

บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

2.1 ยาง

ยาง เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เรียกว่าสารประกอบพอลิเมอร์ มีสมบัติพิเศษคือ มีความยืดหยุ่นได้ (elasticity) ในอดีตก่อนสงครามโลกครั้งที่ 1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยาง มีเพียงยางจากต้นพืช ที่พบครั้งแรกบริเวณตอนใต้ของอเมริกา ปัจจุบันได้มีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นมากมาย เพื่อให้ในอุตสาหกรรมผลิตยาง ส่วนด้านยางธรรมชาติเอง ได้มีการพัฒนารูปแบบ ชนิด และกรรมวิธีการผลิตขึ้นอย่างกว้างขวาง

พืชที่ให้ยางได้มีประมาณ 2000 ชนิด แต่จะมีพืชเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถให้ยาง ซึ่งนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงการค้าได้ พืชที่สำคัญเหล่านี้คือ ยางพารา และยางวายุยูเล่ พืชทั้งสองชนิดนี้ให้ยางที่มีโครงสร้างทางเคมีเช่นเดียวกัน สามารถนำไปแปรรูปเป็น ผลิตภัณฑ์ยางได้เหมือนกัน นอกจากนี้ยังมีพืชอื่นที่ให้ยางซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีต่างไปจากพารา ได้แก่ ยางกัตตา ยางบาลาตา ยางซิคเคิ้ล

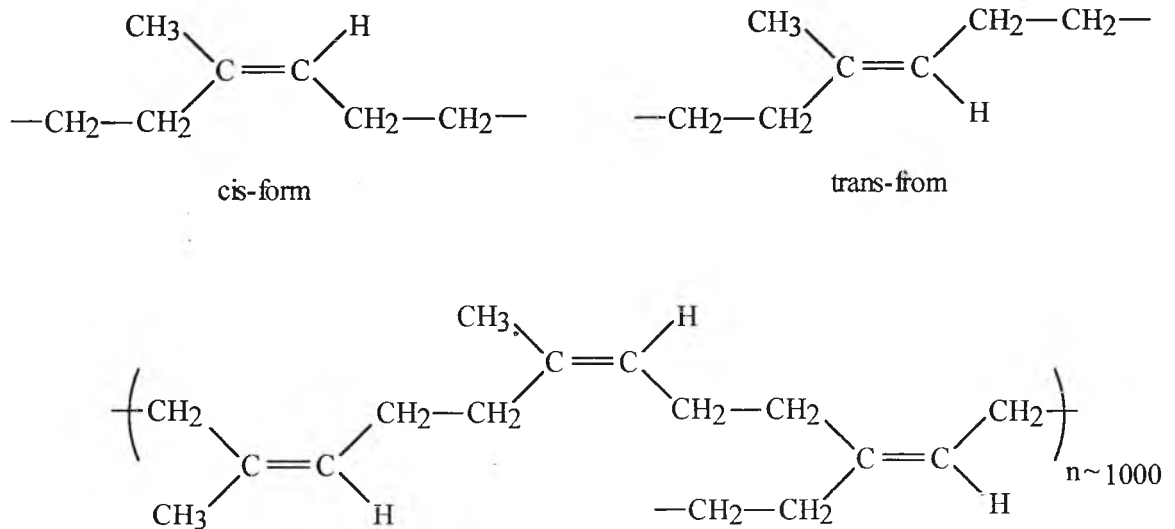
2.2 น้ำยางธรรมชาติ

1. สมบัติและส่วนประกอบของน้ำยาง

น้ำยางสดจากต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวหรือสีครีม ในทางเคมีจัดเป็นสารแขวนลอย มีความหนาแน่น 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มี pH ประมาณ 6.5-7.0 ความหนืดไม่แน่นอน มีส่วนประกอบของสารต่าง ๆ ไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุต้นยาง การกรีต และฤดูกาล เป็นต้น ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC)	36
น้ำยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC)	33
สารพวกโปรตีน	1-1.5
เถ้า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำในปริมาณที่รวมกับสารอื่น ๆ แล้วเป็น	100

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ⁽²⁾



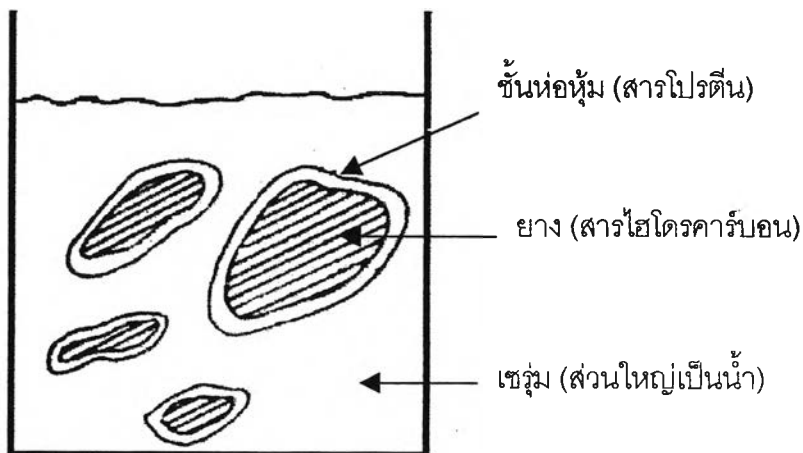
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ⁽³⁾

ยางธรรมชาติ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เขียนเป็นสูตรเคมี คือ (C_5H_8) เรียกชื่อทางเคมีว่าไอโซพรีน (isoprene) โครงสร้างโมเลกุลยางเป็นแบบ cis-configuration ดังรูปที่ 2.1 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1 ล้าน รูปร่างของอนุภาคยางเป็นอนุภาคกลม หรือรูปลูกแพร์ ขนาด 0.05-5 ไมโครเมตร

ยางมีความยืดหยุ่นได้ เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่ของยางแต่ละโมเลกุล เป็นขดของสายโมเลกุลที่เกิดจากหน่วยย่อยของไอโซพรีนต่อเนื่องกัน ยางชิ้นหนึ่ง ๆ จะประกอบด้วยขดของสายโมเลกุลที่พันกันอย่างยุ่งเหยิง สายโมเลกุลเหล่านี้ มีสมบัติ ถูกหักงอ หรือ ยืดได้ (flexible) การดึงหรือยืดชิ้นยาง ก็เท่ากับยืดสายโมเลกุลของยางให้คลายออก แต่เมื่อปล่อยคืนให้ความเป็นอิสระกับชิ้นยาง สายโมเลกุลยางก็จะพยายามหดตัวกลับมาขดอยู่ในสภาพเดิม

2. การรักษาสภาพน้ำยาง

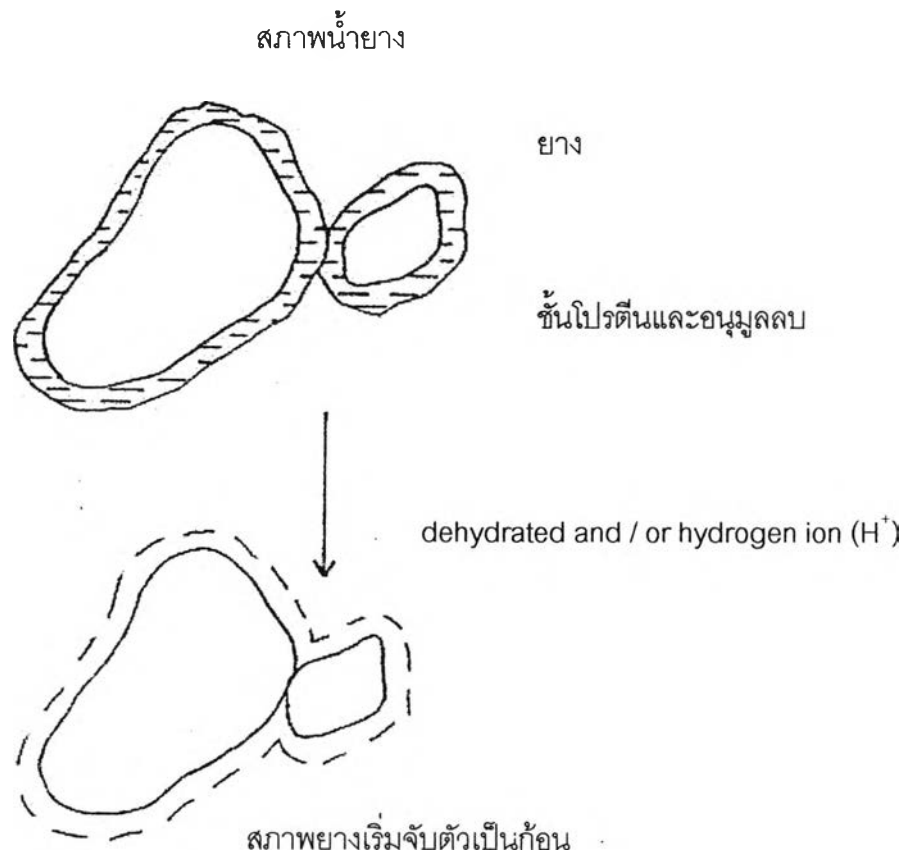
น้ำยางสดเป็นสารแขวนลอยที่มีส่วนของอนุภาคยาง แขนงลอยกระจัดกระจายอยู่ในตัวกลางที่เรียกว่าเซรัม (serum) ในน้ำยางมีส่วนของสารโปรตีน (ตารางที่ 2.1) ส่วนหนึ่งของสารโปรตีนนี้ จะเคลือบอยู่รอบผิวของอนุภาคยาง เปลือก ห่อหุ้มอนุภาคไว้ (รูปที่ 2.2) ชั้นห่อหุ้มนี้มีความสำคัญต่อสถานะความคงตัว เพราะชั้นโปรตีนนี้ป้องกันไม่ให้เกิดอนุภาคยางรวมกัน



รูปที่ 2.2 แสดงสถานะการเป็นสารแขวนลอยของน้ำยางสด⁽²⁾

นอกจากนั้นโปรตีนจะห่อหุ้มทำหน้าที่รักษาสถานะการเป็นของเหลวให้น้ำยางแล้วในชั้นโปรตีน ยังมีอนุมูลลบของคาร์บอกซีเลต (carboxylate $R.COO^-$) ซึ่งก่อให้เกิดการผลักรันระหว่างอนุภาคยาง นั่นคือน้ำยางคงสภาพเป็นของเหลวอยู่ได้ด้วยปัจจัยสำคัญ 2 ประการ คือ ชั้นโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยาง และอนุมูลลบของคาร์บอกซีเลต

การเสีสภาพจากการเป็นของเหลวของน้ำยาง จะเกิดขึ้นเมื่อมีการทำลายปัจจัยสำคัญทั้งสองดังกล่าวข้างต้น เช่น การสูญเสียน้ำ (dehydrated) ในชั้นของโปรตีน การทำลายอนุมูลลบของคาร์บอกซีเลต สภาพที่น้ำยางถูกกระทบกระเทือนดังกล่าวนี้ จะทำให้อนุภาคยางเกิดการรวมตัวกันจับเป็นก้อนยาง เรียกว่า โคแอกกูลัม (coagulum) แยกจากส่วนของเซรุ่ม (รูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 แสดงน้ำยางเสีสภาพจับเป็นก้อนยาง⁽²⁾

3. การเสถียรภาพของน้ำยาง (destability)⁽⁴⁾

น้ำยางเมื่อเกิดการเสถียรภาพจะทำให้เกิดการจับตัวและแยกตัวออกจากน้ำ ลักษณะของการเสถียรภาพของน้ำยางที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

1. เกิดการรวมตัวของอนุภาคของยางอย่างรวดเร็วแล้วแยกตัวออกจากน้ำที่เป็นเซรัมที่มีลักษณะใส ซึ่งเรียกว่า โคแอกูเลชัน (coagulation) ตัวอย่าง เช่นการจับตัวของน้ำยางด้วยกรดแก่ ของการทำยางแผ่นจากน้ำยางธรรมชาติ

2. การเกิดการจับตัวของน้ำยางในลักษณะที่น้ำยางเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นของแข็งอย่างช้า ๆ และได้ของแข็งที่มีปริมาตรเท่าเดิม ลักษณะของยางที่เป็นแบบเจล (gel) ซึ่งเราเรียกว่า เจลเลชัน (gelation) ปรากฏการณ์ที่ตามมาจากการจับตัวด้วยวิธีนี้คือ การหดตัวของยางที่บีบเอาเซรัมออกจากยางซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าซินเนอริซิส (syneresis) ทำให้น้ำยางที่ได้หดตัวลงได้ ตัวอย่างการเกิดการจับตัวแบบนี้คือกระบวนการทำฟองน้ำแบบเจล ซึ่งการทำผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม (dipping) ซึ่งจะเห็นว่าฟองน้ำที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าบัพิมพ์เสมอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำที่อยู่ในยาง

3. การเกิดการจับตัวของอนุภาคยางที่เป็นเม็ดเล็ก ๆ ที่ยังกระจายอยู่ในน้ำเซรัมที่ขุ่นแบบ milky solution ซึ่งเราเรียกการจับตัวของยางแบบนี้ว่าฟลอคคูเลชัน (flocculation) เนื่องจากการจับตัวแบบนี้ได้ยางที่จับเป็นลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ ดังนั้นบางครั้งเราก็เรียกการจับตัวของยางแบบนี้ว่า micro coagulation

สาเหตุที่ทำให้น้ำยางเกิดการเสถียรภาพ

การเสถียรภาพ ของน้ำยางเกิดขึ้นได้ 2 สาเหตุใหญ่ ๆ

1) เกิดขึ้นเนื่องจากผลทางกายภาพ ซึ่งสาเหตุนี้อาจเกิดเนื่องจาก

1.1 สภาพอากาศ

1.1.1 ความเย็น ปกติความเย็นจะไม่มีผลต่อเสถียรภาพของน้ำยางจนกระทั่งถึงจุดเยือกแข็งของน้ำ เช่น ในกรณีอากาศเย็นมาก ๆ (สาเหตุนี้ในเมืองไทยไม่มี) อย่างไรก็ดี เมื่อ น้ำยางถูกเก็บไว้ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำจะทำให้ น้ำจับตัวเป็นน้ำแข็ง แยกตัวออกจากอนุภาคของยาง ทำให้อนุภาคของยางถูกผลัดให้รวมตัวกระจายอยู่ในปริมาณของน้ำที่น้อยลงจะทำให้การกระทบกันของอนุภาคยางมีมากขึ้นเป็นผลให้น้ำยางรวมตัวเป็นก้อนได้

