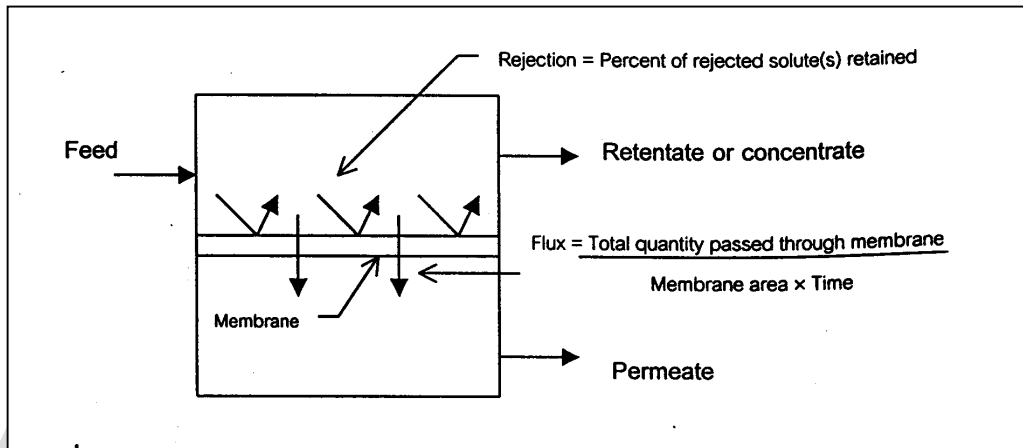


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแยกโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นเพื่อแยกสารหรือเพิ่มความเข้มข้นหรือทำสารให้บริสุทธิ์ขึ้นจากสารละลายหรือก๊าซผสม หลักการสำคัญของกระบวนการแยกโดยเยื่อแผ่นสังเคราะห์ คือ จะต้องมีความดันที่ทำให้สารละลายไหลผ่านเยื่อแผ่นและเกิดการแยก ซึ่งแรงขับเคลื่อนอาจจะเป็นผลต่างของความเข้มข้น ผลต่างของความดัน ผลต่างของอุณหภูมิ หรือผลต่างของศักย์ไฟฟ้า ถ้าจะให้คำจำกัดความอาจอธิบายได้ว่า เยื่อแผ่น คือ ตัวกลางซึ่งอาจเป็นฟิล์มบางๆ หรือหยดของเหลวขนาดเล็กหลายๆ ที่ทำหน้าที่กั้นระหว่าง 2 วัฏภาค (phase) โดยทั่วไปเยื่อแผ่นเป็นฟิล์มที่เป็นของแข็ง หรืออาจเป็นของเหลวก็ได้ ลักษณะที่สำคัญที่สุดของเยื่อแผ่น คือ มีสมบัติในการเลือกผ่านสารหนึ่งมากกว่าสารอื่น การเลือกผ่านสารเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีหรือทางกายภาพ หรือจากขนาดของรูพรุน หรือจากการมีประจุของเยื่อแผ่น เป็นต้น

ได้มีการจำแนกวิธีการในการแยกสารตามชนิดของแรงขับเคลื่อน คือ ถ้าแรงขับเคลื่อนที่ทำให้โมเลกุลของสารผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์เป็นผลต่างของความเข้มข้นเรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการไดอะไลซิส (dialysis) ถ้าแรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างของศักย์ไฟฟ้าเรียกว่ากระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิส (electrodialysis) แต่ถ้าแรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างของความดัน ก็สามารถแยกออกเป็นกระบวนการย่อยๆ ได้อีก ได้แก่ กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration, MF) กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration, UF) และกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis, RO) รูปที่ 2.1 ได้แสดงหลักการของกระบวนการแยกโดยเยื่อแผ่นสังเคราะห์ ซึ่งสารละลายป้อน (feed) ไหลผ่านเยื่อแผ่นโดยแรงขับเคลื่อน ตัวถูกละลายที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าเยื่อแผ่นจะถูกเยื่อแผ่นกักไว้ สารที่ไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ เรียกว่า รีเทนเตต (retentate) หรือสารละลายเข้มข้น (concentrate) ส่วนตัวทำละลายหรือสารโมเลกุลที่มีขนาดเล็กที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ เรียกว่า เพอร์มิเอต (permeate) ซึ่งส่วนที่ต้องการนำไปใช้ประโยชน์อาจเป็นส่วนรีเทนเตตหรือเพอร์มิเอตก็ได้ ตัวแปรสำคัญที่แสดงความสามารถในการแยกคืออัตราการไหลผ่านเยื่อแผ่นหรือฟลักซ์ (flux) ของเพอร์มิเอต ซึ่งอาจมีหน่วยเป็นปริมาตร หรือมวล หรือโมลของเพอร์มิเอตต่อเวลาต่อหน่วยพื้นที่เยื่อแผ่น



รูปที่ 2.1 หลักการของกระบวนการแยกโดยเยื่อแผ่นสังเคราะห์ (Mohr et al., 1989)

2.1 กระบวนการแยกโดยใช้แรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างของความดัน

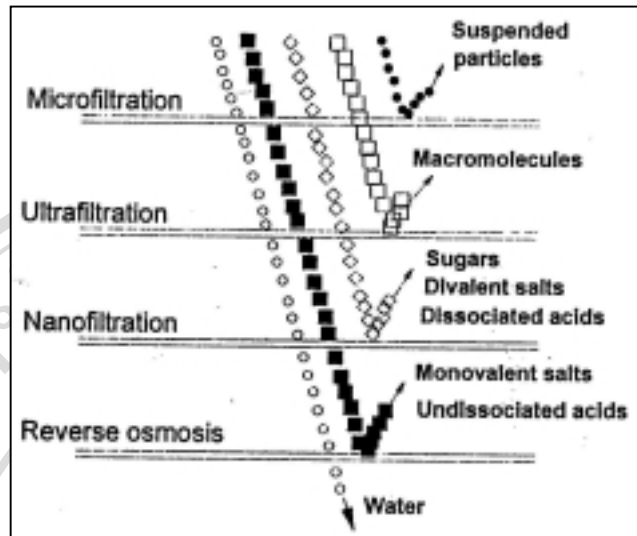
กระบวนการแยกสารที่อาศัยแรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างของความดันสามารถแบ่งแยกตามลักษณะการใช้งานได้เป็น 4 กระบวนการ (แสดงดังรูปที่ 2.2) คือ

2.1.1 กระบวนการออสโมซิสผ่นกลับ (reverse osmosis, RO) เป็นกระบวนการแยกตัวถูกละลายขนาดเล็ก เช่น เกลือชนิดโมโนวาเลนต์ หรือกรดที่ไม่แตกตัว เป็นต้น ออกจากตัวทำละลาย ความดันที่ให้แก่สารละลายจะต้องสูงกว่าความดันออสโมติกของสารละลายจึงจะทำให้สารละลายสามารถผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ไปยังสารละลายที่เจือจางกว่าได้ ความดันที่ให้แก่สารละลายประมาณ 35-100 bar กระบวนการนี้จึงไม่สามารถจะแยกสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงๆ ได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดของความดันออสโมติกสูงของสารละลาย นิยมใช้กระบวนการนี้ในการทำน้ำบริสุทธิ์จากน้ำทะเล และการทำน้ำผลไม้เข้มข้น

2.1.2 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration, NF) เป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารละลายที่มีอิออนต่างชนิดออกจากกัน มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าเยื่อแผ่นแบบ RO และใช้ความดันต่ำกว่าคือประมาณ 10-30 bar อนุภาคที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้จะต้องมีขนาดเล็กกว่ารูพรุน เช่น สารประกอบอินทรีย์พวกน้ำตาลหรือเกลือชนิดไดวาเลนต์ กระบวนการนี้ยังใช้ในการแยกสารที่สามารถแตกตัวได้ในสารประกอบออกจากสารที่ไม่สามารถแตกตัวได้ ตัวอย่างการนำไปใช้งาน เช่น ใช้กำจัดเกลือโซเดียม เกลือโพแทสเซียม และกรดออกจากหางนม (Nguyen et al., 2003) การกำจัดอิออนของไนเตรทออกจากน้ำดื่ม (Paugam et al., 2003)

2.1.3 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration, UF) เป็นกระบวนการแยกสารโมเลกุลใหญ่หรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.001-0.02 ไมครอน เช่น โปรตีน เอนไซม์ โพลีแซคคาไรด์ เป็นต้น ออกจากน้ำและสารโมเลกุลเล็กอื่นๆ ความดันที่ให้แก่สารละลายอยู่ในช่วง 1-10 bar ซึ่งต้องเลือกชนิดและขนาดของรูพรุนของเยื่อแผ่นให้เหมาะสม เยื่อแผ่นที่มีการผลิตออกจำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบัน มีการบอกขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่ใช้งานในกระบวนการแยก UF เป็น Molecular Weight Cut-Off (MWCO) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการกักสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่กำหนด หรือมากกว่าที่กำหนดได้อย่างต่ำ 90% เช่น เยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่มี MWCO 25,000 หมายถึง เยื่อแผ่นสังเคราะห์นี้มีความสามารถในการกักกันสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับหรือมากกว่า 25,000 ได้ อย่างต่ำ 90% ของสารตั้งต้น ส่วนสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 25,000 ก็สามารถผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์นั้นไปได้ อย่างไรก็ตามความสามารถในการกักกันสารของเยื่อแผ่นยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ชนิดและรูปร่างโมเลกุลของสารที่ต้องการแยก ปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุล ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย และปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลกับเยื่อแผ่น ตลอดจนสภาพการใช้งานของเยื่อแผ่นสังเคราะห์ เป็นต้น นิยมนำไปใช้ในการทำให้สารบริสุทธิ์ เช่น ใช้ในการทำน้ำอ้อยให้บริสุทธิ์ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำตาล (Ghosh et al., 2000, Karode et al., 2000 และ Balakrishnan et al., 2000) หรือใช้ในการทำให้สารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เช่น ปั่นสุก้า (2535) พบว่าการใช้เยื่อแผ่น UF ร่วมกับการระเหยทำให้น้ำเสาวรเข้มข้นมีคุณภาพดีกว่าการเพิ่มความเข้มข้นด้วยการระเหยเพียงอย่างเดียว

2.1.4 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration, MF) เป็นกระบวนการแยกอนุภาคออกจากสารแขวนลอยโดยให้สารแขวนลอยไหลผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่ใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อน ทำให้ตัวทำละลายและสารที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นสามารถผ่านเยื่อแผ่นออกมาได้ ความดันที่ให้กับสารแขวนลอยจะไม่เกิน 5 bar และสามารถกักสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 300,000 หรือมีขนาดโมเลกุลประมาณ 0.1-10 ไมครอน นิยมใช้ในกระบวนการทำให้ใสและการแยกสารแขวนลอยออกจากสารละลาย



รูปที่ 2.2 กระบวนการแยกสารที่อาศัยแรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างของความดัน (Cheryan, 1998)

2.2 วัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่น

สารที่ใช้ในการสังเคราะห์เยื่อแผ่นนั้นมีมากกว่า 130 ชนิด แต่มีเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่มีการผลิตในทางการค้า และมีเพียงส่วนน้อยที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานทางอุตสาหกรรมอาหารและยาหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแบ่งชนิดของเยื่อแผ่นตามวัสดุที่ใช้ในการผลิตได้ 2 ชนิด คือ

2.2.1 เยื่อแผ่นจากโพลีเมอร์

วัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่นสังเคราะห์ ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) โพลีสัลโฟน (polysulfone) โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride) โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene) เป็นต้น เยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่ทำจากสารโพลีเมอร์เหล่านี้ มีอายุการใช้งานประมาณ 1-4 ปี มีราคาสูง และมีรูปแบบหลายชนิด เช่น แบบแผ่น แบบเส้นใยกลวง เป็นต้น โพลีเมอร์บางชนิดที่นิยมใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น ได้แก่

1. เซลลูโลสอะซิเตต (cellulose acetate; CA) และอนุพันธ์

ข้อดี

- มีสมบัติชอบน้ำและโมเลกุลมีขั้ว (hydrophilicity) ซึ่งเป็นสมบัติที่มีความสำคัญมาก เพราะสามารถลดการอุดตัน (fouling) ของเยื่อแผ่น
- สามารถผลิตให้มีขนาดรูพรุนต่างๆ ได้ตั้งแต่ RO ถึง MF

