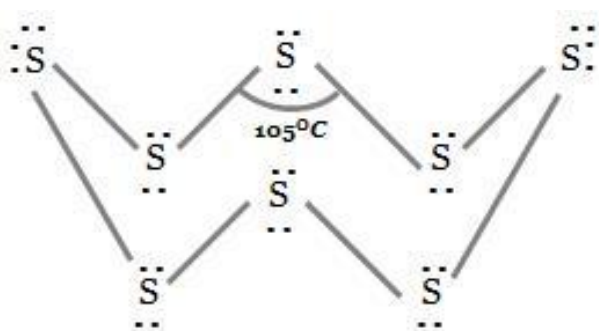


รูปที่ 2.1 สมการของการเกิดวัลคาไนเซชัน

2.2 กำมะถันที่ไม่ละลาย (Insoluble Sulphur, IS)

กำมะถันอสัณฐาน (Amorphous) เกิดจากอะตอมของกำมะถันจำนวนมากเรียงต่อกัน มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีคล้ายพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Polymeric Sulphur) ลักษณะดังกล่าวส่งผลให้กำมะถันไม่แพร่ละลายในยางหรือเรียกว่ากำมะถันที่ไม่ละลาย (Insoluble Sulphur, IS) ซึ่งช่วยป้องกันการบวมของยางที่ผ่านการวัลคาไนเซชัน โครงสร้างของ IS แสดงได้ดังรูปที่ 2.2

ปัจจุบันมีการศึกษากระบวนการเคลือบหุ้ม (Encapsulation) เพื่อเตรียมกำมะถันที่มีโครงสร้างที่เสถียรตัวแบบ IS เพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยาง



รูปที่ 2.2 กำมะถันไม่ละลาย (Insoluble Sulphur, IS)

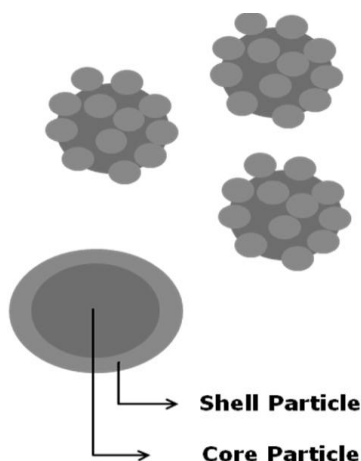
2.3 พาราฟินแว็กซ์ (Paraffin Wax) [6,7]

เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมซึ่งกลั่นแยกออกจากน้ำมันดิบ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นแว็กซ์ที่จัดอยู่ในกลุ่มปิโตรเลียมแว็กซ์ (Petroleum wax) โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ C_nH_{2n+2} จำนวนคาร์บอนในห่วงโซ่โมเลกุล 19-36 อะตอม ($C_{19}-C_{36}$) มีลักษณะเป็นของแข็ง มีสีเหลืองอ่อนถึงขาว สามารถประยุกต์ใช้เป็นสารเติมแต่งร่วมกับพอลิเมอร์และยางธรรมชาติต่างๆ เนื่องจากมีลักษณะโครงสร้างและสภาพผิวที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังนิยมประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิว และอุตสาหกรรมเทียนไข เป็นต้น

2.4 กระบวนการเคลือบหุ้ม (Encapsulation Process)

เอนแคปซูเลชัน (Encapsulation) [4,5]

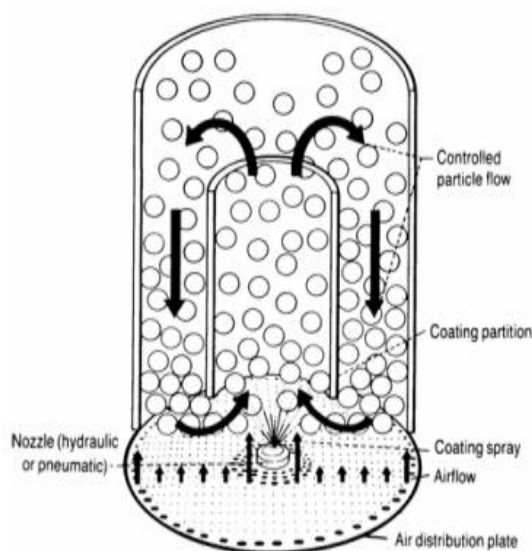
Encapsulation เป็นกระบวนการเคลือบผิวของสารที่มีอนุภาคขนาดเล็กในลักษณะแบบหุ้มเคลือบ โดยสารที่เกิดการ Encapsulation จะประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ สารแกนกลาง (Core) และสารเปลือกหุ้ม (Shell) ดังรูปที่ 2.3 เทคนิคการ Encapsulation มีหลายเทคนิค ดังนี้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอนุภาค Microencapsulation

