

บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel processing)

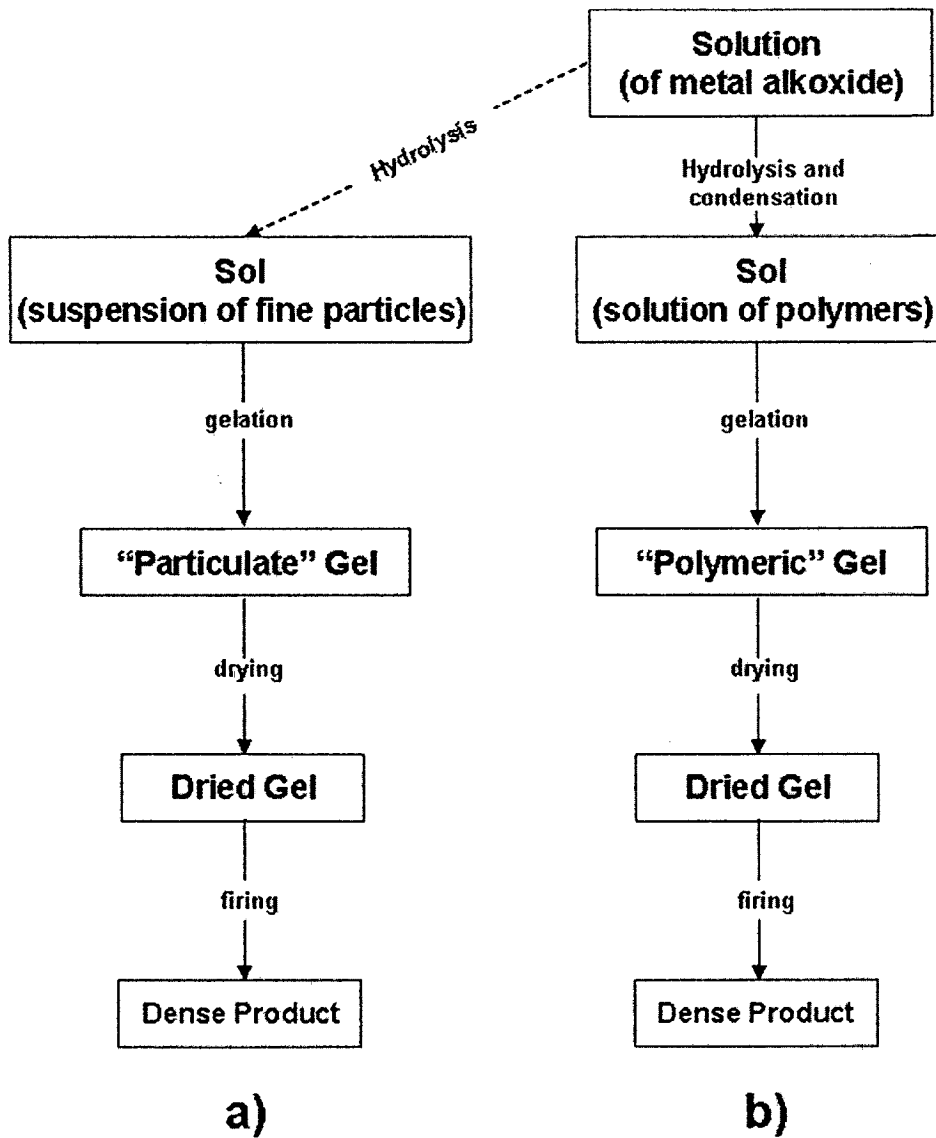
ในกระบวนการโซล-เจล สารละลายหรือโซลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเจล ซึ่งมีความหนืดสูง โดยโซลหรือสารละลายที่มีการไหลจะถูกเปลี่ยนไปเป็นของแข็งที่ปราศจากการไหล จุดที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นเจลสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาและการสังเกตจุดที่ซึ่งโซลหรือสารละลายไม่เปลี่ยนแปลงการไหลภายในภาชนะ การที่โซลหรือสารละลายไม่ไหลภายใต้แรงโน้มถ่วงไม่ได้ขึ้นเฉพาะกับความหนืดเท่านั้นแต่ยังขึ้นกับพฤติกรรมการไหล (Rheological) ของโซลหรือสารละลายอีกด้วย การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของความหนืดต่อเวลาเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั่วไปในการเปลี่ยนจากโซลไปเป็นเจล

ในกรณีของโซล วัสดุเจลจะประกอบไปด้วยอนุภาคคอลลอยด์ (1 - 1000 นาโนเมตร) ซึ่งมารวมตัวกันด้วยแรงดึงดูด เพื่อสร้างโครงร่างแห กรณีของสารละลาย วัสดุเจลอาจจะประกอบไปด้วยโครงร่างแหของพันธะพอลิเมอร์ที่สร้างจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซชัน แผนผังแสดงกระบวนการโซล-เจลเริ่มจากการแขวนลอยของอนุภาค (อนุภาคหรือเจลคอลลอยด์) และสารละลาย (เจลพอลิเมอร์) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 และโครงสร้างของเจลแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ในบางกรณีความแตกต่างระหว่างระบบอนุภาคและพอลิเมอร์อาจจะไม่ชัดเจนนัก เมื่อขนาดอนุภาคมีค่าเข้าใกล้ขอบเขตขั้นต่ำของช่วงขนาดคอลลอยด์

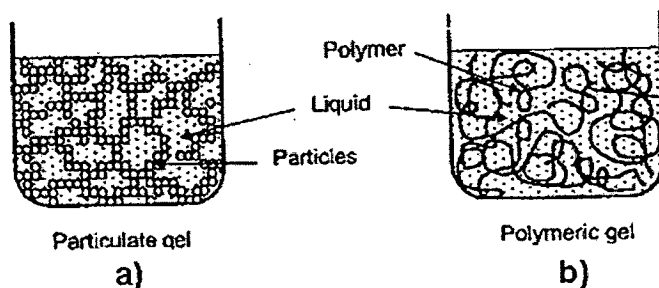
รูปในพอลิเมอร์เจลโดยปกติจะมีขนาดเล็กกว่าในพาทิคุเลตเจล (Particulate gel) ที่ซึ่งรูพรุนจะมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดอนุภาค (ขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 1-5 เท่าของขนาดอนุภาค) ในพาทิคุเลตเจล (Particulate gel) อนุภาคเจลจะชนกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ เพื่อสร้างโครงร่างแห ในพอลิเมอร์เจลจะประกอบไปด้วยร่างแหที่มาเชื่อมต่อกันของพันธะพอลิเมอร์และเดบิตเจนมีขนาดใหญ่หรือเป็นกลุ่มก้อน

โครงสร้างของพันธะพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์เจลสามารถพิจารณาได้หลายทาง ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในการเตรียม ความแตกต่างของร่างแหอาจจะมีผลมาจากหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของน้ำ กระบวนการอบแห้งเพื่อกำจัดวัฏภาคน้ำออกจากเจลในการสร้างวัสดุที่มีรูพรุน ซึ่งอาจมีการให้ความร้อน (การเผา) เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชันและเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล แหล่งกำเนิดโซล (Sol precursor) สามารถตกตะกอนบนซับสเตรท (Substrate) เพื่อสร้างฟิล์ม

(โดยวิธีจุ่ม-เคลือบหรือหมุน-เคลือบ) หรือหล่อลงในภาชนะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ (จะได้โมโนลิทเซรามิค กระฉก ไฟเบอร์ แอโรเจล) หรือใช้เพื่อสังเคราะห์ในรูปผง (ทรงกลม ไมโคร ทรงกลมนาโน)



รูปที่ 2.1 แผนผังโครงสร้างของ (a) พาทิคุเลทเจลที่เกิดจากการแขวนลอยของอนุภาคนาโนขนาดเล็ก และ (b) พอลิเมอร์เจลที่เกิดจากจากสารละลาย (Rahaman และคณะ, 2003)



รูปที่ 2.2 แผนผังโครงสร้างของ (a) พาทิคุเลทเจลที่เกิดจากการแขวนลอยของอนุภาคขนาดเล็ก และ (b) พอลิเมอร์เจลที่เกิดจากจากสารละลาย (Rahaman และคณะ, 2003)

กระบวนการโซล-เจลมีความน่าสนใจตรงที่มีราคาถูก และเป็นเทคนิคที่ใช้อุณหภูมิต่ำและสามารถใช้สำหรับควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ได้

2.2 รีโซซินอล ฟอर्मอลดีไฮด์เจลและคาร์บอนเจล

การแบ่งแยกวัสดุที่มีรูพรุนนั้นอาจแบ่งตามการขึ้นรูปของวัสดุที่มีรูพรุนเป็น แอกรีเกต (aggregates), แบบร่างแห (network), แบบรังผึ้ง (honeycomb) ฯลฯ หรือแบ่งตามขนาดของรูพรุนเป็น 3 แบบตามระบบของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) คือ แบบไมโครพอร์ (micropore: ขนาดรูพรุน น้อยกว่า 2 นาโนเมตร) แบบเมโซพอร์ (mesopore: ขนาดรูพรุนอยู่ระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร) และ แบบแมคโครพอร์ (macropore: ขนาดรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร)

ในปัจจุบันวัสดุที่มีรูพรุนได้ก้าวเข้ามามีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการดูดซับของวัสดุที่มีรูพรุนได้ก่อให้เกิดประโยชน์เป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมเคมี โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่มีรูพรุนแบบไมโคร มักจะถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและมีแรงดูดซับของรูในระดับไมโครสูง ในขณะที่วัสดุที่มีรูพรุนแบบเมโซ นิยมนำมาใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst support) ถึงแม้ว่าวัสดุที่มีรูพรุนแบบเมโซจะมีพื้นที่ผิวและแรงในการดูดซับต่ำกว่าวัสดุที่มีรูพรุนแบบไมโคร แต่ก็ยังมีข้อดีในด้านการถ่ายเทมวลสารได้ง่ายกว่า แต่ก็ยังมีข้อจำกัดบางอย่างในการใช้งานเช่น ถ้าอัตราเร็วที่ใช้ในการถ่ายเทมวลสารนั้นมากเกินไปอาจจะทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานนั้นลดต่ำลงได้

การเตรียมคาร์บอนเจลที่มีรูพรุนจากวัสดุที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนที่มีสภาพความพรุนสูงและสามารถควบคุมลักษณะสมบัติความเป็นรูพรุนได้ง่ายจึงทำให้คาร์บอนที่ได้มีลักษณะสมบัติความเป็นรูพรุนได้ตามความต้องการที่จะนำไปประยุกต์ใช้