- ผลิตได้ง่าย
- ต้นทุนการผลิตต่ำ

ข้อเสีย

- ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิแคบ อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถทำงานได้คือ 30 องศาเซลเซียส
- ทนความเป็นกรด-ด่างได้ในช่วงแคบ คือตั้งแต่ 2-8 แต่จะทำงานได้ดีที่ความเป็นกรด-ด่างในช่วง 3-6 การที่เซลลูโลสอะซิเตตไม่ทนทานต่อความเป็นกรด-ด่างทำให้มีปัญหาในการล้างเยื่อแผ่น เพราะสารล้างที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่มักเป็นด่างหรือกรด
- ไม่ทนทานต่อคลอรีน เนื่องจากคลอรีนสามารถออกซิไดซ์เซลลูโลสอะซิเตตทำให้รูพรุนขยายใหญ่ขึ้น และมีผลทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ด้วยสมบัติที่ไม่ทนต่อคลอรีน จึงเป็นอุปสรรคสำคัญในการนำเยื่อแผ่นชนิดนี้ไปใช้งาน ทั้งนี้เพราะคลอรีนเป็นสารที่นิยมใช้ในการฆ่าเชื้อในอุตสาหกรรมอาหาร
- ที่สภาวะความดันสูงจะเกิดการอัดแน่นของตะกอน (compaction) ได้ง่ายกว่าเยื่อแผ่นชนิดอื่น ทำให้เยื่อแผ่นสูญเสียสมบัติโดยเฉพาะสมบัติการซึมผ่าน ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง
- ुकย่อยสลายโดยทางชีวภาพได้ง่าย เนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยเซลลูโลส จึงถูกทำลายได้ง่ายด้วยจุลินทรีย์ทั้งยังไม่สามารถฆ่าเชื้อโดยใช้คลอรีนได้ทำให้อายุการใช้งานสั้น

2. โพลีเอไมด์ (polyamide; PA)

สมบัติของสารในกลุ่มโพลีเอไมด์ถูกกำหนดโดยพันธะเอไมด์ (-CONH-) ที่ปรากฏในโครงสร้างสมบัติของโพลีเอไมด์มีดังนี้

- สามารถใช้งานได้ในช่วงความเป็นกรด-ด่างที่กว้างกว่าเซลลูโลสอะซิเตต คือตั้งแต่ 3-11
- ไม่ทนทานต่อคลอรีน
- มีแนวโน้มที่จะเกิดการสะสมและเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (biofouling) บริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นสูง

3. โพลีซัลโฟน (polysulfone)

เยื่อแผ่นในกลุ่มโพลีซัลโฟนใช้แพร่หลายใน MF และ UF โดยเฉพาะโพลีอีเทอร์ซัลโฟน (polyethersulfone; PES) สมบัติที่สำคัญของเยื่อแผ่นในกลุ่มนี้ได้แก่

- ทนอุณหภูมิได้ในช่วงกว้าง สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 75 องศาเซลเซียส บางชนิดอาจทนความร้อนได้ถึง 125 องศาเซลเซียส จึงฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำได้ ซึ่งเหมาะกับงานทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพและการหมัก
- ทนความเป็นกรด-ด่างได้ในช่วงกว้าง ทำงานได้อย่างต่อเนื่องที่ความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 1-13 ซึ่งเป็นผลดีต่อการทำความสะอาดเยื่อแผ่น
- ทนต่อคลอรีนได้ค่อนข้างดี แต่การสัมผัสคลอรีนความเข้มข้นสูงเป็นเวลานานอาจทำให้เยื่อแผ่นเสียหายได้
- สามารถผลิตให้มีรูพรุนหลายขนาดทั้ง UF และ MF
- ทนต่อสารเคมีพวกกรด แอลกอฮอล์ อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (aliphatic hydrocarbons) และฟลูออโรโลจีเนตไฮโดรคาร์บอน (fully halogenated hydrocarbons) แต่ไม่ทนต่ออะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbons) คีโตน (ketones) อีเทอร์ (ethers) และเอสเทอร์ (esters)
- ไม่ทนต่อความดัน ทำงานได้ที่ความดันต่ำ (7 bar สำหรับเยื่อแผ่นแบบแผ่น และ 1.7 bar สำหรับแบบเส้นใยกลวง)
- มีสมบัติไม่ชอบน้ำแต่ชอบโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (hydrophobicity) ทำให้เกิด fouling ได้ง่าย

4. ไนลอน (nylon)

สมบัติของไนลอน มีดังนี้

- มีสมบัติชอบน้ำและโมเลกุลมีขั้ว (hydrophilicity) จึงลดการเกิด fouling
- สามารถนึ่งฆ่าเชื้อได้
- สามารถจับกับขั้วโมเลกุล เช่น กรดนิวคลีอิก และโปรตีน

5. โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride; PVDF)

สมบัติของโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ มีดังนี้

- สามารถนึ่งฆ่าเชื้อได้
- ทนต่อสารเคมีได้ค่อนข้างดี

- มีสมบัติไม่ชอบน้ำแต่ชอบโมเลกุลไม่มีขั้ว (hydrophobicity) แต่บางชนิดมีการดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลให้มีสมบัติชอบน้ำและโมเลกุลมีขั้ว (hydrophilicity) เพิ่มขึ้น เพื่อให้สมบัติดีขึ้น
- นิยมใช้ในการผลิตเยื่อแผ่นสำหรับ MF และ UF
- ทนต่อคลอรีนได้ดีกว่าเยื่อแผ่นในกลุ่มโพลีเอทิลีน
- นิยมใช้ในการทำน้ำผลไม้ตระกูลส้มให้ใส เพราะทนต่อ limonene

6. โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene; PTFE)

สมบัติของโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน มีดังนี้

- ทนต่อสภาวะกรดและด่างแก่และทนต่อตัวทำละลาย
- ทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ตั้งแต่ -100 องศาเซลเซียส ถึง 260 องศาเซลเซียส
- มีสมบัติไม่ชอบน้ำแต่ชอบโมเลกุลไม่มีขั้ว (hydrophobicity) สูง จึงใช้กับสารละลายอินทรีย์ ไขมันและก๊าซ
- มีขนาดรูพรุนเฉพาะในช่วงของ MF

7. โพลีโพรพิลีน (polypropylene; PP)

สมบัติของโพลีโพรพิลีน มีดังนี้

- มีสมบัติไม่ชอบน้ำแต่ชอบโมเลกุลไม่มีขั้ว (hydrophobicity)
- ค่อนข้างเฉื่อย
- ทนอุณหภูมิสูงได้ปานกลาง

2.2.2 เยื่อแผ่นอนินทรีย์ (inorganic membrane)

อาจเรียกว่า ceramic membrane หรือ mineral membrane เยื่อแผ่นชนิดนี้เหมาะกับการใช้งานในด้านอุตสาหกรรมอาหารเพราะทนทานต่อกระบวนการแปรรูป การทำความสะอาดและการฆ่าเชื้อ โครงสร้างของเยื่อแผ่นอนินทรีย์ประกอบด้วยแผ่นฟิล์มบางๆ ของสารอนินทรีย์เคลือบบนโลหะหรือเซรามิกเพื่อเกิดเป็นชั้นของเยื่อแผ่น วัสดุที่ใช้ในเยื่อแผ่นอนินทรีย์ ได้แก่ แก้ว โลหะต่างๆ สารประกอบอโลหะนิยามออกไซด์ ซิลิกา เซอร์โคเนีย เป็นต้น เยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่ทำจากสารเหล่านี้สามารถทนต่อสารเคมี ทนอุณหภูมิสูง มีความแข็งแรง ทนความดันสูง อายุการใช้งานประมาณ 10 ปี มีราคาแพง ในปัจจุบันเยื่อแผ่นอนินทรีย์มีใช้เฉพาะในงานของ MF, UF และ NF เท่านั้น

ข้อดี

- ใช้ได้กับสารเคมีและตัวทำละลายได้เกือบทุกชนิด
- ใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิกว้างคือ 125-350 องศาเซลเซียส
- ใช้ได้ในช่วงความเป็นกรด-ด่างกว้างคือ 0.5-13
- ทนความดันได้ประมาณ 10 bar
- สามารถทำการล้างแบบสวนทางได้ (backflushing)
- ทนทาน

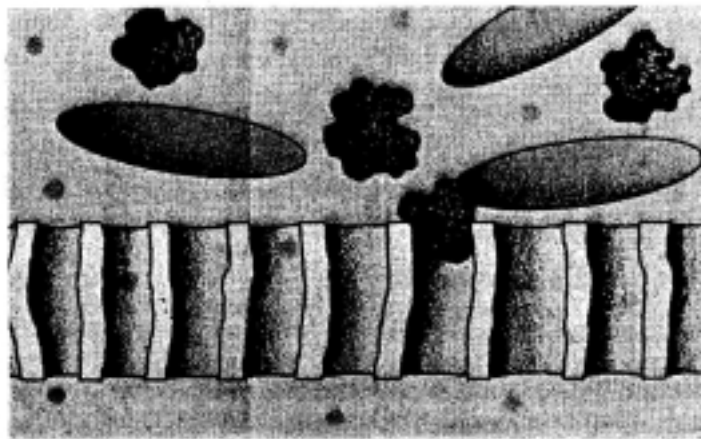
ข้อเสีย

- เปราะ จึงเสียหายได้จากการเพิ่มลดอุณหภูมิแบบกะทันหัน
- ขนาดรูพรุนมีเพียงช่วงการทำงานแบบ MF, UF และ NF
- มีราคาแพง

2.3 ชนิดของเยื่อแผ่นสังเคราะห์

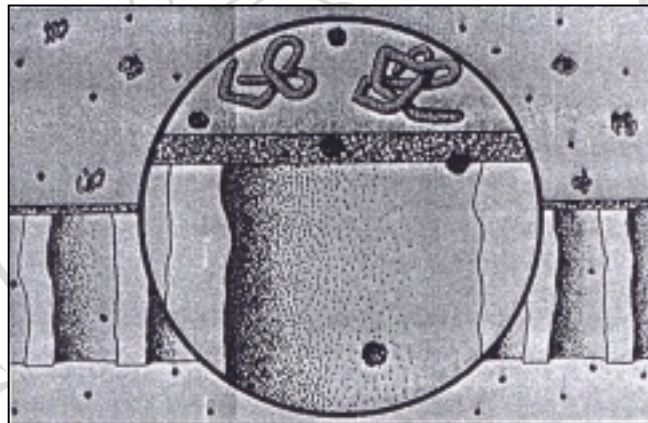
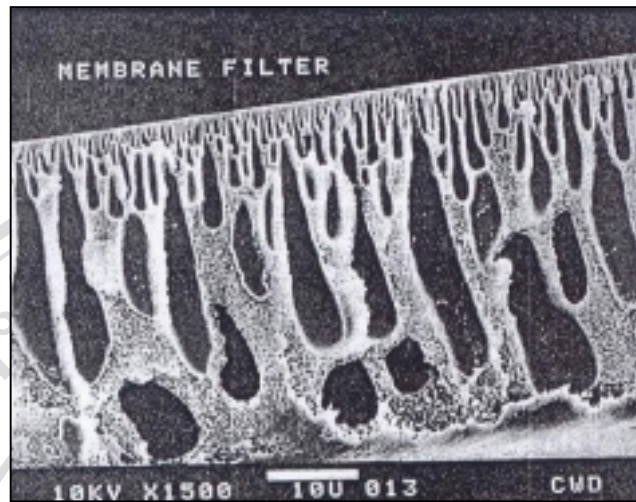
เยื่อแผ่นสังเคราะห์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ตามลักษณะของโครงสร้างของเยื่อแผ่น ดังนี้

2.3.1 เยื่อแผ่นแบบสมมาตร (symmetric/microporous membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดสม่ำเสมอเมื่อมองในภาพตัดขวางดังรูปที่ 2.3 อนุภาคของตัวถูกละลายสามารถติดอยู่บนผิวหน้าที่มีลักษณะตาข่ายของเยื่อแผ่นหรือเข้าไปในรูพรุนได้ สามารถกรองหรือเก็บกักอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน เช่น เยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.45 ไมครอน จะสามารถกักอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.45 ไมครอน ไม่ให้ผ่านเยื่อแผ่น แต่อนุภาคที่มีขนาดเล็กใกล้เคียงกับรูพรุนสามารถเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนได้ และพบว่าเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ จะมีอัตราการไหลช่วงแรกสูงแต่จะเกิดการอุดตันอย่างรวดเร็ว เยื่อแผ่นชนิดนี้มักใช้กับกระบวนการ MF



รูปที่ 2.3 ลักษณะและแบบจำลองการทำงานของเยื่อแผ่นแบบสมมาตร (Cheryan, 1998)