2.4.1) การเคลือบโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Coating)

เทคนิคนี้เป็นการเคลือบผิวอนุภาคของแข็งโดยอนุภาคที่ต้องการเคลือบผิวจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับกระแสอากาศที่เคลื่อนที่หมุนเวียนอยู่ภายในห้องอบแห้งด้วยความเร็วสูง ในขณะเดียวกันตัวกลางที่ใช้ในการเคลือบจะถูกป้อนผ่านหัวฉีดและพ่นเป็นละอองไปยังกระแสของอนุภาค (Particle Stream) และเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาค ความหนาของสารเคลือบผิวสามารถควบคุมได้โดยควบคุมระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ภายในห้องอบแห้งซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4

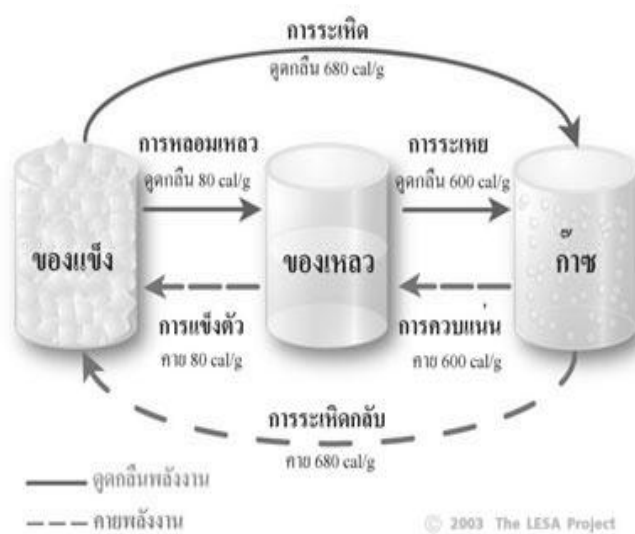


รูปที่ 2.4 การเคลือบโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

การใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด จะไม่สามารถควบคุมขนาดอนุภาคได้ และรูปร่างไม่เป็นทรงกลม อนุภาคที่เตรียมได้มีขนาดใหญ่และเกาะเป็นกลุ่มก้อน

2.4.2) เทคนิคการอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying)

การเอนแคปซูเลชันด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบแช่แข็งสามารถประยุกต์ใช้ในการทำเอนแคปซูเลชันสารที่ไวต่อความร้อน การทำเอนแคปซูเลชันจะเกิดระหว่างขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง โดยขณะที่น้ำในสารละลายเปลี่ยนสถานะเป็นผลึกน้ำแข็ง สารละลายในน้ำที่ยังไม่แข็งตัว (Non-Frozen Solution) จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งจะช่วยชะลอการแพร่ของสารเมื่อปริมาณผลึกน้ำแข็งเพิ่มมากขึ้น สารละลายอยู่จะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดและเริ่มตกผลึกโดยจับสารไว้ภายในผลึกน้ำแข็งที่ได้จะอยู่ในรูปของแข็งอสัณฐาน (Amorphous Solid) ดังรูปที่ 2.5