1.1.2 ความร้อน ความร้อนทำให้อุณหภูมิของยางสูงขึ้นซึ่งอุณหภูมิของยางสูงขึ้นไม่เป็นผลต่อเสถียรภาพของน้ำยาง จนกระทั่งถึงจุดเดือดของน้ำ หรือใน

กรณีที่มีสารพวก non-ionic stabilizer ซึ่งเมื่ออุณหภูมิถึงจุด cloud point จะทำให้น้ำยางเสียเสถียรภาพได้

1.2 ผลจากการกระทบกันทางกล การเกิดแรงเฉือน (shear stress) รวมทั้งการปั่นป่วน เป็นผลทำให้เกิดการกระทบกันของอนุภาคยาง เมื่อบ่อย ๆ เข้าจะทำให้แรงในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นในอนุภาคยางเรื่อย ๆ จนทำให้เกิดเสียเสถียรภาพขึ้น

1.3 การระเหยน้ำ

การระเหยน้ำออกไม่ได้เป็นผลทำให้อนุภาคของยางเสียเสถียรภาพโดยตรง แต่การระเหยน้ำออกมากจนทำให้อนุภาคของยางถูกอัดอยู่ในน้ำที่มีปริมาณน้อย ระยะห่างระหว่างอนุภาคของยางมีน้อยมากจนทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคยางขึ้น แยกแผ่นหรือชั้นของยางออกจากน้ำ

1.4 อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้า

เนื่องจากอนุภาคของยางมีประจุลบ อยู่รอบตัวของมัน ถ้าเอาขั้วบวกใส่เข้าไปในน้ำยาง อนุภาคยางจะวิ่งเข้าไปหาขั้วไฟฟ้าบวก ถ้าประจุให้แล้วตัวเองเป็นกลางทำให้เกิดการรวมตัวของน้ำยางได้

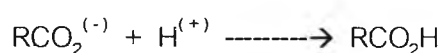
2) สาเหตุจากสารเคมี

สารเคมีที่ทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคยาง ทำให้น้ำยางจับตัวแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

2.1 สารเคมีที่ทำให้น้ำยางจับตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากสารเคมีทำปฏิกิริยาโดยตรงกับอิเล็กตรอนที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคยาง เช่นการเติมสารเคมีชนิดที่เป็นกรดลงในน้ำยาง สารเคมีกลุ่มนี้แบ่งได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ ดังนี้

2.1.1 กรดแก่

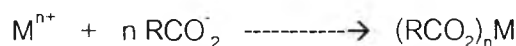
กรดแก่ได้แก่สารใด ๆ ที่แตกตัวให้อนุมูลไฮโดรเจน ซึ่งอนุมูลนี้จะทำปฏิกิริยากับอนุมูลคาร์บอกซิเลตที่มีอยู่รอบ ๆ น้ำยาง มีผลทำให้เกิดเป็นกรดไขมัน ซึ่งไม่ละลายน้ำเป็นผลให้ชั้นของอนุมูลประจุที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคของยางแฟบลง เกิดการจับตัวของอนุภาคของยางเป็นก้อนอย่างรวดเร็ว



ในกรณีของน้ำยางที่มีประจุบวก การเติมกรดลงไปเป็นการเสริมสภาพของเสถียรภาพให้กับน้ำยาง ในกรณีจะใช้เติมสารพวกที่เป็นด่างลงในน้ำยางช่วยในการจับตัวของน้ำยาง เช่น กรณีการจับตัวของน้ำยางด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำยางสังเคราะห์

2.1.2 อนุมูลโลหะ

อนุมูลโลหะมักจะทำให้ยางที่มีประจุลบเสียเสถียรภาพได้ อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา 2 แบบ คือ หนึ่งเกิดจากอนุมูลโลหะกับอนุมูลคาร์บอกซิเลต ทำให้เกิดเป็นสบู่ของโลหะหนัก (metallic soaps) ไม่ละลายน้ำ และไม่เกิดการไอออไนซ์ (ionize)



ซึ่งได้โลหะไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ และอาจเกิดตะกอนในน้ำได้

ทั้ง 2 ปฏิกิริยามีผลทำให้น้ำยางเสียเสถียรภาพได้ ปฏิกิริยาแรกมีผลทำให้ชั้นของประจุรอบ ๆ อนุภาคยางเสียไป อีกปฏิกิริยาหนึ่งดูเดอสารรักษาเสถียรภาพของน้ำยาง (stabilizer) ตกตะกอนลงมาและยังทำให้เกิดการตกตะกอนร่วมกันของอนุภาคยางกับโลหะได้อีกด้วย

2.2 สารเคมีที่ทำให้น้ำยางจับตัวที่ไวต่อความร้อน

สารเคมีที่ทำให้น้ำยางจับตัวเมื่อถูกความร้อน เป็นสารที่ไม่มีผลต่อเสถียรภาพของน้ำยางที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้น้ำยางจับตัวอย่างรวดเร็ว ในกรณีที่อุณหภูมิเริ่มถึงจุดที่น้ำยางจับตัว สารเคมีในกลุ่มนี้จะมีผลทำให้น้ำยางจับตัวแบบเจล (gelation) เพราะว่าการรวมตัวกระจายออกไปอย่างสม่ำเสมอ ทั้งทั้งหมดของน้ำยาง และการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปที่ละน้อย

2.3 สารเคมีที่ทำให้น้ำยางจับตัวอย่างช้า ๆ

สารเคมีนี้เป็นสารที่เมื่อเติมลงไปใต้น้ำยางแล้วจะค่อย ๆ เกิดปฏิกิริยาและมีผลทำให้น้ำยางเสียเสถียรภาพไปอย่างช้า ๆ และรวมตัวกันเป็นแบบเจล สารเคมีที่นิยมใช้ในระบับนี้มี

- เกลือของกรดไฮโดรฟลูออโรซิลิกแอซิด (salts of hydrofluorosilicic acid)
- เกลือของกรดฟลูออโรอื่น ๆ (salts of fluoro acids)
- และสารอื่น ๆ ที่เกิดปฏิกิริยาช้า ๆ ได้

4) สารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง (preservatives)

เนื่องจากในน้ำยางสด มีส่วนประกอบหลายชนิด ที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ ได้แก่ พวกน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส จุลินทรีย์ในอากาศจะลงปะปนในน้ำยาง มีปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงที่ทำให้เกิดกรด กรดทำลายชั้นห่อหุ้มอนุภาคยางทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อน เรียกรวมการจับตัวเป็นก้อนดังนี้ว่า การจับตัวที่เกิดเองตามธรรมชาติ (natural or spontaneous coagulation)

การเกิดจะช้าเร็วเพียงใดขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่นสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความคงตัวของน้ำยาง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อป้องกันน้ำยางจับตัวเป็นก้อนก่อนเวลาที่ต้องการ หรือเพื่อให้น้ำยางอยู่ในสภาพของเหลวตามต้องการ จึงจำเป็นต้องเติมสารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง

4.1 สมบัติของสารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง

สารเคมีที่จะใช้รักษาสภาพน้ำยางควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- มีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์
- ควรมีสภาพเป็นด่างเพื่อส่งเสริมสถานะแขวนลอยให้น้ำยาง
- ทำให้อนุมูลโลหะหนักไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เพราะอนุมูลเหล่านี้จะ

ส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

- สามารถระงับการทำงานของเอนไซม์ ที่ช่วยการเจริญของจุลินทรีย์
- ไม่เป็นพิษต่อคนและต่อคุณภาพของยาง และขจัดได้สะดวก

4.2 ชนิดของสารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง

สารเคมีชนิดแรก ที่พบว่ามีประสิทธิภาพในการรักษาสภาพน้ำยางได้ คือแอมโมเนีย และจนปัจจุบัน แอมโมเนียก็ยังคงเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในการรักษาสภาพน้ำยาง นอกจากแอมโมเนีย สารอื่นที่ใช้รักษาสภาพน้ำยาง ได้แก่ ฟอรัมาดีไฮด์ โซเดียมซัลไฟด์ เป็นต้น

เนื่องจากปัจจุบันได้มีการค้นคว้าวิจัยชนิดของสารเคมี ที่จะใช้รักษาสภาพน้ำยาง และพบว่า มีหลายชนิด ในการเลือกใช้สารเคมีเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ วัตถุประสงค์ของการรักษาสภาพ เช่นจะรักษาสภาพน้ำยางสด เพื่อนำไปแปรรูปเป็นยางดิบชนิดใด ๆ ก็จะต้องเลือกชนิดสารเคมีรักษาสภาพให้เหมาะสม หรือจะเก็บรักษาน้ำยางชั้นไว้ใช้นาน ๆ ก็จะต้องเลือกชนิดสารเคมีให้ถูกต้อง เป็นต้น

2.3 น้ำยางชั้น

น้ำยางชั้นที่ผลิตจำหน่ายทั่วไป อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ น้ำยางชั้นธรรมดาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพกับสารเคมีหรือวิธีการใด ๆ ให้โมเลกุลยางเปลี่ยนแปลงไป ส่วนอีกประเภทหนึ่ง เป็นน้ำยางที่ได้ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยสารเคมี หรือด้วยการฉายรังสีให้โมเลกุลยางเปลี่ยนแปลง ประเภทหลังนี้เรียกว่า น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (prevulcanised or vulcanised latex)

2.3.1 การผลิตน้ำยางข้น

ปกติน้ำยางสดจากสวน จะมีปริมาตรเนื้อยางแห้งเพียง 25-45 เปอร์เซ็นต์ นอกนั้นส่วนใหญ่เป็นน้ำ และมีสารของแข็งที่ไม่ใช่ยางบ้าง ฉะนั้นหากต้องการนำน้ำยางไปใช้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ไกลจากสวนยาง หรือจากแหล่งยางธรรมชาติ จึงเป็นการไม่สะดวก นอกจากนั้นสารต่าง ๆ บางอย่างที่อยู่ในน้ำยางยังอาจมีผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางไม่ดีอีกด้วย ด้วยเหตุผลเหล่านี้ คือที่มาของการทำน้ำยางสดให้เป็นน้ำยางข้น คือมีปริมาณเนื้อยางแห้งเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่มีความเหมาะสมกับการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

วิธีการผลิตน้ำยางข้นที่ทำในเชิงการค้ามี 3 วิธี คือ วิธีระเหยน้ำ (evaporation) วิธีทำให้เกิดครีม (creaming) วิธีเหวี่ยงแยก (centrifuging) และอีกวิธีหนึ่งซึ่งไม่สามารถทำการค้าได้เพราะไม่สะดวกและลงทุนสูง คือ การใช้กระแสไฟฟ้าแยก (electrodecantation)

1. วิธีการระเหยน้ำ

น้ำยางสดจากสวนก่อนการทำให้ข้นโดยวิธีการระเหยน้ำจะต้องเติมสารที่ทำให้ยางคงตัว (stabilizers) เช่น potassium soap ก่อนการระเหยน้ำออกจากน้ำยางจะเกิดขึ้นภายในถัง หรือภาชนะที่หมุนได้รอบ ๆ แกน ตามแนวนอน และถังนี้ถูกให้ความร้อนรอบ ๆ ถึงการระเหยน้ำจากน้ำยางจะทำให้ได้น้ำยางข้นซึ่งมีส่วนประกอบโดยประมาณ คือส่วนของของแข็งทั้งหมด 75 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเนื้อยาง 60 เปอร์เซ็นต์ caustic potash 1.5 เปอร์เซ็นต์ และสารพวกช่วยให้น้ำยางคงตัวกับสารโปรตีน ฯลฯ อีก 13.5 เปอร์เซ็นต์ น้ำยางข้นที่ได้จากวิธีการนี้มีความคงสภาพเป็นน้ำยางดีมาก จึงเหมาะสำหรับการขนย้ายน้ำยางไปไกล ๆ และเหมาะกับการนำไปทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ต้องใส่พวกสารเติม (filler) จำนวนมากตัวอย่างเช่น การผลิตกาว

2. วิธีการทำให้เกิดครีม

น้ำยางธรรมชาติไม่ว่าอยู่ในสถานะสดหรือสถานะใส่สารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง (preserved latex) ประกอบด้วยระบบของสารละลายคอลลอยด์แบบอิมัลชัน (colloidal emulsion) ของอนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เรียกว่าเซรุ่ม อนุภาคเล็ก ๆ ของยางที่แขวนลอยอยู่ในเซรุ่มแสดงการเคลื่อนไหวแบบ Brownian (คือเคลื่อนไหวในทุกทิศทางไม่เป็นระเบียบ) และการเคลื่อนไหวของอนุภาคยางในน้ำยางสดจะรวดเร็วว่าการเคลื่อนไหวของอนุภาคยางในน้ำยางที่ใส่สารเคมีรักษาสภาพ เนื่องจากอนุภาคของยางเบากว่าเซรุ่ม ดังนั้นอนุภาคยางเหล่านี้จึงมีแนวโน้มลอยตัวขึ้นสู่มิวน้ำของน้ำยางได้ การแยกตัวของอนุภาคยางเกิดเป็นลักษณะครีมอยู่ผิวหน้าน้ำยางจะรวดเร็วขึ้นถ้าอนุภาคยางมีลักษณะใหญ่ขึ้น และอนุภาคยางจะใหญ่โตขึ้น

เมื่อเติมสารพวกคอลลอยด์ที่จะไปทำหน้าที่พอกหรือเคลือบผิวอนุภาคยาง สารนี้จึงเรียกว่าเป็นตัวทำให้เกิดครีม creaming agent ตัวอย่างสารพวกนี้ได้แก่ sodium alginate, locust bean gum, gum tragacanth เป็นต้น การผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีทำให้เกิดครีมยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลาแต่เป็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับวิธีการนี้ คือสามารถทำให้น้ำยางข้นที่ผลิตได้โดยวิธีนี้มีความบริสุทธิ์และมีโปรตีนน้อยลงเมื่อผ่านกรรมวิธีทำครีมซ้ำหลาย ๆ ครั้ง