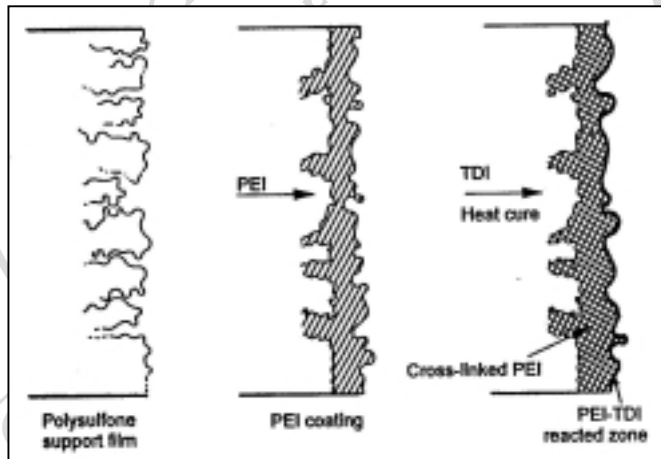
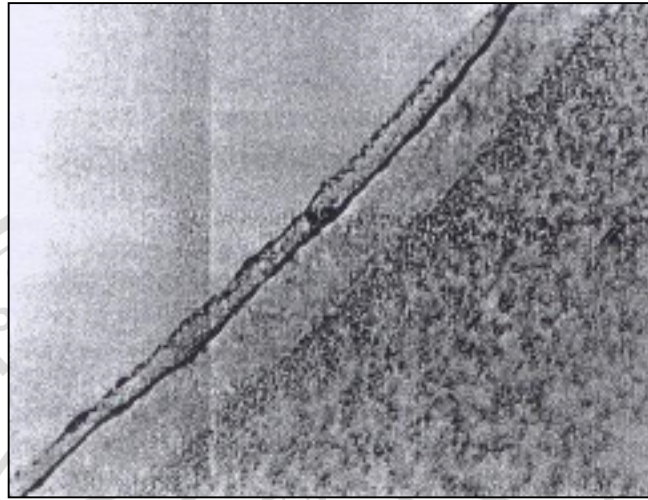
2.3.2 เยื่อแผ่นแบบไม่สมมาตร (asymmetric skinned membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่บริเวณผิวหน้ามีรูพรุนขนาดเล็กมากคล้ายแผ่นบางๆ (thin skin) ส่วนชั้นล่างมีรูพรุนขนาดใหญ่คล้ายช่องว่าง (void) ดังรูปที่ 2.4 การเก็บกักสารจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นเท่านั้น และอนุภาคจะไม่สามารถแทรกเข้าไปในตัวเยื่อแผ่นได้ จึงมักไม่เกิดการอุดตันในรูพรุน อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นชนิดนี้ก็เกิดการลดลงของฟลักซ์ได้ง่ายเช่นกันจากการสะสมของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นชนิดนี้มักใช้กับกระบวนการ UF, NF และ RO



รูปที่ 2.4 ลักษณะและแบบจำลองการทำงานของเยื่อแผ่นแบบไม่สมมาตร (Cheryan, 1998)

2.3.3 เยื่อแผ่นประกอบ (composite membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่เกิดจากการซ้อนทับกันของโพลีเมอร์มากกว่าหนึ่งชนิด เช่น มีฐานรองรับเป็นเยื่อแผ่นแบบมีรูพรุนแต่ผิวหน้าเป็นแผ่นบางจัดเป็นเยื่อแผ่นแบบไม่สมมาตรเช่นกัน ตัวอย่างเช่น เคลือบ polyethylenimine (PEI) บนตัวรองรับคือ polysulfone (PS) แล้วเคลือบ toluene 2,4 diisocyanate (TDI) และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.5 ทั้งนี้เยื่อแผ่นประกอบที่ได้จะมีสมบัติดีขึ้น เช่น ทนความเป็นกรด-ด่างได้ช่วงกว้างขึ้น สามารถทนความดัน อุณหภูมิสูงขึ้น มักใช้กับกระบวนการ RO

นอกจากนี้ยังมีเยื่อแผ่นแบบอื่นๆ อีก ได้แก่ เยื่อแผ่นไดนามิก (dynamic membrane) เยื่อแผ่นของเหลว (liquid membrane) เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange membrane) เป็นต้น

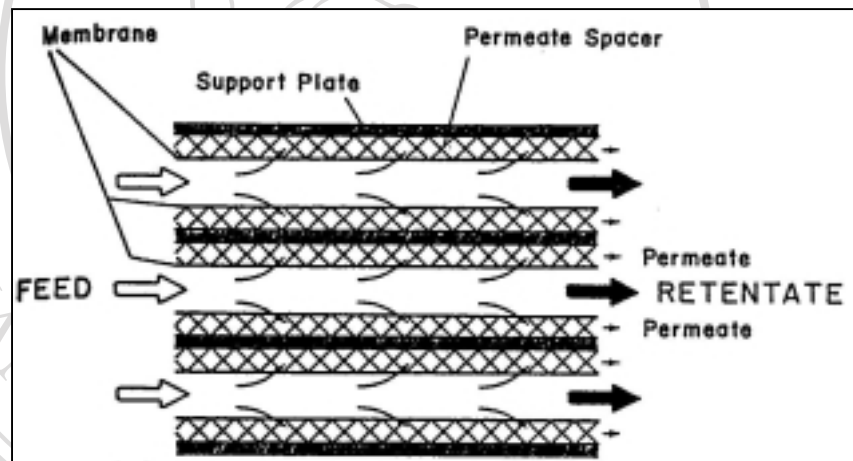


รูปที่ 2.5 เยื่อแผ่นประกอบ (Cheryan, 1998)

2.4 อุปกรณ์เยื่อแผ่น (membrane module)

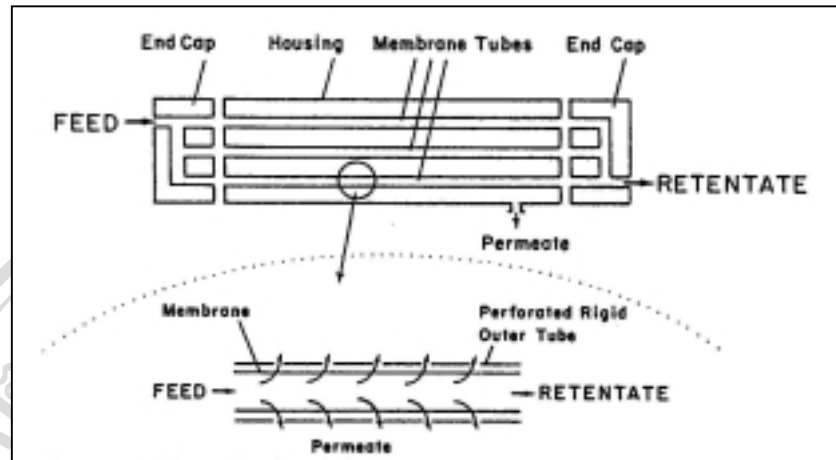
เยื่อแผ่นที่ผลิตขึ้นอาจมีรูปร่างต่างๆ กัน ในการใช้งานต้องบรรจุหรือประกอบเยื่อแผ่นในหน่วยอุปกรณ์ให้มีพื้นที่เยื่อแผ่นตามต้องการซึ่งเรียกว่า module ได้มีการออกแบบอุปกรณ์ที่มีรูปร่างต่างกัน โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ แบบแผ่นและกรอบ (plate and frame) แบบท่อ (tubular) แบบเส้นใยกลวง (hollow fibers) และแบบท่อม้วน (spiral wound) หลักในการออกแบบต้องคำนึงถึงการใช้งาน คือ ต้องมีอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น และมีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง

2.4.1 หน่วยอุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ (plate and frame module) ประกอบด้วยเยื่อแผ่นที่ทำจากวัสดุลักษณะคล้ายตาข่ายประกบอยู่กับ plate ระหว่างเยื่อแผ่นกับ plate มีช่องว่างสำหรับให้เพอร์มิเอทไหล plates อาจวางเรียงต่อกันในลักษณะซ้อนกัน หรือเรียงกันเป็นชั้นๆ ปกติช่องสวอป้อนจะกว้างกว่าช่องเพอร์มิเอท นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อื่นๆ ประกอบเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของรีเทนเตตและเพอร์มิเอท ข้อดีของอุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบคือสามารถหาส่วนที่เกิดการรั่วของเยื่อแผ่นได้ง่ายเนื่องจากสามารถมองเห็นการทำงานของ plate แต่ละคู่ และการเปลี่ยนเยื่อแผ่นทำได้ง่าย แต่มีข้อควรระวังคือ ต้องแทนที่เยื่อแผ่นที่เปลี่ยนให้ถูกต้อง และประกบ plate ให้แน่นมิฉะนั้นอาจเกิดการรั่วของสวอป้อนได้ แผนภูมิแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบแสดงดังรูปที่ 2.6



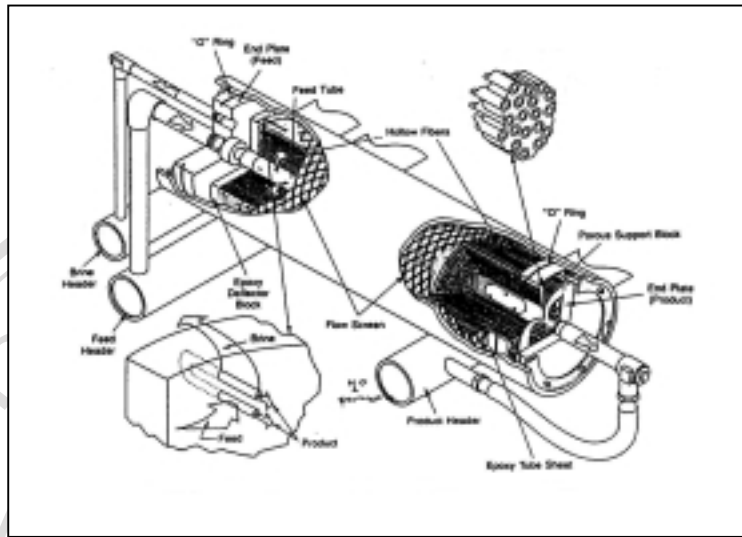
รูปที่ 2.6 แผนภูมิแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ (Cheryan, 1998)

2.4.2 อุปกรณ์แบบท่อ (tubular module) เยื่อแผ่นจะเคลือบอยู่ภายในท่อโลหะหรือพลาสติกที่มีรูพรุน เยื่อแผ่นอาจเป็นชนิดโพลีเมอร์หรือเซรามิก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ 0.5-1.0 เซนติเมตร (Baker, 2000) โดยปกติจะประกอบด้วยท่อเยื่อแผ่นหลายๆ ท่อ (ขึ้นอยู่กับพื้นที่เยื่อแผ่นที่ต้องการ) บรรจุอยู่ในตัวบรรจุ (housing) สวอป้อนจะไหลเข้าด้านในท่อและเพอร์มิเอทซึ่งไหลผ่านเยื่อแผ่นจะถูกเก็บมารวมกัน อุปกรณ์แบบท่อมีข้อดี คือ สามารถกรองสวอป้อนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ได้ และมีอัตราการไหลสูง เนื่องจากเส้นผ่าศูนย์กลางท่อค่อนข้างใหญ่ ทำความสะอาดได้ง่ายด้วยวิธี Clean In Place (CIP) แต่มีข้อเสีย คือ เป็นอุปกรณ์ชนิดที่ใช้พลังงานสูงที่สุดในการทำงาน และมีราคาแพง แผนภูมิแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์แบบท่อแสดงดังรูปที่ 2.7



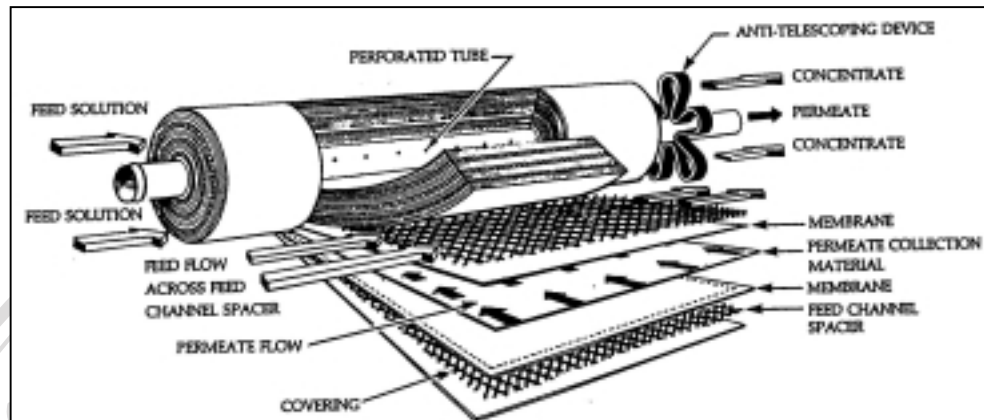
รูปที่ 2.7 แผนภูมิแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์แบบท่อ (Cheryan, 1998)

2.4.3 อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง (hollow fibers) เส้นใยมีรูกลวงมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2-3 มิลลิเมตร และมีความหนาอยู่ระหว่าง 100-400 ไมครอน เส้นใยแต่ละมัดประกอบด้วย เส้นใยมีรูกลวง 50-3,000 เส้น ขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางและขนาดบรรจุ ปลายของเส้นใยสองด้าน ฝังอยู่ในชิ้นฐานแล้วบรรจุในตัวบรรจุ (รัตน, 2541) สำหรับการใช้งานมี 2 แบบ คือ แบบป้อนสาร ด้านในเส้นใยและเก็บเพอร์มิเอทจากด้านนอกเส้นใย และแบบป้อนสารจากด้านนอกเส้นใยและ เก็บเพอร์มิเอทจากด้านในเส้นใย อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวงมีข้อดี คือ เป็นอุปกรณ์ที่มีอัตราส่วน พื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงที่สุด และสามารถทำความสะอาดด้วยวิธีล้างแบบสวนทางได้ (back washing) แต่มีข้อเสีย คือ เกิดการอุดตันได้ง่ายเนื่องจากเยื่อแผ่นมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก และเสียค่าใช้จ่ายสูง ในการเปลี่ยนเยื่อแผ่น แผนภูมิแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์แบบเส้นใยกลวงแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภูมิแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง (Cheryan, 1998)