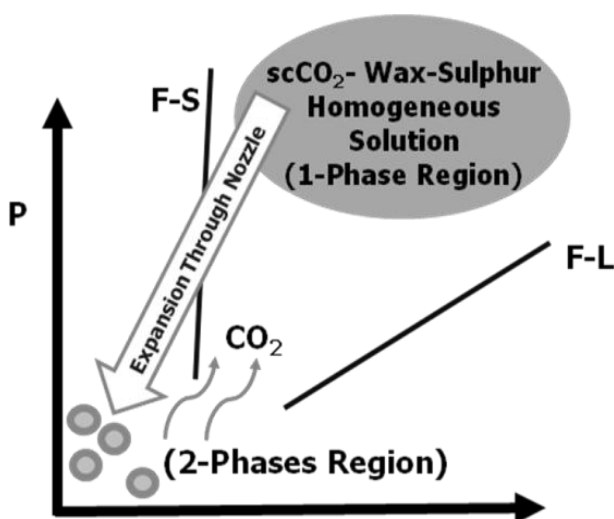
รูปที่ 2.5 กลไกของการอบแห้งแบบแช่แข็ง

เทคนิคการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่ได้ค่อนข้างสูงรวมถึงระยะเวลาการผลิตจะนานกว่ากระบวนการเอนแคปซูเลชันโดยใช้เทคนิคอื่นๆ

2.5 การเคลือบผิวแบบไมโครเอนแคปซูเลชันด้วยเทคนิคการขยายตัวอย่างรวดเร็วของสารละลายเหนือวิกฤต

RESS-Microencapsulation [4,5] เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเคลือบอนุภาคขนาดเล็ก โดยมีองค์ประกอบของสารในกระบวนการคือ อนุภาคที่เป็นแกนกลาง (Core Particles) อนุภาคที่ล้อมรอบ (Shell Particles) และตัวละลาย (Solvent) ที่มีลักษณะเป็นของไหลเหนือวิกฤต กลไกของ

กระบวนการนี้ คือ อนุภาคที่เป็นแกนกลางและอนุภาคที่เคลือบหุ้มที่มีความหนาแน่นมาก (วัฏภาคชั้นล่างของระบบ) มีความสามารถในการละลายไปยังตัวทำละลายเหนือวิกฤตที่มีความหนาแน่นน้อย (วัฏภาคชั้นบนของระบบ) เกิดเป็นสารละลายเนื้อเดียวอิมิตัว (Homogenous Phase) เมื่อลดความดันหรืออุณหภูมิอย่างรวดเร็วด้วยการฉีดผ่านท่อขนาดเล็ก ทำให้เกิดการแยกวัฏภาค ดังรูปที่ 2.6 ดังนั้นสารที่เป็นอนุภาคที่เป็นแกนกลางและอนุภาคที่ล้อมรอบจะสามารถละลายในตัวทำละลายเหนือวิกฤตได้



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดอนุภาคของเทคนิคRESS

2.6 ของไหลเหนือวิกฤต

ของไหลเหนือวิกฤต [8] คือ สารที่อุณหภูมิและความดันค่าใดค่าหนึ่ง โดยที่สภาวะดังกล่าวของไหลเหนือวิกฤตจะมีสมบัติและพฤติกรรมของสารที่อยู่ระหว่างสมบัติของของเหลวและแก๊สของสารใดๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด สัมประสิทธิ์การแพร่ และสมบัติของการละลายซึ่งของไหลเหนือวิกฤตมีองค์ประกอบที่ไม่ใช่ของเหลวหรือแก๊ส แต่เป็นของไหลกึ่งของเหลวและแก๊ส ทำให้ของไหลเหนือวิกฤตมีสมบัติต่างๆ คล้ายตัวทำละลายอินทรีย์แต่สามารถแพร่ได้ดีกว่า และมีความหนืดน้อยกว่า

สารบริสุทธิ์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติเฉพาะแตกต่างกันไป ณ ที่อุณหภูมิวิกฤต กับ ความดันวิกฤต การปรับอุณหภูมิ ความดัน และความเข้มข้นของสาร สามารถเปลี่ยนสถานะและคุณสมบัติได้ ซึ่งคุณสมบัติเฉพาะของสารต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ค่าวิกฤตของสารแต่ละประเภท

สาร	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	P_c (bar)
คาร์บอนไดออกไซด์	31.0	73.8
น้ำ	374	221.2
อะซิโตน	235.0	47.0
เฮกซะฟลูออโรอีเทน	19.9	30.6
นอร์มอลเฮกเซน	234.4	30.1
โพรเพน	96.7	42.5
เมทานอล	239.5	80.9