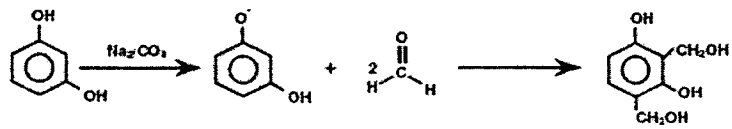
รีโซซินอล-ฟอร์มอลดีไฮด์ คาร์บอนเจล มีขั้นตอนในการเตรียมหลายขั้นตอน ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีตัวแปรที่สามารถกำหนดลักษณะสมบัติรูพรุนของวัสดุคาร์บอน ดังต่อไปนี้

2.2.1 ขั้นตอนการเตรียมเจลก่อนการอบแห้ง

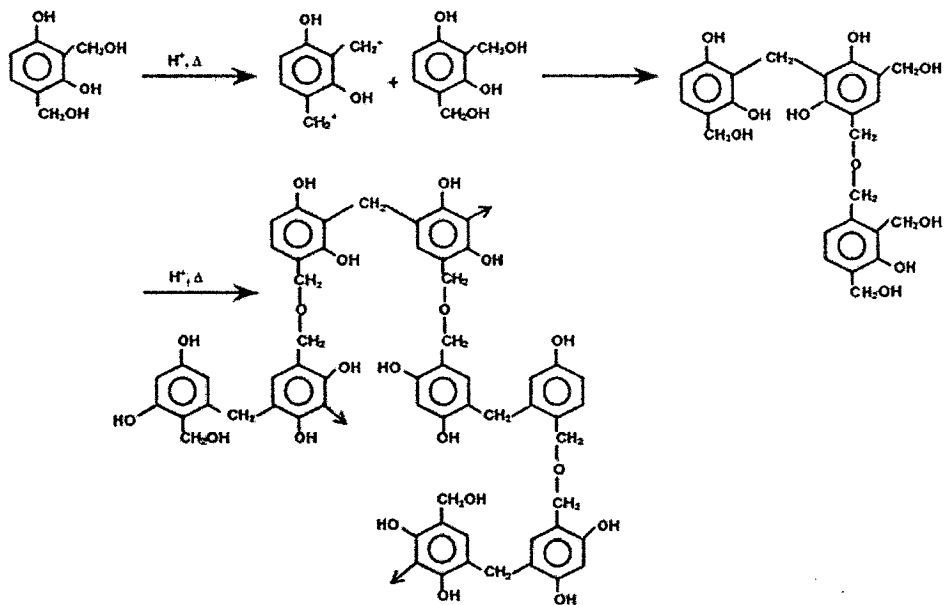
รีโซซินอล-ฟอร์มอลดีไฮด์เจล เป็นวัสดุที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนที่มีสภาพความพรุนสูง ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกโดยPekala และคณะ ในปีค.ศ. 1989 และเมื่อนำไปเผาให้เป็นคาร์บอน (Carbonization) ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนจะได้คาร์บอนที่มีรูพรุนในช่วงเมโซพอร์ (Mesopore) ในสัดส่วนสูง จึงทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ อีกทั้งมีความหนาแน่นต่ำ (น้ำหนักเบา) มีสมบัติด้านการนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี โดยรีโซซินอล-ฟอร์มอลดีไฮด์เจล สามารถเตรียมได้จากกระบวนการ โพล-เจลโพลีคอนเดนเซชันของรีโซซินอล (R) กับ ฟอร์มอลดีไฮด์ (F) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดหรือด่าง (Acid or Basic catalysts) สำหรับกลไกหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์รีโซซินอล-ฟอร์มอลดีไฮด์เจลมี 2 กลไกหลักได้แก่ ปฏิกิริยาการเติม (Addiional reaction) และปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ดังรูปที่ 2.3

จากรูปที่ 2.3 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์รีโซซินอล-ฟอร์มอลดีไฮด์เจล ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง รีโซซินอลจะกลายเป็น รีโซซินอลแอนไอออน (Resorcinol anion) เนื่องจากสูญเสียโปรตรอนหรือไฮโดรเจนไอออน ขั้นตอนารีโซซินอลแอนไอออนจะรวมตัวกับฟอร์มอลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาการเติมเกิดเป็นอนุพันธ์ของไฮดรอกซีเมทิล ($-\text{CH}_2\text{OH}$) ซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามาก

อนุพันธ์ของไฮดรอกซีเมทิล($-\text{CH}_2\text{OH}$) และสารตั้งต้นที่เหลือจะรวมตัวกันด้วยปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation) และเชื่อมต่อกันด้วยหมู่เมทิล($-\text{CH}_2-$) และหมู่เมทิลอีเทอร์ ($-\text{CH}_2\text{OCH}_2-$) และรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Cluster) และเติบโตจนเป็นอนุภาคปฐมภูมิที่ยึดเกาะกันเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการเติม กับปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชันจะเกิดขึ้นพร้อมกันในระบบ หลังเสร็จจากขั้นตอนนี้อ่อนภาคคอลลอยด์จะเริ่มรวมตัวกันและกลายเป็นโครงสร้างของแข็งที่มาเชื่อมต่อกันจะมีลักษณะคล้ายกับสายสวอยโซ่มุกดังแสดงในภาพที่ 2.4



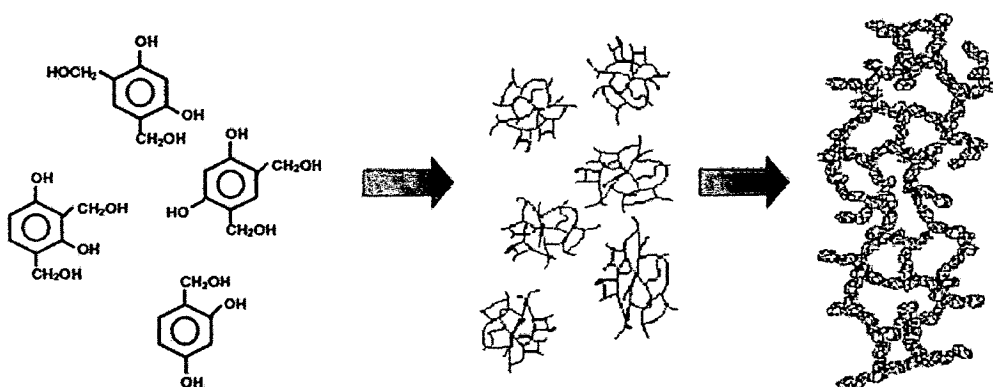
(A) ปฏิกริยาเติม



(B) ปฏิกริยาคอนเดนเซชัน

รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์ RFGel

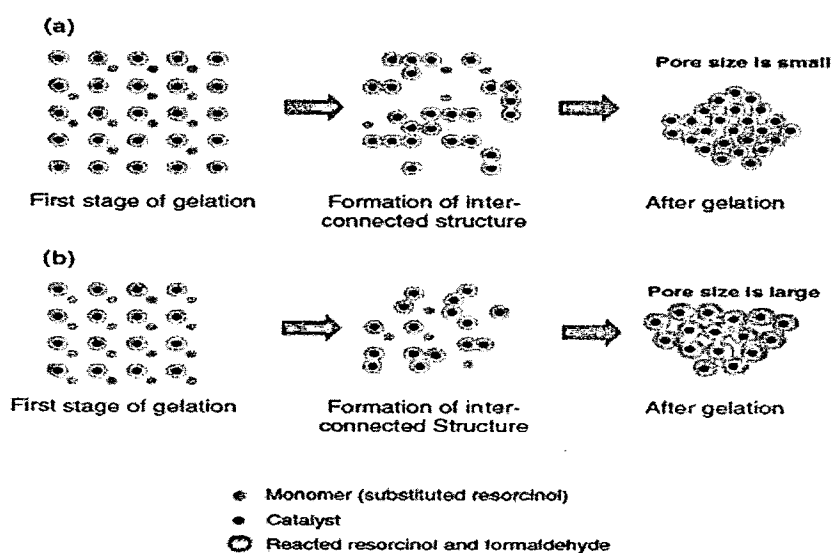
(Al-Muhtaseb และคณะ, 2003)



รูปที่ 2.4 อนุภาคที่เติบโตขึ้นของรีซินิกอล-ฟอร์มอลดีไฮด์ มอนอเมอร์

(Al-Muhtaseb และคณะ, 2003)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างกับน้ำ หรือ ค่า C/W เป็นปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญมากสำหรับโครงสร้างรูพรุนของรีโซซินอล-ฟอร์มอลดีไฮด์เจล (RF-gel) และรีโซซินอล-ฟอร์มอลดีไฮด์ คาร์บอนเจล (Carbon gel) ดังนั้นในปี 2002 Yamamoto และคณะได้ศึกษาการก่อตัวของโครงสร้างของ RF-gel โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (C) และใช้น้ำ (W) เป็นตัวทำละลาย โดยทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนเชิงโมลของรีโซซินอล กับน้ำหรือค่า R/C และสัดส่วนของรีโซซินอลกับน้ำหรือ R/W ให้อยู่ในช่วง 12.5 ถึง 200 โมลต่อโมล และ 0.125 ถึง 0.500 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ โดยให้สัดส่วนของรีโซซินอลกับฟอร์มอลดีไฮด์หรือค่า R/F คงที่ที่ 0.500 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากการทดลองพบว่า ในช่วงแรกนั้นอัตราการเติบโตของอนุภาคคอลลอยด์ (Growth rate of colloidal particles) ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างกับน้ำหรือค่า C/W ในสารละลายรีโซซินอล-ฟอร์มอลดีไฮด์ เริ่มแรก โดยเมื่อค่า C/W สูงขึ้น จะทำให้อัตราการเติบโตของอนุภาคคอลลอยด์สูงขึ้นด้วย แต่ในขณะเดียวกันอัตราการเติบโตของอนุภาคคอลลอยด์ในขั้นสุดท้ายจะมีค่าลดลงอีกด้วย และเมื่อศึกษาผลต่อเนื่องไปถึงลักษณะรูพรุนของรีโซซินอล-ฟอร์มอลดีไฮด์เจล (RF-gel) พบว่าที่ค่า C/W สูงขึ้น ขนาดรูพรุนจะมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ปริมาณรูพรุนแบบเมโซก็มีค่าลดลงด้วย จึงได้มีการเสนอแนวคิดเกี่ยวกับบทบาทของค่า C/W ที่มีต่อกลไกการกลายเป็นเจล ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แนวคิดของกลไกการกลายเป็นเจลของรีโซซินอล-ฟอร์มอลดีไฮด์เจล (a) กรณีที่มีค่า C/W สูงและ (b) กรณีที่มีค่า C/W ต่ำ (Yamamoto และคณะ, 2002)