2.4.4 อุปกรณ์แบบท่อม้วน (spiral wound) ประกอบด้วยเยื่อแผ่นเรียบ 2 แผ่นที่กั้นด้วยตาข่ายบางๆ มาม้วนรอบแกน สารป้อนจะเข้ามาตามความยาวของหน่วยกรอง ในขณะที่เพอร์มิเอทจะผ่านเยื่อแผ่นเข้าสู่ทางของเพอร์มิเอทซึ่งถูกรวบรวมไปยังท่อตรงกลาง การเพิ่มพื้นที่เยื่อแผ่นไม่ต้องเพิ่มความยาวของช่องสารป้อนหรือเพอร์มิเอท แต่ทำได้โดยซ้อนเยื่อแผ่นเพิ่มแล้วม้วนเข้าด้วยกัน อุปกรณ์แบบท่อม้วนมีข้อดี คือ สามารถเลือกเยื่อแผ่นที่มีพื้นที่การกรองได้ตามต้องการ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานน้อยที่สุดในการทำงาน และราคาถูก มีข้อเสีย คือ มักเกิดการอุดตันในช่องว่างที่เป็นตาข่ายของช่องสารป้อน เกิดการเสียหายของเยื่อแผ่นได้ง่าย และไม่สามารถเปลี่ยนสลับอุปกรณ์ที่ผลิตจากต่างบริษัทได้ แผนภูมิแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์แบบท่อม้วนแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภูมิแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์แบบท่อม้วน (Cheryan, 1998)

อุปกรณ์เยื่อแผ่นทั้ง 4 แบบ มีลักษณะการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น พื้นที่การกรอง พลิกซ์ของเพอร์มิเอท เป็นต้น ดังแสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 2.1

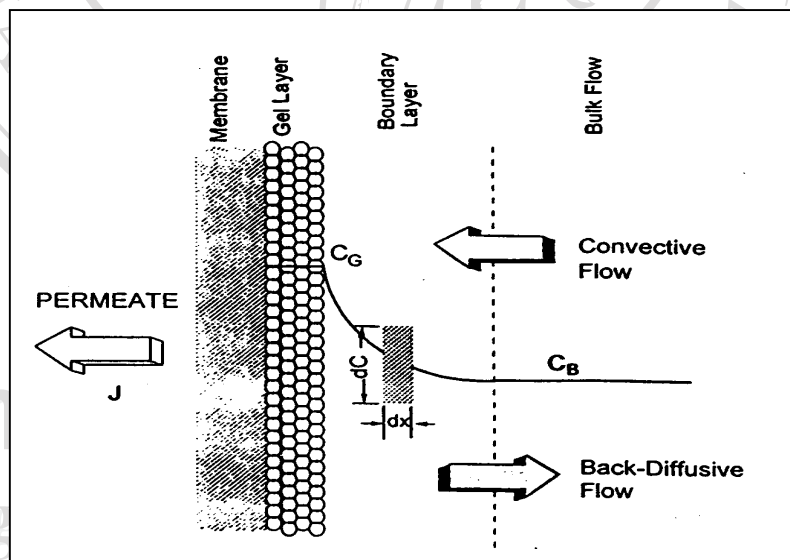
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการทำงานของอุปกรณ์เยื่อแผ่นทั้ง 4 ชนิด

Characteristic	Module type			
	Plate and frame	Spiral wound	Tubular	Hollow fiber
Packing density (m^2 / m^3)	200-400	300-900	150-300	9,000-30,000
Permeate flux ($m^3 / (m^2 \text{ day})$)	0.3-1.0	0.3-1.0	0.3-1.0	0.004-0.08
Flux density ($m^3 / (m^3 \text{ day})$)	60-400	90-900	45-300	36-2400
Feed channel diameter (mm.)	5	1.3	13	0.1
Method of replacement	As sheets	As module assembly	As tubes	As entire module
Replacement labor	High	Medium	High	Medium
Pressure drop				
Product side	Medium	Medium	Low	High
Feed side	Medium	Medium	High	Low
Concentration polarization	High	Medium	High	Low
Suspended solids buildup	Low/medium	Medium/high	Low	High

(ที่มา Singh and Heldman, 2001)

2.5 คอนเซนเตรชันโพลาไรซ์เซชัน (Concentration Polarization, CP)

ในการกรองแยกสารละลายด้วยเยื่อแผ่น อนุภาคขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถผ่านรูพรุนได้จะรวมตัวกันบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่น จึงเกิดการสะสมอนุภาคของตัวถูกละลายใกล้ผิวเยื่อแผ่นทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลายระหว่างผิวเยื่อแผ่นกับบริเวณที่ห่างออกไป เกิดการเคลื่อนที่ย้อนกลับ (back diffusion) จากผิวหน้าเยื่อแผ่นไปยังสารละลาย ทำให้อัตราการไหลของเพอร์มิเอตลดลง เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่าคอนเซนเตรชันโพลาไรซ์เซชัน (Concentration Polarization, CP) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ถ้าหากความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเยื่อแผ่นมีค่าสูงถึงขีดจำกัดของการละลาย (C_G) ของสารนั้น ตัวถูกละลายอาจเกิดลักษณะคล้ายเจลที่บริเวณผิวเยื่อแผ่นมีผลทำให้ตัวทำละลายเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นไม่ได้เลย CP สามารถชะลอให้เกิดช้าลงได้โดยการเปลี่ยนสภาวะการทำงาน เช่น ลดความดัน เพิ่มอัตราการไหล ลดความเข้มข้นของสารป้อน หรือใช้วิธีการทำความสะอาดด้วยน้ำ เป็นต้น ปรากฏการณ์ CP เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในกระบวนการเยื่อแผ่น เมื่อทำการกรองเป็นระยะเวลาหนึ่ง CP จะพัฒนา กลายเป็นสารอุดตัน (fouling) ซึ่งต้องกำจัดด้วยการล้างด้วยสารเคมีหรือเอนไซม์เท่านั้น



รูปที่ 2.10 แบบจำลองการเกิด Concentration Polarization (Cheryan, 1998)

2.6 การอุดตัน (fouling) และการทำความสะอาด

เกิดจากการสะสมและตกตะกอนของสารแขวนลอยหรือตัวถูกละลายบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่น และ/หรือภายในรูพรุน ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงแบบไม่ผันกลับและยังทำให้สมบัติการกักกันสารเปลี่ยนแปลงด้วย ซึ่งสามารถเกิดได้ในทุกสภาวะการกรองแม้ว่าจะมีการควบคุมความดัน อัตราการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารป้อน ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิด fouling มี 3 ปัจจัยคือ (Cheryan, 1998)

1. สมบัติของวัสดุเยื่อแผ่น

- สมบัติการชอบน้ำ เยื่อแผ่นที่ทำจากวัสดุที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำและชอบโมเลกุลไม่มีขั้วสามารถจับกับสารประกอบที่ไม่มีขั้ว เช่น โปรตีน ทำให้เกิด fouling ได้ง่าย ดังนั้นจึงควรเลือกใช้เยื่อแผ่นที่มีสมบัติชอบน้ำและโมเลกุลมีขั้วเพื่อช่วยลดการเกิด fouling
- ลักษณะผิวหน้า เยื่อแผ่นที่มีผิวหน้าขรุขระ เช่น โพลีเอไมท์จะเกิด fouling ได้มากกว่าเยื่อแผ่นที่มีผิวหน้าเรียบ เช่น เซลลูโลสอะซิเตต เนื่องจากส่วนที่ขรุขระจะจับกับสารแขวนลอยในสารป้อนได้ง่ายกว่า นำไปสู่การเกิด fouling
- ประจุ ถ้าเยื่อแผ่นและอนุภาคในสารป้อนมีประจุชนิดเดียวกันจะเกิดการผลักกันของประจุ แต่ถ้ามีประจุต่างกันจะเกิดการดูดกันของประจุทำให้เกิด fouling
- ขนาดรูพรุน เยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จะให้ค่าฟลักซ์สูงกว่าเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดเล็กแต่จะเกิดการอุดตันภายในรูพรุนได้ง่ายจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กหรือมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดรูพรุน ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะในการกรองที่ความดันสูง ทั้งนี้เพื่อลดการอุดตันภายในรูพรุนจึงควรเลือกใช้เยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่าขนาดอนุภาค 10 เท่า

2. สมบัติของตัวละลาย

- โปรตีน เนื่องจากโปรตีนเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยหมู่ที่ไม่มีขั้วเป็นจำนวนมาก และมีโครงสร้างทุติยภูมิและตติยภูมิที่สามารถจับกับอนุภาคในสารป้อนและเยื่อแผ่น โปรตีนจึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิด fouling
- เกลือ เกลือที่มีประจุบวก สามารถจับกับเยื่อแผ่นที่มีประจุเป็นลบได้ดี จึงทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อม (salt bridge) ได้ดี พบว่าการกรอง Ca^{+2} ออกจากนมก่อนจะนำไปกรองจะสามารถลด fouling ได้มาก (Charyan, 1998)

- ความเป็นกรด-ด่าง ถ้าสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับค่า isoelectric point ของโปรตีนจะเกิด fouling มากที่สุด เนื่องจากโปรตีนเกิดการตกตะกอนบนเยื่อแผ่นทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง

3. สภาพการกรอง

- อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิช่วยให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นเนื่องจากทำให้สารป้อนมีความหนืดลดลงและมีการกระจายตัวมากขึ้น แต่ที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เกิดการเสียสภาพของโปรตีนทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง

- อัตราการไหล ที่อัตราการไหลสูงจะเกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นกวาดอนุภาคที่ตกตะกอนอยู่ออกไป จึงช่วยลดความหนาของชั้น CP ทั้งนี้ควรกรองที่สภาวะความดันต่ำ

- ความดัน การเพิ่มความดันในช่วงแรกของการกรองจะช่วยให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นฟลักซ์จะลดลงเนื่องจากเกิดชั้น CP ของสารโมเลกุลใหญ่ และเมื่อเพิ่มความดันขึ้นอีกจะทำให้เกิดการอัดตัวของตะกอนเกิดเป็นชั้น fouling ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง

วิธีการกำจัด fouling เพื่อช่วยให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นทำได้หลายวิธี เช่น (Cheryan, 1998)

1. การใส่วัสดุที่ทำให้เกิดการไหลแบบ turbulence เช่น ลูกแก้วเล็กๆ หรือ วงแหวนขดลวด ซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วของการไหลและแรงเฉือนที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น ทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นได้ แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน

2. วิธีการทำความสะอาดแบบ backflushing, pulsing หรือ shocking วิธีการนี้จะติดตั้งปั๊มเพื่อให้แรงดันจากด้านเพอร์มิเอทไปสู่ด้านรีเทนเนท ทำให้ fouling หลุดออก สำหรับวิธี backflushing นิยมให้ความดัน 1-10 bar เป็นระยะเวลา 1-5 วินาที โดยใน 1 นาทีจะให้ความดัน 10 ครั้ง ส่วนวิธีการ backpulsing และ backshocking จะเป็นการให้ความดันเป็นระยะเวลาที่สั้นกว่าคือ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1 วินาที โดยอาจให้ความดันอย่างต่อเนื่องหรือให้เป็นระยะ วิธีการทำความสะอาดแบบนี้มักใช้ในการกำจัด fouling ที่เกิดในการกรองสารแขวนลอยพวกคอลลอยด์

3. Co-current permeate flow เป็นการควบคุมการเกิด fouling โดยการติดตั้งตัวควบคุมความดันในส่วนรีเทนเนทและเพอร์มิเอท โดยให้ค่าความดันในด้านเพอร์มิเอทต่ำกว่าด้านรีเทนเนท ทำให้เกิดความเร็วสูง และ transmembrane pressure ต่ำ จึงสามารถดัน fouling ไม่ให้มาเกาะติดที่เยื่อแผ่นได้

4. Permeate backpressure เป็นการควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วด้านเพอร์มิเอท โดยเริ่มต้นจะปิดวาล์วส่วนเพอร์มิเอท และให้ความดันด้านสารป้อนคงที่ จากนั้นจึงเปิดวาล์วด้านเพอร์มิเอทและควบคุมให้ความดันด้านเพอร์มิเอทสูงกว่าด้านรีเทนเนทเล็กน้อยเพื่อป้องกันการเกิด fouling วิธีกรนี้เหมาะสำหรับเยื่อแผ่นที่มีโครงสร้างแข็งแรง เพื่อป้องกันแรงดันย้อน และเหมาะกับเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ เช่น MF แต่ไม่เหมาะกับ UF