3. วิธีการเหวี่ยงแยก

วิธีการเหวี่ยงแยก เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการผลิตน้ำยางข้น สำหรับในประเทศไทยปัจจุบันทำการผลิตน้ำยางข้น โดยวิธีการเหวี่ยงแยกเพียงอย่างเดียว โรงงานผลิตน้ำยางข้นจะต้องหาน้ำยางสดจากสวน การรวบรวมน้ำยางสดจากสวนโดยวิธีใด ๆ ก็ตาม ข้อสำคัญที่ต้องคำนึงถึงและถือปฏิบัติ คือ การรักษาความสะอาด การใช้สารเคมีรักษาสภาพน้ำยางอย่างถูกต้องและเพียงพอ ปกติจะใช้แอมโมเนียอย่างเดียว หรือร่วมกับสารช่วย เช่น tetramethyl thiuram disulphide (TMTD) กับ zinc oxide (ZnO) ควรนำน้ำยางที่รวบรวมได้เข้ากระบวนการผลิตให้เร็วที่สุด จึงจะได้ผลผลิตที่มีคุณภาพดี เมื่อนำน้ำยางเข้าโรงงานแล้วจะถ่ายลงถังรวม เก็บตัวอย่างตรวจสอบปริมาณเนื้อยางแห้ง และปริมาณกรดไขมันได้ ตลอดจนปริมาณธาตุแมกนีเซียม เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับสมบัติน้ำยางสดให้เหมาะสมต่อไป ในทางปฏิบัติทางโรงงานจะปล่อยให้ น้ำยางตกตะกอนธาตุแมกนีเซียมแล้วเติมด้วย diammonium hydrogen phosphate (DAHP) ใช้เวลา 1 วัน ในการตกตะกอนดังกล่าว ต่อจากนั้นจะใส่น้ำยางออกจากถังเก็บเข้าเครื่องเหวี่ยง ซึ่งน้ำยางที่ออกจากเครื่องเหวี่ยงสวนหนึ่ง คือน้ำยางข้นที่ต้องการ และอีกสวนหนึ่ง คือ หางน้ำยาง ซึ่งยังคงมีปริมาณเนื้อยางอยู่บ้าง ประมาณไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ หางน้ำยางนี้ถูกนำไปผลิตเป็นยางสกิม

4. วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า

อนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในเซรุ่มจะถูกห่อหุ้มด้วยคาร์บอกซิเลตไอออน (carboxylate ion) ที่มีประจุลบ ดังนั้นจึงสามารถที่จะอาศัยไฟฟ้าเข้ามาช่วยในการแยกส่วนของเนื้อยางจากสวนของเซรุ่มได้ โดยวิธีการจุ่มไฟฟ้าที่มีขั้วบวก ลงในน้ำยางที่เติมสารเคมีช่วยทำให้น้ำยางคงตัวไว้แล้ว อนุภาคยางจะค่อย ๆ เคลื่อนที่ไปรวมอยู่ที่ขั้วบวก และลอยตัวสูงขึ้นสู่ผิวหน้าของน้ำยาง เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคยางต่ำกว่าความหนาแน่นของเซรุ่ม อย่างไรก็ตามการทำน้ำยางข้นโดยวิธีนี้ยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่เป็นที่นิยม

2.3.2 การรักษาสภาพน้ำยางข้น

น้ำยางข้นที่ผลิตได้จะต้องเติม หรือปรับแอมโมเนียรักษาสภาพน้ำยาง ปกติมีวิธีการรักษาน้ำยางข้น 2 วิธี คือ

1. รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียมาก ประมาณ 0.7 เปอร์เซ็นต์ (ต่อน้ำหนักน้ำยาง) เรียกน้ำยางชนิดนี้ว่า HA (high ammonia)
2. รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียน้อย ประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์ (ต่อน้ำหนักน้ำยาง) และมีสารช่วยบางชนิด เช่น TMTD/ZnO เรียกน้ำยางชนิดนี้ว่า LA (low ammonia)

สมบัติน้ำยางข้น

สมบัติที่ใช้ระบุน้ำยางข้น คือ

1. ปริมาณสารของแข็งทั้งหมด (total solid content, TSC)
2. ปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC)
3. สภาพด่าง (alkalinity, %NH₃)
4. เวลาความคงตัวต่อเครื่องมือกล (mechanical stability time, MST)
5. จำนวนกรดไขมันระเหยได้ (volatile fatty acid number, VFA No.)
6. จำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide number, KOH No.)
7. ปริมาณก้อนยางจับตัว (coagulum content)
8. ปริมาณตะกอน (sludge content)
9. กลิ่น และสี

วิธีการทดสอบน้ำยางข้นโดยทั่วไป จะยึดหลักการตามวิธีที่องค์การมาตรฐานระหว่างประเทศกำหนดไว้ ชี้แจงจำกัดสมบัติน้ำยางข้นแสดงไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงการกำหนดขีดจำกัดสมบัติน้ำหนักยางชั้น ที่ผลิตจากวิธีการเหยียงแยก⁽⁵⁾

สมบัติ	ขีดจำกัด		
	ชนิด HA	ชนิด LA	ชนิด XA
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (% ต่ำสุด)	61.5	61.5	61.5
ปริมาณเนื้อยางแห้ง (% ต่ำสุด)	60.0	60.0	60.0
ปริมาณของแข็งที่ไม่ใช่เนื้อยาง (% สูงสุด)	2.0 (ต่ำสุด)	2.0 (สูงสุด)	2.0 (ต่ำสุด)
เวลาความคงตัวต่อเครื่องกล (วินาที,ต่ำสุด)	650.0	650.0	650.0
ปริมาณของโคแอกกูลัม (% สูงสุด)	0.05	0.05	0.05
ปริมาณธาตุทองแดง (มก./กก. ของปริมาณของแข็งทั้งหมด,สูงสุด)	8.0	8.0	8.0
ปริมาณแมงกานีส (มก./กก. ของปริมาณของแข็งทั้งหมด,สูงสุด)	8.0	8.0	8.0
ปริมาณตะกั่ว (%สูงสุด)	0.1	0.1	0.1
จำนวนกรดไขมันระเหยได้ (VFA No., สูงสุด)	ตามที่ตกลงกันระหว่างผู้ผลิตและผู้ใช้แต่ต้องไม่สูงเกินกว่า 0.20		
จำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH No., สูงสุด)	ตามที่ตกลงกันระหว่างผู้ผลิตและผู้ใช้แต่ต้องไม่สูงเกินกว่า 1.0		
การตรวจดูสีด้วยสายตา	ไม่เป็นสีฟ้าหรือสีเทา		
การตรวจดูกลิ่นภายหลังการทำให้เป็นกลางโดยกรดบอริก	ไม่มีกลิ่นเน่าบูด		

2.4 น้ำยางคงรูปหรือน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (prevulcanised latex or vulcanised latex)⁽⁴⁾

น้ำยางคงรูปหรือน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ เป็นน้ำยางที่โมเลกุลยางได้เกิดพันธะเคมีอันเนื่องมาจากการให้ความร้อนกับน้ำยางที่ได้ผสมสารเคมีที่จำเป็นไว้แล้ว

2.4.1 วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์

วิธีการเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ ประกอบด้วยการนำน้ำยางข้น หรือน้ำยางสด มาผสมกับสารเคมีในระบบทำให้อย่างคงรูป (vulcanising system) ซึ่งประกอบด้วยซิงค์ออกไซด์ สารเร่งปฏิกิริยา เช่น zinc diethyl dithiocarbamate (ZDC) และซัลเฟอร์ พร้อมทั้งสารระบบช่วย ความคงตัว

1. น้ำยางข้น (concentrated latex) ความนิยมใช้น้ำยางข้น 60% DRC (dry rubber content) ที่ผลิตโดยวิธีการหมุนเหวี่ยง (centrifuging) มีมากกว่าน้ำยางข้นที่ผลิตโดยวิธี ทำให้เกิดครีมน้ำ (creaming) หรือโดยวิธีระเหยน้ำ (evaporating) เพราะน้ำยางข้น 2 ชนิดหลังหาซื้อได้ยาก มีราคาแพงและไม่มีซื้อได้เปรียบไปกว่าน้ำยางข้นจากการเหวี่ยงแยก น้ำยางที่ใช้เตรียมฟิล์มเป็นน้ำยางที่ทำให้คงรูปแล้ว (pre-vulcanized latex) ข้อดีของน้ำยางคงรูปคือมีความสะดวกที่จะทำให้น้ำยางปริมาณหนึ่ง ๆ คงรูปมากกว่าที่จะทำให้น้ำยางบนแบบพิมพ์แต่ละอันคงรูป และไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีอื่น ๆ ยกเว้นอาจจะต้องเติมสารป้องกันยางเสื่อม อย่างไรก็ตามฟิล์มยางที่ได้จากน้ำยางคงรูปจะมีความแข็งแรงต่อการดึงยางจนขาด (tensile strength) ความยาวที่ดึงยางจนขาด (elongation at break) ต่ำกว่าฟิล์มยางที่ทำให้คงรูปภายหลังที่เป็นฟิล์มแล้ว (post-vulcanized film) จุดอ่อนดังกล่าวของน้ำยางคงรูปเนื่องมาจากขาดการเชื่อมอย่างสมบูรณ์ระหว่างต่างอนุภาคยางเพราะโมเลกุลยางในแต่ละอนุภาคจะเกิดพันธะเคมีกันก่อนแล้ว ดังนั้นในการที่จะเลือกใช้น้ำยางคงรูปควรพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการลดค่าใช้จ่ายและความสะดวกกับสมบัติบางประการของยางที่ได้ วิธีการที่ใช้คือทำให้น้ำยางที่ได้ผสมสารเคมีไว้แล้วได้คงรูปโดยระดับหนึ่ง และทำให้น้ำยางคงรูปอย่างสมบูรณ์ใสรายหลังที่เป็นฟิล์มแล้ว

ชนิดของน้ำยางข้นที่ใช้ทำฟิล์ม สามารถใช้ได้ทั้ง 2 ชนิดคือชนิดรักษาด้วยแอมโมเนียมาก (HA, high ammonia) และชนิดที่รักษาด้วยแอมโมเนียน้อยร่วมกับสารช่วย (LA, low ammonia) สำหรับชนิดแรกต้องไล่แอมโมเนียให้เหลือประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักของน้ำยาง) ก่อนการใช้ ส่วนน้ำยางที่รักษาด้วยแอมโมเนียน้อยอาจไม่จำเป็นต้องลดแอมโมเนียและน้ำยางชนิดหลังที่นิยมใช้คือ ชนิด LA-TZ (low ammonia- tetramethyl thiuram disulphide/zinc oxide) งานวิจัยนี้ใช้น้ำยางชนิดแอมโมเนียน้อย

2. สารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) สารเพิ่มความคงตัวที่ใช้โดยทั่วไปเป็นด่างและสบู่ของกรดไขมัน โดยใช้ด่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเหมาะกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์เพราะอนุมูล โพแทสเซียมมีผลต่อการลดความคงตัวของน้ำยางน้อยกว่าอนุมูลโซเดียม ปริมาณการใช้ด่างอยู่ระหว่าง 0.2-0.5 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่เพิ่มความคงตัวให้น้ำยางโดยการช่วยรักษาความเป็นด่างของน้ำยางเพราะแอมโมเนียน้อยอาจจะหายไปบ้าง นอก

จากนี้ยังช่วยลดการเกิดครีมีที่ผิวน้ำยางอีกด้วย ส่วนสารพวกสบู่ของกรดไขมันจะใช้ชนิดที่โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน 8-12 อะตอม เช่น โพแทสเซียมแคปริเลต (potassium caprylate, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOK}$) และโพแทสเซียมลอเรต (potassium laurate, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOK}$) สบู่ของกรดไขมันจะช่วยให้ยางมีความคงตัวต่อเครื่องมือกล (mechanical stability) ดีขึ้น แต่ไม่ควรใส่สารนี้มากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดฟองได้ โดยทั่วไปใช้ประมาณ 0.2-0.4 ส่วนต่อน้ำยาง 100 ส่วน

3. สารในระบบการคงรูป (vulcanizing system) ใช้ระบบการคงรูปที่ประกอบด้วยซัลเฟอร์เป็นสารทำใหยางคงรูป (vulcanizing agent) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกระตุ้น (activator) และใช้สารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป (accelerator) ชนิดเดียวหรือสองชนิดขึ้นไปสามารถจะใช้สารเร่งชนิดไวต่อปฏิกิริยา (ultra accelerator) เช่นกลุ่ม dithiocarbamate ได้โดยไม่ต้องกังวลเรื่องปัญหายางเกิดคงรูปก่อนกำหนด เช่นที่เกิดในกรณีใช้กับยางแห้ง

ปริมาณการใช้ซัลเฟอร์อยู่ระหว่าง 0.3-1.5 ส่วนต่อน้ำยาง 100 ส่วน แปรตามอัตราความเร็วที่จะเกิดการคงรูป และโมดูลัส (modulus) ของยางที่ต้องการ และขึ้นกับปริมาณสารอื่น ๆ ที่เติมลงในน้ำยางด้วย หากต้องการให้ฟิล์มทนความร้อนได้ดีที่สุดต้องใช้ซัลเฟอร์ในปริมาณต่ำที่สุด ซึ่งปริมาณที่ใช้นี้ต้องสอดคล้องกับโมดูลัสที่ต้องการด้วย ในการใช้ซัลเฟอร์ปริมาณต่ำต้องใช้ร่วมกับสารเร่งชนิดไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เพื่อให้มีอัตราเร็วของการเกิดยางคงรูป (rate of vulcanization) เพียงพอ

ปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นอยู่ระหว่าง 0.1-2.0 ส่วนต่อน้ำยาง 100 ส่วน การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในช่วง 0.1-2.0 ส่วนต่อน้ำยาง 100 ส่วน ทำใหยางมีโมดูลัสสูงขึ้น ปกติถ้าต้องการให้ยางมีความโปร่งแสงต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณต่ำประมาณ 0.25 ส่วนต่อน้ำยาง 100 ส่วน

สารเร่งปฏิกิริยายางคงรูปที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc diethyl dithiocarbamate, ZEDC or ZDC) ปริมาณการใช้อยู่ระหว่าง 0.3-1.5 ส่วนต่อน้ำยาง 100 ส่วน ZEDC จะเพิ่มอัตราเร็วของการคงรูปขึ้นอย่างเด่นชัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส โดยที่ ZEDC จะไม่ทำให้น้ำยางเกิดการคงรูปก่อน (pre-vulcanization) ถ้าเก็บน้ำยางที่ผสม ZEDC ไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า ดังนั้นจึงทำให้สามารถใช้น้ำยางที่ผสม ZEDC ในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันได้ การใช้ ZEDC ในยางที่ไม่เติมสารเพิ่ม (filler) จะได้อย่างที่มีสมบัติความต้านทานแรงดึงจนขาดและความยาวที่ยางยืดจนขาดดีเยี่ยม โมดูลัสปานกลาง

หากต้องการยางที่มีโมดูลัสสูงขึ้นไปให้ ZEDC ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยายางคงรูปกลุ่มไทอาโซล (thiazole) เช่น ซิงค์เมอแคปโทเบนซไทอาโซล (zinc-mercaptobenzthiazole, ZMBT) การใช้ ZEDC ร่วมกับ ZMBT นอกจากทำให้โมดูลัสสูงขึ้นไปแล้ว ยังมีผลในการเสริมประสิทธิภาพการคงรูปให้เร็วขึ้นมากกว่าการใช้แต่ละตัวตามลำพัง

สารกลุ่มไดโทไธคาร์บาเมตตัวอื่น ๆ ซึ่งนำมาใช้แทน ZEDC เพื่อให้ได้สมบัติบางอย่าง เช่น ซิงค์ไดบิวทิลไดโทไธคาร์บาเมต (zinc dibutyl dithiocarbamate, ZBDC) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูปที่มีปฏิกิริยาเร็วกว่า ZEDC จึงง่ายต่อการที่ยางจะเกิดการคงรูปขึ้นก่อนอย่างช้า ๆ ขณะบ่มน้ำยางผสมสารเคมีไว้ที่อุณหภูมิห้อง

สารป้องกันยางเสื่อมเนื่องจากออกซิเดชัน (antioxidant) สารที่ใช้ป้องกันยางเสื่อมเพื่อยืดอายุการใช้งานหรือการเก็บรักษามี 2 กลุ่ม คือ เอมีน/อนุพันธ์ของเอมีน (amine/amine derivative) และฟีนอล/อนุพันธ์ของฟีนอล (phenol/phenol derivative) กลุ่มแรกมีข้อเสียคือทำให้ยางเปลี่ยนสี (staining) ส่วนกลุ่มที่สองไม่ทำให้ยางเปลี่ยนสี (non-staining) แต่จะมีประสิทธิภาพด้อยกว่ากลุ่มแรก ความนิยมในการผลิตถุงมือยางนิยมใช้สารกลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอลมากกว่าปริมาณการใช้ประมาณ 1 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน

สารทุกกลุ่มดังกล่าวข้างต้นเมื่อจะใช้ผสมกับน้ำยางจะต้องเตรียมให้อยู่ในสถานะของเหลว เช่น สารละลาย สารแขวนลอย หรืออิมัลชันเสียก่อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารที่จะใช้ว่าจะสามารถเตรียมให้อยู่ในสถานะใดได้

2.4.2 การผสมสารเคมีกับน้ำยาง

ข้อที่ควรนำมาพิจารณาในการผสมสารเคมีต่างๆ กับน้ำยางคือ ควรตรวจสอบสถานะของน้ำยางและสารเคมีก่อนการผสมและหลังผสมเสร็จแล้ว (latex compounded) นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องเรียงลำดับการผสมสารกลุ่มต่างๆ ได้อย่างถูกต้องอีกด้วย ข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์มากในการควบคุมกระบวนการผลิตตลอดจนคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับ

สารเคมีที่ได้เตรียมให้อยู่ในสถานะต่างๆ คือสารละลาย หรือสารแขวนลอย หรืออิมัลชันแล้วนั้น ควรต้องมีการตรวจสอบความเข้มข้น คือ ตรวจสอบว่ามีปริมาณของเนื้อสารเคมีถูกต้องหรือไม่ และขนาดของอนุภาคมีความละเอียดพอเพียงหรือไม่ (ปกติควรมีความละเอียดต่ำกว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคยาง คือต่ำกว่า 5 ไมโครเมตร ตลอดจนถึงต้องตรวจสอบความเป็นกรดต่างของสารเหล่านั้น เพื่อจะช่วยควบคุมเกี่ยวกับสถานะความคงตัวของน้ำยางเมื่อเติมสารเหล่านี้ลงไป หลักพิจารณาพื้นฐาน คือสถานะความเป็นกรดจะมีแนวโน้มให้น้ำยางเสียคือจับตัวง่าย และสถานะเป็นด่างมากเกินไปน้ำยางมีความคงตัวมากไปก็จะมีปัญหา คือน้ำยางไม่ยอมฟอร์มยางเกาะแบบพิมพ์ในขณะที่ถึงขั้นตอนที่ต้องการให้ยางจับพิมพ์ เป็นต้น

ลำดับการเติมสารเคมีผสมกับน้ำยาง

ข้อแนะนำลำดับการเติมสารเคมี คือ

1. เติมน้ำให้ได้ความเข้มข้นของเนื้อยางที่ต้องการ
2. เติมสารกลุ่มช่วยให้ยางคงตัว (stabilizer)
3. เติมสารกลุ่มทำหน้าที่ให้ยางคงรูป (vulcanizing system)*
4. เติมสารป้องกันยางเสื่อม
5. เติมสารสี (pigment) (ถ้าต้องการ)

* ควรเติม ZnO หลังสุดเพื่อกันน้ำยางหนืด (zinc oxide thickening)

แต่ละกลุ่มหรือแต่ละอย่างของสารที่เติมลงไปในน้ำยางจะต้องผสมเข้ากับน้ำยางเป็นอย่างดีเสียก่อนจึงเติมสารตัวต่อไปลงไป ในการกวนผสมน้ำยางจะใช้เครื่องกวนติดใบกวนใหญ่ ความเร็วของการกวนประมาณ 5-60 รอบ/นาที

2.4.3 ภาชนะบรรจุน้ำยางผสม

ภาชนะที่จะใช้บรรจุน้ำยางผสมควรทำด้วยสแตนเลส หรือ epoxy-lined mild steel หรือ glass-fiber reinforced plastics เป็นต้น ไม่แนะนำให้ใช้ภาชนะที่ทำด้วยอะลูมิเนียม และไม่ควรใช้ทองเหลืองในส่วนใดๆ ของภาชนะ

ขนาดของภาชนะขึ้นอยู่กับขนาดการผลิตและความถี่ของการผสมน้ำยางรูปร่างของภาชนะควรเป็นทรงกระบอกฉนวน คือ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่าความลึก ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการล้างทำความสะอาดภาชนะ และมีฝาปิดได้สนิท

2.4.4 การกวนและระยะเวลากวนน้ำยางผสม

ภาชนะบรรจุน้ำยางควรมีอุปกรณ์ที่ใช้กวนน้ำยางซึ่งควบคุมความเร็วการกวนได้ในช่วง 5-60 รอบต่อนาที ใบพัดกวนควรมีขนาดใหญ่ (เช่น 0.75 x เส้นผ่าศูนย์กลางของภาชนะ) เพื่อให้ได้การกวนในช่วงความเร็วต่ำอย่างมีประสิทธิภาพ แกนของใบพัดควรเป็นส่วนที่จะต้องสัมผัสกับน้ำยาง ต้องทำจากสแตนเลส ถ้าหากภาชนะมีความลึก ควรมีใบพัดกวนมากกว่า 1 ชุด เพื่อให้กวนน้ำยางได้สม่ำเสมอ

ระยะเวลาที่จะกวนน้ำยางผสมกับสารเคมีขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบกวนและปริมาณของน้ำยางผสม อย่างไรก็ตามควรกวนน้ำยางให้น้อยที่สุด แต่ขณะเดียวกันการกวนต้องพอเพียงที่จะทำให้น้ำยางมีความสม่ำเสมออย่างทั่วถึง ระยะเวลากวนผสมอาจประมาณ 30-60 นาที ถ้าจะเก็บน้ำยางผสมไว้เพื่อการบ่ม หรือเพื่อทำให้เกิดพรีวัลคาไนซ์ก็ควรกวนน้ำยางต่อไปซึ่งอาจกวนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วต่ำ (5-10 รอบต่อนาที) หรือกวนเป็นครั้งคราวด้วยความเร็วสูงเล็กน้อย (20-30 รอบต่อนาที) ทั้งนี้เพื่อป้องกันสารเคมีต่างๆ ตกตะกอนลงก้นภาชนะ

จุดประสงค์ของการกวนน้ำยางด้วยความเร็วต่ำและจำกัดระยะเวลา ก็เพื่อป้องกันปัญหาการเกิดน้ำยางผสมเสียความคงตัว

2.4.5 การกำจัดฟองอากาศ

ในขณะที่กวนผสมน้ำยางหลักเลี้ยงไม่ได้ที่จะมีฟองอากาศเกิดขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งฟองอากาศจะยิ่งเกิดมากถ้ากวนน้ำยางด้วยความเร็วสูง การเติมสบู่ของกรดไขมันในปริมาณมากก็จะก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กๆ ซึ่งยากแก่การกำจัดออกจากน้ำยาง อย่างไรก็ตามเมื่อนำน้ำยางไปใช้งานจะต้องกำจัดฟองอากาศออกเสียก่อน โดยปกติแล้วฟองอากาศมักจะลอยสูผิวหน้า เมื่อดึงทิ้งไว้ การกวนน้ำยางเบาๆ ขณะเก็บน้ำยางจะช่วยเร่งการลอยของฟองอากาศสูผิวหน้าน้ำยาง แต่ถ้าการกวนเร็วและมากเกินไปก็จะกลับทำให้ฟองอากาศลอยสูผิวหน้าช้าลง นอกจากนี้อัตราการเคลื่อนที่ของฟองอากาศสูผิวหน้ายังขึ้นอยู่กับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ และ ความหนืดของน้ำยาง ถ้าฟองอากาศมีขนาดเล็กมากหรือถ้าน้ำยางมีความหนืดสูง อาจต้องกำจัดฟองอากาศโดยใช้ระบบสูญญากาศ โดยวิธีการลดความดันบรรยากาศที่เหนือผิวหน้าน้ำยางลงเหลือประมาณ 200 มิลลิเมตรปรอท จะช่วยกำจัดฟองอากาศออกได้ภายในเวลา 12-16 ชั่วโมง การลดความดันดังกล่าวมีผลในการเพิ่มขนาดของฟองอากาศลอยสูผิวหน้าได้เร็วขึ้น

2.5 การเตรียมฟิล์มโดยวิธีการจุ่ม

เมื่อบ่มน้ำยางผสมจนได้อายุที่เหมาะสมแล้ว ต่อไปจะเป็นการเตรียมแบบพิมพ์การจุ่ม อบแห้ง ทำให้อย่างคงรูป นำฟิล์มออกจากพิมพ์

2.5.1 การเตรียมพิมพ์

พิมพ์ (former) ที่ใช้ในงานทำผลิตภัณฑ์ด้วยกรรมวิธีจุ่มทำได้จากวัสดุต่าง ๆ เช่น แก้ว aluminium aluminium-alloy ไม้ ปูนพลาสติก และกระเบื้อง (porcelain) เป็นต้น ลักษณะผิวของพิมพ์จะมีผลต่อกระบวนการผลิตและสูตรน้ำยางผสมเป็นอย่างมาก เพราะความหยาบของผิวพิมพ์ จะมีผลต่อการเกาะพิมพ์ของสารช่วยจับตัว (coagulant) และการเกาะพิมพ์ของน้ำยางผสม ถ้าผิวพิมพ์ยิ่งมีความหยาบมากผลกระทบจะยิ่งมาก นอกจากนี้ยังมีผลต่อการแห้งของสารช่วยจับตัว และการฟอร์มยาง (gelling) บนพิมพ์

การทำความสะอาดพิมพ์เป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่ง เพราะพิมพ์สกปรกไม่ว่าจะด้วยสิ่งแปลกปลอมใด ๆ ก็ส่งผลต่อการเกิดจุดบกพร่องหรือตำหนิต่าง ๆ กับแผ่นฟิล์มได้ วิธีปฏิบัติที่ควรทำคือ ก่อนจุ่มพิมพ์ในน้ำยางผสมทุกครั้งจะทำความสะอาดพิมพ์ด้วยด่างหรือกรดอินทรีย์

แล้วต้องล้างพิมพ์ด้วยน้ำสะอาดที่เป็นน้ำอ่อน และอาจมีวิธีการขัดถูสิ่งสกปรกออกจากพิมพ์โดยใช้แปรง เพื่อให้แน่ใจว่าพิมพ์สะอาดปราศจากสิ่งแปลกปลอมทั้งหลายรวมทั้งสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดพิมพ์ พิมพ์ที่สะอาดแล้วจะต้องทำการอบแห้งก่อนการจุ่ม

2.5.2 การจุ่ม (dipping technique)

เทคนิคการจุ่มเพื่อทำผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ นั้นมีหลายวิธี ได้แก่

1. การจุ่มน้ำยางโดยตรง (straight dipping)
2. การจุ่มโดยใช้สารช่วยจับตัว (coagulant dipping)
3. การจุ่มโดยใช้พิมพ์ร้อน (heat sensitive dipping)
4. การจุ่มโดยใช้ขั้วไฟฟ้าช่วย (electrode dipping)

เทคนิคทั้งหมดดังกล่าวนี้ เทคนิคการจุ่มโดยใช้สารช่วยจับตัวจะเป็นที่นิยมและเหมาะสมสำหรับการผลิตถุงมือโดยทั่วไป

เทคนิคการจุ่มโดยใช้สารช่วยจับตัวมีวิธีการคือ จุ่มพิมพ์ลงในสารช่วยทำให้น้ำยางจับตัวแล้วจึงจุ่มพิมพ์ลงในน้ำยางผสม สารช่วยทำให้น้ำยางจับตัวจะช่วยให้น้ำยางเกาะพิมพ์ เทคนิคนี้ยังแบ่งออกเป็น

1) ใช้สารช่วยจับตัวเปียก (wet coagulant dipping) หมายถึงการใช้สารที่เป็นของเหลว เช่น กรดแอซีติก กรดฟอริก จุ่มพิมพ์ลงในสารนี้แล้วจุ่มพิมพ์ที่เปียกลงในน้ำยางผสม

2) ใช้สารช่วยจับตัวแห้ง (dry coagulant dipping) หมายถึงการที่จุ่มพิมพ์ลงในสารช่วยจับตัว (เช่น สารละลายเกลือแคลเซียม) แล้วทิ้งให้พิมพ์แห้งหรือหมาดเสียก่อน จึงนำไปจุ่มในน้ำยางผสม ความหนาของยางที่เกาะพิมพ์ในการจุ่มหนึ่งครั้งขึ้นกับธรรมชาติและความเข้มข้นของสารช่วยจับตัวที่ใช้ระยะเวลาการแช่ ความเข้มข้นและความหนืดของน้ำยางผสมตัวอย่าง เช่น การจุ่มด้วยสารช่วยจับตัว 1 ครั้ง และการจุ่มน้ำยางผสม 1 ครั้งจะได้ยางหนา 0.2-0.8 มิลลิเมตร

สารช่วยจับตัวที่นิยมใช้คือ สารละลายของเกลือแคลเซียม เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) , แคลเซียมไนเตรต (CaNO_3) จะให้ผิวยางเรียบสม่ำเสมอและหนาพอสมควร แคลเซียมคลอไรด์จะให้ยางสีขาวขุ่นมากกว่าแคลเซียมไนเตรต ความเข้มข้นของสารละลายเกลืออยู่ระหว่าง 10-50 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นกับความหนาของฟิล์มที่ต้องการ

การจุ่มพิมพ์ลงในน้ำยางผสมสารเคมีมีหลักการ คือต้องจุ่มพิมพ์ที่เคลือบหมาด ๆ ด้วยสารช่วยน้ำยางจับตัว และนำพิมพ์ขึ้นจากน้ำยางผสมด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอ สำหรับอัตรา

เร็วของการจุ่มขึ้นอยู่กับสูตรการผสมน้ำยางและลักษณะของถังบรรจุ (dipping tank) อัตราเร็วของการนำฟิล์มขึ้นจากน้ำยางผสมนั้นขึ้นอยู่กับความหนืดและความคงตัวของน้ำยางผสม อัตราเร็วของการจุ่มและการนำฟิล์มขึ้นมีความสัมพันธ์กับความหนาของฟิล์มด้วย ทันทันที่ฟิล์มถูกนำขึ้นมาจะต้องรีบหมุนฟิล์มเพื่อให้เกิดกระจายหรือการไหลของน้ำยางทั่วฟิล์ม ถ้าหากต้องการจุ่มซ้ำโดยใช้น้ำยางผสมเดียวกับที่ได้ใช้จุ่มในครั้งแรก ยางที่เกาะฟิล์มในการจุ่มครั้งแรกจะหนากว่าในครั้งที่สอง และการจุ่มครั้งที่สองยางที่เกาะฟิล์มจะเหลวกว่าและมักอยู่ตัวน้อยกว่าครั้งแรกด้วย

2.5.3 การล้าง (leaching)

การล้างหมายถึงล้างฟิล์มยางที่จับอยู่บนฟิล์มซึ่งอาจทำได้ 2 วิธีคือ ล้างขณะอยู่ในระหว่างกระบวนการผลิต หรือล้างหลังจากแกะถ่วงมือออกจากฟิล์มแล้ว การล้างนี้เพื่อกำจัดสารที่ละลายน้ำได้ออก ซึ่งได้แก่พวกเกลือที่มีอยู่ในน้ำยางแต่แรก หรือที่เติมลงในน้ำยาง

เหตุผลจำเป็นที่ต้องล้างยาง

- 1) เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำโดยสารชนิดที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำหรือชอบน้ำ (hydrophilic materials) ที่ตกค้างอยู่ในยาง
- 2) เพื่อป้องกันผิวยางเหนียวอันเนื่องจากสารที่ตกค้างอยู่
- 3) เพื่อไม่ให้สารตกค้างอยู่ในยาง
- 4) เพื่อลดการเปลี่ยนสีเมื่อถูกกับแสง
- 5) เพื่อให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น (โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ใช้ น้ำยางพรีวัลคาไนซ์)

การล้างฟิล์มยางในระหว่างกระบวนการผลิตโดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะที่อยู่ในสถานะฟิล์มเปียกจะได้ผลดีมาก เพราะน้ำสามารถชะล้างสารต่าง ๆ ในเนื้อยางขณะที่เปียกอยู่ ออกได้อย่างรวดเร็วและง่าย ไม่ควรล้างน้ำยางทันทีที่ฟิล์มถูกยกขึ้นจากถังจุ่ม เพราะผิวยางที่เกาะฟิล์มยังเหลวอยู่ จึงควรรอให้ฟิล์มยางแข็งก่อน อาจใช้เวลาประมาณ 2 นาที

การใช้น้ำอุ่น (50-60 องศาเซลเซียส) ประมาณ 5-10 นาที (ขึ้นกับความหนา) ล้างจะให้ประสิทธิภาพดี ถ้าหากล้างภายหลังจากแกะออกจากฟิล์มอาจต้องจุ่มถ่วงมือล้างเป็นเวลาหลายชั่วโมง การล้างควรใช้น้ำในปริมาณที่พอเพียง และควรเปลี่ยนน้ำล้างด้วยเพราะเกลือที่ถูกชะล้างออกมาจะสะสมอยู่ในน้ำเมื่อมากเข้าอาจทำให้น้ำนั้นขัดขวางต่อความสามารถของการชะล้างสิ่งต่าง ๆ ออกจากยาง

น้ำที่ใช้ล้างยางควรเป็นน้ำที่ไม่มีไอออน เช่นพวกน้ำกลั่น หรือ น้ำปราศจากไอออน แต่อาจใช้น้ำก๊อกได้ถ้าหากน้ำก๊อกนั้นมีปริมาณธาตุทองแดงต่ำ น้ำกระด้างก็อาจใช้ได้ถ้าความกระด้างไม่สูงเกินไปนัก

4. การอบแห้งและการทำให้ยางคงรูป

ปกติมักอบแห้งและทำให้ยางคงรูปในตู้อบร้อน โดยอบเพื่อให้ยางที่จับพิมพ์แห้งในตู้อบ จะใช้อุณหภูมิประมาณ 100-140 องศาเซลเซียส ในการอบให้ยางคงรูป ระยะเวลาขึ้นอยู่กับระบบของสารทำให้ยางคงรูปที่ใช้

2.6 การออกแบบเครื่องกวน⁽⁶⁾

ถังกวน แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ถังกวนมีคิริบและถังกวนไม่มีคิริบ ถังกวนไม่มีแผ่นกั้น เมื่อใช้ที่ความเร็วรอบสูงจะเกิดวอร์เทค ทำให้ประสิทธิภาพในการกวนต่ำลง การติดแผ่นกั้นจะช่วยลดการเกิดวอร์เทคได้นั้นหมายถึงการทำให้ประสิทธิภาพในการกวนสูงขึ้น

ใบกวน รูปร่างของใบกวนที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีอยู่มากมาย แต่พอจะแบ่งออกเป็นแบบมูลฐานได้ 3 แบบดังนี้คือ

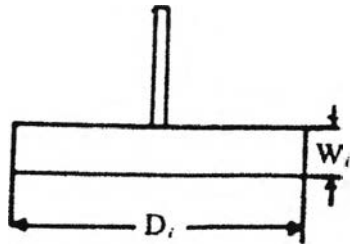
1. แบบใบพาย (paddle)
2. แบบกังหัน (turbine)
3. แบบใบพัด (propeller)

รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะใบกวนแบบต่าง ๆ

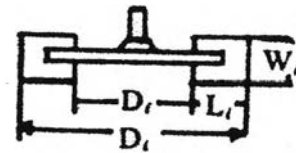
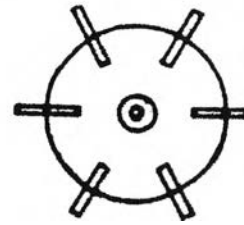
ลักษณะการไหลวนของของเหลวภายในถังซึ่งเกิดจากการหมุนของใบกวนทั้ง 3 แบบดังกล่าวนี้พอจะแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามแบบของใบกวนดังนี้

1. แบบใบพาย การไหลวนเป็นวงใน แนวเส้นรอบวงของถัง
2. แบบกังหัน การไหลในแนวรัศมีของถัง (ระหว่างก้านใบกวนกับผนังถัง)
3. แบบใบพัด การไหลในแนวแกนของก้านใบกวน (ในลักษณะขึ้นลงในแนวตั้ง)

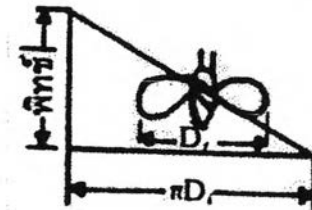
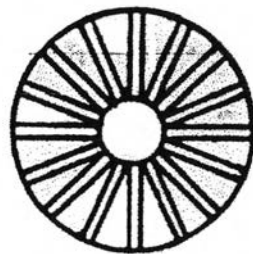
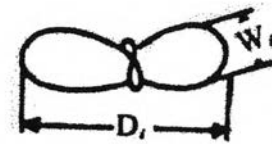
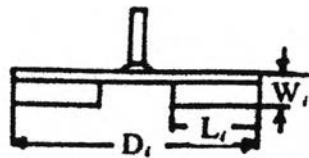
อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวนต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของถังกวนของใบกวนแบบกังหันและแบบใบพัดเท่ากับ 0.33 สำหรับใบกวนแบบใบพายเท่ากับ 0.5-0.9 สัดส่วนของใบกวนและถังกวนแสดงไว้ในตารางที่ 2.3



แบบใบพาย

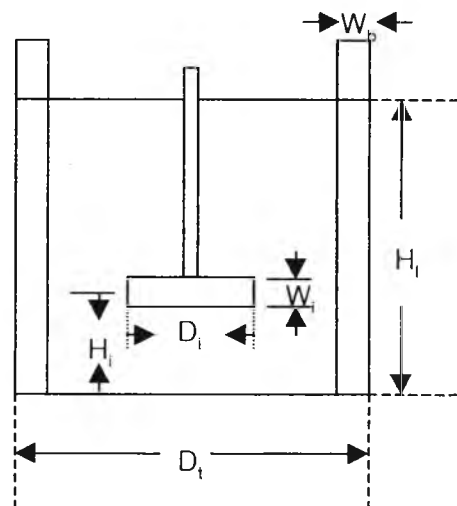


แบบกั้งหัน



แบบกั้งหันซึ่งมีแผ่นปิดด้านบน

แบบใบพัด



รูปที่ 2.4 แบบของใบกวน

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานสัดส่วนของใบกวนและถังกวน

ชนิดของใบกวน	D_i/D_i	H_i/D_i	H_i/D_i	แผ่นกั้น	
				จำนวนแผ่นกั้น	W_i/D_i
กังหันแบบมาตรฐาน หรือแบบมีแผ่นกลมปิดด้านบน ชนิด 6 ใบ $L_i/D_i = 0.25$, $W_i/D_i = 0.2$	3	3	1	4	0.1
กังหันแบบมีแผ่นกลมปิดด้านบน ชนิด 16 ใบ $L_i/D_i = 0.35$, $W_i/D_i = 0.1$	2.3	2.5	0.75	4	0.11
ใบกวนแบบใบพาย, $W_i/D_i = 0.25$	3	3	1	4	0.10
ใบกวนแบบใบพาย, $W_i/D_i = 0.25$	3	3.2	0.33	0	-
ใบกวนแบบใบพัดโดยมีพิทช์ $= D_i$	3	3	1	4	0.10

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังงานที่ต้องใช้ในการกวนของเหลวมีดังนี้คือ สมบัติทางกายภาพของของเหลวที่จะกวน ขนาดและชนิดของใบกวน อัตราส่วนระหว่างขนาดของถังกวนกับใบกวน (D_i/D_i , H_i/D_i , H_i/D_i) โดยที่ D_i คือเส้นผ่าศูนย์กลางของถังกวน H_i คือความลึกของของเหลวในถังกวน H_i คือ ระยะสูงจากก้นถังกวนถึงใบกวน รวมถึงการมีหรือไม่มีแผ่นกั้นข้างถังด้วย

2.7 การกระจายตัวในระบบของเหลว-ของเหลว⁽⁷⁾

2.7.1 กลไกทางอุทกศาสตร์ของการแตกออกของหยด

การกระจายตัวของของเหลววิฏภาคหนึ่ง ไปสู่ของเหลววิฏภาคอื่น มีด้วยกัน 2 วิธี วิธีแรก คือ การขีดของเหลววิฏภาคหนึ่งไปสู่อีกวิฏภาคหนึ่ง ซึ่งเป็นการเปลี่ยน พลังงานศักย์เป็นพลังงานจลน์ แรงกระทำระหว่างกันจะทำให้ของเหลววิฏภาคที่ขีดเข้าไปแตกออก วิธีที่สอง คือ พลังงานจลน์จากการกวนของเหลววิฏภาคหนึ่ง เป็นตัวชักนำให้ของเหลวอีกวิฏภาคหนึ่งเกิดการแตกออก กลุ่มก้อนของของเหลววิฏภาคที่กระจาย อาจจะเป็นแผ่นหรือแตกออกเป็นหยดเล็กๆ ขนาดหยดใหญ่ อาจจะทำแตกออกได้อีก เป็นผลให้ขนาดหยดที่ได้ มีขนาด และรูปร่างแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามขนาดหยดที่แตกออกขึ้นกับ ความรุนแรงในการกวน แรงตึงระหว่างผิว และสัดส่วนระหว่างวิฏภาค

แรงซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกออกและต้านการแตกออกของหยด สรุปได้ดังนี้

1. แรงตึงระหว่างผิว เป็นแรงที่กระทำในส่วนที่อยู่ภายใน ที่ผิวของหยด คอยต่อต้านการผิดรูป เพื่อให้หยดพยายามรักษาสภาพทรงกลมไว้ แรงนี้มีค่าเท่ากับ σ/d ต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย σ คือ ค่าแรงตึงระหว่างผิว d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางหยด
2. แรงเนื่องจากการไหลของของเหลว (fluid-dynamic force) เป็นการรวมผลของแรงโน้มถ่วง แรงจากการไหลของของไหล และแรงเฉื่อย สามารถแทนผลรวมของแรงเหล่านี้ด้วยแรงเค้นเฉือน (τ , shear stress)
3. แรงเนื่องจากความหนืด (viscosity force) ของของเหลววิฤภาคที่กระจาย

เปรียบเทียบแรงภายนอกที่กระทำกับแรงตึงระหว่างผิว แรงภายนอกที่มากกว่าจะทำให้หยดเสียรูปและเกิดการแตกออก

แรงเนื่องจากความหนืด (viscous force) ภายในเฟสกระจาย เป็นผลให้เกิดการหมุนเวียนภายใน กลุ่มก้อน เกิดขึ้นได้โดยการไม่เท่ากันของแรงเค้นเฉือนรอบ ๆ

$$\text{viscous force} \propto \frac{\mu'}{d} \sqrt{\frac{\tau}{\rho'}} \quad (2.1)$$

μ' คือ ค่าความหนืดของเฟสกระจาย

ρ' คือ ค่าความหนาแน่นของเฟสกระจาย

แรง 3 แรงนี้อาจนำมารวมกันเป็นกลุ่มไร้หน่วย ดังตัวอย่าง

$$\text{Drop Weber number, } We = \tau d / \sigma \quad (2.2)$$

$$\text{Drop Reynolds number, } Re = (d / \mu') (\tau \rho')^{1/2} \quad (2.3)$$

$$\text{Viscosity group, } Nvi = \sqrt{We} / Re = \frac{\mu'}{(\rho' \sigma d)^{1/2}} \quad (2.4)$$

พบว่าแรงเค้นเฉือน (τ) จะมีผลทำให้หยดเสียรูปมากกว่าแรงตึงระหว่างผิว (σ/d) และหยดจะแตกออกเมื่อ ค่า weber number มีค่าเท่ากับค่าวิกฤต (We_{crit})

Hinze⁽⁸⁾ ได้เสนอความสัมพันธ์สำหรับการแตกออกอย่างง่าย ๆ ดังนี้

$$We_{crit} = C_o [1 + f(Nvi)] \quad (2.5)$$

ซึ่งฟังก์ชัน $f(Nvi)$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ Nvi มีค่าใกล้ศูนย์ (เช่น ภาวะที่ค่า Re สูง ๆ) ค่า We_{crit} จะมีค่าคงที่

ในระบบที่มีความปั่นป่วนในทุกจุดเท่า ๆ กัน $\bar{u}^2 = \bar{v}^2 = \bar{w}^2$

\bar{w}^2 = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของ ความเร็วอนุภาคที่กระจายอยู่ในเฟสของเหลว

รูปแบบการไหลวนแบบ "komogoroff" จะทำให้เกิดการกระจายพลังงานจลน์ จากของเหลวตัวกลาง (intermediate size) การไหลแบบนี้จะมีการเคลื่อนที่เป็นระยะทาง η ที่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของหยด ทำให้เกิดแรงเนื่องจากความดันและการเคลื่อนที่ และนำไปสู่การแตกของหยด

$$\eta = (\mu^3 / \rho^3 \varepsilon)^{1/4} \quad (2.6)$$

$$We_{crit} = \rho \bar{v}^2 d_{max} / \sigma \quad (2.7)$$

\bar{v}^2 คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยกำลังสอง เมื่อระยะทางเท่ากับ d_{max}

รูปแบบความปั่นป่วนถูกพิจารณาโดยพลังงานที่ป้อนต่อมวลต่อเวลา และสำหรับ $D_p \gg d \gg \eta$ ซึ่ง

$$\bar{v}^2 = c_1 (\varepsilon d)^{2/3} \quad (2.8)$$

ซึ่งค่าคงที่ $C_1 \approx 2.0$

หลักการพิจารณาการแตกออกของหยด คือ

$$We_I = \frac{\rho \bar{v}^2 d}{\sigma} = \frac{c_1 \rho d^{5/3} \varepsilon^{2/3}}{\sigma} > We_{crit} \quad (2.9)$$

สำหรับภาวะที่ไม่คิดผลของความหนืด ขนาดหยดที่ใหญ่ที่สุด คือ

$$d_{max} (\rho / \sigma)^{3/5} \varepsilon^{2/5} = \text{constant} \quad (2.10)$$

Clay⁽⁹⁾ พิจารณาการกระจายขนาดหยดของของเหลว 2 ชนิดที่กระจายอยู่ระหว่างทรงกระบอก 2 อันที่มีแกนร่วมกันภายในหมุนตลอด ค่าของขนาดหยดที่ปริมาตรสะสม 95 เปอร์เซ็นต์ ถูกพิจารณาเป็นขนาดหยดที่ใหญ่ที่สุด ตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\frac{\rho \sigma d_{max}}{\mu} = 0.725 \left(\frac{\mu^5 \varepsilon}{\rho \sigma^4} \right)^{-2/5} \quad (2.11)$$

Shinnar และ Church⁽¹⁰⁾ ทำตามข้อสรุปของ Hinze ได้เสนอภาวะที่ค่า

ความหนืด (viscous stress) มีนัยสำคัญ และ $d \ll \eta$

$$\bar{v}^2 = c_2 \frac{\varepsilon}{\nu} d^2 \quad (2.12)$$

หลักการพิจารณาการแตกออกของหยด คือ

$$We_I = \frac{c_2 \rho^2 \varepsilon d^3}{\nu \sigma} > We_{crit} \quad (2.13)$$

2.7.2 การกระจายขนาดหยด^(7,10)

การกระจายของขนาดอนุภาค สามารถอธิบายได้ในรูปของอัตราส่วนของอนุภาค ในช่วงของขนาดที่จำเพาะ จำนวนทั้งหมดของอนุภาคจะต้องกำหนดพื้นฐานที่เฉพาะเช่น จำนวนทั้งหมด พื้นที่ผิวทั้งหมดหรือปริมาตรทั้งหมดของอนุภาค เมื่อทุกอนุภาคเหมือนกัน และสามารถเปลี่ยนจาก พื้นฐานการคำนวณหนึ่งไปเป็นพื้นฐานอื่น ๆ ได้

การนำเสนอการกระจายของอนุภาคด้วยกราฟ สัดส่วนของอนุภาคถูกสร้างเป็นฟังก์ชันของขนาดเฉลี่ยหยดในรูปของความถี่ อาจนำเสนอด้วยกราฟฮิสโทแกรมหรือกราฟต่อเนื่อง การทำกราฟการกระจายสะสม (cumulative distribution curve) เป็นการกำจัดผลของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหยดเฉลี่ย (sauter mean diameter) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_{gp} = \frac{\sum d^q \cdot fn}{\sum d^p \cdot fn^{1/(q-p)}} \\ D_{32} = \frac{\sum fn \cdot d^3}{\sum fn \cdot d^2} \quad (2.14)$$

fn คือ จำนวนหยดต่อจำนวนหยดทั้งหมด

d คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง

การเลือกวิธีหาค่าเฉลี่ยขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้ ในระบบการกระจายตัวของของเหลว ค่าเฉลี่ยชนิดนี้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถนำไปหาค่าพื้นที่ผิวระหว่างเฟส (A_s) ได้ทันที จากสมการดังต่อไปนี้

$$A_s = 6\phi / D_{32} \quad (2.15)$$

2.7.3 สมบัติทางกายภาพของสารแขวนลอย

ระบบของเหลว-ของเหลวที่มีการก่อให้เกิดการกระจาย ในแต่ละตำแหน่งของสารแขวนลอยค่าความหนาแน่นจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีค่าความหนาแน่นที่เป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของของผสมหาได้โดยวิธีของ Miller และ Mann⁽¹¹⁾ ดังสมการ

$$\rho_m = (1-\phi)\rho + \phi\rho' \quad (2.16)$$

ρ_m , ρ และ ρ' ค่าความหนาแน่นของของผสม ของเฟสต่อเนื่อง และเฟสกระจายตามลำดับ

เช่นเดียวกับค่าการนำความร้อนของสารแขวนลอยอาจประมาณได้จากสมการพื้นฐานจากการแนะนำของ Orr และ Dallavalle⁽¹⁰⁾ ที่ว่า

$$k = k_c \frac{2k_c + k_d - 2(k_c - k_d)}{2k_c + k_d + (k_c - k_d)} \quad (2.17)$$

k , k_c และ k_d คือสภาพนำไฟฟ้าของสารแขวนลอย ของเฟสต่อเนื่อง และเฟสกระจายตามลำดับ

Miller และ Mann⁽¹¹⁾ ได้นำเสนอสมการสำหรับการหาค่าความหนืดของของผสม ซึ่งแสดงไว้ดังสมการ

$$\mu_m = \mu^{(1-\phi)} \cdot \mu'^{(\phi)} \quad (2.18)$$

μ_m , μ และ μ' คือ ค่าความหนืดของของผสม ของเฟสต่อเนื่อง และเฟสกระจายตามลำดับ แต่สมการนี้ใช้ได้สำหรับของไหลที่มีความหนืดต่ำและสามารถละลายผสมกันได้

Vermulen และคณะ⁽¹²⁾ ได้ทำการทดลองหาสมการความสัมพันธ์สำหรับหาค่าความหนืดของของผสม ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\mu_m = \frac{\mu}{(1-\phi)} \left[1 + \frac{1.5\phi\mu'}{\mu + \mu'} \right] \quad (2.19)$$

Vanderveen⁽¹³⁾ ได้นำเสนอสมการของ Vermulen ในอีกรูปหนึ่งดังสมการ

$$\mu_m = \frac{\mu}{(1-\phi)^{1.5}} \left[1 + \frac{6\mu'}{\mu + \mu'} \right] \quad (2.20)$$

2.7.4 การแตกออกของหยดในถังกวน

การทำนายขนาดหยดเฉลี่ยในถังกวนประสบความสำเร็จได้โดย ดัดแปลงทฤษฎีของขนาดหยดที่ใหญ่ที่สุดในของไหลที่มีความปั่นป่วนเท่ากันทุกจุด อัตราการกระจายพลังงานเฉลี่ย (average energy dissipation rate) ในถังติดแผ่นกั้น ใบกวนแบบกั้งหัน นิยามไว้ดังสมการ

$$\bar{\varepsilon} = c_3 \rho N^3 D_i^2 \quad (2.21)$$

สมการนี้ใช้สำหรับ $Re_i > 50,000$ ค่า C_3 เป็นค่าไร้หน่วย และขึ้นอยู่กับารออกแบบเครื่องกวน ดังนั้น

$$\begin{aligned} We_i &= \frac{c_4 \rho d^{5/3} (\rho N^3 D_i^2)^{2/3}}{\sigma} \\ &= \frac{c_4 \rho^{5/3} d^{5/3} N^2 D_i^{4/3}}{\sigma} \end{aligned} \quad \text{สำหรับ } L \gg d \gg \eta \quad (2.22)$$

ในกรณีที่การแตกออกของหยดมีสาเหตุมาจากความหนืด จากการวิเคราะห์

$$We_I = \frac{c_5 N^{3/2} D_i d \rho \mu^{1/2}}{\sigma} \cdot f(\lambda) \quad (2.23)$$

$$\text{ซึ่ง } \lambda = \mu/\mu'$$

การเกิดหยดแขวนลอยในการไหลแบบปั่นป่วน มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอยู่เสมอ เป็นสาเหตุให้เกิดการแกว่งของหยด หยดที่แกว่งนี้อยู่ในภาวะที่ไม่คงตัว ถ้าพลังงานจลน์ (E_k) สูงกว่าพลังที่ผิว หยดที่อยู่เดี่ยว ๆ จะแตกออกเป็นสองหยดเล็ก ๆ และได้ว่า

$$E_k / \sigma d^2 = \text{constant} = 0.26$$

พลังงานจลน์ในระบบของเหลวที่มีความปั่นป่วนเท่ากันทุกจุดเป็นสัดส่วนกับ $\rho \bar{v}^2 d^3$ ดังนั้น

$$\rho \bar{v}^2 d / \sigma = We_I = \text{constant} \approx 0.26$$

$$\frac{\rho N^2 D_i^{4/3} d^{5/3}}{\sigma} = \text{constant} \approx 0.016$$

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหยดเฉลี่ย เป็นสัดส่วนกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหยด (d) จากความสัมพันธ์ที่กล่าวข้างต้นสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{D_{32}}{D_i} = c_6 We_I^{-0.6} \quad (2.24)$$

ซึ่ง We_I คือ impeller weber number ($We_I = \rho N^2 D_i^3 / \sigma$)

Chen และ Middleman⁽¹³⁾ ทำการถ่ายภาพสารแขวนลอยและนำมาวิเคราะห์ขนาดหยด จากจำนวนหยดตัวอย่าง 300 หยด ในช่วงสัดส่วนเฟส 0.001-0.005 ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{D_{32}}{D_i} = 0.053 We_I^{-0.6} \quad (2.25)$$

และได้กล่าวว่า ภายใต้ภาวะที่มีการใส่พลังงานสูงมาก เป็นไปได้ที่จะเกิดหยดที่มีขนาดเล็ก ๆ ซึ่งเล็กกว่า $\eta = \nu^{3/4} \epsilon^{1/4}$ ขนาดหยดเฉลี่ยอาจทำนายจาก

$$\frac{D_{32}}{D_i} = c' We_1^{-1/7} Re_1^{-4/7} \quad (2.26)$$

เมื่อสัดส่วนระหว่างเฟสสูงขึ้น การจับตัวกันของหยดเริ่มมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองของ Vermulen และคณะ⁽¹²⁾ ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{D_{32}}{D_i} = c_7(1 + c_8) We_1^{-0.6} \quad (2.27)$$

$$\frac{D_{32}}{D_i} = 0.0837 We_1^{-0.6} \cdot f(\phi) \quad 0.10 \leq \phi \leq 0.40 \quad (2.28)$$

We_1 คำนวณได้โดยใช้ความหนาแน่นเฉลี่ย

$f(\phi)$ คือ correction factor ซึ่งขึ้นอยู่กับการจับตัวกันระหว่างเฟส

$$f(\phi) = 1 + c_8$$

c_7 และ c_8 เป็นค่าคงตัว

Calderbank⁽¹⁴⁾ ศึกษาถึงพื้นผิวระหว่างเฟส ในถังกวนซึ่งมีค่า $\phi < 0.20$ ได้สมการความสัมพันธ์สำหรับทำนายขนาดหยดสารแขวนลอยดังนี้

$$\frac{D_{32}}{D_i} = 0.06 f(\phi) We_1^{-0.6} \quad (2.29)$$

ซึ่ง $f(\phi) = 1 + 3.75\phi$ สำหรับใบกวนแบบใบพัด 4 ใบพัด $D_i/D_t = 2/3$

และ $f(\phi) = 1 + 9\phi$ สำหรับใบกวนแบบกังหัน 6 ใบพัด

Mlynek และ Resnick⁽¹⁵⁾ วัดขนาดหยดและอัตราการจับตัวรวมกัน โดยใช้ encapsulation technique ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในถัง ได้สมการดังนี้

$$\frac{D_{32}}{D_i} = 0.058(1 + 5.4\phi) We_1^{-0.6} \quad (2.30)$$

จากผลการทดลองพบว่า ประชากรหยดจับตัวรวมกันอย่างมีขอบเขต ซึ่งจะขึ้นกับสัดส่วนระหว่างเฟสเป็นอย่างมาก ตำแหน่งบริเวณรอบใบกวนจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อขนาดหยด เนื่องจากหยดสารแขวนลอยจะไหลไปสู่บริเวณใบกวน

Roger และคณะ⁽¹⁹⁾ ทำการศึกษาพบว่าอิทธิพลของขนาดถังขึ้นกับค่าคงตัว c_7 สามารถรายงานในเทอมของ $(D_i/D_t)^{0.75-1.4}$

เพียร์พอร์ด ทิศคร⁽⁷⁾ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหยดเฉลี่ยกับตัวแปรต่าง ๆ ในระบบสารแขวนลอย o-xylene กับน้ำ สำหรับถังกวนที่มีการกวนแบบปั่นป่วน และมีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารช่วยให้หยดคงรูป ทำให้ได้ระบบที่ไม่เกิดการรวมตัวของหยด (non-coalescing) ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{D_{32}}{D_i} = 0.063(1 + 1.81\phi) We_1^{-0.6} \quad (2.31)$$

และสำหรับระบบที่มีการจับตัวรวมกันบางส่วน (partially coalescing) ได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{D_{32}}{D_1} = 0.048(1 + 4\phi)We_T^{-0.6} \quad (2.32)$$

Zerfa⁽¹⁷⁾ ศึกษาความถูกต้องของความสัมพันธ์ของขนาดหยดเฉลี่ยกับขนาดหยดที่ใหญ่ที่สุดที่มีอยู่ได้ และศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างเฟสต่อขนาดหยด ในระบบสารแขวนลอยไว้นิลโคลไรต์ในน้ำ ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{D_{32}}{D_1} = 0.027(1 + 3.1\phi)We_T^{-0.6} \quad (2.33)$$

2.7.5 แฟกเตอร์ความรุนแรงของการปั่นป่วน (turbulence intensity factor)⁽⁷⁾

ถังกวนที่ทำงานที่ค่าเรโนลด์นัมเบอร์สูง ๆ ($ND_1^2/V > 50,000$) สามารถสมมติได้ว่าทุกจุดภายในระบบมีสมบัติเหมือนกัน ที่ภาวะนี้พลังงานถูกกระจายไปตามแนวสมดุลของการหมุนวน ดังนั้นอัตราการเคลื่อนที่โดยการทำให้กระจายเท่ากับพลังงานที่ใส่เข้าไปต่อหนึ่งหน่วยมวล ซึ่งเป็นตัวแปรภายนอก ดังนี้

$$\varepsilon = 2\nu \int_0^\infty k^2 E(k,t) dk \quad (2.34)$$

การกระจายของพลังงานที่ทำให้เกิดการกระจายขึ้นอยู่กับตัวแปรภายนอกและฟังก์ชันสเปกตรัมพลังงาน $E(k,t)$ ซึ่งนิยามได้ดังสมการ

$$E(k,t) = \alpha \varepsilon^{2/3} d^{5/3} \quad (2.35)$$

พลังงานจลน์ทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยมวลของไหล

$$\begin{aligned} (K.E)_d &= \frac{1}{2} \rho d^3 \bar{u}^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho d^3 \int_d^0 \alpha \varepsilon^{2/3} d^{5/3} . d(1/d) \\ &= \frac{3}{4} \alpha \rho \varepsilon^{2/3} d^{11/3} \end{aligned} \quad (2.36)$$

หยดจะเริ่มไม่เสถียร ถ้าพลังงานจลน์มีมากกว่าแรงตึงระหว่างผิว ทำให้หยดเสียรูปและแตกออกด้วยเหตุนี้จะได้ว่า

$$(K.E)_d / \sigma d^2 = \text{constant} \approx 0.26$$

$$\frac{\rho \varepsilon^{2/3} d^{11/3}}{\sigma d^2} = \text{constant} = 0.26$$

$$d_{\max} (\rho / \sigma)^{3/5} \varepsilon^{2/5} = K = 0.536 \alpha^{-3/5} \quad (2.37)$$

Clay⁽⁹⁾ วัดการกระจายขนาดหยดในภาวะปั่นป่วนในระบบทรงกระบอกสองใบที่ใช้แกนร่วมกัน โดยให้ $d_{\max} = d_{95}$ ได้ค่า $K = 0.725$ ในการประมาณค่าครั้งนี้ โดยสมมติให้พลังงานกระจายเท่า ๆ กันในทุก ๆ ส่วน

สำหรับถึงกวนที่มีความปั่นป่วนเกิดขึ้น ค่าพลังงานกระจายต่อหน่วยมวลที่ตำแหน่งหนึ่ง (ε) อาจจะแตกต่างจากค่าพลังงานกระจายเฉลี่ยของทั้งถัง ($\bar{\varepsilon}$) และในบริเวณที่ใกล้กับตัวกวนจะมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย ค่าพลังงานเฉลี่ยต่อหน่วยมวลของเหลว ($\bar{\varepsilon}$) นี้ นิยามได้ดังสมการ

$$\bar{\varepsilon} = \frac{P}{\rho v} = c.N^3 D_i^2 . N_p \quad (2.38)$$

ซึ่ง $c = \frac{4}{27\pi}$ สำหรับถึงกวน $D_i/D_t = 1/3$ และ $H_i = D_i$

และ $c = \frac{4}{27\pi}$ สำหรับถึงกวน $D_i/D_t = 1/2$ และ $H_i = D_i$

สมมติค่าพลังงานกระจายสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยมวลเท่ากับ ε ซึ่งถูกควบคุมโดยขนาดหยดที่ใหญ่ที่สุด เป็นสัดส่วนกับค่าพลังงานเฉลี่ยต่อหน่วยมวล ดังสมการ

$$\varepsilon = \theta \bar{\varepsilon} \quad (2.39)$$

θ คือ turbulence intensity factor

$$\varepsilon = \theta c . N^3 D_i^2 . N_p \quad (2.40)$$

จากสมการ (2.37) (2.38) (2.39) และ (2.40) สามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{d_{\max}}{D_i} = \frac{1}{D_i} . k \varepsilon^{-2/5} (\rho / \sigma)^{-0.6}$$

หรือ

$$\frac{d_{\max}}{D_i} = \frac{k}{(\theta D_i)^{0.4}} \left[\frac{\sigma}{\rho N^3 D_i^3} \right]^{0.6} \quad (2.41)$$

ถ้าขนาดหยดที่ใหญ่ที่สุด เป็นค่าเดียวกับ d_{95} และอัตราส่วนระหว่าง D_{32} ต่อ d_{95} เป็นค่าคงที่ ดังนั้น

$$D_{32} = \beta d_{95} \quad (2.42)$$

ถ้าเฟสกระจายทำให้เกิดการแกว่งของความปั่นป่วน ค่าแก้ไข $f(\theta)$ จึงถูกกำหนดขึ้นดังนั้น

$$\frac{D_{32}}{D_i} = \beta . f(\phi) . \frac{k}{(\theta c)^{0.4}} . \frac{1}{N_p^{0.4}} \left[\frac{\sigma}{\rho N^3 D_i^2} \right]^{0.6} \quad (2.43)$$

$$f(\phi) = 1 + \gamma \phi \quad (2.44)$$

เทอม $\frac{\rho N^3 D_i^2}{\sigma}$ คือ We_i ดังนั้นเขียนให้อยู่ในรูป We_i ดังสมการ

$$\frac{D_{32}}{D_i} = \beta(1 + \gamma\phi) \cdot \frac{K}{(\theta c)^{0.4}} \left[\frac{1}{N_p} \right]^{0.4} \cdot We_i^{-0.6} \quad (2.45)$$

ค่า turbulence intensity factor (θ) ในถังกวนติดแผ่นกั้น จะปรากฏได้เป็นค่าคงตัวค่าหนึ่ง สำหรับรูปแบบและชนิดของใบพัดนั้น ๆ สำหรับกรณีถังไม่มีแผ่นกั้น ค่า turbulence intensity factor จะขึ้นอยู่กับภาวะการกวน การเกิดวอร์เทคขึ้นอยู่กับความเร็วของใบพัด สามารถอธิบายได้ด้วยสมการมูลฐานดังนี้

$$\theta = a Re_i^b \quad (2.46)$$

สมการนี้สามารถประยุกต์ใช้กับถังกวนไม่ติดแผ่นกั้น ค่าคงตัว a และ b เป็นลักษณะสมบัติของรูปทรงใบกวนและถังเท่านั้น

การวัดค่าความรุนแรงของการปั่นป่วน ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในถังติดแผ่นกั้น ค่าเฉลี่ยของ θ ที่ผนังและที่บริเวณรอบใบพัดมีความแตกต่าง ในระบบของเหลว-ของเหลวที่เกิดการกระจาย ค่าสูงสุดของ θ เป็นสิ่งเดียวที่มีความสำคัญในการประมาณค่าขนาดหยดที่ใหญ่ที่สุด

2.7.5 การวัดขนาดหยด

วิธีที่ใช้ในการวัดขนาดหยด มีด้วยกันหลายวิธี แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ optical methods และ alternative methods

วิธีแบบ optical methods อาจสรุปได้ดังนี้

1. การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ วิธีนี้ทำการวัดขนาดโดยนำตัวอย่างมาทำให้เจือจาง และนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากนั้นทำการถ่ายภาพอนุภาคแขวนลอย ซึ่งในการวิเคราะห์จะสุ่มตัวอย่างประมาณ 500-2000 หยด ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้ผลที่มีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น โปรแกรม Quantimet Image Analysing Computer , Image pro-plus 3

2. การวัดอัตราความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงที่สะท้อน ต่อรังสีที่ตกกระทบพื้นผิว (reflectance measurement) เมื่อเฟสกระจายถูกย้อมสีทำให้แตกต่างจากเฟสต่อเนื่อง ทำให้เกิดการกระจายของแสง เมื่อนำสารแขวนลอยใส่ในเซลล์ และนำไปใส่ในเครื่อง spectrophotometer ค่า % reflectance สัมพันธ์กับข้อมูลขนาดหยดที่ประมาณได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์

3. Extinction techniques เมื่อแสงส่องผ่านอิมัลชัน ของของเหลว 2 ชนิด ที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน แสงบางส่วนถูกดูดกลืน ในขณะที่บางส่วนถูกทำให้กระจัดกระจาย ทั้งสอง

ปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายพลังงานจากลำแสง ดังนั้นการถ่ายทอดแสงจึงลดลง ข้อมูลขนาดหดยดสามารถหาได้จาก ข้อมูลการถ่ายทอดแสง (light transmission) และข้อมูลการกระจายของแสง (light scattering)

วิธีแบบ alternative methods ได้แก่

1. การตกตะกอน (sedimentation)

Grossman ⁽¹⁸⁾ เทของเหลวแขวนลอยที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจากถังกวนลงในภาชนะทรงกระบอกอย่างรวดเร็ว สังเกตตำแหน่งของสารแขวนลอยและประมาณค่าการกระจายของหดยด

2. การหมุนเหวี่ยง (centrifugation) การตกตะกอนภายใต้อิทธิพลการเหวี่ยง อัตราการตกตะกอนขึ้นกับขนาดอนุภาคหรือขนาดหดยด ดังนั้นขนาดหดยดสามารถหาได้จากการตกตะกอน

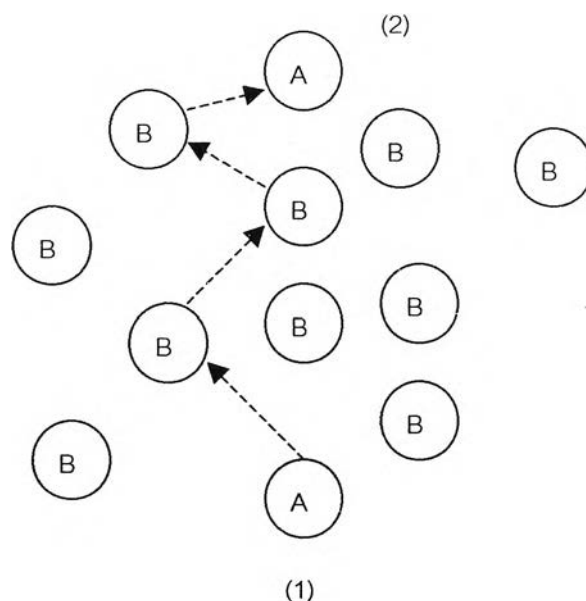
3. Photographic method รูปถ่ายของสารแขวนลอยถูกนำไปผ่านทางเครื่องมือวัด หลังจากถูกขยายให้ใหญ่ขึ้น หดยดถูกวัดขนาดและนับจากการพิมพ์ จำนวนของหดยดที่วัดอยู่ระหว่าง 300 – 800 หดยด

2.8 การถ่ายโอนมวล

2.8.1 การแพร่เชิงโมเลกุล (Molecular diffusion)

การถ่ายโอนมวลโดยการแพร่โมเลกุลเป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในตัวกลางซึ่งไม่เคลื่อนที่หรือตัวกลางที่มีการไหลแบบลามินาร์ ในกรณีที่เป็นแก๊ส โมเลกุลอาจมีการชนกัน แล้วเคลื่อนที่ต่อไป รูปที่ 2.5 แสดงการแพร่ของโมเลกุล A ผ่านโมเลกุล B เส้นประแสดงเส้นทางที่แพร่จาก (1) ไป (2) A อาจเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของ A สูงกว่าหรือต่ำกว่าก็ได้ แต่ถ้าในตอนเริ่มต้น A บริเวณ (1) มากกว่าบริเวณ (2) A เคลื่อนที่จาก (1) ไป (2) มากกว่า (2) ไป (1) ซึ่งหมายความว่า การแพร่สุทธิเกิดจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ

Knudsen diffusion เป็นการแพร่ของแก๊สผ่านรูพรุนหรือช่องขนาดเล็ก (capillary) เมื่อระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลเคลื่อนที่โดยไม่ชนกับโมเลกุลอื่น (mean free path) ยาวกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุลมากก็จะทำให้โมเลกุลชนกับผนังของช่องว่างมากกว่าที่จะชนกับโมเลกุลอื่น การชนผนังทำให้ฟลักซ์ลดลง จากการใช้ทฤษฎีจลน์ของแก๊สจะสามารถคำนวณฟลักซ์การแพร่ของแก๊สนั้น ๆ ได้



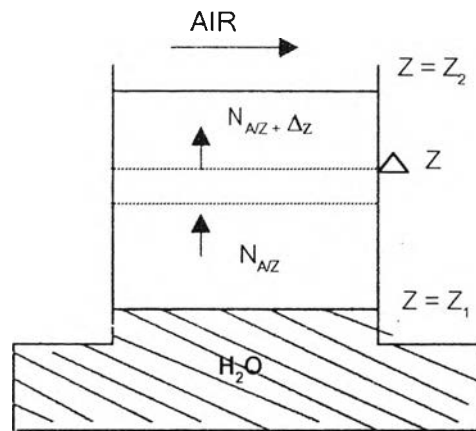
รูปที่ 2.5 แสดงการแพร่ของโมเลกุลแบบแรนดอม⁽¹⁹⁾

2.8.2 การแพร่เชิงโมเลกุลที่สถานะคงตัว (steady-state molecular diffusion)

การแพร่แบบสถานะคงตัว กล่าวถึงการถ่ายโอนมวลแบบการแพร่ โดยจำกัดเฉพาะกรณีที่ความเข้มข้นหรือความดันย่อยที่จุดใด ๆ และฟลักซ์การแพร่มีค่าคงที่เทียบกับเวลา โดยจะได้กล่าวถึงการแพร่เชิงโมเลกุลของโมเลกุลในหนึ่งมิติแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี

การแพร่ผ่านฟิล์มแก๊สที่หยุดนิ่ง (diffusion through a stagnant gas film)

การเคลื่อนที่ของแก๊ส A ผ่านแก๊ส B ที่หยุดนิ่งที่ภาวะสมดุล โมลาร์ฟลักซ์ N_{Az} และ N_{Bz} มีค่าคงที่หรือไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางการแพร่ (z) พิจารณาการแพร่ของแก๊สผ่านฟิล์มหยุดนิ่งโดยการใช้ Arnold cell ลักษณะของ Arnold cell ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยมีลักษณะเป็นหลอดแก้วแคบ ๆ ซึ่งมีของเหลวบรรจุอยู่ แก๊ส B ไหลผ่านทางด้านปลายเปิดของหลอดแก้ว ระบบอยู่ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ถ้า B ไม่ละลายใน A และไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับ A ด้วย องค์ประกอบ A สามารถระเหยและแพร่เข้าไปในแก๊สเฟส อัตราการระเหย/แพร่ ขององค์ประกอบ A สามารถวัดหรือแสดงค่าได้ในรูปฟลักซ์โดยวิธีต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 Arnold diffusion cell

การทำดุลมวล ที่สถานะคงตัวในปริมาตรควบคุม $s\Delta z$ เมื่อ s เป็นพื้นที่หน้าตัดของหลอดแก้วจะได้ว่า

$$SN_{A,z}|_{z+\Delta z} - SN_{A,z}|_z = 0 \quad (2.47)$$

หารตลอดด้วยปริมาตร หาค่าลิมิตเมื่อ Δz เข้าใกล้ศูนย์ จะได้สมการเชิงอนุพันธ์

$$\frac{d}{dz} N_{A,z} = 0 \quad (2.48)$$

สมการ (2.47) อาจได้จากสมการทั่วไปของการถ่ายโอนมวล

$$\frac{\partial}{\partial x} N_{A,x} + \frac{\partial}{\partial y} N_{A,y} + \frac{\partial}{\partial z} N_{A,z} + \frac{\partial c_A}{\partial t} - R_A = 0 \quad (2.49)$$

ในกรณีนี้เป็นการแพร่ที่ภาวะคงตัว $\left[\frac{\partial c_A}{\partial t} = 0 \right]$ ไม่มีปฏิกิริยาเคมี ($R_A = 0$) และเฉพาะฟลักซ์ใน

ทิศทาง z เท่านั้นที่มีความสำคัญ สมการ (2.49) จึงลดรูปเป็นสมการ (2.47) นั่นเอง ใน

ทำนองเดียวกันจะได้สมการสำหรับองค์ประกอบ B

$$\frac{d}{dz} N_{B,z} = 0 \quad (2.50)$$

ทั้งสามสมการแสดงว่าโมลาร์ฟลักซ์ $N_{A,z}$ และ $N_{B,z}$ มีค่าคงตัวหรือไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางการแพร่ (z) เนื่องจาก B ไม่ละลายใน A ฟลักซ์ $N_{B,z}$ ที่ $z = z_1$ จึงมีค่าเป็นศูนย์ สรุปได้ว่า ฟลักซ์ $N_{B,z}$ (สุทธิ) เป็นศูนย์ตลอดระยะทางการแพร่ จึงเรียก B ว่า เป็นแก๊สที่อยู่นิ่ง (stagnant gas) ที่จริงแล้วส่วนที่ประกอบเป็นฟลักซ์ของ B มีอยู่สองส่วน ส่วนแรกเป็นฟลักซ์เนื่องจากการ

แพร่ ส่วนที่สองคือฟลักซ์เนื่องจาก B ถูกพาไปเพราะการไหลของของไหล การที่ $N_{B,z}$ มีค่าเป็นศูนย์แสดงว่าฟลักซ์สองส่วนมีค่าเท่ากันแต่มีทิศตรงกันข้าม

สำหรับ $N_{A,z}$ เขียนอยู่ในรูปสมการของฟิค คือ

$$N_{A,z} = -cD_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A(N_{A,z} + N_{B,z}) \quad (2.51)$$

$$N_{B,z} = 0: \quad N_{A,z} = \frac{-cD_{AB} dy_A}{1 - y_A dz} \quad (2.52)$$

ภาวะขอบที่ใช้แก้สมการนี้ คือ $z=z_1$ $y=y_{A1}$
 $z=z_2$ $y_A=y_{A2}$

ถ้าสมมติการแพร่ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น อินทิเกรตสมการ (2.52)

$$N_{A,z} \int_{z=1}^{z=2} dz = -cD_{AB} \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dy_A}{1 - y_A} \quad (2.53)$$

$$N_{A,z} = \frac{cD_{AB} \ln \frac{(1 - y_{A2})}{(1 - y_{A1})}}{z_2 - z_1} \quad (2.54)$$

สมการ (2.54) สามารถเขียนในรูปความเข้มข้นเฉลี่ย log-mean จากค่าจำกัดความ

$$Y_{B,lm} = \frac{y_{B2} - y_{B1}}{\ln(y_{B2}/y_{B1})}$$

ในเทอมขององค์ประกอบ A

$$Y_{B,lm} = \frac{(1 - y_{A2}) - (1 - y_{A1})}{\ln[(1 - y_{A2})/(1 - y_{A1})]} = \frac{y_{A1} - y_{A2}}{\ln[(1 - y_{A2})/(1 - y_{A1})]} \quad (2.55)$$

แทนค่า (2.55) ใน (2.54)

$$N_{A,z} = \frac{cD_{AB}(y_{A1} - y_{A2})}{(z_2 - z_1)Y_{B,lm}} \quad (2.56)$$

เมื่อเป็นแก๊สสมมติเขียนความเข้มข้นในรูปความดัน เพราะ

$$c = \frac{n}{v} = \frac{P}{RT}; \quad y_A = \frac{P_A}{P}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad N_{A,z} = \frac{D_{AB}P}{RT(z_2 - z_1)} \frac{(P_{A1} - P_{A2})}{P_{B,lm}} \quad (2.57)$$

สมการ (2.55) (2.56) และ (2.57) คือสมการสำหรับคำนวณฟลักซ์การแพร่ที่ภาวะคงตัวของแก๊สชนิดหนึ่งที่แพร่ผ่านแก๊สที่อยู่นิ่ง การแพร่แบบนี้พบในหลายกระบวนการ เช่น การดูดซึมแก๊ส (gas absorption) การเพิ่มความชื้น (humidification)

2.8.2 งานวิจัยในอดีต

Chen และ Middleman⁽¹⁵⁾ ศึกษาการกระจายขนาดหยดในระบบแขวนลอยที่ไม่เกิดการรวมตัวของหยดในช่วงสัดส่วนเฟส 0.001-0.005 โดยวิธีถ่ายภาพสารแขวนลอยและนำมาวิเคราะห์ขนาดหยด จากการสุ่มจำนวนหยดตัวอย่าง 300 หยด ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{D_{32}}{D_1} = 0.053We_T^{-3/5}$$

Spown⁽¹⁹⁾ ศึกษาการกระจายขนาดหยดสารแขวนลอยที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในถังกวน โดยศึกษาระบบคู่ของเหลว กลีโกลีเอทิลไฮโซบิวทิลซีโตนกับน้ำที่ค่าสัดส่วนเฟสเท่ากับ 0.25 ความเร็วรอบใบกวน 500–2000 รอบต่อนาที ถังกวนติดแผ่นกั้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 22.22 เซนติเมตร ใบกวนแบบก้านขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.35 เซนติเมตร พบว่าขนาดหยดขึ้นกับตำแหน่งที่สุ่มตัวอย่าง คือพบหยดขนาดเล็กบริเวณรอบใบกวนและหยดขนาดใหญ่กว่าบริเวณก้นถังกวน จากการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหยดกับความเร็วรอบใบกวน ได้ว่า การแตกออกของหยดถูกควบคุมโดยตำแหน่งรอบใบกวน และการจับตัวรวมกันถูกควบคุมโดยตำแหน่งอื่น ๆ ในถังกวน

Mlynek และ Resnick⁽¹⁵⁾ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหยดกับตำแหน่งในถังกวน ของระบบคู่ของเหลวและของผสมระหว่างไฮโซออกเทนกับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ช่วงสัดส่วนเฟส 0.025-0.34 ความเร็วรอบใบกวน 140-500 รอบต่อนาที ถังกวนติดแผ่นกั้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 29 เซนติเมตร ใบกวนแบบก้านขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร วัดขนาดหยดและอัตราการจับตัวรวมกัน โดยใช้ encapsulation technique ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในถัง ได้สมการความสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายขนาดหยดสารแขวนลอยดังนี้

$$\frac{D_{32}}{D_1} = 0.058(1 + 5.4\phi)We_T^{-3/5}$$

สมการความสัมพันธ์นี้นำไปใช้ทำนายขนาดหยดในระบบถังกวนอื่นๆ ที่มีขนาดรูปทรงและความเร็วรอบใบกวนใกล้เคียงกันได้

เพียรพรวรค ทศคร⁽⁷⁾ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหยดเฉลี่ยกับตัวแปรต่าง ๆ ในระบบสารแขวนลอย o-xylene กับ น้ำ ช่วงสัดส่วนเฟส 0.05-0.30 ความเร็วรอบใบกวน 235-1500 รอบต่อนาที ถังกวนติดแผ่นกั้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 16.5 และ 30.5 เซนติเมตร ใบกวนแบบก้านขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.3 5.5 และ 10.2 เซนติเมตร ระบบมีการกวนให้เกิดการปั่นป่วนและใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารช่วยในการคงรูปของหยด ทำให้ได้ระบบที่ไม่

เกิดการรวมตัวของหยด (non-coalescing) ได้สมการความสัมพันธ์สำหรับทำนายขนาดหยด ดังนี้

$$\frac{D_{32}}{D_i} = 0.063(1 + 1.81\phi)We_i^{-3/5}$$

และสำหรับระบบที่มีการจับตัวรวมกันบางส่วน (partially coalescing) ได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{D_{32}}{D_i} = 0.048(1 + 4\phi)We_i^{-3/5}$$

Zerfa และ Brooks⁽¹⁷⁾ ศึกษาความถูกต้องของความสัมพันธ์ของขนาดหยดเฉลี่ยกับขนาดหยดที่ใหญ่ที่สุดที่มีอยู่ได้ และศึกษาผลกระทบของสัดส่วนระหว่างเฟสต่อขนาดหยด ในระบบสารแขวนลอยไว้นิลคลอไรด์ในน้ำ ช่วงสัดส่วนเฟส 0.01-0.4 ความเร็วรอบใบกวน 250-800 รอบต่อนาที ถังกวนติดแผ่นกั้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ใบกวนแบบก้านหันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ได้สมการความสัมพันธ์สำหรับทำนายขนาดหยดดังนี้

$$\frac{D_{32}}{D_i} = 0.027(1 + 3.1\phi)We_i^{-3/5}$$

Johnson⁽²¹⁾ ศึกษาการถ่ายโอนแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนผ่านแผ่นยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอิพอกซีไดร์ และยางธรรมชาติผสมยางธรรมชาติอิพอกซีไดร์ ผลการศึกษาพบว่า ยางธรรมชาติจะมีค่าสัมประสิทธิ์ผ่านได้ของแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนสูงสุด แต่ยางธรรมชาติผสมยางธรรมชาติอิพอกซีไดร์ร้อยละ 50 โดยโมล ให้ค่าสัมประสิทธิ์ผ่านได้ของแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนสูงสุด การผสมยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอิพอกซีไดร์เข้าด้วยกันจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ผ่านได้มีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของยางธรรมชาติอิพอกซีไดร์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่สัมประสิทธิ์ผ่านได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนโดยปริมาตรของยางอิพอกซีไดร์ที่เพิ่มขึ้น

Reis-nunes⁽²²⁾ และคณะ ศึกษาการถ่ายโอนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน และ แก๊สไนโตรเจน ในเยื่อออสโมซิสของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ เสริมแรงด้วยเซลลูโลส ค่าสัมประสิทธิ์สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจนในเยื่อที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส ร้อยละ 25 ทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 15 เซนติเมตรปรอท มีค่าประมาณ 1 ใน 3 ของค่าที่วัดได้ จากยางธรรมชาติในภาวะเดียวกัน