แนวคิดของกลไกดังกล่าวอธิบายได้ว่า เมื่อปริมาณ C/W มีค่ามาก ภายใต้สภาวะดังกล่าว เป็นการสนับสนุนการเกิดรีโซซินอลแอนไอออน (Resorcinol anion) ทำให้สามารถเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเติมเป็นผลให้อัตราการเพิ่มจำนวนอนุพันธ์ของไฮดรอกซีเมทิล ($-\text{CH}_2\text{OH}$) มีจำนวนมาก ทำให้มีการรวมกลุ่ม (Cluster) กันด้วยปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน หรือเกิดเป็นอนุภาคก่อกำเนิด (Initiator Particle) จำนวนปริมาณมากในช่วงแรก ทำให้อนุภาคปฐมภูมิ (Primary Particle) ที่ได้มีขนาดเล็ก ผลที่ตามมาคือ อนุพันธ์ของไฮดรอกซีเมทิล ($-\text{CH}_2\text{OH}$) ที่เกิดขึ้นทีหลังจะมีปริมาณที่น้อยลงและจะเข้าร่วมตัวกับอนุภาคก่อกำเนิดที่มีอยู่ก่อนแล้วด้วยปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน เป็นผลให้อนุภาคปฐมภูมิที่ได้มีขนาดเล็ก ด้วยเหตุนี้จึงจะได้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่เล็ก หรือมีขนาดรูพรุนแบบเมโซที่เล็ก

ในทางตรงข้ามเมื่อค่า C/W มีค่าลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเติมจะช้าลง เนื่องด้วยปริมาณรีโซซินอลแอนไอออน (Resorcinol anion) เป็นผลให้อัตราการเพิ่มจำนวนอนุพันธ์ของไฮดรอกซีเมทิล ($-\text{CH}_2\text{OH}$) มีจำนวนน้อย ทำให้มีการรวมกลุ่ม (Cluster) หรือ จำนวนอนุภาคก่อกำเนิดมีปริมาณน้อยในช่วงแรก ผลที่ตามมาคือ อนุพันธ์ของไฮดรอกซีเมทิล ($-\text{CH}_2\text{OH}$) ที่เกิดขึ้นทีหลังซึ่งมีปริมาณมากจะเข้าร่วมตัวกับอนุภาคก่อกำเนิดที่มีอยู่ก่อนแล้วด้วยปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน เป็นผลให้อนุภาคปฐมภูมิที่ได้มีขนาดเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงจะได้มีขนาดช่องว่างระหว่างอนุภาคใหญ่ หรือมีขนาดรูพรุนแบบเมโซที่ใหญ่

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าการปรับเปลี่ยนค่า C/W นั้นมีผลต่อลักษณะความเป็นรูพรุนของ RF-gel และ Carbon gel ที่สังเคราะห์ได้อย่างเห็นได้ชัด นอกจากการปรับเปลี่ยนค่า C/W แล้ว ยังมีงานวิจัยอีกหลายชิ้นที่ศึกษาถึงผลของการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนเชิงโมลของรีโซซินอลกับตัวเร่งปฏิกิริยา หรือค่า R/C ซึ่งพบว่า ค่ารัศมีสูงสุด (r_p , Peak radius) ที่ได้จากการกระจายขนาดรัศมีของรูพรุน (Pore size distribution) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า R/C สูงขึ้น (Yamamoto และคณะ, 2002) เนื่องจากว่าปริมาณของสารตั้งต้นสูงขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีการรวมกลุ่ม (Cluster) หรือ จำนวนอนุภาคก่อกำเนิดมีปริมาณน้อยในช่วงแรก เป็นผลให้อนุภาคปฐมภูมิที่ได้ในต่อมามีขนาดเพิ่มขึ้น จากเหตุผลที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

ในงานวิจัยของ Jin และคณะในปี 2009 ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนที่มีรูพรุนขนาดเมโซที่มีความเป็นระเบียบของรูพรุนและศึกษาการควบคุมโครงสร้างรูพรุนที่ได้ โดยพบว่าโครงสร้างรูพรุนและขนาดรูพรุนของอนุภาคคาร์บอนสามารถควบคุมได้โดยทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของไตรบิล็อกโคพอลิเมอร์ที่ใส่ในสภาวะการเตรียมตอนเริ่มต้น โดยอนุภาคคาร์บอนที่เตรียมจาก รีโซซินอล/ฟอร์มอลดีไฮด์ และพลูโรนิค F127 จะมีโครงสร้างเป็นแบบหกเหลี่ยม ขนาด

รพูนจะเพิ่มขึ้นจาก 4.7 เป็น 5.8 นาโนเมตรเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของฟลูโรนิก F127 ต่อรีไซโคลเป็น 0.0054 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลจนมีค่าเท่ากับ 0.0081 อนุภาคคาร์บอนจะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นโครงสร้างแบบสามมิติที่มีลักษณะเหมือนตัวหนอน

นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างของวัสดุคาร์บอนรพูนสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างในสภาวะเริ่มต้นของสารละลายดังเช่นในงานวิจัยของ JOB และคณะในปี 2004 ได้ทำการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายในสภาวะเริ่มต้นที่มีอิทธิพลต่อลักษณะโครงสร้างของรพูน โดยพบว่าค่าพื้นที่ผิวไม่ขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่างในสภาวะเริ่มต้นของสารละลาย ในขณะที่ปริมาตรช่องว่างทั้งหมด (total void volume) มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 0.4 ไปเป็น 1.4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงจาก 6.25 เป็น 5.45 และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าสูงขึ้น (ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.5 และ 7.35) โครงสร้างรพูนที่ได้ทั้งหมดจะเกิดการยุบตัวและทำให้วัสดุคาร์บอนเป็นคาร์บอนที่ไม่มีรพูนทั้งหมด

2.2.2 การอบแห้ง (Drying processing)

การอบแห้งเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งในการเตรียมวัสดุรพูนโดยกระบวนการโซล-เจล โพลีคอนเดนเซชัน (Sol-gel Polycondensation) ซึ่งในแต่ละวิธีของการอบแห้งนั้นมีผลต่อลักษณะรพูนของ RF-gel และ Carbon gel ที่ได้ โดยส่วนใหญ่วิธีที่ใช้ในการอบแห้งนั้นจะนิยมใช้กันอยู่ทั้งหมด 4 วิธี ดังนี้

การอบแห้งด้วยลมร้อน (Subcritical Drying) เป็นการระเหยสารละลายที่อยู่ในโครงสร้างของเจลด้วยลมร้อนที่ความดันบรรยากาศ RF-gel ที่ได้จากการอบแห้งด้วยวิธีนี้จะเรียกว่า "RF xerogel" จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการอบแห้ง RF-gel ด้วยวิธีนี้จะทำให้คุณสมบัติความเป็นรพูนนั้นค่อนข้างต่ำ เนื่องจากว่าจะเกิดการหดตัวของเจลอย่างมากขณะทำการอบแห้ง โดยขนาดของการหดตัวนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งและขนาดของ RF-gel ซึ่งขนาดของการหดตัวจะสูงเมื่ออัตราเร็วของลมร้อนมีค่ามากหรือ RF-gel ที่นำมาอบแห้งนั้นมีขนาดใหญ่ (Al-Muhtaseb และคณะ, 2003) แต่ถ้าให้อัตราเร็วของลมร้อนต่ำก็จะทำให้เวลาในการอบแห้งนั้นนานขึ้นด้วย

การอบแห้งด้วยสภาวะเหนือวิกฤติ (Supercritical Drying) เป็นการทำให้สารละลายที่อยู่ในโครงสร้างของ RF-gel อยู่ในสภาวะเหนือวิกฤติหลังจากนั้นจะทำการปล่อยสารละลาย

(ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลว) อีกตัวหนึ่งที่มีแรงดึงดูดต่ำกว่าเข้าไปแทนที่แล้วปล่อยอากาศที่สถานะเหนือวิกฤติที่อัตราเร็วต่ำ ๆ ตามเข้าไปเพื่อกำจัดสารละลาย(ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลว) ที่อยู่ในโครงสร้างของ RF-gel ออกไป โดย RF-gel ที่ได้จากการอบแห้งด้วยวิธีนี้จะเรียกว่า “RF aerogel” การอบแห้งนี้สามารถแก้ปัญหาเรื่องการหดตัวของ RF gel หลังจากการอบแห้ง RF aerogel มีพื้นที่ผิวและปริมาตรมากถึง 1,400 ตารางเมตรต่อกรัมและ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม ตามลำดับ (Moreno-Castilla และคณะ, 2005) แต่วิธีนี้ใช้ต้นทุนค่อนข้างสูง

การอบแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze Drying) ใช้หลักการระเหิดตัวทำละลายออกจากรูพรุนของ RF-gel โดยการทำให้สารละลายที่อยู่ในโครงสร้างของ RF-gel เกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิเย็นเยือก (Pre-Freezing) หลังจากนั้นทำการระเหิด (Sublimation) สารละลายออกมา โดย RF-gel ที่ได้จากการอบแห้งด้วยวิธีนี้จะเรียกว่า “RF-cryogel” ซึ่งการอบแห้งด้วยวิธีนี้จะแก้ปัญหาเรื่องการหดตัวของ RF-gel หลังการอบแห้งด้วย โดยพบว่า Carbon cryogel ที่ได้จากการอบแห้งด้วยวิธีนี้จะมีค่าพื้นที่ผิวของ RF cryogel ถึง 700 ตารางเมตรต่อกรัมและมีปริมาตรรูพรุนสูงถึง 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (Yamamoto และคณะ, 2002) และ (Baric' และคณะ, 2004) แต่พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนแบบเมโซของ Carbon cryogel จะมีค่าต่ำกว่า Carbon aerogel

2.2.3 การเผาให้เป็นคาร์บอน (Carbinization)

การเผาให้เป็นคาร์บอนเป็นขั้นตอนที่ทำให้วัสดุอินทรีย์เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ออกมาในรูปของแก๊สทำให้ได้โครงสร้างที่เกือบจะเป็นคาร์บอนที่บริสุทธิ์ โดยการเผาในบรรยากาศเฉื่อยที่อุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส

สำหรับโครงสร้างของ RF-gel ที่ผ่านกระบวนการเผาให้เป็นคาร์บอน (Carbinization) เรียกว่า “Carbon gel” การเผาให้เป็นคาร์บอนของ RF-gel โดยส่วนมากแล้วมักกระทำในเตาเผาแบบท่อ (Tube Furnace) โดยมีก๊าซเช่น ไนโตรเจน ฮีเลียม เป็นต้น ไหลผ่านด้วยอัตราการไหลเชิงปริมาตรคงที่และเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าขั้นตอนในการเผาให้เป็นคาร์บอนนั้นมีผลต่อความเป็นรูพรุนของ Carbon gel ที่ได้ ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงสถานะต่างๆในกระบวนการเผาให้เป็นคาร์บอนว่ามีผลต่อลักษณะสมบัติรูพรุนของคาร์บอนเจลอย่างไร

ตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนสภาวะการเผาให้เป็นคาร์บอนที่ส่งผลต่อลักษณะสมบัติรูพรุนของคาร์บอนเจล (Ritter และคณะ, 2003)

สภาวะที่ปรับเปลี่ยน	อิทธิพล
1. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาให้เป็นคาร์บอน	-ลดองค์ประกอบออกซิเจน -คาร์บอนเจลที่ได้มีพื้นที่ผิวลดลง -ปริมาตรรูพรุนมีค่าลดลง -เพิ่มการกระจายขนาดรูพรุนขนาดแมโคร (Macropore Size Distribution) -เพิ่มการกระจายขนาดรูพรุนขนาดมีโซ (Mesopore Size Distribution)
2. เพิ่มระยะเวลาการเผาให้เป็นคาร์บอน	-เพิ่มขนาดรูพรุน ปริมาตร และพื้นที่ผิว

จากการเผาให้เป็นคาร์บอนเป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ โดยจะเกิดการหักออกของโมเลกุลตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อน ทำให้กลุ่มโมเลกุลที่เป็นวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดรูพรุนและช่องว่างภายใน Carbon gel ซึ่งการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เผาทำให้สมบัติความเป็นรูพรุนของ Carbon gel ที่ได้แตกต่างกัน โดยส่วนมากจะใช้อุณหภูมิในช่วง 600-2100 องศาเซลเซียส (Yamamoto และคณะ, 2002)

ผลของการเผาให้เป็นคาร์บอนนั้นทำให้รูพรุนแบบแมโครของ Carbon gel นั้นลดลง เนื่องจากการหดตัวของ RF-gel แต่จะทำให้รูพรุนแบบไมโครและเมโซเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของ Carbon gel นั้นเพิ่มขึ้นด้วย (Tamon และคณะ, 1998)

2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับ-คายซับไนโตรเจน (Sing และคณะ, 1982)

เมื่อของแข็งถูกปกคลุมด้วยของไหลแล้วของไหลที่ถูกดูดซับจะเป็นฟังก์ชันกับคุณสมบัติทางเคมีของของไหล (Adsorptive) และของแข็ง (Adsorbent) รวมไปถึงคุณสมบัติทางกายภาพของระบบเช่น ความดัน อุณหภูมิ และปริมาตร

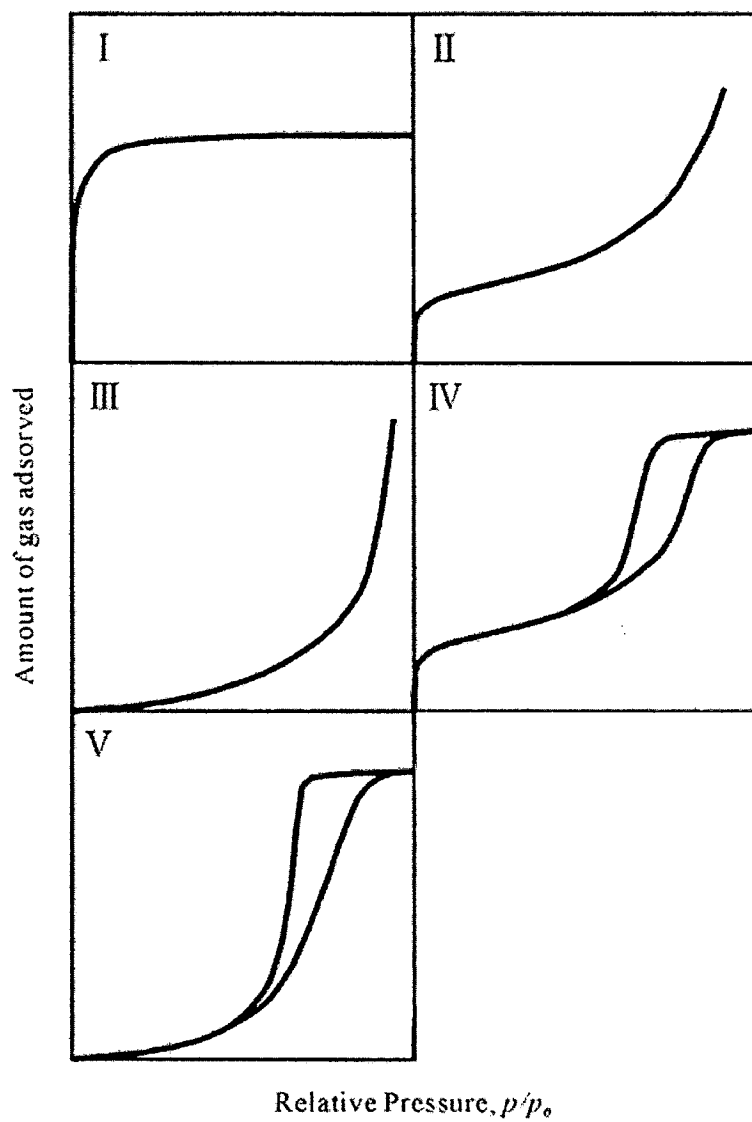
เมื่อบันทึกค่าระหว่างปริมาตรของของไหลที่ถูกดูดซับหรือมวลของของไหลที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) เราจะเรียกความสัมพันธ์ที่ได้ว่า ไอโซเทอรั่มการดูดซับ - คายซับของไนโตรเจนที่สามารถแบ่งประเภทเป็น 5 แบบตามหลักของ IUPAC ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งไอโซเทอรั่มการดูดซับ - คายซับของไนโตรเจนแต่ละแบบสามารถบอกลักษณะสมบัติรูพรุนของวัสดุได้ดังต่อไปนี้

แบบที่ 1 (Type I) ซึ่งจะบ่งบอกว่าลักษณะสมบัติรูพรุนของวัสดุเป็นวัสดุที่มีรูพรุนในช่วงไมโครพอร์ (Micropore) เท่านั้น ลักษณะของเส้นไอโซเทอรั่มจะเป็นรูปเส้นโค้งค้ำ โดยเส้นโค้งที่ความดันต่ำมาก ๆ จะมีความชันมากเนื่องจากโมเลกุลที่ถูกดูดซับ (Adsorbend) จะเริ่มถูกดูดซับลงในรูพรุนในช่วงไมโครพอร์และจะเริ่มเป็นระนาบขนานกับแกนนอนเมื่อความดันสูงขึ้นเนื่องจากรูพรุนในช่วงไมโครพอร์เต็มไปด้วยโมเลกุลตัวถูกดูดซับแล้ว

แบบที่ 2 (Type II) ลักษณะของเส้นโค้งไอโซเทอรั่มจะเป็นเส้นโค้งค้ำในช่วงความดันต่ำซึ่งเกิดจากอิทธิพลของการดูดซับของรูพรุนในช่วงไมโครพอร์และจะกลายเป็นเส้นโค้งหงายหรือมีการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความดันมีค่าสูงขึ้นซึ่งเกิดขึ้นจากการดูดซับแบบ Multilayer หรือเกิดการซ้อนทับกันเองของโมเลกุลตัวถูกดูดซับและเส้นการดูดซับจะซ้อนทับกับเส้นการคายซับ ซึ่งไอโซเทอรั่มแบบที่ 2 บ่งบอกถึงลักษณะสมบัติรูพรุนของวัสดุว่าเป็นวัสดุที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนที่มีขนาดแมโครพอร์ (Macropore)

แบบที่ 4 (Type IV) ลักษณะของเส้นโค้งไอโซเทอรั่มจะคล้ายกับแบบที่ 2 (Type II) เพียงแต่ที่ความดันสูงเส้นโค้งของการคายซับจะไม่ซ้อนทับกับเส้นโค้งของการดูดซับซึ่งจะเรียกว่า Hysteresis Loop เนื่องมาจากการเกิดปรากฏการณ์ Capillary Condensation ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดภายในรูพรุนขนาดเมโซพอร์ (Mesopore) ไอโซเทอรั่มแบบที่ 4 จึงบ่งบอกถึงการมีรูพรุนเมโซพอร์ (Mesopore) ภายในวัสดุ

แบบที่ 3 (Type III) และ 5 (Type V) ลักษณะของเส้นโค้งจะเป็นเส้นโค้งหงาย ซึ่งไอโซเทอรั่มแบบที่ 3 จะไม่มี Hysteresis Loop ในขณะที่แบบที่ 5 ปรากฏ Hysteresis Loop ซึ่งไอโซเทอรั่มแบบที่ 3 บ่งบอกถึงลักษณะสมบัติรูพรุนของวัสดุว่าเป็นวัสดุที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนที่มีขนาดแมโครพอร์ (Macropore) ส่วนไอโซเทอรั่มแบบที่ 5 บ่งบอกว่าเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดไมโครพอร์ (Micropore) หรือเมโซพอร์ (Mesopore)

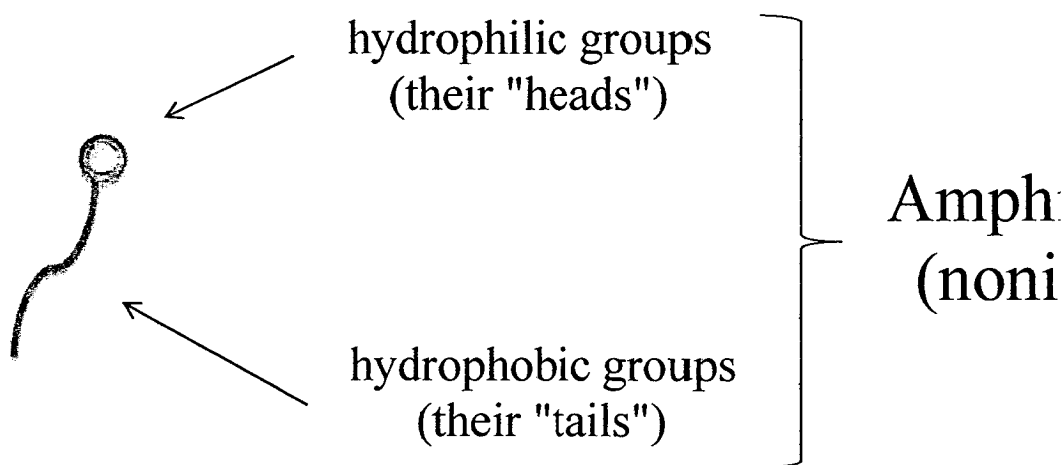


รูปที่ 2.6 ลักษณะต่าง ๆ ของไอโซเทอर्मการดูดซับ - คายซับ ตามหลักของ IUPAC

(Sing และคณะ, 1982)