5. Intermittent jet เป็นการลดการเกิด fouling โดยการป้อนสารป้อนแบบไม่สม่ำเสมอ ในเวลารวดเร็ว เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวน

6. Pulsatile flow ทำให้เกิดการไหลแบบเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่อง ทำได้หลายวิธี เช่น ใช้ระบบอกสูบ หรือปรับให้ส่วน inlet และ outlet มีความยืดหยุ่น หรือใช้หัวป้อนสารป้อนที่มีลักษณะเป็นแบบจานหมุนมีรู เป็นต้น

7. Electrical methods เป็นการใช้สนามประจุไฟฟ้าเพื่อช่วยลด fouling ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของประจุไฟฟ้าระหว่างสารละลายกับเยื่อแผ่น ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความดันและความเร็วของการกรอง

สารทำความสะอาดจะช่วยให้การกำจัดสารอุดตันบนเยื่อแผ่น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดผง และของเหลว การเลือกใช้สารทำความสะอาดต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารอุดตันแต่ละชนิด เช่น สารอุดตันที่เกิดจากนมควรเลือกใช้สารทำความสะอาดที่มีความเป็นกรดและต่างทำความสะอาดสลับกัน คือ ต่าง กรด และต่าง ตามลำดับ สารอุดตันที่เกิดจากเนยแข็ง ควรใช้สารทำความสะอาดชนิดกรดและต่าง ตามลำดับ ส่วนสารอุดตันที่เกิดจากเพคตินควรทำความสะอาดด้วยสารทำความสะอาดชนิดที่เป็นด่างเพียงอย่างเดียว เป็นต้น สำหรับสารอุดตันชนิดอื่นควรใช้สารทำความสะอาดดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชนิดและลักษณะการทำงานของสารทำความสะอาด

Foulant	Reagent	Time and Temperature	Mode of Action
Fats and oils, Proteins Polysaccharides Bacteria	0.5N NaOH with 200 ppm Cl ₂	30-60 min 25-55°C	Hydrolysis and oxidation
DNA, mineral salts	0.1M-0.5M acid (acetic, citric, nitric)	30-60 min 25-35°C	Solubilization
Fats, oils, Biopolymers, Proteins	0.1% SDS, 0.1% Triton X-100	30 min-overnight 25-55°C	Wetting, emulsifying, Suspending Dispersing
Cell fragment, Fats, oils, proteins	Enzyme Detergents	30 min-overnight 30-40°C	Catalytic breakdown (proteolysis)
DNA	0.5% DNAase	30 min-overnight 30-40°C	Enzyme hydrolysis
Fats, oils, and grease	20-50% ethanol	30-60 min 25-50°C	Solubilization

(ที่มา Cheryan, 1998)

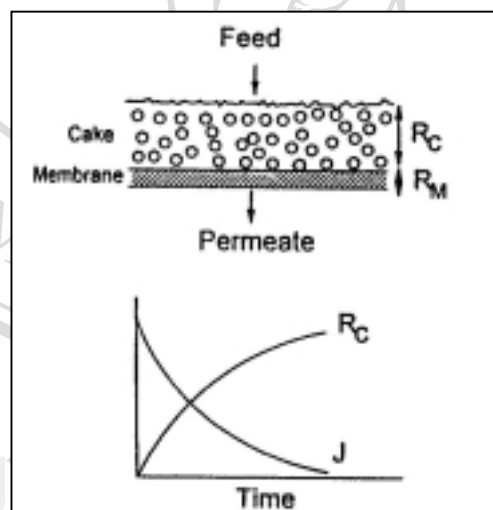
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้วิธีทำความสะอาดเพื่อช่วยให้ค่าฟลักซ์ที่ลดลงกลับคืนมา คือ การใช้วิธี gas backwash (N₂) เพื่อเพิ่มค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำแอมป์เปิดที่ไม่มีเพคตินด้วยเยื่อแผ่น MF พบว่าการทำความสะอาดด้วยวิธีนี้ทุกๆ 15 นาทีตลอดการกรอง 2 ชั่วโมงช่วยให้ค่าฟลักซ์มากกว่าการกรองที่ไม่มีการทำความสะอาด (Su et al., 1993) ส่วนการใช้วิธี automated electrophoretic ที่มีให้กระแสไฟฟ้า 60 โวลต์เป็นเวลา 10 วินาที ทุกๆ 40 นาที จะช่วยกำจัดอนุภาคที่ตกตะกอนหรือเคঁกให้ออกไปจากผิวหน้าเยื่อแผ่น ทำให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเททกลับคืนมาทันทีหลังการทำความสะอาด (Ahmad et al., 2002) เช่นเดียวกับการใช้ infrasonic pulsing ที่ความถี่สูงคือ 6.67 Hz, 0.2 dutycycle(φ) จะช่วยกำจัดเคঁกและทำให้ค่าฟลักซ์ระหว่างการกรองเบียร์และไวน์ให้เพิ่มขึ้น 4 เท่าจากสภาวะการกรองปกติ (Czekaj et al., 2001) และการทำความสะอาดด้วยวิธี pulsatile flow ในการกรองสารละลายเพคติน จะช่วยให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้นมากกว่า 60% (Marwan et al., 1999)

2.7 รูปแบบการกรองผ่านเยื่อแผ่น

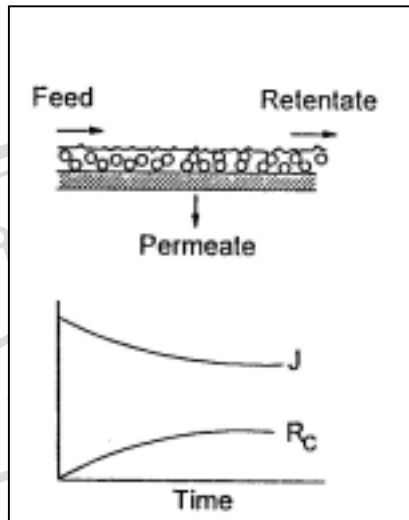
ลักษณะการกรองของกระบวนการเยื่อแผ่นแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบ dead-end และแบบ cross-flow

2.7.1 การกรองแบบ dead-end เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางที่ตั้งฉากกับเยื่อแผ่น ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นที่เรียกว่าเค้ก (cake) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 การสะสมของเค้กทำให้ความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้นและฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว จึงต้องหยุดการกรองเพื่อกำจัดชั้นเค้กที่เกิดขึ้น ดังนั้นการกรองแบบ dead-end เหมาะสมสำหรับการกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน หรือกรองสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นต่ำหรืองานในห้องปฏิบัติการ

2.7.2 การกรองแบบ cross-flow หรือเรียกว่า tangential-flow หรือ inertial-flow เป็นการป้อนสารให้ไหลขนานกับผิวเยื่อแผ่นเพื่อให้เกิดแรงเฉือนและกวาดอนุภาคที่เกาะอยู่กับผิวเยื่อแผ่นให้กลับเข้าไปในสารละลายอย่างต่อเนื่อง ทำให้ฟลักซ์ลดลงไม่มากนักเนื่องจากชั้นเค้กค่อนข้างบาง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ทำให้ลดการเกิด CP และ fouling ได้



รูปที่ 2.11 การกรองแบบ dead-end (Cheryan, 1998)



รูปที่ 2.12 การกรองแบบ cross-flow (Cheryan, 1998)

2.8 สมการที่ใช้ทำนายฟลักซ์

สมการที่ใช้ทำนายฟลักซ์ในการกรองสารละลายผ่านเยื่อแผ่นมีอยู่ด้วยกันหลายสมการคือ

1. สมการของ Hagen-Poiseuille

$$J = \frac{\epsilon d_p^2 P_t}{32 \Delta x \mu}$$

เมื่อ J = ฟลักซ์ของเพอร์มิเอท ($L/m^2 h$ หรือ LMH)

ϵ = พื้นที่รูพรุนของเยื่อแผ่น (cm^2)

d_p = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุน (cm)

P_t = ความดันคร่อมของเยื่อแผ่น (bar)

ΔX = ความหนาของผิวเยื่อแผ่น (cm)

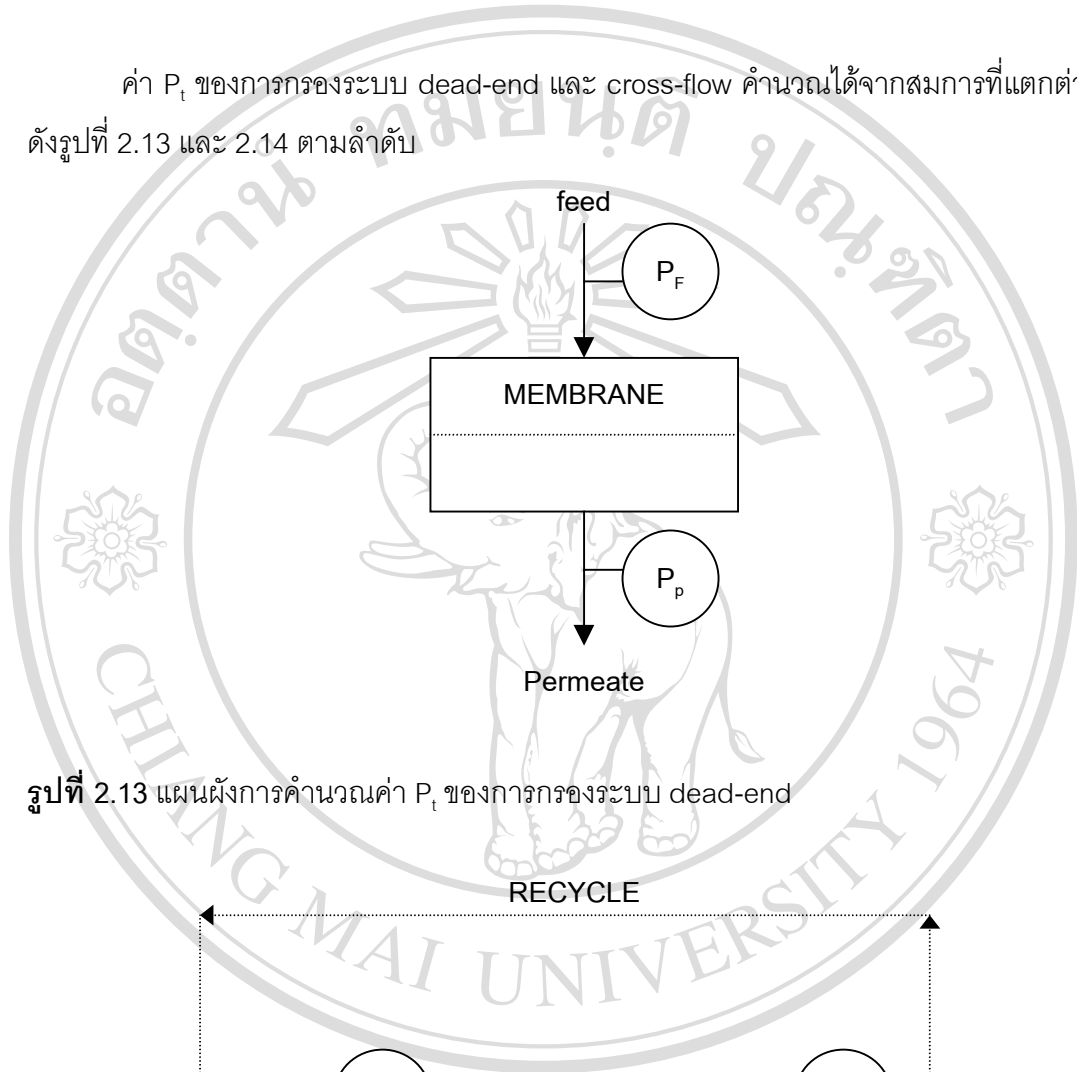
μ = ความหนืดของสารป้อน ($g/cm\text{-}sec$)