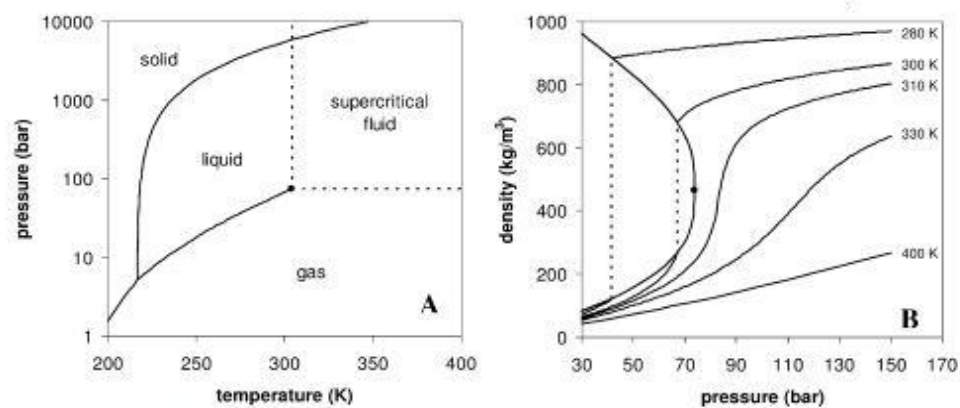
สมบัติของของไหลเหนือวิกฤตเป็นสมบัติที่มีลักษณะร่วมกันของของเหลวและแก๊ส เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับของเหลว และ แก๊ส ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบสมบัติ ความหนาแน่น ความหนืด และ สัมประสิทธิ์การแพร่ ในแต่ละวัฏภาค

วัฏภาค	ความหนาแน่น (kg/m^3)	ความหนืด ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)	สัมประสิทธิ์การแพร่ (mm^2/s)
แก๊ส	1	10	1-10
ของไหลเหนือวิกฤต	100-1,000	50-100	0.010-0.100
ของเหลว	1,000	500-1,000	0.001

สมบัติทั่วไปเกี่ยวกับของไหลเหนือวิกฤตและคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [8]

ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid) คือ ของไหลที่มีอุณหภูมิและความดันมากกว่าจุดวิกฤต ทำให้สมบัติทั่วไปเช่น ความหนาแน่น สัมประสิทธิ์การแพร่ สมบัติการละลาย ความหนืด แตกต่างจากสภาวะปกติ โดยของไหลเหนือวิกฤตมีสมบัติร่วมกันระหว่างแก๊สและของเหลว scCO_2 มีอุณหภูมิและความดันวิกฤต คือ 31.0°C และ 73.8 bar ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.7 (ก) แผนภูมิวัฏภาคระหว่างความดันและอุณหภูมิ มีการแยกขอบเขตของแก๊สกับของเหลวอย่างชัดเจนจนสิ้นสุดลงที่จุดวิกฤต ที่จุดดังกล่าวความหนาแน่นจะอยู่ในสมดุลวัฏภาคของของเหลวกับไออิมิตัว รูปที่ 2.7 (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ scCO_2 และพบว่าความหนาแน่นสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิและความดันเพียงเล็กน้อย จึงนิยมใช้เป็นตัวทำละลายของสารอินทรีย์ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ มีความเฉื่อยทางเคมี มีจุดวิกฤตต่ำ ความหนืดต่ำและกำจัดออกจากระบบง่าย



(ก) จุดอุณหภูมิและความดันวิกฤต

(ข) ความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 2.7 แผนภูมิวิวัฒนาการของคาร์บอนไดออกไซด์ [8]

2.7 การแพร่ของสารในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [9]

กลไกสำคัญของการเกิดอนุภาคด้วย scCO_2 โดยใช้เทคนิค RESS คือ การแพร่ของสารเกิดอนุภาคและ scCO_2 ที่แสดงถึงลักษณะเฉพาะของทั้งสองเทคนิค เทคนิค RESS เป็นเทคนิคที่มีกลไกสำคัญ คือ สารเกิดอนุภาคมีความสามารถในการแพร่และละลายใน scCO_2 ดังนั้นการศึกษากลไกหรือทิศทางของการแพร่ของสารจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น และใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบการทดลองและศึกษากระบวนการ

2.7.1 การแพร่ของสารไปยังวิวัฒนาการของไหลเหนือวิกฤต

การแพร่ คือ การกระจายตัวของโมเลกุลของสารจากจุดหรือบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังจุดที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าด้วยการเคลื่อนที่เชิงสุ่มของโมเลกุล การแพร่จะทำให้เกิดการผสมของสารอย่างช้าๆ แม้ว่าจะสารจะผสมกันโดยสมบูรณ์หรือเข้าสู่ภาวะสมดุลการแพร่ก็ยังคงเกิดขึ้น

การแพร่ของโมเลกุลโดยทั่วไปเป็นแบบสภาวะไม่คงตัว ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้กฎข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) ดังสมการที่ (2.1)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C \quad (2.1)$$

โดย C คือ ความเข้มข้น (mol/dm^3)

t คือ เวลา (s)

D_{AB} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่จาก A ไป B (m^2/s)

จากสมการที่ (2.1) พบว่าพจน์ด้านซ้ายแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่อเวลา และพจน์ด้านขวาแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่แนวแกนใดๆของระบบ โดยมี D_{AB} เป็นสัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงอัตราการแพร่ของสารผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อเวลา ค่า D_{AB} จะขึ้นกับอุณหภูมิและความดันของสาร

โดยทั่วไปการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะต้องพิจารณาลักษณะของพื้นผิวของการแพร่ว่ามีลักษณะเป็นแบบระนาบ ทรงกระบอก หรือทรงกลม

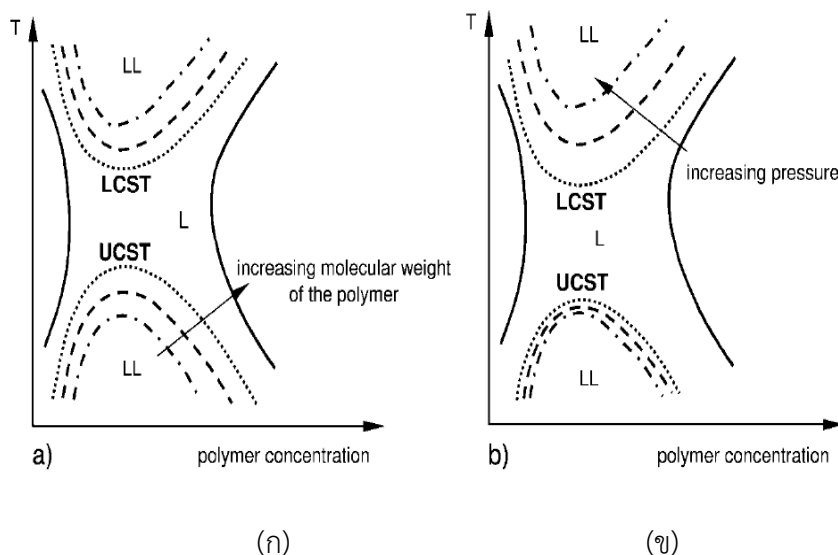
สำหรับการแพร่ผ่านทรงกลมกลวงแสดงได้ดังสมการที่ (2.2) [9]

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{6}{\pi^2(a^2 + ab + b^2)} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{b \cos n\pi - a}{n} \right)^2 \exp \left\{ -D_{AB} n^2 t / (b-a)^2 \right\} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.2) สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สภาวะดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประมาณระยะเวลาในกระบวนการต่างๆ ได้

2.8 พฤติกรรมการละลายของพอลิเมอร์ในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [8]

พอลิเมอร์หรือแก้วซ์เป็นสารที่มีขีดจำกัดของการละลายใน $scCO_2$ หรือมีค่าการละลายต่ำ ค่าการละลายของพอลิเมอร์ใน $scCO_2$ ขึ้นกับอุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้นของระบบและองค์ประกอบของสาร นอกจากนี้พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อการละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย เช่น $scCO_2$ จากรูปที่ 2.8 ที่อุณหภูมิต่ำพอลิเมอร์จะไม่สามารถละลายในตัวทำละลายได้ จึงแยกออกเป็น 2 ภูมิภาค (LL) โดยประกอบไปด้วยบริเวณพอลิเมอร์มีความเข้มข้นต่ำหรือ Solvent Rich Phase และบริเวณที่มีความเข้มข้นของพอลิเมอร์สูงหรือ Polymer Rich Phase



รูปที่ 2.8 อุณหภูมิและความเข้มข้นของพอลิเมอร์ของการละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย เนื่องจากผลของ (ก) มวลโมเลกุล และ (ข) ความดัน [9]

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้เกิดการผสมเข้ากันได้ดีขึ้นระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลายที่อุณหภูมิวิกฤตสูงของสารละลาย (Upper Critical Solution Temperature; UCST) เกิดละลายที่สมบูรณ์ระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลายเป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous Solution, (L)) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิวิกฤตต่ำของการละลาย (Lower Critical Solution Temperature, LCST) พอลิเมอร์และตัวทำละลายจะเกิดการแยกวัฏภาคหรือเกิดเป็น 2 วัฏภาค (LL) ซึ่งเป็นผลมาจาก Free Volume Effect (ผลกระทบเนื่องจากปริมาตรอิสระ) โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า LCST จะเกิดการขยายตัวที่แตกต่างกันทางความร้อนของพอลิเมอร์และตัวทำละลายส่งผลทำให้วัฏภาคทั้งสองเกิดการละลายที่ไม่สมบูรณ์และแยกเป็น 2 วัฏภาค นอกจากนี้การลดลงของความหนาแน่นของตัวทำละลายจะลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ทำให้การละลายเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยทั่วไประบบระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลายจะปรากฏเพียงจุด LCST เพราะมีช่วงของการขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion) เป็นช่วงกว้าง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปที่ 2.8 (ก) มวลโมเลกุลของพอลิเมอร์จะส่งผลต่อค่าการละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย โดยพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะละลายในตัวทำละลายได้ดีกว่าพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูง สังเกตได้จากเมื่อพอลิเมอร์มีมวลโมเลกุลสูงขึ้น ช่วงของอุณหภูมิของการละลายที่สมบูรณ์ หรือ Homogeneous Solution (L) หรือ ระยะห่างระหว่าง LCST และ UCST จะแคบลงหรือเกิดการละลายได้ไม่ดี เพราะเมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น พอลิเมอร์จะมีสภาพขั้วแตกต่างจากตัวทำละลาย scCO_2 มากขึ้น หรือมีความสามารถละลายน้อยลง

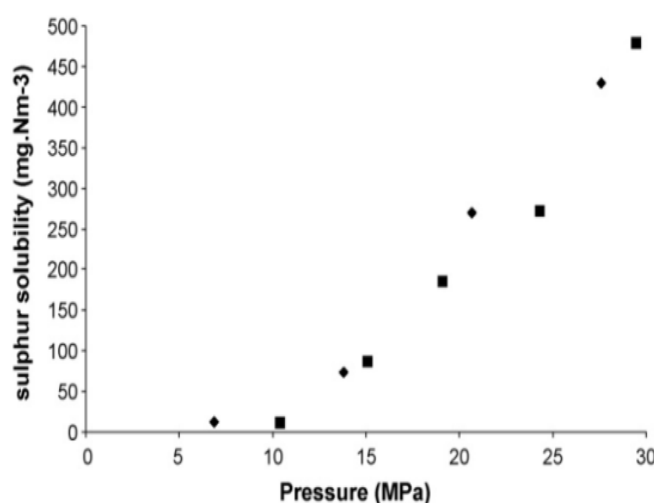
ผลของความดันต่อการละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลายแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 (ข) ที่ UCST การเพิ่มของอุณหภูมิจะส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าการละลาย ในขณะที่ LCST การเพิ่มหรือ

ปรับเปลี่ยนความดันจะส่งผลต่อค่า LCST และสมบัติการละลายอย่างชัดเจน โดยที่บริเวณ LCST นี้ ผลของความดันจะส่งผลอย่างมากต่อการขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion) และ Free Volume โดยการเพิ่มความดันส่งผลให้ความสามารถในการละลายหรือช่วงกว้างของอุณหภูมิของการละลายมีค่ามากขึ้น

พฤติกรรมของการละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลายที่แสดงในรูปที่ 2.8 นี้จะคล้ายคลึงกับ พฤติกรรมของการละลายของพอลิเมอร์หรือแว็กซ์ใน scCO_2 ซึ่งการละลายจะขึ้นสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิเมอร์

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

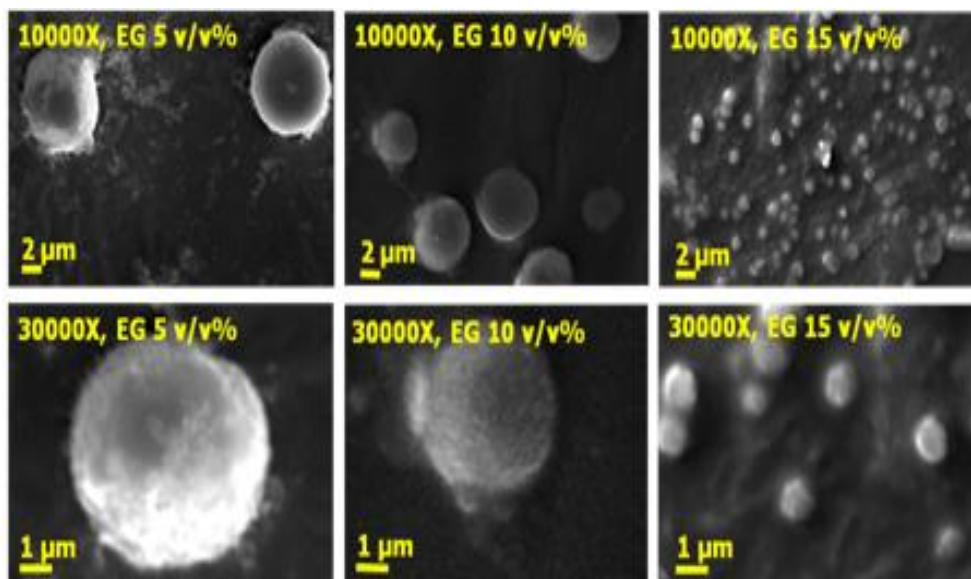
Jean-Paul Serin และคณะ [10] ศึกษาพฤติกรรมการละลายของกำมะถันใน scCO_2 เพื่อเป็นข้อมูลในการทำความสะดวกอัดกำมะถันที่ตกค้างในกระบวนการกลั่นของปิโตรเลียม พบว่า กำมะถันมีความสามารถในการละลายใน scCO_2 โดยที่อุณหภูมิคงที่ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ การเพิ่มความดัน 6-30 MPa ส่งผลให้กำมะถันมีความสามารถในการละลายใน scCO_2 ได้มากขึ้นดังรูปที่ 2.9 จากความสามารถในการละลายดังกล่าวจึงสามารถประยุกต์ใช้กำมะถันร่วมกับเทคนิค RESS-Microencapsulation ได้



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าการละลายของกำมะถันใน scCO_2 อุณหภูมิคงที่ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]

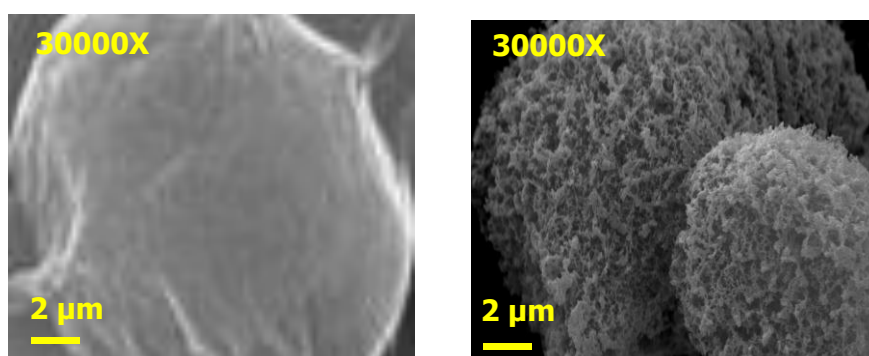
วาริพร พิริยะวิวัฒน์วงศ์ และสุรัตน์ อาริรัตน์ [11] ประสบผลสำเร็จในการใช้เทคนิค RESS ภายใต้บรรยากาศของ scCO_2 ในการเตรียมอนุภาคไมโครสเฟียร์ของพาราฟินแว็กซ์ (Octacosane, C_{28}) โดยการฉีดพ่นสารละลายระหว่าง scCO_2 และพาราฟินแว็กซ์ไปยังสารละลายเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol, EG) และน้ำ ผ่านการปั่นกวนสารละลาย EG และน้ำด้วยความเร็วเชิงมุม 150 rpm พบว่า สามารถเตรียมพาราฟินแว็กซ์ไมโครสเฟียร์ที่มีลักษณะไม่ติดกันเป็นกลุ่มก้อน

โดยมีขนาดอนุภาคในช่วง 0.4-7.0 μm ที่อุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว 70-90 $^{\circ}\text{C}$ และ 120-160 bar ความเข้มข้น EG และน้ำ 5-15 v/v% ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้เป็นสารเปลี่ยนวัฏภาค (Phase Change Material) ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์และพลังงานในอนาคต



รูปที่ 2.10 ผลของความเข้มข้นของ EG ในการเตรียมอนุภาคไมโครสเฟียร์แว็กซ์ [11]

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค RESS ในกระบวนการ Encapsulation หรือ RESS-Microencapsulation ที่อุณหภูมิและความดันก่อนการขยายตัว 90 $^{\circ}\text{C}$ และ 160 bar ซึ่ง SP-M ที่เตรียมได้จะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระและมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กกว่า กำมะถันทั่วไปซึ่งจะช่วยให้มีพื้นที่ผิวและการกระจายตัวที่ดีในการประยุกต์ใช้ในการวัลคาไนซ์ร่วมกับยางธรรมชาติดังรูปที่ 2.11

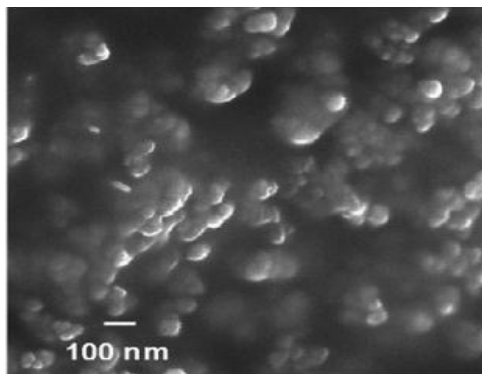


(ก) กำมะถัน

(ข) กำมะถันเคลือบบนแว็กซ์

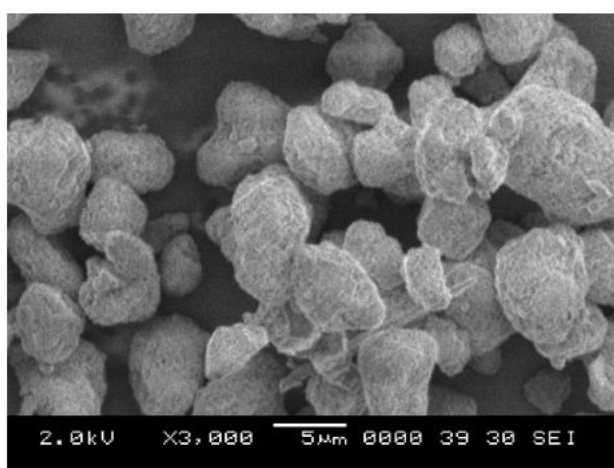
รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของ (ก) กำมะถัน และ (ข) SP-M

Amporn Sane และ Jumras Limtrakul [5] ได้ทำการศึกษาในการประยุกต์เทคนิค RESS-Microencapsulation ในการใช้วิตามินเอเคลือบหุ้มบน PLLA (Poly (l-lactide) พบว่าสามารถเตรียมอนุภาควิตามินเอเคลือบหุ้มบน PLLA โดยมี ลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาควิตามินเอเคลือบหุ้มบน PLLA [5]

Kenji Mishima และคณะ [12] ศึกษากระบวนการเอนแคปซูเลชันของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO_3) ด้วยฟลูออโรพอลิเมอร์ (Fluoropolymer) เพื่อปรับปรุงสมบัติการแขวนลอยในน้ำด้วยเทคนิค RESS-Microencapsulation ภายใต้บรรยากาศ scCO_2 โดยสามารถเตรียมอนุภาค CaCO_3 ในระดับไมครอนที่เคลือบด้วยฟลูออโรพอลิเมอร์ในลักษณะแบบเอนแคปซูเลชันดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาค CaCO_3 ที่เคลือบด้วยฟลูออโรพอลิเมอร์เตรียมได้จากเทคนิค RESS-Microencapsulation [12]