2.4 การให้โมเลกุลหน่วยย่อยวางตัวเข้าด้วยกันอย่างเป็นระเบียบด้วยตัวเอง (self-assembly) (Brinker และคณะ, 1999)

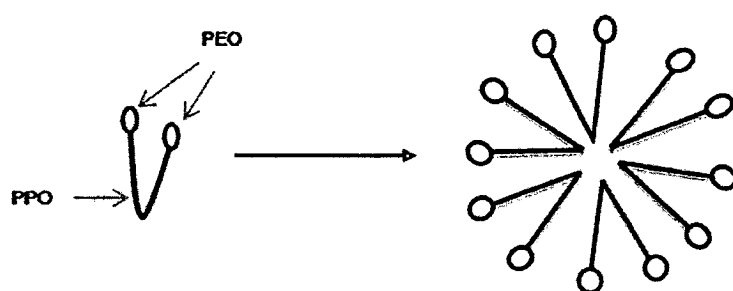
กระบวนการที่เป็นไปในลักษณะของการสังเคราะห์ โดยให้โมเลกุลหน่วยย่อยวางตัวเข้าด้วยกันอย่างเป็นระเบียบด้วยตนเองได้นั้น (self-assembly) ถูกให้ความหมายไว้ว่า "เป็นการประกอบตัวของโมเลกุลหน่วยย่อยให้วางตัวอย่างเป็นระเบียบได้เอง เพื่อก่อสร้างเป็นโครงสร้างหนึ่งที่มีความเสถียร โดยไม่ต้องทำให้เกิดการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างกัน" อธิบายได้ง่ายได้ว่าเป็นลักษณะการก่อตัวขึ้นมาของโครงสร้างโมเลกุลโดยการจับตัวกันของแต่ละหน่วยย่อย ซึ่งไม่ต้องอาศัยการสร้างพันธะโควาเลนต์เพื่อเชื่อมต่อแต่อย่างใด แต่อาศัยน้ำเป็นตัวช่วยในการสังเคราะห์ และเมื่อประกอบตัวกันเสร็จแล้วน้ำนั้นก็就会被ถอดออกได้เอง (น้ำที่ถูกลำเลียงมาใช้เพื่อช่วยก็คือโมเลกุลต่างๆ นั่นเอง) ซึ่งกระบวนการของการประกอบตัวเองได้ในธรรมชาตินั้น จะนำไปสู่โครงสร้างที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวที่เป็นไปได้หลากหลายรูปแบบ จนกระทั่งได้พบกับสภาพแวดล้อมของจุดต่ำสุดของอุณหพลวัต (Thermodynamic) ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่จะกำหนดรูปร่างเรขาคณิตของโครงสร้างโมเลกุลสุดท้ายขึ้นมาได้ โดยทั่วไปได้แก่โมเลกุลสารลดแรงตึงผิวแอมฟิฟิลิก (Amphiphilic surfactant molecules) หรือพอลิเมอร์ (Polymers) ที่ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic part) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่มีขั้ว และ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic part) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ไม่มีขั้วดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 แบบจำลองลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวประเภท Amphiphilic
(Brinker และคณะ, 1999)

การให้โมเลกุลหน่วยย่อยของสารอินทรีย์วางตัวเข้าด้วยกันอย่างเป็นระเบียบด้วยตัวเองจะนำมาประยุกต์เพื่อใช้สังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนโดยวิธีการเผาให้เป็นคาร์บอน วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนสามารถสังเคราะห์ได้จากการเกิดเป็นพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์สารอินทรีย์ซึ่งจะมีทั้งส่วนที่ไม่ชอบน้ำและส่วนที่ชอบน้ำ โดยส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบของสารผสมสามชนิด ได้แก่ สารลดแรงตึงผิว/น้ำหรือตัวทำละลาย/มอนอเมอร์สารอินทรีย์ เช่น การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบเมโซจากกาให้โมเลกุลหน่วยย่อยวางตัวเข้าด้วยกันอย่างเป็นระเบียบด้วยตัวเองของไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ชนิดพอลิซาเมอร์ (Pluronic) ในสารละลายน้ำ นอกจากนี้ Jin และคณะ (2009) ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนที่มีรูพรุนแบบเมโซที่มีการจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบโดยวิธีที่ให้โมเลกุลหน่วยย่อยของสารอินทรีย์วางตัวเข้าด้วยกันอย่างเป็นระเบียบด้วยตัวเองโดยใช้รีซินอล/ฟอร์มอลดีไฮด์และไตรบล็อกโคพอลิเมอร์สองชนิด (พลูโรนิค F127 และ P123) เป็นแม่แบบชนิดซอฟท์ (soft template) เนื่องจากสามารถทำการกำจัดได้ง่าย

ในสารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous solution) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเริ่มจับกันเองเป็นกลุ่มเรียกว่าไมเซลล์ โดยส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุลหันเข้าหากันเองแล้วหันส่วนที่มีขั้วเข้าหาตัวทำละลายน้ำดังแสดงในรูปที่ 2.8 ความเข้มข้นที่สารลดแรงตึงผิวเริ่มจับกันเป็นไมเซลล์นี้เรียกว่า ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration (CMC)) พบว่าสารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่ที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ไม่มีขั้วในโมเลกุลมักมีความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์อยู่ในช่วง 10^{-4} - 10^{-2} โมลาร์ (Pompen, 2005)

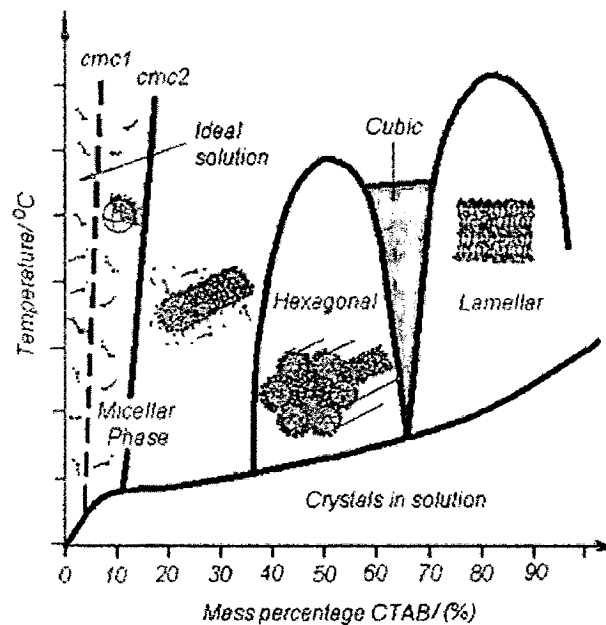


รูปที่ 2.8 รูปแบบเบื้องต้นของสารกลุ่ม Pluronic® (PEO-PPO-PEO) ในรูปแบบไมเซลล์

(Nakashima และคณะ, 2006)

พบว่า การเกิดไมเซลล์นั้นขึ้นกับคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเตรียม สารลด

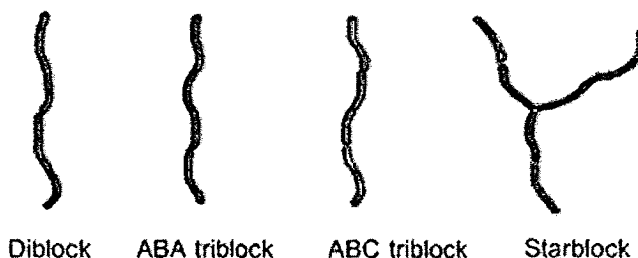
แรงดึงดูดที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวเชื่อมต่อการเกิดไมเซลล์เมื่อเทียบกับสารที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสั้นโดยสังเกตจากสารลดแรงตึงผิวที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวมีค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ที่ต่ำกว่าพวกที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสั้น การเติมเกลือลงในสารละลายของสารลดแรงตึงผิวมีผลทำให้ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ต่ำลง ซึ่งแสดงว่าระบบมีการเกิดไมเซลล์ได้ดีขึ้นทั้งนี้เนื่องจากเกลือช่วยลดแรงผลักระหว่างประจุของส่วนที่มีขั้วบนโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวทำให้จับกันเป็นไมเซลล์ได้ดีขึ้น และจำนวนโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวที่จับกันในแต่ละไมเซลล์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเกลือที่เติมลงไป ส่วนการเติมแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กทำให้ค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์สูงขึ้นเนื่องจากแอลกอฮอล์ไปลดพันธะไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic bonding) แต่ถ้าเติมแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลยาว (Long chain alcohol) จะทำให้ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ลดลง นอกจากนี้อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ และโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวมีผลต่อลักษณะรูปร่าง และจำนวนโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวในแต่ละไมเซลล์ด้วย โดยรูปร่างของไมเซลล์สามารถเปลี่ยนจากทรงกลมไปเป็นทรงรี หรือทรงกระบอกเป็นต้น (Pompen, 2005) อย่างไรก็ตามถ้าเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเหนือกว่าค่า CMC โครงสร้างของไมเซลล์ (Micelles) จะเกิดรูปแบบโครงสร้างที่แตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเหนือกว่าค่า CMC ณ ขณะนั้น สามารถอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.9 เป็นแผนภาพรูปแบบโครงสร้างไมเซลล์ที่ความเข้มข้นต่างกันของ Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB) ซึ่งค่า CMC ถือเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดด้วย



รูปที่ 2.9 แผนภาพแบบโครงสร้างไมเซลล์ที่ความเข้มข้นต่างกัน ของ Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB) (Brinker และคณะ, 1999)

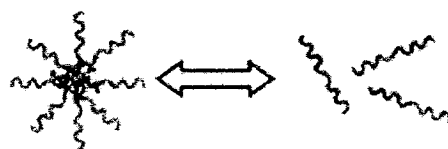
2.5 บล็อกโคพอลิเมอร์ (Block copolymer)

พอลิเมอร์ชนิดนี้จะประกอบไปด้วยพอลิเมอร์สองส่วน (Block) หรือมากกว่าที่มาเชื่อมต่อกันด้วยการจัดเรียงตัวที่แน่นอน บล็อกโคพอลิเมอร์สามารถจำแนกได้ตามจำนวนของบล็อกต่อหนึ่งโมเลกุล บล็อกโคพอลิเมอร์ที่มีจำนวนสอง, สาม และมากกว่าขึ้นไปจะเรียกว่า ไดบล็อก ไตรบล็อก และมัลติบล็อกตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น ABC เป็นไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ที่เป็นเส้นตรง (อาจเรียกเทอร์พอลิเมอร์) จะประกอบไปด้วยสามมอนอเมอร์ที่แตกต่างกัน ในขณะที่ ABA เป็นไตรบล็อกโคพอลิเมอร์เส้นตรงมีสองมอนอเมอร์ คือมอนอเมอร์ A และมอนอเมอร์ B (Nakashima และคณะ, 2006) แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวโคพอลิเมอร์แบบบล็อกดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะการจัดเรียงตัวโคพอลิเมอร์แบบบล็อก (Block copolymer) (Nakashima และคณะ, 2006)

โมเลกุลบล็อกโคพอลิเมอร์นี้อาจไม่เรียกว่าเป็นสารลดแรงตึงผิวเมื่อพวกมันมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันที่ขอบเขตของสองวัฏภาค (Letchford และคณะ, 2007) เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย โมเลกุลบล็อกโคพอลิเมอร์จะจัดเรียงศูนย์กลางตัวเองโดยบล็อกที่ไม่ชอบน้ำจะถูกกำจัดออกจากส่วนที่มีน้ำหรือหัวที่อยู่แวดล้อม เพื่อที่จะให้อยู่ในสภาวะที่มีพลังงานอิสระน้อยที่สุด เมื่อความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น พลังงานอิสระของระบบจะเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากปฏิกิริยาที่ไม่เป็นที่ต้องการระหว่างโมเลกุลน้ำและหมู่ที่ไม่ชอบน้ำของพอลิเมอร์ ส่งผลต่อโครงสร้างของสิ่งแวดล้อมรอบๆ น้ำ และต่อมาเอนโทรปีจะมีค่าลดลง ที่ช่วงความเข้มข้นค่าหนึ่ง โมเลกุลหลายตัวของพอลิเมอร์จะเกิดการจัดเรียงตัวด้วยตัวเองกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดคอลลอยด์ เรียกว่าไมเซล (micelles) และเทอร์มของความเข้มข้นวิกฤตจะเรียกว่าความเข้มข้นไมเซลวิกฤต (critical micelle concentration (CMC)) แม้ว่าไมเซลจะถูกจัดว่าเป็นคอลลอยด์ แต่พวกมันไม่ได้เป็นอนุภาคของแข็ง เมื่อความเข้มข้นถูกเจือจางจนมีค่าต่ำกว่า CMC ไมเซลสามารถที่สลายการจัดเรียงตัวได้ โดยอัตราการสลายการจัดเรียงตัวจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลและปฏิกิริยาระหว่างพันธะ ในบางกรณีที่มีปฏิกิริยาทางฟิสิกส์เกิดขึ้นระหว่างพันธะในแกนไมเซล ทำให้สามารถที่จะต้านทานต่อการสลายการจัดเรียงตัวได้ ถ้าความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายมีค่าสูงกว่า CMC ไมเซลจะมีความเสถียรอยู่ในเทอโมไดนามิคระหว่างการจัดเรียงตัวและสลายการจัดเรียงตัว การรวมตัวของโคพอลิเมอร์ภายใต้สมดุลไดนามิคด้วยมอนอเมอร์แสดงไว้ในรูปที่ 2.11

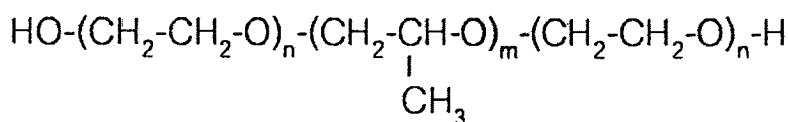


micelle unimers

รูปที่ 2.11 การรวมตัวของโคพอลิเมอร์ภายใต้สมดุลไดนามิกด้วยมอนอเมอร์

(Letchford และคณะ, 2007)

โดยทั่วไปไมเซลจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 10 ถึง 100 นาโนเมตร และจะจัดแบ่งประเภทโดยอาศัยโครงสร้างแกน - เปลือกที่ซึ่งเกิดจากส่วนที่ไม่ชอบน้ำสร้างจะสร้างแกนอยู่ข้างในและถูกล้อมรอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำของโมเลกุลโคพอลิเมอร์ (Letchford และคณะ, 2007) ชนิดของบล็อกโคพอลิเมอร์ที่มีความน่าสนใจ คือ poly(ethylene oxide)-poly(propylene oxide)-poly(ethylene oxide), PEO-PPO-PEO triblock copolymers ดังแสดงโครงสร้างตามรูปที่ 2.12 ซึ่งจะถูกจำหน่ายภายใต้ชื่อ Pluronics® (BASF) และเป็นที่รู้จักในชื่ออื่น ๆ เช่น Proxanols, Synperonics, Poloxamers (Nakashima และคณะ, 2006)

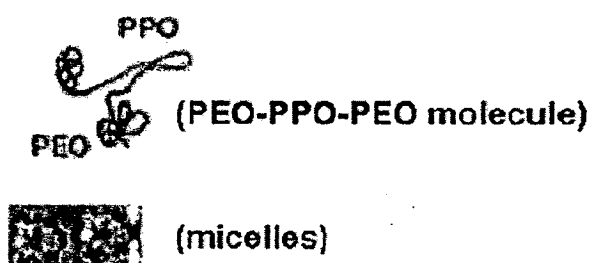


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ PEO-PPO-PEO triblock copolymers

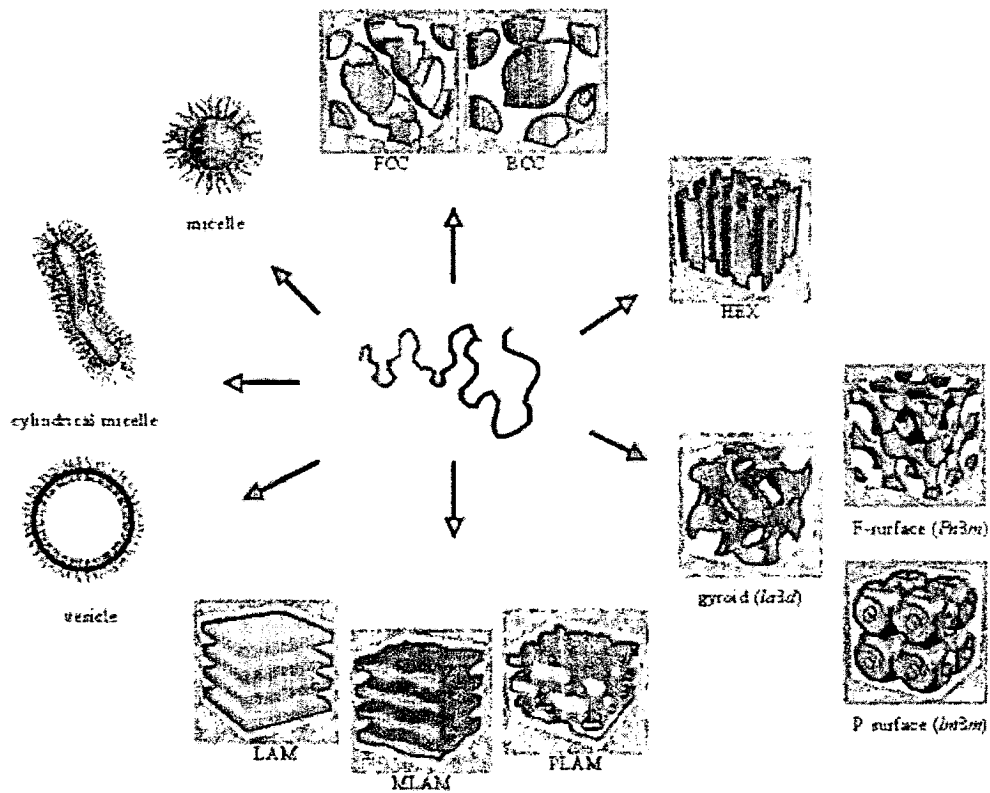
สำหรับ Pluronics® (BASF) บล็อกโคพอลิเมอร์นั้นมีออกแบบให้มีการเรียงลำดับตัวอักษรใช้อธิบายคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์ 'L' สำหรับของเหลว, 'P' สำหรับpaste, 'F' สำหรับของแข็ง ตัวเลขตัวแรกในการออกแบบเชิงจำนวนจะถูกคูณด้วย 300 ซึ่งให้น้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณของส่วน PO ที่ไม่ชอบน้ำ ตัวเลขตัวสุดท้ายเมื่อคูณด้วย 10 จะชี้ให้เห็นถึงส่วนประกอบ EO ทั้งหมดในโมเลกุลโดยประมาณ ยกตัวอย่างเช่น พลูโรนิค F68 เป็นของแข็ง น้ำหนักโมเลกุลของช่วงที่ไม่ชอบน้ำมีค่า 1,800 โดยประมาณ (6x300) ส่วนที่ชอบน้ำ (ส่วนEO) มีค่าประมาณ 80% ของโมเลกุลโดยน้ำหนัก (8x10) พลูโรนิค F127 เป็นของแข็งน้ำหนักโมเลกุลของ

หัวที่ไม่ชอบน้ำมีค่า 3,600 (12x300) โดยประมาณ และส่วนที่ชอบน้ำ (ส่วนEO) มีค่าประมาณ 70% (7x10) ของโมเลกุล

การเกิดไมเซลของ PEO-PPO-PEO ในสารละลายน้ำมีการศึกษาโดยหลายวิธีเช่น การวัดแรงตึงผิว การวัดความหนืด และฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) (Nakashima และคณะ (2006)) การสร้างแกน-เปลือกของไมเซลจะเกิดจากบล็อก PPO ที่ไม่ชอบน้ำจะอยู่ตรงกลางเป็นแกนและถูกล้อมรอบด้วยเปลือกนอกของ PEO ที่ชอบน้ำเป็นบล็อกสุดท้าย ลักษณะการเกิดเป็นไมเซลของพอลิเมอร์แสดงไว้ดังรูปที่ 2.13 โครงสร้างของการให้โมเลกุลหน่วยย่อยวางตัวเข้าด้วยกันอย่างเป็นระเบียบด้วยตัวเองของบล็อกโคพอลิเมอร์และสารลดแรงตึงผิวสามารถเปลี่ยนแปลงจากไมเซลทรงกลมไปเป็นไมเซลทรงกระบอกไปเป็นลามลลา (Lamellae) หรือโครงสร้างที่ซับซ้อนอื่นๆ ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 การเกิดไมเซลของไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ชนิด (PEO-PPO-PEO) (Soler-Illia และคณะ, 2000)



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของบล็อกโคพอลิเมอร์ที่จัดเรียงตัวด้วยตัวเอง (Aegerter และคณะ, 1989)

2.6 การอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Drying)

ในปัจจุบันเทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเทคนิคนี้จะใช้เพื่ออบแห้งสารที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ เช่น สารละลายอินทรีย์ อิมัลชัน เป็นต้น ในอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมอาหารจะใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อผลิต นมผง ไข่ผง อาหารเด็ก เนื้อวัวสกัด โปรตีน ผลิตภัณฑ์ยา เช่น ยาสมุนไพร ผงอุตสาหกรรมเคมี เช่น การผลิตเกลือของแมกนีเซียม เป็นต้น การอบแห้งแบบพ่นฝอยสามารถใช้เพื่อการถนอมอาหารได้ โดยการอบแห้งสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว โดยเป็นการเปลี่ยนรูปของสายป้อน (Feed) จากของไหลให้อยู่ในรูปของผงแห้งโดยการพ่นฝอยสายป้อนเข้าสู่ตัวกลางอบแห้งความร้อน (Hot drying medium) การศึกษาค้นคว้าและพัฒนาในช่วงหลายปีที่ผ่านมาส่งผลให้เทคนิคการพ่นฝอยแบบอบแห้งได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างหลากหลาย มีการขยายงานการ

ผลิตอย่างต่อเนื่อง ดังจะเห็นได้จากในปัจจุบันการอบแห้งแบบพ่นฝอยได้เข้ามามีบทบาทกับสิ่งรอบ ๆ ตัวของเรามากขึ้น ข้อดีของเทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยคือ เป็นวิธีที่สามารถทำได้รวดเร็ว ประหยัดเวลา และในกรณีที่สารมีปริมาณน้อยก็สามารถทำให้อยู่ในรูปผงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งแบบเยือกแข็งข้อดีคือได้อัตราปริมาณงานที่มากกว่าและเวลาที่ใช้ในกระบวนการสั้นกว่า

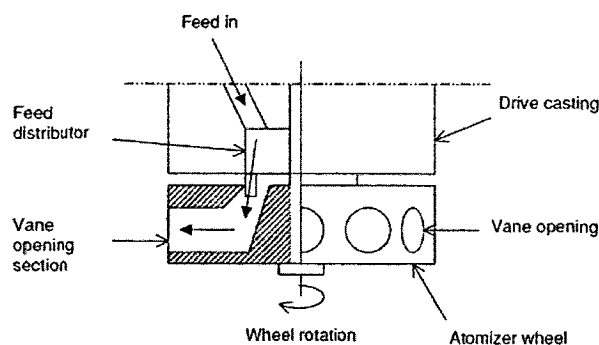
การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นการระเหยความชื้นของสายป้อนที่ถูกพ่นให้เป็นละอองโดยการทำงานร่วมกันระหว่างการพ่นฝอยและตัวกลางการอบแห้ง โดยตัวกลางการอบแห้งอาจจะเป็นอากาศ การอบแห้งจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องโดยความชื้นจะถูกระเหยออกไปและเริ่มเข้าใกล้ที่จะเป็นอนุภาคแห้ง และหลังจากนั้นอนุภาคที่ได้จะถูกแยกออกจากอากาศ กระบวนการที่สมบูรณ์ของการพ่นฝอยแบบอบแห้งโดยปกติจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน (Masters, 1991) ที่ต่อเนื่องกันคือ

1. การทำให้สายป้อนกระจายตัวเป็นละอองฝอย (Atomization)

กระบวนการนี้ทำให้สายป้อนเป็นละอองโดยใช้เครื่องกำเนิดละออง (Atomizer) ซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยลักษณะของเครื่องกำเนิดละออง (Atomizer) มี 3 ชนิด คือ

- จานหมุนกำเนิดละออง (Rotary Atomizer)

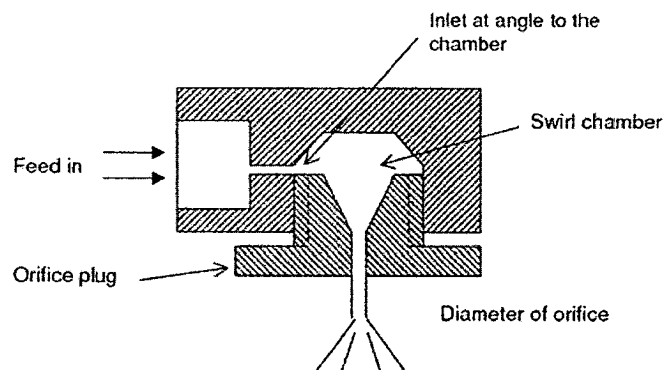
เครื่องกำเนิดละอองชนิดนี้สายป้อนจะไหลลงบนจานหมุน ซึ่งใกล้กับจุดศูนย์กลางโดยจานหมุนจะมีความเร็วรอบสูงประมาณ 5,000-10,000 รอบต่อนาที และสายป้อนจะถูกเหวี่ยงออกด้านข้างกระจายเป็นละอองโดยขนาดเฉลี่ย 30-120 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดเฉลี่ยนี้จะแปรผันโดยตรงกับอัตราการไหลของสายป้อนความหนืดและแปรผกผันกับอัตราการหมุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน โดยลักษณะของ Rotary atomizer ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะของ Rotary atomizer (C'anovas และคณะ, 2005)

- หัวฉีดอาศัยความดัน (Pressure Nozzle)

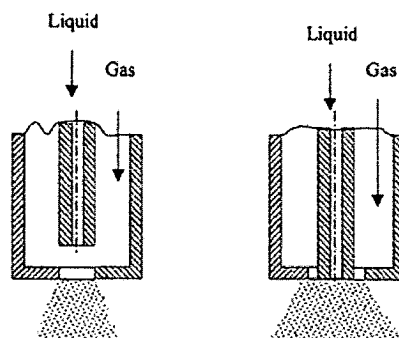
วิธีนี้สายป้อนจะไหลช่องแคบออริฟิส (Orifice) ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 0.5-3 มิลลิเมตร ภายใต้ความดันสูง ทำให้ของเหลวที่ออกมาจากหัวฉีดเป็นฝอยโดยไม่ใช้อากาศ อนุภาคที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ย 120-250 มิลลิเมตร โดยขนาดอนุภาคจะแปรผันโดยตรงกับอัตราการไหลของสายป้อน ความหนืด และแปรผกผันกับความดัน โดยลักษณะของ Pressure nozzle atomizer ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ลักษณะของ Pressure nozzle atomizer (C'anovas และคณะ, 2005)

- Pneumatic Nozzles

อุปกรณ์ชนิดนี้สายป้อนและอากาศจะไหลผ่านหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งจะทำให้สายป้อนแตกเป็นละอองฝอยเนื่องจากการไหลผ่านของอากาศด้วยความเร็วสูงภายในหัวฉีด การปรับอัตราการไหลของอากาศ จะช่วยในการกระจายเป็นละอองของสายป้อน วิธีนี้นิยมใช้กับสายป้อนที่มีความหนืดสูง อย่างไรก็ตามวิธีนี้ มีค่าดำเนินการที่สูงและให้ผลผลิตที่ต่ำ โดยลักษณะของ Pneumatic Nozzles ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะหัวฉีดแบบ Two-Fluid nozzle (C'anovas และคณะ, 2005)

2. การทำงานร่วมกันของการพ่นฝอยและการอบแห้งด้วยตัวกลาง (อากาศ) โดยอาศัยความร้อนและการส่งถ่ายมวล

การที่สารที่ทำการพ่นแห้งเข้าสัมผัสกับอากาศที่ใช้เพื่ออบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบเครื่องพ่นฝอย ดังเช่นอนุภาคที่ผ่านการอบแห้งจะมีคุณสมบัติที่ดีได้จะมีผลมาจากพฤติกรรมของละอองของเหลวในขณะอบแห้ง โดยการไหลของอากาศแห้งในระบบอาจจำแนกได้ 3 รูปแบบ คือ ทิศทางการไหลผ่านทางเดียวกับสารป้อน (Co-current flow) ทิศทางไหลตรงกันข้ามกับสารป้อน (Counter-current flow) และการไหลแบบผสม (Mixed flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.18

- ทิศทางการไหลผ่านทางเดียวกับสารป้อน (Co-current flow)

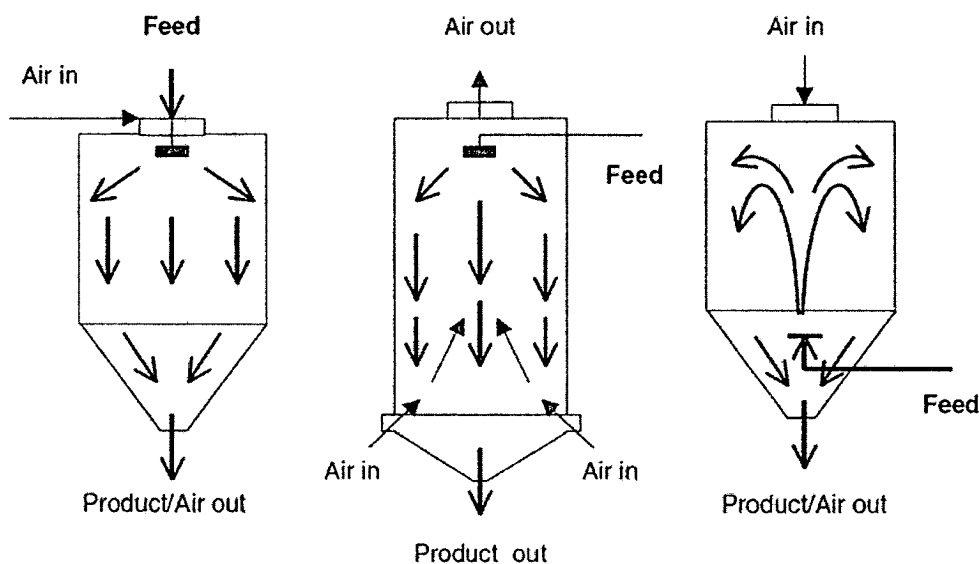
การไหลแบบขนาน คือ สารที่พ่นฝอยจะไหลในทิศทางเดียวกันกับอากาศร้อนผ่านเครื่องปฏิกรณ์ หยดของเหลวจะมาสัมผัสกับอากาศร้อนเมื่อพวกมันมีความชื้นมากที่สุด และความชื้นจะถูกระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว

- ทิศทางไหลตรงกันข้ามกับสารป้อน (Counter-current flow)

การไหลแบบสวนทาง คือ สารที่พ่นฝอยจะไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับอากาศร้อนผ่านเครื่องปฏิกรณ์ อากาศร้อนจะไหลขึ้นข้างบนและผลิตภัณฑ์จะตกลงข้างล่างเข้าสู่ส่วนกักเก็บ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความร้อนสูง วิธีนี้จึงเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่สามารถทนความร้อนได้เท่านั้น

- การไหลแบบผสม (Mixed flow)

การไหลแบบผสม คือ สารที่พ่นฝอยจะถูกพ่นฝอยไปข้างบนและคงอยู่ในโซนที่มีความร้อนเป็นเวลาสั้น ๆ เพื่อกำจัดความชื้นออกไป จากนั้นแรงโน้มถ่วงจะดึงอนุภาคเข้าสู่โซนที่เย็นเนื่องจากผลิตภัณฑ์จะอยู่ในโซนให้ความร้อนเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ดังนั้นจะต้องกระทำกับผลิตภัณฑ์ด้วยความระมัดระวัง



รูปที่ 2.18 การไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (ก) co-current (ข) counter-current และ (ค) การไหลแบบผสม (Mixed flow) (C'anovas และคณะ, 2005)

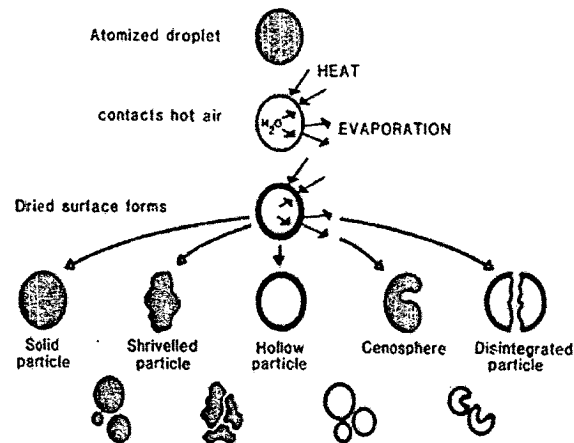
- ระบบเปิดและระบบปิด

สำหรับระบบเปิด อากาศมักนิยมใช้เป็นตัวกลางความร้อนมากที่สุด อากาศจะถูกทำให้ร้อนโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือการเผาไหม้และหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการไอเสียจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ สำหรับระบบปิด ตัวกลางความร้อนสามารถนำกลับมาใช้หมุนเวียนในระบบใหม่ได้ โดยปกติจะใช้ก๊าซเฉื่อยเป็นตัวกลางความร้อน เช่น ไนโตรเจน โดยจะใช้ในกรณีที่ของเหลวเป็นตัวทำละลายที่สามารถติดไฟได้ เช่น เอทานอล ผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อออกซิเจน หรือผลิตภัณฑ์ที่มีพิษ

3. ขั้นตอนการอบแห้ง (Drying of spray)

ในขั้นตอนการอบแห้งนี้ น้ำที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการละลายสารห่อหุ้มและคอร์เข้าด้วยกัน จะถูกกำจัดออกไปอย่างน้อยที่สุด 90 เปอร์เซ็นต์ โดยขั้นตอนของการอบแห้งเริ่มจากละอองฝอยสัมผัสกับอากาศร้อน ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนไปยังละอองฝอย ในขณะที่น้ำจะแพร่ผ่านในทิศทางที่ตรงข้าม ซึ่งการแพร่ผ่านของน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจน

อุณหภูมิของละอองฝอยมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของอากาศแห้ง ทำให้การแพร่ผ่านของน้ำคงที่ จนความชื้นในละอองฝอยมีค่าต่ำกว่าจุดอิ่มตัว ซึ่งจะไม่มีการแพร่ผ่านของน้ำ และเกิดการฟอร์มตัวของเปลือกชั้นนอกขึ้น โดยกลไกการอบแห้งของละอองฝอยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งปริมาณการกักเก็บสารระหว่างกระบวนการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตผงแห้ง

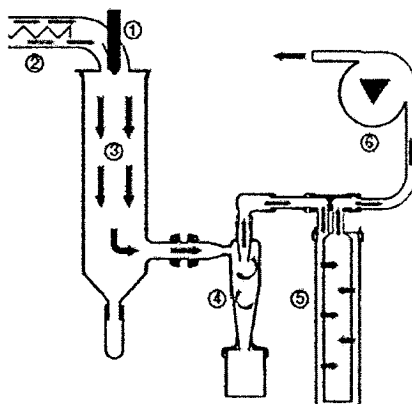


รูปที่ 2.19 กลไกการอบแห้งของละอองฝอย (Masters, 1991)

4. ขั้นตอนการแยกผลิตภัณฑ์แห้งจากอากาศ

การแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอากาศนั้น โดยทั่วไปนิยมใช้ไซโคลน (cyclone) เป็นตัวเก็บผลิตภัณฑ์ที่จะตกลงสู่ด้านล่างของไซโคลน (cyclone) ส่วนลมที่ออกจากด้านบนของไซโคลน (cyclone) จะผ่านไปยังตัวเก็บชั้นสุดท้ายทั้งนี้อาจเป็น wet scrubber หรือ bag filter หรือ electrostatic precipitator ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณผงที่มีและประสิทธิภาพการนำกลับมา

2.6.1 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย



รูปที่ 2.20 แสดงหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Buchi Labortechnik(2002)

รูปที่ 2.20 แสดงหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งสามารถอธิบายหลักการทำงานได้ตามรูปดังนี้ กระบวนการอบแห้งจะเกิดในเครื่องพ่นฝอยโดยสายป้อนจะถูกดูดโดยปั๊มเข้าสู่หัวฉีดซึ่งทำงานโดยอาศัยการอัดอากาศเพื่อกระจายสารให้เป็นละอองดังบริเวณหมายเลข(1),อากาศจะถูกทำให้ร้อนโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือตัวกลางความร้อน(drying medium) ดังบริเวณหมายเลข(2), ละอองฝอยจะสัมผัสกับอากาศร้อนทำให้เกิดการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วและเปลี่ยนรูปไปเป็นอนุภาคของแข็งที่ห้องอบ (Spray chamber) ดังบริเวณหมายเลข (3),ผงผลิตภัณฑ์ที่ได้จะตกลงสู่ด้านล่างของห้องอบ(Spray chamber) และผงบางส่วนที่หลุดมากับอากาศจะถูกแยกโดยใช้ไซโคลนดังบริเวณหมายเลข (4), ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กเกินไปจะถูกกำจัดโดยตัวกรองภายนอก (Outlet filter) ดังบริเวณหมายเลข(5)

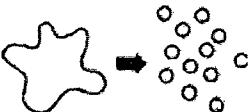
2.6.2 การประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

วัสดุที่ประสบความสำเร็จในการอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นมีอยู่มากมาย ดังเช่นในงานวิจัยของ Andersson และคณะ ในปี2004 ได้ศึกษาการเตรียมอนุภาคซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดเมโซโดยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยพบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม จากการวิเคราะห์พบว่าถ้าเตรียมสารละลายโดยใช้บล็อกโคพอลิเมอร์ชนิดไม่มีประจุและสารลดแรงตึงผิวประจุบวก โครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปทรงหกเหลี่ยมแบบ 2 มิติ และถ้าใช้บล็อกโคพอลิเมอร์เป็น

แม่แบบเพียงชนิดเดียวโครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะเหมือนหัวหอม จากการวิเคราะห์ค่าการดูดซับ-คายซับในโตรเจนพบว่าอนุภาคมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 2.5 – 8.5 นาโนเมตร นอกจากนี้ในปี 2004 Alonso และคณะ ได้ทำการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาทรงกลมที่มีรูพรุนขนาดเมโซโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอยซิลโดยใช้อุณหภูมิขาเข้าของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีค่าต่ำ (383 เคลวิน) โดยศึกษา 2 ตัวแปร คือ 1. เวลาที่ใช้ในการบ่มสาร (aging)

2. ปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ในสภาวะการเตรียมเริ่มแรก จากการทดลองพบว่าอนุภาคที่ได้มีลักษณะแตกต่างกัน ดังนี้ เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อซิลิกาเท่ากับ 40 และเวลาที่ใช้บ่มสาร 24 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคที่ได้เป็นแบบแมคโครเจล เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของไอโซ

โพรพานอลต่อซิลิกาเท่ากับ 20 และเวลาที่ใช้บ่มสาร 4.2 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคที่ได้เป็นแบบแมคโครเจล เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อซิลิกาเท่ากับ 20 และเวลาที่ใช้บ่มสาร 24.1 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคที่ได้เป็นทรงกลมที่ค่อนข้างเกาะตัวกัน เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อซิลิกาเท่ากับ 10 และเวลาที่ใช้บ่มสาร 22 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคที่ได้เป็นทรงกลมที่แยกตัวออกจากกัน และเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อซิลิกาเท่ากับ 20 และเวลาที่ใช้บ่มสาร 169.4 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคที่ได้เป็นทรงกลมที่ไม่แยกตัวออกจากกัน นอกจากนี้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับหลายอุตสาหกรรมซึ่งได้แสดงรายละเอียดของวัสดุที่สามารถใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยผลิตได้ไว้ดังรูปที่ 2.21

Application	Goal / use	Practical application
Spray drying 	Drying of inorganic and organic products	corn starch pigments dried milk
Micronization 	Reduction of a product's particle size	salt dyes
Micro encapsulation 	A liquid product is embedded in a solid matrix	perfumes strawberry aroma peach oil
Englobing 	A solid product is embedded in another solid or a mixture of solids	carotenoids in gelatins

รูปที่ 2.21 วัสดุที่สามารถใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยผลิตได้ (Buchi Labortechnik (2002))

2.6.3 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีสำหรับสารจำพวกเรซิน

เรซิน (โพลีคอนเดนเซท) มักนิยมนำมาใช้ในรูปผง สำหรับการสังเคราะห์เรซินนั้นการจะเปลี่ยนให้เรซินอยู่ในรูปผงต้องการขั้นตอนการระเหยของน้ำออกจากสาร เช่น พวกตัวทำละลายอินทรีย์ เรซินจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปผงเนื่องจากเรซินในรูปของเหลวมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์อย่างต่อเนื่อง เรซินในรูปผงสามารถเก็บไว้ได้โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงของสาร ในปัจจุบันมักนิยมใช้เรซินในรูปผงมากกว่าในรูปของเหลวเพราะว่าสะดวกต่อการบรรจุ จัดเก็บ และการนำไปใช้ นอกจากนี้ยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งเรซินสำหรับระยะทางไกล ๆ ได้อีกด้วย