สมการที่ใช้หาค่าพื้นที่รูพรุนของเยื่อแผ่น (ϵ) คือ

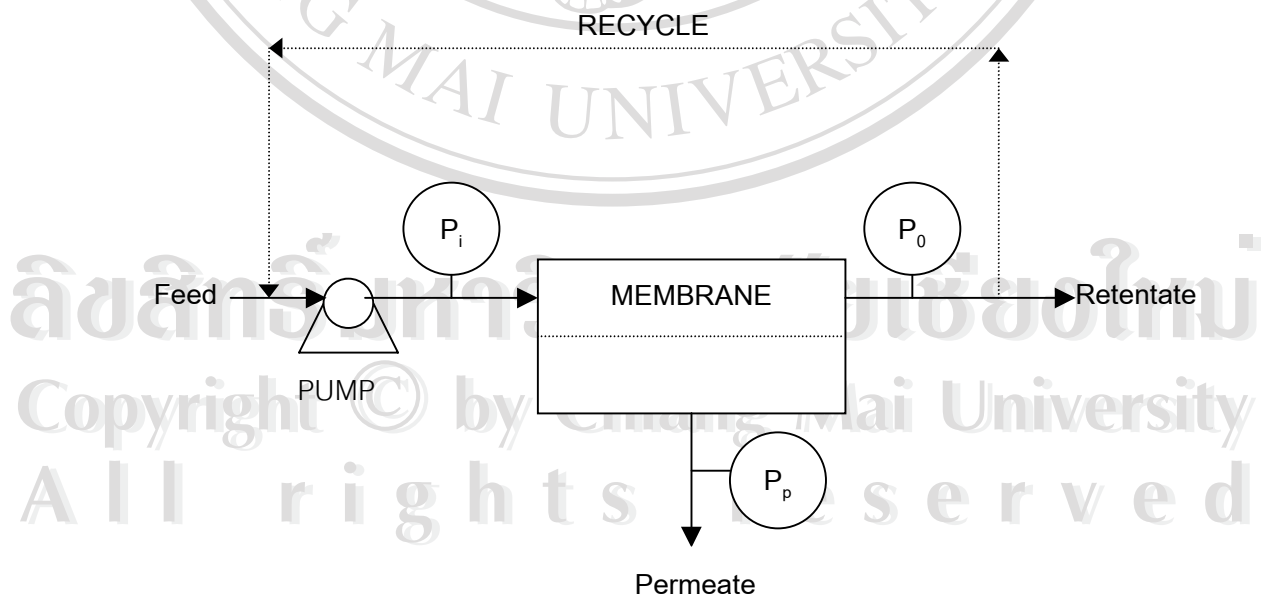
$$\epsilon = N \times \frac{\pi}{4} \times d_p^2$$

เมื่อ N = ความหนาแน่นของรูพรุน (pores/cm²)
 d_p = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุน (cm)

ค่า P_f ของการกรองระบบ dead-end และ cross-flow คำนวณได้จากสมการที่แตกต่างกัน
 ดังรูปที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 แผนผังการคำนวณค่า P_f ของการกรองระบบ dead-end



รูปที่ 2.14 แผนผังการคำนวณค่า P_f ของการกรองระบบ cross-flow

ระบบ dead-end

$$P_t = P_f - P_p$$

เมื่อ $P_f =$ ความดันที่ให้แก่สารป้อน (bar)

$P_p =$ ความดันด้านเพอร์มิเอทของเยื่อแผ่น (bar)

ระบบ cross-flow

$$P_t = \frac{P_i + P_o}{2} - P_p$$

เมื่อ $P_i =$ ความดันขาเข้าของสารป้อน (bar)

$P_o =$ ความดันขาออกของรีเทนเตด (bar)

$P_p =$ ความดันขาออกของเพอร์มิเอท (bar)

สมการของ Hagen-Poiseuille นี้ใช้กับช่วงการกรองที่ค่าฟลักซ์ขึ้นกับความดัน สามารถคาดคะเนค่าฟลักซ์ได้ดีในกรณีที่เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนเท่ากันและมีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทำการกรองที่สภาวะความดันต่ำ ความเข้มข้นของสารป้อนต่ำ อัตราการไหลของสารป้อนสูง ไม่มีการเกิด fouling และมีชั้น CP น้อย

2. Mass transfer (film theory) model

$$J = k \ln \frac{C_g}{C_b}$$

เมื่อ $J =$ ฟลักซ์ของเพอร์มิเอท (L/m^2h หรือ LMH)

$k =$ ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวล (m^3/m^2h หรือ m/h หรือ LMH)

$C_g =$ ความเข้มข้นของเจล (%w/v)

$C_b =$ ความเข้มข้นของสารละลาย (%w/v)

สมการที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวล (k) คือ

$$k = Sh \times \frac{D}{d_h}$$

เมื่อ D = สัมประสิทธิ์การกระจายมวล (mass diffusivity, m^2/h)

Sh = เลขเชอร์วูด (sherwood number)

d_h = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุน (m)

สมการนี้ใช้กับช่วงการกรองที่ค่าฟลักซ์ไม่ขึ้นกับความดัน แต่จะขึ้นกับอัตราการแพร่กลับของตัวละลายจากผิวหน้าเยื่อแผ่นไปยังสารละลาย ดังนั้นค่าฟลักซ์จึงเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นเท่ากับความเข้มข้นของเจลจะไม่ได้ฟลักซ์เลย

3. Resistance model สมการนี้อธิบายโดยใช้หลักการของการกรองในการคาดคะเนค่าฟลักซ์นั้นคือ

$$J = A \frac{P_t}{\mu}$$

เมื่อ J = ฟลักซ์ของเพอร์มิเอท (L/m^2h หรือ LMH)

A = สัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านของเยื่อแผ่น (L/m^2)

P_t = ความดันคร่อมของเยื่อแผ่น (bar)

μ = ความหนืดของเพอร์มิเอท ($g/cm\text{-}sec$)

ในกรณีการกรองน้ำบริสุทธิ์จะได้รับความสัมพันธ์คือ

$$J_w = \frac{P_t}{R_m}$$

เมื่อ J_w = ฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ (L/m^2h หรือ LMH)

P_t = ความดันคร่อมของเยื่อแผ่น (bar)

R_m = ความต้านทานของเยื่อแผ่น (m^{-1})

ในการกรองสารละลายจริงจะมีความต้านทานจากชั้น CP และ fouling ดังนั้น

$$J = \frac{P_t}{R_m + R_g + R_f}$$

เมื่อ J = ฟลักซ์ของเพอร์มิเอท (L/m^2h หรือ LMH)

P_t = ความดันคร่อมของเยื่อแผ่น (bar)

R_m = ความต้านทานของเยื่อแผ่น (m^{-1})

R_g = ความต้านทานของชั้นเจล (m^{-1})

R_f = ความต้านทานของ fouling (m^{-1})

โดยสามารถหาค่า R_m , R_g และ R_f ได้จากสมการดังต่อไปนี้คือ

$$R_m = \frac{P_t}{J_w}$$

หลังจากการใช้งานแล้วจะทำการล้างเยื่อแผ่นด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดชั้นโพลารไรซ์ ดังนั้นค่าความต้านทานของชั้นโพลารไรซ์จึงถูกกำจัดออกไป ค่าความต้านทานที่เหลืออยู่ คือ ความต้านทานเยื่อแผ่นและความต้านทานของ fouling ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$R_m + R_f = \frac{P_t}{J'_w}$$

เมื่อ J'_w = ฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ภายหลังจากที่ล้างเยื่อแผ่นด้วยน้ำกลั่นแล้ว (L/m^2h หรือ LMH)

P_t = ความดันคร่อมของเยื่อแผ่น (bar)

R_m = ความต้านทานของเยื่อแผ่น (m^{-1})

R_f = ความต้านทานของ fouling (m^{-1})

ดังนั้น

$$R_f = \frac{P_t}{J'_w} - R_m$$

จึงสามารถหาค่าความต้านทานของชั้นเจลได้จากสมการ

$$R_g = \frac{P_t}{J} - R_m - R_t$$

สมการนี้เหมาะจะใช้กับการกรองแบบ MF และ UF ในการทดลองนี้จึงใช้ resistance model ในการอธิบาย

4. Osmotic pressure model for limiting flux

จากทุกสมการที่ผ่านมาจะไม่นำค่าความดันออสโมติกมาคำนวณในสมการหาค่าฟลักซ์ เนื่องจากค่าความดันออสโมติกของสารโมเลกุลใหญ่มีค่าน้อยมาก แต่ที่การกรองแบบ RO สารป้อนจะเป็นสารละลายของโมเลกุลขนาดเล็กซึ่งค่าความดันออสโมติกมีค่าสูงจึงนำมาคำนวณร่วมด้วย โดยสามารถเขียนสมการ Hagen-Poiseuille ได้อยู่ในรูป

$$J = \frac{P_t - \pi_m}{R_m}$$

เมื่อ J = ฟลักซ์ของเพอร์มิเอท (L/m^2h หรือ LMH)

P_t = ความดันคร่อมของเยื่อแผ่น (bar)

π_m = ความดันออสโมติกของสารละลายที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น (bar)

R_m = ความต้านทานของเยื่อแผ่น (m^{-1})

การเพิ่มค่า P_t จะทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นชั่วเวลาหนึ่ง อย่างไรก็ตามตัวถูกละลายที่เคลื่อนที่เข้าสู่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นจะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นหรือค่าความดันออสโมติกสูงขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงซึ่งเป็นข้อจำกัดของ RO ที่ไม่สามารถใช้เพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้ได้มากกว่า 50%

2.9 น้ำผลไม้และวิธีทำให้น้ำผลไม้ใส

น้ำผลไม้แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะความขุ่นและความใสของน้ำผลไม้ คือ น้ำผลไม้ชนิดใส และน้ำผลไม้ชนิดขุ่นมีเนื้อผลไม้อยู่ด้วย องค์ประกอบที่ทำให้น้ำผลไม้ขุ่นที่พบตามธรรมชาติ ส่วนใหญ่ยังไม่เป็นที่ทราบอย่างชัดเจน แต่จากการศึกษาของผู้วิจัยหลายๆ ท่าน เชื่อว่าความขุ่นของน้ำผลไม้เกิดจากสารประกอบในเซลล์พืช ซึ่งเป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่และแขวนลอยอยู่ในน้ำผลไม้ เช่น แทนนิน เพคติน แป้ง เจลาติน กัม โปรตีนจากผลไม้ นิวเคลียส และองค์ประกอบอื่นๆ ที่ไม่ละลายน้ำ สารประกอบฟีนอลิกที่พบในน้ำผลไม้ก็เป็นอีกชนิดหนึ่งที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดความขุ่น (Yen and Song, 1998) ซึ่งมี 4 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ กลุ่ม cinnamic acid และอนุพันธ์ กลุ่ม flavan และ flavanol กลุ่ม glycoside dehydrochalcone และ glycoside และกลุ่ม condensed tannin (Wakayama and Lee, 1987)

การทำให้น้ำผลไม้ใสแบ่งออกเป็นกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางกายภาพ (Ranken and Kill, 1993, ไพโรจน์, 2535)

2.9.1 กระบวนการทางเคมี

2.9.1.1 การใช้เอนไซม์ สารประกอบพวกโปรตีน โปรโตเพคติน (protopectin) แป้ง (starch) อาจแขวนลอยอยู่ในน้ำผลไม้ การใช้เอนไซม์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้ให้มีโมเลกุลเล็กลง และสามารถเปลี่ยนสภาพสารอินทรีย์และสารที่ไม่ละลายน้ำ ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ทำให้น้ำผลไม้ใสขึ้น ใช้เอนไซม์ beta-glucosidase ในการไฮโดรไลต์พันธะเบต้า 1,4 ในน้ำตาล และเปลี่ยนหมู่ fructosyl ของเพคตินในน้ำฝรั่งทำให้น้ำฝรั่งมีความหนืดลดลง (Chen et al., 1997) ส่วนการใช้เอนไซม์ pectinase และ cellulase จะช่วยเอสเทอร์ไรไฟด์ (esterify) เพคตินในน้ำฝรั่งทำให้ความหนืดลดลง และการใช้เอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกันจะเพิ่มประสิทธิภาพการไฮโดรไลต์ผนังเซลล์ของฝรั่งและช่วยปรับปรุงสมบัติของการไหล (Zoghbe et al., 1992) มีการทดลองใช้เอนไซม์เพคตินเนสในเนื้อฝรั่งสีชมพูตีป็น (pink guava pulp) พบว่าเอนไซม์สามารถไฮโดรไลส์กรดโพลีกลูคโคโนนิกของโปรโตเพคติน ทำให้ความหนืดลดลง 62.9% (Brasil et al., 1995) และมีรายงานว่าการใช้เอนไซม์เพคตินเนส 1,000 ppm. ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ให้ผลในการทำให้น้ำฝรั่งใสเป็นที่น่าพอใจแต่ทำให้สารระเหยให้กลิ่นลดลงอย่างมาก (Chan and Chiang, 1992)

2.9.1.2 การตกตะกอน สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนได้แก่พวก fining agents สารเคมีเหล่านี้เมื่ออยู่ในน้ำผลไม้จะตกตะกอน หรือฟองตัวขึ้น หรือดูดซับเอาสารที่ทำให้ขุ่นไว้แล้ว จึงตกตะกอนที่ถัง สารเคมีเหล่านี้ได้แก่ เจลาติน ไชขาว เคซีน และเบนโทไนท์

- การตกตะกอนโดยใช้เจลาติน ใช้ในการกำจัดสารแขวนลอยที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดความขุ่น (haze) โดยเฉพาะในน้ำแอปเปิลซึ่งจะใช้วิธีการนี้หลังจากการใช้เอนไซม์ การเติมเจลาตินจะทำให้เกิดการตกตะกอนซึ่งเชื่อว่าเป็นเกิดจาก electrostatic action ระหว่างอนุภาคของเจลาตินที่มีประจุบวกกับอนุภาคที่เป็นประจุลบในน้ำผลไม้ ผลการศึกษาพบว่าอนุภาคในน้ำผลไม้ที่จับกับเจลาตินได้ คือ แทนนินที่มีตามธรรมชาติในน้ำผลไม้ การเติมเจลาตินมากหรือน้อยเกินไปจะมีผลต่อคุณภาพของน้ำผลไม้ เช่น การเติมมากเกินไปจะทำให้องค์ประกอบที่สำคัญในน้ำผลไม้สูญเสียไป และจะมีผลต่อกลิ่นและรสชาติของน้ำผลไม้ด้วย เนื่องจากเจลาตินจะจับกับสารแทนนินที่มีอยู่ในน้ำผลไม้ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดรสฝาด (astringency) ดังนั้นในบางครั้งจะต้องเติมแทนนินลงไปทดแทนเพื่อรักษากลิ่นและรสชาติดั้งเดิมของน้ำผลไม้ไว้ Brasil et al. (1995) พบว่าการใช้เจลาตินเติมลงไปในน้ำฝรั่งจะช่วยลดปริมาณสารฟีนอลิก

- ไชขาว การใช้ไชขาวในการตกตะกอนสารต่างๆ ในน้ำผลไม้อาจใช้ในรูปไชขาวผงแห้งหรือไชขาวสดก็ได้ ปริมาณที่ใช้คือ 2% แต่การใช้ร่วมกับความร้อนจะให้ผลดีคือหลังจากใส่ไชขาวลงไปผสมให้เข้ากันดีแล้ว ทำให้อุ่นถึง 71-78 องศาเซลเซียส ไชขาวจะตกตะกอนแล้วดึงเอาสารที่ทำให้ขุ่นตกตะกอนลงมาด้วย

- เคซีน (casein) การใช้เคซีนนิยมใช้ในรูปเกล็ดของเคซีน ปริมาณที่ใช้คือ 2% สารนี้สามารถละลายน้ำได้ เมื่อใส่สารนี้ลงไปแล้วทิ้งไว้ประมาณ 1-2 วัน ตะกอนจะตกลงมาจนก้นถัง

- เบนโทไนท์ (bentonite) การเตรียมต้องละลายเบนโทไนท์ผงในน้ำประมาณ 5% เก็บสารละลายนี้ไว้หลายวันเพื่อให้ผงเบนโทไนท์กระจายตัวได้ดี หลังจากนั้นนำเบนโทไนท์ที่อิ่มตัวด้วยน้ำไปกรองน้ำผลไม้โดยจะใช้ประมาณ 2-3 กรัมต่อน้ำผลไม้ 1 ลิตร อาจใช้ร่วมกับความร้อน โดยให้ความร้อนแก่น้ำผลไม้ประมาณ 60 องศาเซลเซียส จะช่วยให้ตกตะกอนได้เร็วขึ้น Day and Sheu (1996) พบว่าการเติมเบนโทไนท์ปริมาณ 2 กรัมต่อน้ำลิ้นจี่ 1 ลิตร ช่วยกำจัดโปรตีนได้ 46% ทำให้ความขุ่นลดลง

2.9.2 กระบวนการทางกายภาพ

2.9.2.1 การใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifugation) นิยมใช้กำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีปริมาณมากออกจากรสผลไม้ Alizai (1997) พบว่าการกำจัดอนุภาคเล็กๆ โดยการหมุนเหวี่ยงจะช่วยลดความขุ่น และช่วยป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในน้ำฝรั่ง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการหมุนเหวี่ยงคือ ตามความเร็วรอบของการหมุนเหวี่ยงและความสูงของฝรั่ง

2.9.2.2 การกรอง (filtration) ใช้ในการกำจัดตะกอนปริมาณมากออกจากรสผลไม้ อาจเรียกรูปแบบนี้ว่า pulp filter การกรองจะใช้เครื่องกรองแบบ plate and frame

นอกจากวิธีที่กล่าวมาข้างต้น ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเยื่อแผ่นในการทำน้ำผลไม้ใส โดยเริ่มใช้ในทางการค้าครั้งแรกที่ประเทศฝรั่งเศสและแอฟริกาใต้ในช่วงต้นทศวรรษ 1980 กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นจัดเป็นกระบวนการทางกายภาพ ซึ่งในการทำน้ำผลไม้ให้ใสนั้นสามารถใช้ได้ทั้งกระบวนการ UF และ MF

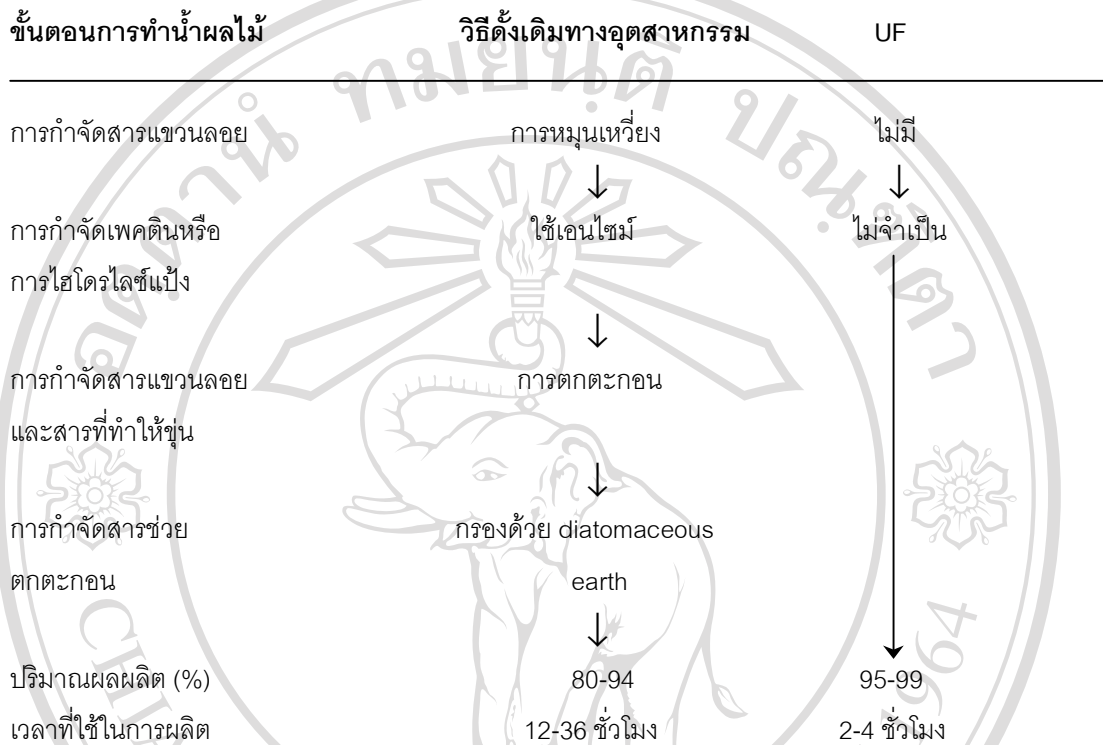
2.10 การใช้เทคโนโลยีเยื่อแผ่นในกระบวนการแปรรูปน้ำผลไม้

การใช้เทคโนโลยีเยื่อแผ่นในกระบวนการแปรรูปน้ำผลไม้ สามารถใช้ในงานหลัก 3 ด้าน ได้แก่

1. ใช้ในการทำน้ำผลไม้ใส เช่น การผลิตเครื่องดื่มแบบใส (sparkling clear beverage) โดยใช้ MF หรือ UF
2. ใช้ในการทำให้เข้มข้น เช่น การทำน้ำผลไม้เข้มข้น โดยใช้ RO
3. ใช้ลดความเป็นกรด เช่น การลดความเป็นกรดในน้ำผลไม้ตระกูลส้ม โดยใช้ electro dialysis หรือ nanofiltration

ในกรณีนี้จะกล่าวเฉพาะการทำน้ำผลไม้ให้ใสเท่านั้น ในการผลิตน้ำผลไม้แบบใสด้วยวิธีดั้งเดิมทางอุตสาหกรรมนั้นประกอบด้วยหลายขั้นตอน ซึ่งใช้แรงงานและเวลามาก เริ่มตั้งแต่การแยกประเภท การล้าง และการปอกเปลือก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ แล้วกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ออกด้วยกระบวนการกรองหรือการหมุนเหวี่ยง เติมนอนไซม์เพคตินเนสเพื่อย่อยสลายเพคตินและลดความขุ่น การใช้เอนไซม์ยังช่วยให้กรองได้ง่ายขึ้นเนื่องจากความหนืดของน้ำผลไม้ลดลง ขั้นตอนต่อไปคือการกำจัดสารแขวนลอยและสารที่ทำให้น้ำผลไม้ขุ่นด้วยสารช่วยตกตะกอน เช่น เจลาตินหรือเบนโทไนท์ ซึ่งต้องใช้เวลาในการตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานานคือประมาณ 20-30 ชั่วโมง กรองด้วย diatomaceous earth เพื่อกำจัดสารช่วยตกตะกอนและแยกสารแขวนลอย โปรตีนและสารโพลีฟีนอล (condensed polyphenols) ออก ทำการพาสเจอร์ไรส์น้ำผลไม้แล้วจึงบรรจุ

การเปรียบเทียบกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิลด้วยวิธีแบบดั้งเดิมทางอุตสาหกรรมและวิธีใช้ UF แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเปรียบเทียบกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิลด้วยวิธีแบบดั้งเดิมทางอุตสาหกรรมและวิธีใช้ UF (Cheryan, 1998)

จุดมุ่งหมายสำคัญในการใช้กระบวนการเยื่อแผ่นในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ คือ ใช้แทนขั้นตอนการตกตะกอน การกรอง และการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งจากการวิจัยพบว่า การกรองด้วยเยื่อแผ่นสามารถใช้แทนกระบวนการที่กล่าวมาแล้ว และมีข้อดีที่กว่าดังนี้ (Cheryan, 1998)

- สามารถทำให้ใสและตกตะกอนได้ในขั้นตอนเดียว ในขณะที่วิธีแบบเดิมทางอุตสาหกรรมต้องใช้การหมุนเหวี่ยง การใช้เอนไซม์ (เพคตินเนส, อะไมเลส) สารช่วยตกตะกอน (เบนโทไนท์, เจลาติน เป็นต้น) และการกรองโดยใช้ diatomaceous earth ซึ่งใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 12-36 ชั่วโมง แต่การกรองด้วยเยื่อแผ่นไม่ต้องผ่านขั้นตอนดังกล่าว จึงสามารถผลิตน้ำผลไม้ได้ในเวลาเพียง 2-4 ชั่วโมง

- สามารถเพิ่มปริมาณผลผลิต คือได้ผลผลิตประมาณ 95-99% ขณะที่วิธีการเดิมจะได้เพียง 80-94% เท่านั้น การที่ได้ปริมาณน้ำผลไม้เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้ diatomaceous earth และสารช่วยตกตะกอนในการกรองจะดูดซับน้ำผลไม้บางส่วนไว้ ทำให้ปริมาณผลผลิตลดลง

- ไม่ต้องใช้สารเคมี คือสารช่วยกรองและสารช่วยตกตะกอน และกำจัดปัญหาในเรื่องการกำจัดสารเคมีเหล่านี้

- ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น เพราะสามารถกำจัดสารที่ทำให้เกิดความขุ่น ซึ่งได้แก่ สารแขวนลอย โปรตีน สารประกอบเชิงซ้อนของแทนนินกับโปรตีน ทำให้น้ำผลไม้ที่ผลิตได้มีคุณภาพดีขึ้นและมีความขุ่นต่ำเมื่อเทียบกับการผลิตแบบเดิม

- สามารถทำการผลิตได้แบบต่อเนื่อง

- สามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ โดยไม่ต้องใช้ความร้อน (cold pasteurization) เนื่องจากเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอน สามารถกรองแยกเชื้อยีสต์ รา และแบคทีเรียได้ จึงไม่ทำให้สารให้กลิ่นบางชนิด (aroma compounds) ระเหยออกไป และไม่สูญเสียคุณค่าทางอาหาร

อย่างไรก็ตาม ปัญหาและอุปสรรคของการนำเทคโนโลยีเยื่อแผ่นมาใช้ในการผลิตน้ำผลไม้ คือ อัตราการไหลของเพอร์มิเอทจะลดลงอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะใช้กระบวนการ MF หรือ UF หรือ น้ำผลไม้ชนิดใดก็ตาม ดังรายงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการใช้เยื่อแผ่นในการกรองน้ำผลไม้ต่างๆ ดังนี้

น้ำแอมป์เปิล

Riedl et al. (1998(a,b)) พบว่าสารแขวนลอยในน้ำแอมป์เปิลซึ่งส่วนใหญ่เป็นเศษของผนังเซลล์ (cell wall debris) จะจับตัวกับโพลีแซคคาไรด์ที่มีสมบัติชอบน้ำและโมเลกุลมีขั้ว เช่น เพคติน และเซลลูโลส หรือโปรตีนที่มีสมบัติทั้งชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ หรือแทนนินที่มีสมบัติทั้งมีขั้วและไม่มีขั้วในตัวเดียวกัน ทำให้เกิดการดูดซับบนผิวเยื่อแผ่นเกิดเป็นโครงสร้างหลายๆ ชั้น (multilayer structure) ซึ่งมีอิทธิพลในการเพิ่มความต้านทานของชั้น fouling มีการทดลองกรองน้ำแอมป์เปิลสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ MF พบว่าสารละลายแทนนินและเจลาตินในน้ำแอมป์เปิลไม่ได้เป็นสาเหตุหลักของการเกิด fouling แต่ถ้าใช้เจลาตินมากเกินไปจะทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง เนื่องจากทำให้สารแขวนลอยมีความคงตัวมากขึ้น จึงต้านทานการไหลของเพอร์มิเอท

เพคตินเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ก่อให้เกิด fouling ในการกรองน้ำผลไม้ จากการทดลองกรองน้ำแอปเปิล 2 ชนิดคือ น้ำแอปเปิลแท้ที่กำจัดเพคติน และน้ำแอปเปิลสังเคราะห์ที่เติมเพคตินลงไป พบว่าปริมาณเพคตินที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง (Su et al., 1993) เช่นเดียวกับ Padilla-Zakour and Mclellan (1993) ที่พบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำแอปเปิลที่มีเพคตินมีค่าลดลงมากกว่าน้ำแอปเปิลที่กำจัดเพคตินออกแล้ว 40-50% นอกจากนั้นยังมีการศึกษาน้ำแอปเปิลที่กำจัดเพคตินออกแล้วและน้ำแอปเปิลที่มีการเติมกรดแอสคอร์บิก พบว่าค่าฟลักซ์ของตัวอย่างน้ำแอปเปิลที่เติมกรดแอสคอร์บิกมีค่าน้อยกว่าค่าฟลักซ์ของน้ำแอปเปิลที่กำจัดเพคตินออก (Fukumoto et al., 1998)

น้ำสับปะรด

มีการศึกษาการกรองน้ำสับปะรดที่ทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยเอนไซม์ พบว่าหลังการบำบัดเบื้องต้นด้วยเอนไซม์ น้ำสับปะรดมีความหนืดและปริมาณชิ้นเนื้อ (pulp) ลดลง เนื่องจากโพลีแซคคาไรด์ เช่น เพคติน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินถูกไฮโดรไลส์ และน้ำสับปะรดที่กรองผ่าน MF มีความขุ่นและความหนืดลดลง แต่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณกรด ปริมาณน้ำตาล และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีค่าไม่แตกต่างจากสารป้อน และเมื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์ของเพอร์มิเอทพบว่ามีความคุณภาพตามที่กฎหมายกำหนด แต่ค่าฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วถึง 52% เมื่อกรองเป็นเวลา 15 นาที เท่านั้น (Carneiro et al., 2002)

น้ำเสาวรส

Jiraratananon and Chanachai (1996) ศึกษาผลของสภาวะการกรองต่อค่าเพอร์มิเอท ฟลักซ์ และความต้านทานในการกรองน้ำเสาวรสด้วยเยื่อแผ่นแบบ UF พบว่าการกรองที่อุณหภูมิต่ำคือ 30 และ 40 องศาเซลเซียส ค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นตามความดัน แต่ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าฟลักซ์เริ่มต้นเพิ่มขึ้นตามความดันแล้วจึงลดลงในภายหลัง และพบว่าค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลและลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย มีการศึกษาการกรองน้ำเสาวรสด้วยเยื่อแผ่นอนินทรีย์แบบ MF พบว่าการใช้เอนไซม์ในการบำบัดเบื้องต้นจะช่วยไฮโดรไลด์สารแขวนลอยพวกโพลีแซคคาไรด์ ทำให้สามารถกรองได้นานติดต่อกันเป็นเวลา 6 ชั่วโมงโดยค่าฟลักซ์ไม่ลดลง แต่กลับเพิ่มขึ้นจากค่าฟลักซ์เริ่มต้นคือ 80 LMH เป็น 120 LMH เมื่อสิ้นสุดการกรอง 6 ชั่วโมง ในขณะที่น้ำเสาวรสที่ไม่ได้บำบัดเบื้องต้นด้วยเอนไซม์มีค่าฟลักซ์เริ่มต้นเท่ากับ 30 LMH และลดลงเมื่อเวลากรองนานขึ้นจนคงที่ที่ประมาณ 18 LMH หลังกรอง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Vaillant et al., 1999)

น้ำผลไม้ตระกูลส้มและมะนาว

Hernandez et al. (1995) พบว่าการใช้ UF สามารถช่วยกำจัดสารแขวนลอยและเพคติน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความขุ่น ทำให้น้ำส้มที่ได้ใส มีสีเหลืองสวย และมีความหนืดลดลง ขณะที่ Capannelli et al. (1992) พบว่าน้ำส้มและน้ำมะนาวสดที่กรองได้มีปริมาณเนื้อผลไม้ เพคติน และ สารให้กลิ่นเท่ากับน้ำผลไม้ก่อนกรอง ส่วน Chamchong and Noomhorm (1991) ที่กรองน้ำส้ม ด้วย MF ขนาดรูพรุน 0.1 ไมครอน พบว่าที่ความดันและอัตราการไหลสูงจะให้ค่าฟลักซ์สูงที่สุด แต่สภาวะที่ให้น้ำส้มใสที่สุดคือที่ความดันสูงและอัตราการไหลต่ำ เนื่องจากเกิดการสะสม ของตัวถูกละลายบนผิวเยื่อแผ่น เกิดเป็น secondary dynamic filter ทั้งนี้การบำบัดน้ำส้มเบื้องต้น ก่อนกรองด้วยเอนไซม์โพลีกลาแลคทูโรเนสร่วมกับการปรับความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากับ 2 จะช่วยให้ น้ำส้มใสนิ่งขึ้น

น้ำมะม่วงหิมพานต์

Campos et al. (2002) ศึกษาการกรองน้ำมะม่วงหิมพานต์ที่มีการบำบัดเบื้องต้นด้วย เอนไซม์ผ่านเยื่อแผ่น MF ขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอน พบว่าค่าฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง การกรอง 20 นาทีแรก เนื่องจากเยื่อแผ่นเกิด CP และการอุดตัน หลังจากนั้นค่าฟลักซ์จะคงที่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณกรดของน้ำมะม่วงหิมพานต์ก่อนและหลังกรองไม่มีความแตกต่างกัน แต่ปริมาณวิตามินซีลดลง สาเหตุอาจเนื่องจากวิตามินซีถูกออกซิไดซ์ระหว่างการกรอง

pulpy fruit

Vaillant et al. (2001) ทดลองกรองน้ำผลไม้ 6 ชนิดคือ มะม่วง สับปะรด เสาวรส naranjilla, castillas blackberry และ tangerine โดยมีการบำบัดเบื้องต้นด้วยเอนไซม์เพื่อลด ความหนืดและสารแขวนลอยก่อนกรองผ่านเยื่อแผ่น MF พบว่าค่าฟลักซ์มีความสอดคล้องกับ ปริมาณของแข็งที่ละลายในผลไม้ คือผลไม้ที่มีปริมาณของแข็งละลายอยู่สูงที่สุด (เสาวรส) จะให้ ค่าฟลักซ์ต่ำที่สุด

2.11 ฝรั่ง (guava)

มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Psidium guajava* L. เป็นไม้ยืนต้นขนาดย่อม สูง 2-8 เมตร มีกิ่งเหนียว แผ่กิ่งก้านสาขาออกไปได้กว้าง เปลือกต้นเรียบ ใบเดี่ยว เรียงตรงข้าม รูปวงรีหรือรูปวงรีแกมขอบขนาน กว้าง 3-8 เซนติเมตร ยาว 6-14 เซนติเมตร ดอกเดี่ยวหรือช่อ 2-3 ดอก ออกที่ซอกใบ กลิบบอกสีขาวร่วงง่าย มีเกสรตัวผู้จำนวนมาก ผลเป็นผลสด เป็นผลไม้ที่มีตลอดปี เช่นเดียวกับส้ม มะละกอก กัลฉ่าย และสับปะรด ทั้งนี้เพราะทนทานต่อความแห้งแล้งได้ดี (พร้อมจิต, 2532)

พันธุ์ฝรั่งที่พบในเมืองไทยมีหลายชนิด การจำแนกประเภทฝรั่ง มี 2 แบบคือ จำแนกจากลักษณะผลและจำแนกจากลักษณะการใช้ประโยชน์ ถ้าพิจารณาตามลักษณะผล ฝรั่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ประเภทผลหิวโตกันสอบ และประเภทผลกลม ฝรั่งพันธุ์กลมสาธิตมีลักษณะผลกลมขนาดใหญ่ มีผิวสีอ่อน เนื้อหนาและกรอบ รสหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย

ฝรั่งเป็นผลไม้ที่มีกลิ่นหอม รสชาติดี มีวิตามินและเกลือแร่มากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งวิตามินซีและเอที่มีปริมาณสูง สำหรับคุณค่าทางอาหารของฝรั่งแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณค่าทางอาหารของฝรั่ง

รายการ	ปริมาณการวิเคราะห์
วิตามินบี 1 (mg/100 g)	0.06
วิตามินบี 2 (mg/100 g)	0.13
วิตามินซี (mg/100 g)	160.0
วิตามินเอ (units/100 g)	89.0
ค่าพลังงานความร้อน (kcal/100 g)	51.0
แคลเซียม (mg/100 g)	13.0
เหล็ก (mg/100 g)	0.5
ฟอสฟอรัส (kg/100 g)	25.0
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	11.6
โปรตีน (ร้อยละ)	0.9
เส้นใย (ร้อยละ)	6.0
ไขมัน (ร้อยละ)	0.1
ความชื้น (ร้อยละ)	80.7

(ที่มา สวัสดิ์, 2541)

หากพิจารณาสีของเนื้อฝรั่งจะพบว่าฝรั่งนั้นมีลักษณะสีอยู่ 2 สีคือ สีขาว และสีชมพูอมแดง ซึ่งทั้ง 2 พันธุ์จะให้คุณค่าทางอาหารแตกต่างกัน ค่าวิเคราะห์ความแตกต่างทางคุณค่าทางอาหาร แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าวิเคราะห์คุณค่าทางอาหารของฝรั่งพันธุ์เนื้อสีชมพูอมแดงและพันธุ์เนื้อสีขาว

รายการ	พันธุ์เนื้อสีชมพูอมแดง	พันธุ์เนื้อสีขาว
น้ำ (ร้อยละ)	65.4	72.3
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	26.8	20.4
ไขมัน (ร้อยละ)	0.4	0.4
โปรตีน (ร้อยละ)	1.0	1.2
เถ้า (ร้อยละ)	0.7	0.7
แคลอรี (units)	124.0	99.0
แคลเซียม (mg)	33.0	22.0
ฟอสฟอรัส (mg)	28.0	34.0
เหล็ก (mg)	0.6	0.8
วิตามินเอ (mg)	105.0	106.0
วิตามินบี 1 (mg)	0.06	0.07
วิตามินซี (mg)	126	104.0
เส้นใย (ร้อยละ)	5.7	5.0

(ที่มา สวัสดิ์, 2541)

ฝรั่งนอกจากจะนำมาบริโภคสดแล้วยังนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น น้ำฝรั่งสด น้ำฝรั่งเข้มข้น ฝรั่งดอง แยมฝรั่ง เยลลี่ฝรั่ง ฝรั่งในน้ำเชื่อมบรรจุขวดหรือบรรจุกระป๋อง เป็นต้น นอกจากนี้ฝรั่งยังมีสรรพคุณทางยา คือ ใบและผลฝรั่งสามารถลดอาการท้องร่วงได้ดี มีเส้นใยและเพคตินสูง เมื่อรับประทานเป็นประจำจะช่วยลดเรื่องโรคฟันผุ ท้องผูก มะเร็งลำไส้ใหญ่ ริดสีดวงทวาร ลดน้ำตาลและโคเลสเตอรอลในเลือด (สวัสดิ์, 2541)

ประเทศไทยมีแหล่งปลูกฝรั่งที่สำคัญในจังหวัดนครปฐม ราชบุรี สมุทรสาคร และชลบุรี มีพื้นที่ปลูกรวมในปี พ.ศ 2540 ประมาณ 67,210 ไร่ เป็นพื้นที่ให้ผลผลิตแล้ว 48,229 ไร่ และพื้นที่ยังไม่ให้ผลผลิต 18,981 ไร่ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2545) มีการส่งออกจำหน่ายต่างประเทศ

ในรูปฝรั่งสดปริมาณ 80 ตัน คิดเป็นมูลค่า 2.2 ล้านบาท และในรูปฝรั่งกระป๋องปริมาณ 364 ตัน คิดเป็นมูลค่า 10.0 ล้านบาท (กรมศุลกากร, 2545) ดังนั้นการแปรรูปเป็นน้ำฝรั่งจึงช่วยลดปัญหาสินค้าเกษตรนำเสีย และช่วยเพิ่มมูลค่าสินค้าทางการเกษตรได้อีกทางหนึ่ง



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved