บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีผลผลิตทางการเกษตรที่สามารถใช้บริโภคโดยตรงหรือแปรรูปโดยวิธีทางอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แปลกใหม่และเป็นการเพิ่มมูลค่าสินค้า นอกจากนี้ยังสามารถนำรายได้เข้าประเทศจากการส่งออกด้วย น้ำผลไม้เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มที่ได้จากการแปรรูปผลไม้สดโดยการสกัดหรือคั้นเอาน้ำจากผลไม้ซึ่งถือเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางโภชนาการทำให้น้ำผลไม้เป็นที่นิยมแพร่หลาย ปัจจุบันน้ำผลไม้ได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นโดยเฉพาะ "ผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้แท้" โดยนำมาบริโภคแทนเครื่องดื่มที่มีคาเฟอีน เช่น ชาและกาแฟ หรือเครื่องดื่มที่มีส่วนผสมของคาร์บอเนต เป็นต้น (Brasil *et al.*, 1995) ฝรั่งเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่มีกลิ่นเฉพาะตัว มีวิตามินซี (กรดแอสคอบิค) และเพกทินสูง (Bulk *et al.*, 1997; Brasil *et al.*, 1995) ปกติน้ำผลไม้ทั่วไปมีลักษณะขุ่นเนื่องจากอนุภาคสารแขวนลอยและคอลลอยด์ ผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้บางอย่างต้องการให้มีลักษณะปรากฏแบบขุ่น เช่น น้ำส้มและน้ำมะเขือเทศ แต่สำหรับน้ำฝรั่งผู้บริโภคจะยอมรับในลักษณะปรากฏแบบใสมากกว่าแบบขุ่น (Brasil *et al.*, 1995) ความขุ่นของน้ำฝรั่งเกิดจากอนุภาคสารแขวนลอยและคอลลอยด์รวมตัวกับสารประกอบโพลีฟีโนลิกหรือเพกทินที่มีอยู่มากในน้ำฝรั่ง แต่การที่น้ำฝรั่งมีความขุ่นสูงทำให้เกิดปัญหาโดยทำให้สีและรสชาติของน้ำฝรั่งเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการผลิตน้ำฝรั่งและเก็บรักษา

กระบวนการกรองด้วยเมมเบรนได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทำน้ำผลไม้ให้ใสตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 (Reild *et al.*, 1998) โดยเฉพาะกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน (Alvarez *et al.*, 1996; Borneman *et al.*, 1997) ในช่วง 20 ปีมานี้ได้มีการวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของการใช้เมมเบรนต่างๆต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Alvarez *et al.*, 1996) เมมเบรนที่ใช้มีลักษณะเป็นแบบท่อ (Padilla and McLELLAN, 1993) แบบแผ่น (Sheu *et al.*, 1987) แบบท่อม้วน (Wu *et al.*, 1990) และแบบเส้นใยกลวง (Rao *et al.*, 1987) โดยใช้ทำน้ำแอปเปิลให้ใสโดยใช้เมมเบรนที่ผลิตจากสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โลหะและเซรามิกส์

(Alvarez *et al.*, 1996) ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ผ่านการกรองด้วยเมมเบรนจะมีความใสเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของน้ำผลไม้ เนื่องจากการกำจัดสารแขวนลอยออกหมดแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ใช้น้ำผลไม้ใสเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ เบียร์หรือเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำ เช่น ค็อกเทล พันช์ ชาเย็นผสมน้ำผลไม้ เป็นต้น ลูกอมต่างๆ พาสตรี้ ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัว เช่น ไอศกรีม ซอร์เบท เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบของเยลลี่ต่างๆ น้ำผลไม้กระป๋อง และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางค์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวข้างต้นต้องการน้ำผลไม้ที่มีคุณภาพสูง (Vailant *et al.*, 2001)

การกรองหรือการแยกอนุภาคด้วยเมมเบรนตัวถูกละลายที่มีโมเลกุลใหญ่จะถูกกักไว้ที่ผิวหน้าเมมเบรนเรียกว่า รีเทนเทท (retentate) หรือสารละลายเข้มข้น (concentrate) ส่วนที่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้เรียกว่า เพอมิเอท (permeate) ซึ่งจะมีลักษณะใสกว่าด้านรีเทนเทท ในระดับอุตสาหกรรมได้ให้ความสนใจผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน 2 ลักษณะ คือ ผลิตภัณฑ์ในรูปของน้ำผลไม้เข้มข้น (ส่วนของรีเทนเทท) จะมีความเข้มข้นสูง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากด้านเพอมิเอทมีลักษณะคล้ายคลึงน้ำผลไม้แท้และมีความใส โดยจะนำไปเป็นส่วนประกอบเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ต่ำและโยเกิร์ต (Chiampo and Conti, 1999) ส่วนใสของที่ได้จากการกรองด้วยเมมเบรนจะมีสารระเหยที่ระเหยได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ข้อดีของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนนี้คือ สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิต่ำจึงทำให้น้ำผลไม้คงความสด กลิ่นและคุณค่าทางอาหารไม่สูญเสียไปเช่นเดียวกับการผลิตน้ำผลไม้ด้วยกระบวนการแบบเดิม (Vailant *et al.*, 2001) นอกจากนี้การกรองด้วย เมมเบรนยังใช้พลังงานน้อย สามารถแยกสารละลายโดยไม่ต้องใช้สารเคมีช่วยในการทำงานไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีมาเกี่ยวข้อง ไม่มีการเปลี่ยนวัฏภาคของสารละลายและเป็นกระบวนการกรองแบบง่าย (Wang และ Song, 1999) การทำน้ำผลไม้ให้ใสด้วยกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าและใช้เวลาในกระบวนการผลิตสั้นกว่าการทำน้ำผลไม้ให้ใสด้วยวิธีการแบบเดิม จากงานวิจัยพบว่าการกรองด้วยเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ 0.2 ไมโครเมตร สามารถกรองอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ได้หมด รวมทั้งเพกทินด้วย (Alvarez *et al.*, 1996; Vailant *et al.*, 2001) ตัวอย่างน้ำผลไม้ที่ถูกทำให้ใสโดยการกรองด้วยเมมเบรน ได้แก่ น้ำแอปเปิล น้ำแอปปริคอท น้ำลูกพีช น้ำเสาวรส น้ำลูกท้อ เป็นต้น (Chaimpo and Conti, 1999 ; Alvarez *et al.*, 1996)

งานวิจัยนี้จะอาศัยข้อดีของกระบวนการกรองด้วยอัลตราฟิลเตรชันและไมโคร

ฟิลเตรชันมาใช้ในการทำน้ำฝรั่งให้ใส โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน และศึกษาผลของพารามิเตอร์ คือ ความดัน ชนิดของเมมเบรน และอัตราการไหลต่อเพอมิเอทฟลักซ์และรีเจคชัน

การตรวจเอกสาร

1. ฝรั่ง (Guava)

ฝรั่งเป็นผลไม้อยู่ในวงศ์ Myrtacae มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Psidium guajava, Lim* เป็นผลไม้พื้นเมืองมีถิ่นกำเนิดอยู่ในเขตร้อนและเขตอบอุ่นของทวีปอเมริกา ฝรั่งเจริญเติบโตได้ทั่วทุกภาคและเริ่มปลูกเพื่อการค้าเมื่อประมาณ 40 ปี มานี้ แหล่งผลิตที่สำคัญคือ หมู่เกาะฮาวาย คิวบา อินเดีย ไทย พม่า และกุล่มประเทศอินโดจีน

ฝรั่งเป็นไม้ผลยืนต้นขนาดกลาง มีลำต้นสูงประมาณ 2 – 3 เมตร กิ่งก้านสาขากว้าง และมักแตกเป็นกิ่งเล็กๆ ตามบริเวณโคนและลำต้น มีเปลือกต้นเรียบสีเหลืองปนแดง หรือออกเทา เปลือกลอกได้เป็นแผ่นๆ เนื้อไม้เหนียวแข็ง ลักษณะผลค่อนข้างกลม ผลยาวประมาณ 5 – 12 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 – 7 เซนติเมตร เมื่อผลยังดิบจะมีสีเขียวเข้ม ผิวขรุขระเล็กน้อย ผลแก่จัดแต่ยังไม่สุกผิวจะมีสีเขียวอ่อน เนื้อมีสีขาว และมีรสหวานอมเปรี้ยวบ้างเล็กน้อย ผลแก่จัดแต่ยังไม่สุกผิวของผลจะเป็นสีเหลืองอ่อน เนื้อในที่หุ้มเมล็ดอยู่จะมีสีเนื้อจนถึงสีชมพู มีกลิ่นหอม เมล็ดเล็กและแข็งมีสีเหลืองอมน้ำตาล ขนาดเมล็ดกว้าง 0.2 – 0.3 เซนติเมตร ยาว 0.3 – 1.5 เซนติเมตร

1.1 องค์ประกอบของฝรั่ง

ฝรั่งเป็นผลไม้ที่มีวิตามินและเพกทินสูง คุณค่าทางอาหารดังตาราง 1.1 ฝรั่งเป็นผลไม้ที่สามารถนำไปทำประโยชน์ในแง่ที่เป็นอาหารและส่วนประกอบของอาหาร เช่น ทำแยลลี่ แยม กัววาพรีเซิฟ (Guava presserves) ทอปปิงไซรับ (Topping sryrup) น้ำฝรั่งบรรจุกระป๋อง (Guava juice) น้ำฝรั่งพร้อมดื่มและน้ำฝรั่งเข้มข้น ส่วนการนำไปประกอบอาหารนั้นเปลือกและเนื้อฝรั่งที่สุกนำมาทำสลัดเคี่ยวในน้ำเชื่อมใส่ครีมรับประทานผสมกับนม น้ำตาล แป้ง นอกจากนี้ยังสามารถทำพุดดิง ไอศกรีม และอื่นๆ

ตาราง 1.1 คุณค่าทางอาหารของฝรั่ง จากส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม

สารอาหาร	ปริมาณ	หน่วย
ความชื้น	80.70	กรัม
พลังความร้อน	51.00	กิโลแคลอรี
โปรตีน	0.90	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	11.60	กรัม
ไขมัน	0.10	กรัม
เส้นใย	6.00	กรัม
แคลเซียม	13.00	กรัม
เหล็ก	0.50	มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	25.00	มิลลิกรัม
วิตามินเอ	89.00	มิลลิกรัม
วิตามินบี 1	0.06	มิลลิกรัม
วิตามินบี 2	0.13	มิลลิกรัม
วิตามินซี	160.00	มิลลิกรัม

ที่มา : กองโภชนาการ กรมอนามัย, 2530

1.2 กรรมวิธีการผลิตน้ำฝรั่ง

กรรมวิธีการผลิตน้ำฝรั่งประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1.2.1 การตรวจสอบคัดเลือกและล้าง ฝรั่งจะถูกตรวจสอบเพื่อแยกผลเน่าเสีย ผลดิบออก พวกที่มีตำหนิเล็กน้อยจะผ่านการตัดแต่ง ฝรั่งที่สมบูรณ์จะถูกส่งไปที่ถังล้าง อาจมีการเติมด้วยสารทำความสะอาด เพื่อช่วยขจัดสิ่งสกปรกออกได้ดีขึ้น แล้วผ่านไปยังสายพานที่มีการฉีดพ่นด้วยน้ำสะอาดเพื่อขจัดสารทำความสะอาดออกจากฝรั่ง

1.2.2 เนื้อและเมล็ดออกจากกัน ฝรั่งผ่านการสับเป็นชิ้นแล้วลวกด้วยไอน้ำ 10 – 15 นาที ก่อนเข้าสู่เครื่องแยกเนื้อ ที่ตะแกรงมีรูขนาด 0.1147 เซนติเมตร เพื่อแยกเอาเมล็ดและเส้นใยที่แข็งๆ ออกจากส่วนเนื้อ

1.2.3 การแยกสโตนเซล (Stone cells) ออก เนื้อส่วนนอกของฝรั่งมักประกอบด้วยสโตนเซล การขจัดเซลพวกนี้ออกไปจะช่วยทำให้ลักษณะของเนื้อและสีของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น เพราะเซลพวกนี้มีสีเหลืองหรือน้ำตาล ทำให้สีของฝรั่งบดซึ่งปกติเป็นสีชมพูจะมีสีคล้ำลง การขจัดออกทำได้โดยการผ่านเครื่องแยกกากที่มีรูตะแกรงขนาด 0.0508 เซนติเมตร หรือเข้าสู่เครื่องบดสโตนเซลให้แหลกละเอียดลง

1.2.4 การผสมสูตร เนื้อผลไม้จะถูกนำมาผสมสารละลายน้ำตาลและกรด ปกติจะผสมให้มีปริมาณน้ำตาล 12 – 15 °บริกซ์ ปริมาณกรดร้อยละ 0.5 – 0.8 ในรูปกรดซิตริก

1.2.5 การทำน้ำผลไม้ให้ใส (Clarification) ความขุ่นของน้ำผลไม้เกิดเนื่องจากมีสารพวก เพกทิน แป้ง โพลีวาเลนท์แคทอิออน (polyvalentcation) โพลีฟีนอล (polyphenol) และโปรตีนธรรมชาติ สารเหล่านี้สามารถกำจัดได้โดยเติมสารเคมีหรือการใช้ความร้อน หรืออาจใช้ 2 วิธีร่วมกัน

1.3 การทำให้น้ำผลไม้ใสทำได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

1.3.1 การใช้ความร้อน ปกติน้ำผลไม้มักจะใสได้หลังจากการพาสเจอร์ไรซ์แล้วเก็บรักษาไว้ ความร้อนทำให้สารแขวนลอยเกิดการตกตะกอน การกรองก็จะง่ายขึ้นหรือเข้าเครื่องเหวี่ยงแยกตะกอนออกจากน้ำผลไม้ส่วนใส

1.3.2 การใช้สารช่วยตกตะกอน (Finning agent) น้ำผลไม้บางชนิดทำการกรองได้ยาก และทิ้งไว้ก็ตกตะกอนได้ยาก ก็ต้องทำให้ใสโดยการเติมสารช่วยตกตะกอนดังนี้

1.3.2.1 แทนนินและเจลลาติน

เจลลาตินอาจสกัดจากกระดูกหรือหนังสัตว์ มีคุณสมบัติเป็นประจุบวกซึ่งจะจับสารที่เป็นประจุลบเช่น แทนนินได้ เจลาตินที่ใช้ในการตกตะกอนต้องมีความบริสุทธิ์สูงเพื่อไม่ทำให้กลิ่นรสของน้ำผลไม้เสียได้ ดูดซับน้ำได้ 5 – 9 เท่า ปัจจัยที่มีผลต่อเจลลาตินคือ ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และปริมาณแทนนิน

1.3.2.2 สารเคมีอื่นๆ เบนโทไนต์ ไข่ขาว เคซีน เอนไซม์ เพกทิน ซิลิกาโซล

1.3.3 การใช้เครื่องเหวี่ยง จะสามารถแยกได้ตะกอนใหญ่

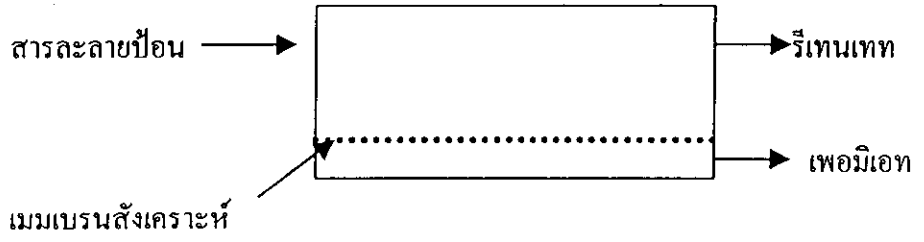
1.3.4 การกรองสามารถทำให้น้ำผลไม้ใสได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ โดยนิยมใช้ฟิลเตอร์เพรส ในปัจจุบันได้มีการนำเอากระบวนการกรองด้วยเมมเบรนมาใช้ในการทำน้ำผลไม้ให้ใสซึ่งได้แก่ กระบวนการออสโมซีสผันกลับ กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน และกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

2. การกรองด้วยเมมเบรนสังเคราะห์

ปัจจุบันกระบวนการกรองโดยใช้เมมเบรนถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลาย ๆ ด้าน เช่น การแยกเกลือออกจากน้ำทะเล การบำบัดน้ำเสีย การกำจัดแบคทีเรียในน้ำดื่ม การผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นและทำน้ำผลไม้ให้ใส เป็นต้น ข้อดีของการกรองด้วยเมมเบรนคือ ใช้พลังงานน้อยสามารถแยกสารละลายโดยไม่ต้องใช้สารเคมีช่วยในการทำงาน ไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีมาเกี่ยวข้อง สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้หมด และค่าบำรุงรักษาต่ำ เมมเบรนที่ใช้เป็นเมมเบรนที่สังเคราะห์ขึ้นมาได้มีการพัฒนาและดัดแปลงเมมเบรนโดยใช้สารโพลิเมอร์ต่างๆ เช่น เซลลูโลสไนเตรท โพลีซัลโฟน โพลีอะไมด์ โพลีโพรพิลีน เป็นต้น เมมเบรนมีคุณสมบัติในการต้านทานความดัน อุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายต่าง ๆ

หลักการของกระบวนการเมมเบรนสังเคราะห์ คือ สารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลเล็กจะผ่านเมมเบรนสังเคราะห์โดยอาศัยแรงขับดันเนื่องจากผลต่างความดันระหว่างเมมเบรน ดังภาพประกอบ 1.1 สารละลายที่มีตัวถูกละลายที่มีโมเลกุลใหญ่จะถูกเมมเบรนสังเคราะห์กักไว้เรียกว่า รีเทนเทท (retentate) หรือสารละลายเข้มข้น (concentrate) ส่วนสารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดเล็กที่ไหลผ่านเมมเบรนสังเคราะห์ไปได้เรียกว่า เพอมิเอท (permeate) ซึ่งส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์เป็นรีเทนเททหรือเพอมิเอททหรือทั้งสองส่วน ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวเมมเบรนทางด้านสารป้อนสูงกว่าด้านเพอมิเอททำให้เกิดความแตกต่างของความดันออสโมติกระหว่างผิวหน้าเมมเบรนทั้งสองด้าน การกรองโดยใช้เมมเบรนมีหลายระดับ ได้แก่ ระดับไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) และ ออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis) สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้ได้ประยุกต์ใช้การกรองด้วยเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันในการทำน้ำผลไม้ให้ใส

2.1 อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration: UF) เป็นกระบวนการแยกสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน เอนไซม์ และแป้งออกจากน้ำและสารโมเลกุลเล็กอื่น ๆ ความดันที่ใช้ป้อนให้แก่สารละลายผ่านเมมเบรนในช่วง 2 - 10 บรรยากาศ เมมเบรนที่ใช้เป็นแบบไม่สมมาตรมีชั้นผิวหนา 0.1 - 2 ไมโครเมตร ขนาดรูพรุน 10 - 500 อังสตรอม หรือเทียบเป็น Molecular Weight Cut-Off (MWCO) 500 – 300,000 ค่า MWCO เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการแยกสารละลาย



ภาพประกอบ 1.1 หลักการของกระบวนการเมมเบรนสังเคราะห์

ที่มา : Baker, 2000

ของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนโดยสามารถกักกันสารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลตามที่กำหนดได้อย่างต่ำร้อยละ 90 (Cheryan, 1998)

2.2 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration: MF) เป็นกระบวนการในการแยกสารละลายที่มีอนุภาคขนาดเล็ก คอลลอยด์ อิมัลชันหรือสารแขวนลอย มีหลักการเช่นเดียวกับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยความดันที่ใช้ป้อนให้แก่สารละลายผ่านเมมเบรนมีค่าในช่วง 1- 5 บรรยากาศ ด้วยเมมเบรนกรองที่มีขนาดรูพรุน 0.1 - 10 ไมโครเมตร ตัวอย่างการใช้งานหลักของไมโครฟิลเตรชัน เช่น ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เช่น ไวน์ น้ำผลไม้ เพื่อทำให้ใส และในอุตสาหกรรมชีวภาพ เป็นต้น

3. ข้อดีของกระบวนการเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรนมีข้อได้เปรียบกระบวนการแยกอื่นๆ ดังนี้

3.1 เป็นการแยกตามขนาดของโมเลกุลหรืออนุภาค ทำให้สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ จึงเหมาะสำหรับแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเพราะความร้อนได้ เช่น การทำน้ำผลไม้ให้ใส การแยกโปรตีนจากนม เป็นต้น

3.2 ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถแยกได้โดยไม่เปลี่ยนเฟส ตัวอย่าง เช่น กระบวนการทำน้ำผลไม้เข้มข้น จะมีข้อได้เปรียบทางด้านพลังงานกว่าการต้มระเหย

3.3 ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้ง เพราะกระบวนการเมมเบรนทำให้สามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งเพอมิเอท และรีเทนเทท เช่น ในการผลิต

น้ำผลไม้เข้มข้น ได้เพอมิเอท คือ น้ำผลไม้ใส ส่วนรีเทนเทท มีเข้มข้นสามารถนำไปผลิตเป็นน้ำผลไม้เข้มข้นได้ หรือในการบำบัดน้ำทิ้งบางชนิดที่ได้น้ำสะอาดกลับไปใช้ในกระบวนการและได้ผลิตภัณฑ์เข้มข้นซึ่งใช้ประโยชน์ต่อไปได้

3.4 สามารถขยายขนาดจากระดับต้นแบบให้เป็นระดับอุตสาหกรรมได้ง่าย เนื่องจากเมมเบรนมีลักษณะเป็นชุด (modular) หรือหน่วย สามารถนำหน่วยย่อยๆ มาต่อกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแยกสารที่ต้องการ

3.5 สามารถดำเนินการแบบกะ (batch) หรือแบบต่อเนื่อง (continuous) และสามารถติดตั้งระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติได้ง่าย

3.6 มีขนาดกระทัดกระรัดไม่เปลืองพื้นที่ เพราะชุดอุปกรณ์เมมเบรนมีการออกแบบให้มีศักยภาพในการกรองต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง

3.7 ไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง สามารถแยกได้โดยไม่เปลี่ยนสถานะ และไม่ต้องใช้สารเคมีช่วยในการแยก เช่น การทำน้ำผลไม้ให้ใสจะลดการใช้เอนไซม์เพคติเนสหรือไม่ต้องใช้เลย

3.8 สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ต้องการได้หมด

3.9 ใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการกรองแบบเดิมและใช้เวลาในการผลิตสั้นกว่าส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าด้วย

ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้สามารถนำกระบวนการเมมเบรนไปใช้แทนกระบวนการกรองแบบเดิมที่ใช้อยู่อาจจะในลักษณะแทนบางขั้นตอน หรือทั้งกระบวนการทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของกระบวนการนั้นๆ

4. ข้อจำกัดของกระบวนการเมมเบรน

ถึงแม้ว่ากระบวนการเมมเบรนมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในการแยกสารละลายต่างๆ แต่ก็มีข้อจำกัดในการนำไปใช้เช่นเดียวกับกระบวนการอื่นๆ ดังต่อไปนี้

4.1 Concentration polarization (CP) มักจะกล่าวถึงกันอยู่เสมอในการศึกษาวิจัยพื้นฐานของกระบวนการเมมเบรน CP หมายถึง การสะสมของโมเลกุล/อนุภาค ของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ทำให้ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเมมบรนสูงกว่าใน bulk solution (บริเวณที่อยู่ห่างออกไป) ซึ่งจะลดความสามารถในการแยกทั้งในแง่ของฟลักซ์และการกักกัน

ดังภาพประกอบ 1.8 ซึ่งแสดงโปรโฟล์ความเข้มข้น CP การเกิด CP อย่างต่อเนื่องส่งผลทำให้เกิด fouling การลด CP ในระดับหนึ่งทำได้โดยการออกแบบอุปกรณ์ให้มีการป้อนสารผ่านเมมเบรนแบบไหลขวางและที่ความเร็วสูงซึ่งจะช่วยให้ตัวถูกละลายที่สะสมเกิดการแพร่กลับไปใน bulk solution

4.2 Fouling การเกิด fouling ของเมมเบรน หมายถึง การสะสม/อุดตันของตัวถูกละลายทั้งบนผิวหน้าเมมเบรนและภายในรูพรุน ซึ่งทำให้ฟลักซ์ลดลงและการกักกันโมเลกุลเปลี่ยนแปลงโดยการลดลงหรือเพิ่มขึ้น fouling เกิดขึ้นด้วยกลไกที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเมมเบรนและสารละลาย สิ่งสะสมและอุดตันไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำได้ ต้องล้างทำความสะอาดด้วยสารเคมีที่เหมาะสม การเกิด fouling มีผลกระทบต่อสมรรถนะของกระบวนการเมมเบรน

4.3 ความคงตัวของเนื้อเมมเบรน เมมเบรนที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่ผลิตจากโพลิเมอร์ มีความคงตัวค่อนข้างจำกัด สามารถใช้งานในช่วงความเป็นกรด-ด่างกว้าง และช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ปัจจุบันมีการพัฒนาให้เมมเบรนที่ผลิตจากโพลิเมอร์สามารถทนอุณหภูมิได้สูง 60-80 องศาเซลเซียส เมมเบรนบางชนิดไม่ทนต่อคลอรีน หรือตัวทำละลายอินทรีย์ ส่วนเมมเบรนชนิดเซรามิกส์ (ceramic) มีความคงตัวต่ออุณหภูมิและสารเคมีดีมาก สามารถฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำได้ ทนต่อจุลินทรีย์ แต่ความสามารถในการแยกยังด้อยกว่าเมมเบรนที่ผลิตจากโพลิเมอร์ การพัฒนายังค่อนข้างจำกัด และราคาแพง

5. วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน

5.1 โพลิเมอร์สำหรับผลิตเมมเบรน

โพลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเมมเบรนมีมากกว่า 130 ชนิด แต่มีเพียง 2-3 ชนิดเท่านั้นที่ถูกนำมาใช้ในการอุตสาหกรรมอาหารและเภสัชศาสตร์ ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ทำเมมเบรนในเชิงพาณิชย์ดังตาราง 1.2

5.1.1 เซลลูโลส (Cellulose) เป็นโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic) แต่ไม่ละลายน้ำ เนื่องจากมีความเป็นผลึกมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล เป็นสายตรง เซลลูโลส ได้แก่ เซลลูโลสอะซิเตท (cellulose acetate; CA) และเซลลูโลสไนเตรท (cellulose nitrate; CN) จะนิยมใช้ผลิตเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน

ตาราง 1.2 โพลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการผลิตเมมเบรนสำหรับกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน

	Application	
	MF	UF
Cellulose diacetate and triacetate (CA, CTA)	X	X
Cellulose nitrate (CN)	X	
CA/CN blends	X	
Cellulose	X	X
Polyacrylonitrile (PAN)		X
Polyamide (aromatic and aliphatic)		X
Polysulfone (PS)	X	X
Polyether sulfone (PES)	X	X
Polycarbonate (track-etched)	X	X
Polyethylene terephthalate (PET) (track-etched)	X	X
Polyamide		X
Polyethylene (PE)	X	
Polypropylene (PP)	X	
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	X	
Polyvinylidene fluoride (PVDF)	X	X
Polyvinylchloride (PVC)	X	X

ที่มา : Cheryan, 1998

แต่เซลลูโลส ไม่คงทนต่อความร้อน สารเคมี และจุลินทรีย์ ถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายในสภาวะที่เป็นด่าง (Howell *et al.*, 1993) โดยปกติแล้วเมมเบรนชนิดเซลลูโลสต้องเก็บไว้ในสารละลายที่มีคลอรีนเพื่อป้องกันการทำลายจากสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ยังหาได้ง่ายและราคาถูก

5.1.2 โพลีอะไมด์ (Polyamide; PA) มีพันธะเอไมด์ (-CONH-) โพลีอะไมด์ผลิตขึ้นเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในเมมเบรนชนิดเซลลูโลสอะซิเตท เช่นใช้ได้ในช่วงความเป็นกรด-ด่างที่กว้างมากขึ้น แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่ทนต่อคลอรีน และเกิดการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์ได้ง่าย

5.1.3 โพลีซัลโฟน (Polysulfone; PS) โพลิเมอร์จำพวกโพลีซัลโฟน ถูกนำมาผลิตเป็นเมมเบรนสำหรับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันอย่างกว้างขวาง ทนความร้อนสูง ใช้ในช่วงความเป็นกรด-ด่างกว้างๆ ทนคลอรีนและสารเคมีได้ดี แต่ข้อจำกัดของโพลีซัลโฟน คือ ใช้ได้ในช่วงความดันต่ำและเป็นโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

5.1.4 โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride; PVDF) สามารถทนความร้อนได้สูงและทนต่อสารเคมี เป็นโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ แต่เมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ บางเครื่องหมายการค้า เช่น Durapore จาก บริษัท Millipore จำกัด ได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของผิวหน้าเมมเบรนให้มีคุณสมบัติความชอบน้ำ ดังนั้นผิวหน้าของเมม เบรนจะดูดซับน้ำได้ง่ายขึ้น เป็นโพลิเมอร์ที่นิยมใช้ผลิตเมมเบรนสำหรับกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันอย่างกว้างขวาง และมีคุณสมบัติในการทนคลอรีนมากกว่าโพลีซัลโฟน ปกตินิยมใช้ในการทำน้ำผลไม้ให้ใสเพราะทนทานต่อลิโมนีน (limonene)

5.1.5 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene; PP) โดยทั่วไปนิยมใช้ในแบบเส้นใยกลวง เป็นโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ ทนความร้อนและสารเคมีเหมือนเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์

5.2 วัสดุสำหรับเมมเบรนอนินทรีย์ (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2541)

วัสดุอินทรีย์มีคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนที่เหนือกว่าโพลิเมอร์ แต่ที่นำมาผลิตเป็นเมมเบรนได้มีอยู่จำกัด ปัจจุบันจึงมีการนำเมมเบรนที่ผลิตจากอนินทรีย์มาใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ไมโครฟิลเตรชัน และการแยกก๊าซเท่านั้น วัสดุอนินทรีย์สามารถแบ่งออกเป็นเซรามิกส์ โลหะแก้ว และซีโอไลท์ (zeolite)

เมมเบรนอนินทรีย์ที่ผลิตจากโลหะ เช่น จากเหล็กสแตนเลส (stainless steel) โมลิบดินัม (molybdenum) ทังสเตน (tungsten) วิธีการผลิต คือ sintering ปัจจุบันไม่มีการใช้งานที่เกี่ยวกับกระบวนการเมมเบรนหรือได้รับความสนใจเท่าที่ควร วัสดุเซรามิกส์ หมายถึง วัสดุ

ที่เกิดจากการรวมตัวของโลหะบางชนิด เช่น อะลูมิเนียมไทเทเนียม (aluminium titanium) และ เซอโครเนียม (zirconium) กับอโลหะในรูปของออกไซด์ เช่น อะลูมินา(Al_2O_3) และ เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) เมมเบรนที่ผลิตจากแก้วมีวิธีการผลิตที่แตกต่างจากเซรามิกส์ นอกจากนั้นยังมีการศึกษาเมมเบรนที่ผลิตจากอนินทรีย์ชนิดใหม่จากซีโอไลท์ ซึ่งพบว่ามีการกระจายของรูพรุนแคบ ใช้ในการแยกก๊าซและเพอแวปเปอเรชัน ในที่นี้จะกล่าวถึงวัสดุอนินทรีย์โดยเน้นเซรามิกส์

5.3 วัสดุเซรามิกส์

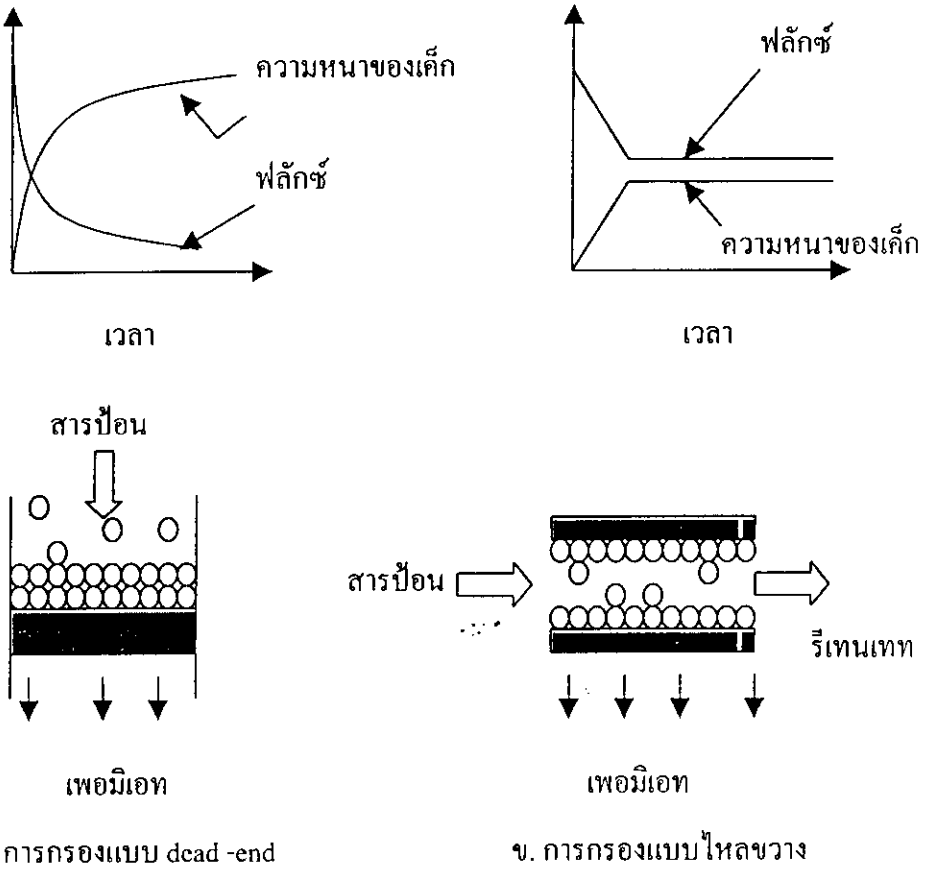
เซรามิกส์เป็นวัสดุที่พันธะแข็งแรง จึงมีจุดหลอมเหลวสูง เซรามิกส์จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสำหรับกระบวนการแยกที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้เมมเบรนชนิดเซรามิกส์ยังสามารถนำไปใช้งานที่ทุกๆ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และกับตัวทำละลายอินทรีย์ จึงเลือกสารทำความสะอาดเมมเบรนได้หลายชนิด หรือไม่มีข้อจำกัดเช่นเดียวกับเมมเบรนที่ผลิตจากโพลิเมอร์

6. ลักษณะการกรองแบบ dead-end และแบบไหลขวาง

ลักษณะการกรองในกระบวนการ แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

6.1 การกรองแบบ dead-end เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางที่ตั้งฉากกับเมมเบรน ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคผิวเมมเบรน ที่เรียกว่า เค็ก (cake) ดังภาพประกอบ 1.2ก การกรองแบบนี้มีข้อเสียคือ เมื่อกรองไปนานๆ จะเกิดการสะสมของเค็กทำให้ความต้านทานในการไหลเพิ่มขึ้น และทำให้ฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ต้องหยุดการกรองเพื่อกำจัดชั้นเค็กที่เกิดขึ้น ดังนั้นการกรองแบบ dead-end จึงควรใช้เมื่อสารละลายประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก และมีความเข้มข้นต่ำ และดำเนินงานแบบกะ

6.2 การกรองแบบไหลขวาง เป็นการป้อนสารละลายขนานกับเมมเบรนหรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอมิเอท ซึ่งเรียกว่า crossflow หรือ tangential flow ดังภาพประกอบ 1.2ข. ซึ่งเป็นการที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ อัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน การป้อนสารละลายแบบไหลขวางมีลักษณะการไหลจะมีความปั่นป่วน ซึ่งผลของแรงเฉือนทำให้สารละลายกวาดอนุภาคออกจากผิวหน้าของเมมเบรน ดังนั้นจึงเป็นการลดการเกิด concentration polarization (CP) ทำให้มีการสะสมของเค็กเพียงบางๆ เท่านั้น การลดลงของฟลักซ์ไม่มากเท่ากับการกรองแบบ dead-end จึงเหมาะสมสำหรับสารละลายที่มี



ก. การกรองแบบ dead -end

ข. การกรองแบบไหลขวาง

ภาพประกอบ 1.2 เปรียบเทียบการกรองแบบ dead-end และแบบไหลขวาง
ที่มา : รัตนา จิรรัตนานนท์, 2541

ความเข้มข้นสูง ดังนั้นการประยุกต์ใช้ในปัจจุบันจึงเป็นกระบวนการอัตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางเป็นส่วนใหญ่

7. รูปแบบของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน

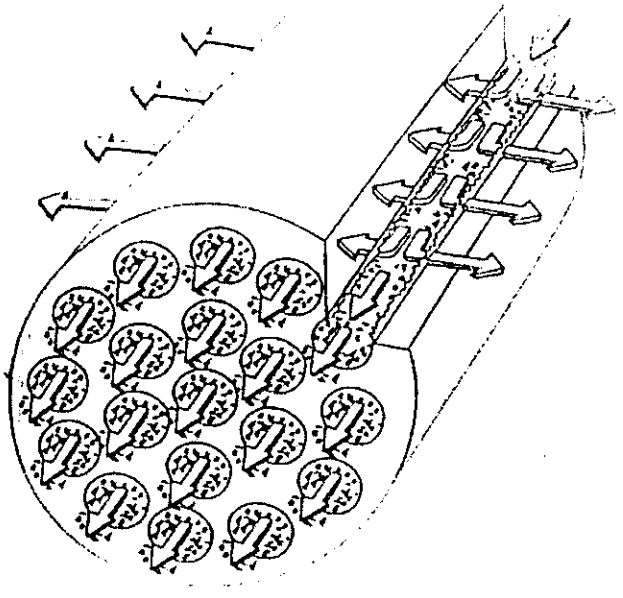
เมมเบรนที่ใช้กันในระบบต่าง ๆ นั้นมีหลายรูปแบบ ดังแสดงในภาพประกอบ 1.3 – 1.6

7.1 เมมเบรนแบบแผ่น (Flat Plate membrane)

มีลักษณะเป็นแผ่นแบน ๆ เล็ก ๆ เมื่อใช้แล้วจะทิ้งไป

7.2 เมมเบรนแบบท่อ (Tubular Module)

มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก ส่วนใหญ่จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 0.3 - 2.5 เซนติเมตร โดยสารละลายจะไหลผ่านภายในท่อ ผนังภายในท่อจะเป็นเยื่อ ของเหลวจะซึมผ่านออกมาได้และถูกเก็บไว้ที่บริเวณรอบ ๆ ท่อ ดังนั้นตัวท่อเองจะต้องแข็งแรงพอหรืออาจจะต้องใช้วัสดุจากภายนอกมาเสริมเพิ่มความแข็งแรงด้วย ข้อดีของเมมเบรนแบบท่อคือ สามารถทำให้สารละลายเข้มข้นขึ้นหรือเพื่อความหนืดมากขึ้นได้ โดยไม่ทำให้เมมเบรนสกปรกและสามารถทำความสะอาดได้ง่ายเนื่องจากเป็นการไหลภายในช่องกลม ทั้งยังสามารถตรวจสอบและดูแลได้ง่ายด้วย แต่มีข้อเสียคือมีพื้นที่ส่วนที่เป็นเยื่อน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับพื้นที่ทั้งหมด และอาจต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้นในส่วนของวัสดุที่นำมาเสริมเพิ่มความแข็งแรงให้เมมเบรน

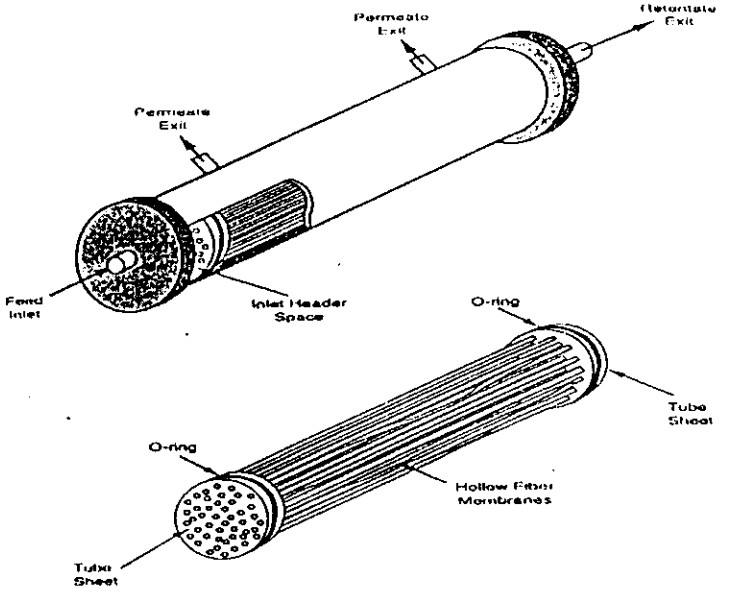


ภาพประกอบ 1.3 เมมเบรนแบบท่อ

ที่มา : Ho และ Sirkar, 1992

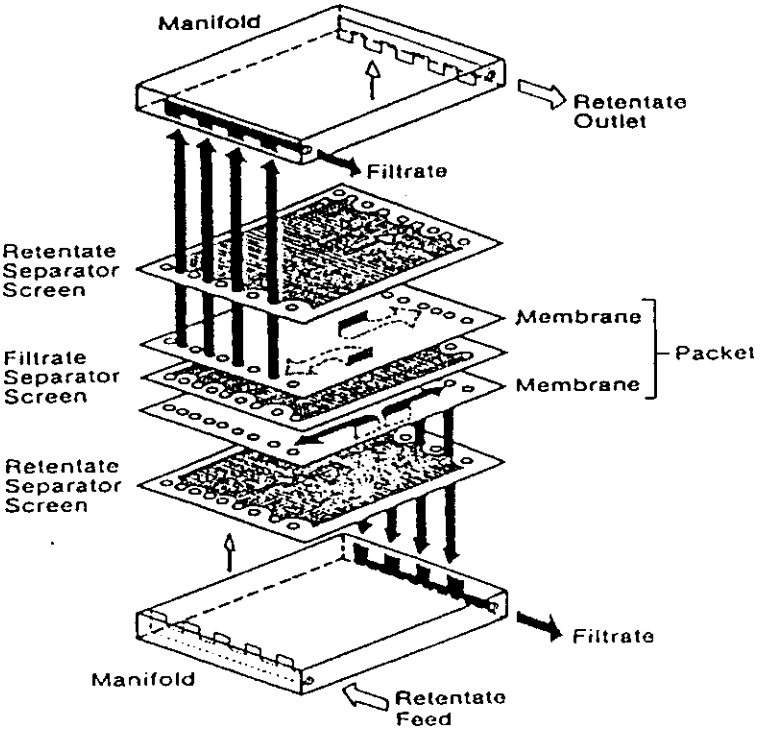
7.3 เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber)

เป็นแบบที่มีความแข็งแรงและทนต่อแรงดันได้ดีพอสมควร มีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็กภายในเป็นไฟเบอร์จำนวนมากเรียงตัวขนานกันอยู่และบรรจุอยู่ในเรซิน (resin) มีการป้อนสารละลายเข้มข้นออกทางด้านตรงกันข้าม ในระบบไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันนั้น สารละลายจะไหลภายใต้ความดันไปในช่องที่เจาะไว้ ส่วนที่ซึมผ่านได้จะถูกแยกออกมาข้างนอก เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของแต่ละท่อจะมีขนาดเพียงประมาณ 200 - 500 ไมโครเมตร ความหนาของเส้นใยอยู่ระหว่าง 200 ไมโครเมตร ถ้าใช้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น คือ มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.5 – 10 มิลลิเมตร จะเรียกว่าแบบคาพิลารี (capillary) การนำแผ่นแบบนี้ไปใช้อาจต้องมีการปรับสภาพของสารละลายก่อนนำเข้าไปกรองโดยเมมเบรนแบบนี้ เนื่องจาก เมมเบรนแบบนี้ไวต่อการอุดตันมาก ข้อดีคือ สามารถทำความสะอาดได้โดยการผ่านน้ำเข้าไปช่วยขับสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ติดอยู่บนไฟเบอร์ของเมมเบรนออกไป ข้อเสียคือ เส้นใยมักจะแตกง่าย เนื่องจากแรงเฉือนของความดันลด (pressure drop) ที่มาจากความสกปรกที่เกิดขึ้น



ภาพประกอบ 1.4 เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง

ที่มา : Zeman และ Zydney, 1996



ภาพประกอบ 1.5 เมมเบรนแบบแผ่น/ มีกรอบ

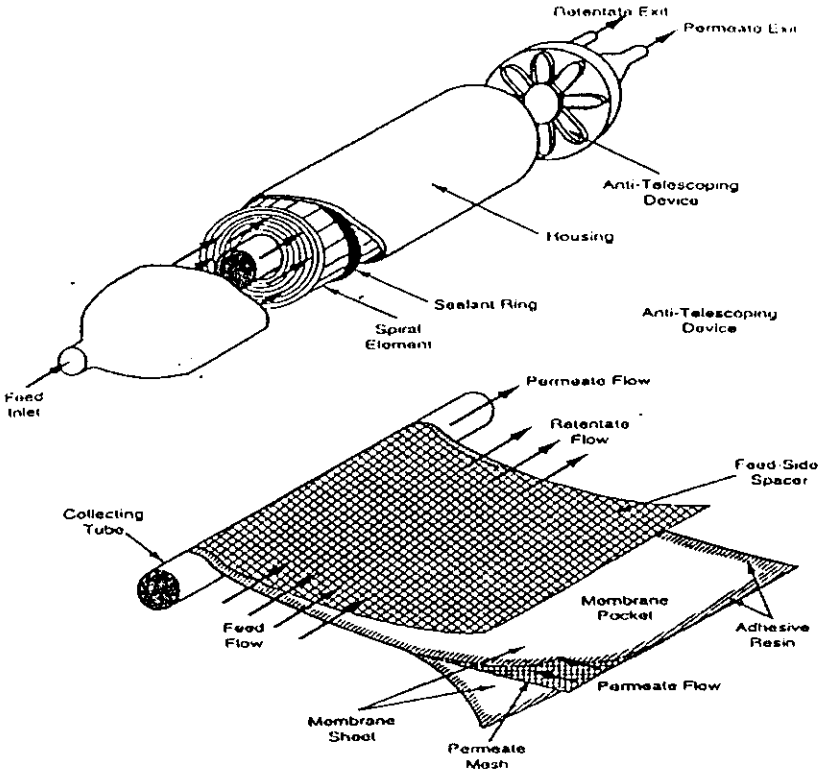
ที่มา : Zeman และ Zydney, 1996

7.4 เมมเบรนแบบแผ่น / มีกรอบ (Plate and Frame Module)

มีลักษณะเป็นแผ่นแบนวางอยู่ระหว่างแผ่นโครงที่ใช้เป็นช่องทางให้สารละลายไหลผ่านช่องนี้มีความสูงประมาณ 0.03 – 0.1 เซนติเมตร เมมเบรนและวัสดุที่ให้ความแข็งแรงจะประกบติดกัน ใช้วัสดุเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากในกระบวนการทำงานต้องใช้ความดันสูง ข้อดีคือ สามารถเปลี่ยนเมมเบรนได้ง่าย ข้อเสียคือ ใช้แรงงานมากในการทำความสะอาดและการเคลื่อนย้าย

7.5 เมมเบรนแบบท่อม้วน (Spiral Wounded Module)

มีลักษณะคล้ายท่อโดยมีเมมเบรนอยู่รอบๆ ท่อที่ดูดซึมตรงกลาง ในระบบอัลตราฟิลเตรชันนั้นเมมเบรนจะมีความหนาประมาณ 0.0075 - 0.015 เซนติเมตร ข้อดีคือ เมมเบรนแบบนี้มีความแข็งแรงสามารถใช้กับกระบวนการที่ต้องการความดันสูงๆ ได้ และง่ายต่อการเปลี่ยนเมมเบรน ข้อเสียคือ ถ้าใช้สารละลายที่มีอนุภาคแขวนลอยจะเกิดการอุดตันได้ง่าย เนื่องจากอนุภาคของแข็งนั้นจะไปอุดตันทำให้การไหลเกิดได้ยากขึ้น



ภาพประกอบ 1.6 เมมเบรนแบบท่อม้วน

ที่มา : Zeman และ Zydney, 1996

ตาราง 1.3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเมมเบรนแบบต่าง ๆ

ชนิด	ข้อดี	ข้อเสีย	สถานะภาพทางการค้า
แบบท่อ (Tubular)	1.ทำความสะอาดง่าย เหมาะกับผลิตภัณฑ์อาหาร 2.เป็นที่รู้จักดี,มีการทดสอบและใช้งานมาอย่างดีแล้ว 3.สามารถเปลี่ยนเฉพาะท่อเมมเบรนได้	1. ปริมาณของเหลวในยูนิต (hold up) สูง 2. ราคาแพง 3.ใช้พื้นที่ในการติดตั้งค่อนข้างมาก	มีการผลิตขายเชิงการค้า
แบบแผ่น/มีกรอบ (Plate and Frame Module)	1.ปริมาณของเหลวในยูนิตต่ำ 2.เป็นที่รู้จักใช้งานกันเป็นอย่างดี 3.ใช้พื้นที่ในการติดตั้งไม่มาก	1.อาจเกิดการอุดตันของเมมเบรนตามจุดที่สารละลายหยุดนิ่งหรือไหลช้า 2.ทำความสะอาดยากไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์อาหาร 3.ราคาแพง 4.การเปลี่ยนแปลงแผ่นไม่สะดวก ใช้เวลานาน	มีการผลิตขายเชิงการค้า
แบบท่อม้วน (Spiral wound)	1. ราคาถูก 2. ขนาดกระทัดรัด 3.ใช้พื้นที่ในการติดตั้งไม่มาก	1.อาจเกิดอุดตันสกปรกง่าย 2. ทำความสะอาดยากไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์อาหาร	มีการผลิตขายเชิงการค้า
แบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber)	1. ราคาถูก 2. ขนาดกระทัดรัด	1.สกปรกหรือเกิดอุดตันง่าย 2.ทำความสะอาดยากมาก	มีการผลิตขายเชิงการค้า

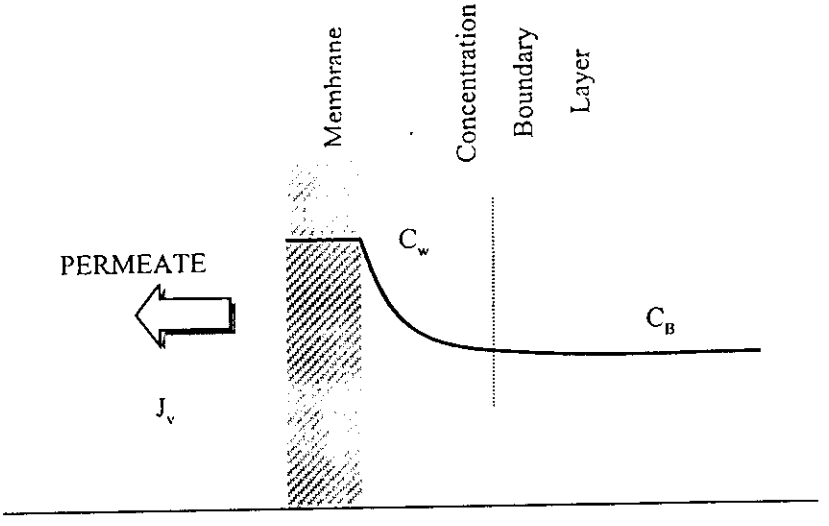
ฝ่ายหอสมุด
คุณหญิงหลง อรรถกระวีสุนทร

8. รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการการซึมผ่านเมมเบรน

8.1 แบบจำลองเจลโพลาไรเซชัน (Gel polarization model : GP)

8.1.1. การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration polarization: CP)

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดเนื่องจากการที่โมเลกุลของสารที่มีขนาดใหญ่ถูกกักไว้ที่ผิวเมมเบรนทำให้เกิดการสะสมโมเลกุลที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นที่บริเวณผิวเมมเบรน



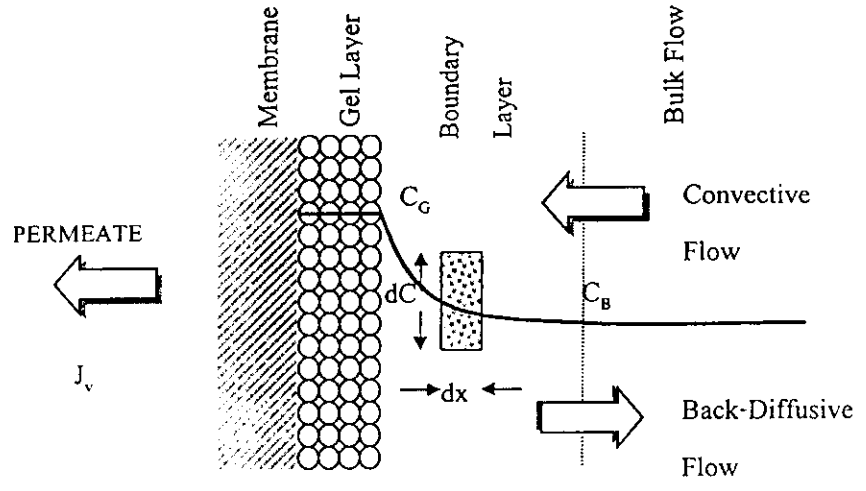
ภาพประกอบ 1.7 แสดงการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน

ที่มา : Cheryan, 1998

จึงแตกต่างกันที่บริเวณห่างออกไป เมื่อมีการสะสมโมเลกุลที่บริเวณผิวของเมมเบรนทำให้เกิดการถ่ายเทกลับของตัวถูกละลายจากผิวไปยัง bulk solution ที่สภาวะคงที่ ดังภาพประกอบ 1.7

8.1.2. การเกิดเจลโพลาไรเซชัน (Gel polarization : GP)

เมื่อเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันสำหรับสาร



ภาพประกอบ 1.8 การเกิดการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและเจลโพลาไรเซชัน

ที่มา : Cheryan, 1998

ละลายบางชนิดตัวถูกละลายอาจมีการละลายจำกัดที่ความเข้มข้นสูงทำให้เกิดการตกตะกอนที่ผิวเมมเบรนมีลักษณะเป็นชั้นเจล ดังภาพประกอบ 1.8 ชั้นของเจลเปรียบเสมือนเมมเบรนอีกแผ่นประกบอยู่กับเมมเบรนเดิมเป็นการเพิ่มความต้านทานการไหล ดังนั้นอัตราการไหลลดลง การเกิดเจลสามารถเกิดได้ในระยะเวลารวดเร็วมาก การเพิ่มความดันจะไม่มีผลให้ ฟลักซ์เพิ่มขึ้นแต่ทำให้เจลสะสมแน่นขึ้น สัมประสิทธิ์รีเจคชันของเมมเบรนต่อตัวถูกละลายแต่ละชนิดขึ้นกับคุณสมบัติของเจล ถ้าชั้นของเจลไม่แน่นหรือเป็นของไหลหนืดและตัวถูกละลายสามารถผ่านเจลไปยังเมมเบรนได้สัมประสิทธิ์รีเจคชันจะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าชั้นของเจลแน่นทำให้สามารถกักกันตัวถูกละลายไว้ได้ ในกรณีนี้สัมประสิทธิ์รีเจคชันจะเพิ่มขึ้น

8.2 แบบจำลองความต้านทาน (Resistance Model)

อนุกรมความต้านทานได้ถูกนำมาใช้ในการทำนายค่าฟลักซ์สำหรับเมมเบรนและสารละลายป้อนในอุดมคติ จากสมการ

$$J = \frac{\varepsilon d_p^2 P_T}{32 \Delta x \mu} \qquad (1)$$

เมื่อ ε = ความพรุนของผิวหน้าเมมเบรน

d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

P_T = ความดันที่ให้กับสารละลาย (กิโลปาสคาล)

μ = ความหนืดของเพอมิเอท

Δx = ความหนาของผิวเมมเบรน

นำมาเขียนในเทอมของความดัน จะได้

$$J = A \frac{P_T}{\mu} \qquad (2)$$

เมื่อ A = สัมประสิทธิ์ในการเลือกผ่านเมมเบรน

μ = ความหนืดของเพอมิเอท

แบบจำลองความต้านทานอธิบายการลดลงของฟลักซ์ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานการไหล ความต้านทานของเมมเบรน (R_M) หาได้จากฟลักซ์ของน้ำกลั่น จะได้

$$J_w = \frac{P_T}{R_M} \qquad (3)$$

เมื่อทำการกรองสารละลายจะเกิดการลดลงของฟลักซ์เนื่องจากการอุดตัน ความต้านทานของเมมเบรนในสมการที่ (3) จะเปลี่ยนไปโดยจะรวมความต้านทานเนื่องจากการ fouling (R_F) จะได้

$$J_v = \frac{P_T}{R_M + R_F} \qquad (4)$$

เมื่อรวมการเกิดเจลโพราไรเซชัน สมการที่ 3 จะได้

$$J_v = \frac{P_T}{R_M + R_F + R_G} \qquad (5)$$

เมื่อ J_v = ฟลักซ์ของสารละลายผ่านเมมเบรน (ลิตร / เมตร^2. ชั่วโมง)

P_T = ความดันที่ให้กับสารละลาย (กิโลปาสคาล)

R_F = ความต้านทานของ fouling (กิโลปาสคาล/ (ลิตร / เมตร^2. ชั่วโมง))

R_M = ความต้านทานของเมมเบรน (กิโลปาสคาล/ (ลิตร / เมตร^2. ชั่วโมง))

R_G = ความต้านทานของเจล (กิโลปาสคาล/ (ลิตร / เมตร^2. ชั่วโมง))

8.3 พารามิเตอร์ของสภาวะดำเนินการ: ค่าการกักกัน (Rejection)

ปัญหาของการกรองด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็ก คือ สภาวะการทดลองและพารามิเตอร์ของสภาวะดำเนินการโดยขึ้นอยู่กับ ความดัน ความปั่นป่วนบริเวณผิวหน้าเมมเบรน อุณหภูมิ และความเข้มข้นของตัวถูกละลาย นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง แรงกระทำระหว่างประจุ และรูปร่างและโครงสร้างของตัวถูกละลาย ซึ่งปัจจัยดังกล่าวข้างต้นส่งผลต่อค่าการกักกัน (Rejection; f) ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันจะเกิดได้ง่ายในสภาวะดำเนินการที่ความดันสูง ความเร็วสารป้อนต่ำ และสภาวะที่ทำให้ตัวถูกละลายสามารถผ่านเมมเบรนไปได้อย่างรวดเร็ว (เช่น การมีขนาดรูพรุนใหญ่ของเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน) ตัวอย่าง ถ้าสารละลายที่ถูกกักกันไว้ความเข้มข้นสูง จะทำให้เกิดเจลหรือเมมเบรนชั้นที่สองเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ตัวถูกละลายขนาดโมเลกุลเล็กผ่านไปได้ยาก

การเกิดชั้นของเจลจะอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรน เนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเมมเบรน (C_M หรือ C_{wall}) มากกว่าความเข้มข้นของ bulk solution ดังนั้นค่าการกักกันจริง (true rejection, f_t) จะแตกต่างจากค่าการกักกันปรากฏ (apparent rejection, f_a) เมื่อ

$$f_a = 1 - \frac{C_P}{C_R} \qquad (6)$$

$$f_t = 1 - \frac{C_P}{C_M} \qquad (7)$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นขององค์ประกอบ (กรัม/ลิตร)ในด้าน P, R และ M

P = ด้านเพอมิเอท

R = ด้านรีเทนเททหรือด้านสารป้อน

M = ผิวหน้าเมมเบรน

เมื่อ $C_M > C_R$ ค่า f_t จะมีค่ามากกว่า f_a ค่า C_P และ C_R สามารถวัดได้จากการเก็บตัวอย่างสารละลายไปวิเคราะห์ ดังนั้นค่า f_a จึงเป็นค่าการกักกันที่แท้จริง ภายใต้สภาวะดำเนินการและปรากฏการณ์โพลาไรเซชันเดียวกัน

การคำนวณผลของโพลาไรเซชันและการถ่ายเทมวลต่อค่าการกักกันอีกวิธีคือ การใช้ทฤษฎีฟิล์ม (film theory) ค่าการกักกันจริงสามารถคำนวณได้จากค่าการกักกันปรากฏ (จากการวัด) ดังสมการ

$$In[(1-f_a)/f_a] = In[(1-f_t)/f_t] + J/k \qquad (8)$$

เมื่อ J = ค่าฟลักซ์

k = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

สำหรับค่าการกักกัน (Rejection; f) องค์ประกอบหนึ่ง ๆ คำนวนเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังนี้ จากสมการ (6) จะได้

$$f = \left(1 - \frac{C_p}{C_R}\right)100 \qquad (9)$$

โดย C_P และ C_R เป็นความเข้มข้นขององค์ประกอบในเพอมิเอทและสารป้อน (หรือด้านรีเทนเทท) ตามลำดับ ค่า f จากสมการ (1) เป็นค่าปรากฏเพราะทั้ง C_P และ C_R หาได้จากการเก็บตัวอย่างสารละลายไปวิเคราะห์

9. การอุดตันในเมมเบรน

9.1 Fouling

ได้มีการพยายามที่จะอธิบายความหมายของ fouling และพบว่า fouling มีความเกี่ยวข้องกับ CP และ GP แต่สรุปว่า fouling อาจเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. การดูดซับ
2. การกักเก็บพร้อมกับการหลุดออก
3. การกักเก็บโดยไม่มีการหลุดออก
4. การอุดตันหรือการปิดกั้นรูพรุนของตัวถูกละลาย

มีผลทำให้ฟลักซ์ลดลงและทำให้คุณสมบัติในการกักเก็บสารเปลี่ยนแปลงด้วย ลักษณะแสดงการเกิด fouling สรุปว่ากลไกของการเกิด fouling มี 2 ขั้นตอน คือ การเกิด fouling ภายในรูพรุนและการสร้างชั้นของตัวถูกละลายบนผิวเมมเบรนซึ่งขึ้นกับขนาดรูพรุนและขนาดของตัวถูกละลาย

Jiraratananon และ Chanachai (1996) ได้ศึกษาการเกิด fouling ของเมมเบรนสังเคราะห์ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของน้ำเสาวรส ซึ่งคำนวณค่าความต้านทานต่างๆ คือ ความต้านทานของเมมเบรน (R_m) ความต้านทานจาก fouling (R_f) ความต้านทานจากชั้นโพลาไรซ์ผันกลับไม่ได้ ($R_{p,ir}$) และ ความต้านทานจากชั้นโพลาไรซ์ผันกลับ ($R_{p,re}$)

ความต้านทานรวม, R_t (เมตร $^{-1}$) สมการฟลักซ์เขียนในรูปความดันที่ให้กับระบบดังนี้

$$R_t = \frac{\Delta P}{\mu_p J_v} \qquad (10)$$

เมื่อ ΔP = ความดันที่ให้กับระบบ (กิโลปาสคาล)

μ_p = ความหนืดของเพอมิเอต (ปาสคาล .วินาที)

J_v = ฟลักซ์ของสารละลาย (เมตร^3/เมตร^2.วินาที)

ความต้านทานรวมในสมการที่ (5) เป็น

$$R_t = R_m + R_f + R_{p,ir} + R_{p,re} \quad (11)$$

การวิเคราะห์ความต้านทานขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์การผันกลับได้และการผันกลับไม่ได้ หลักการการเกิดความต้านทานของเมมเบรนดังแสดงในภาพประกอบ 1.9 ความต้านทานของเมมเบรน, R_m (เมตร $^{-1}$) คำนวณจากสมการ

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu_w J_w} \quad (12)$$

เมื่อ μ_w = ความหนืดของน้ำ (ปาสคาล.วินาที) ณ อุณหภูมิที่วัดฟลักซ์น้ำ

J_w = ฟลักซ์ของน้ำสำหรับเมมเบรนก่อนใช้งาน (เมตร^3/เมตร^2.วินาที)

$R_{p,re}$ เป็นความต้านทานเนื่องจากชั้นโพลาไรซ์ผันกลับได้ คือ ชั้น CP และ/หรือเจล ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการสะสมของสารละลายโมเลกุลใหญ่ที่ผิวหน้าเมมเบรนทำให้มีความเข้มข้นสูง จนถึงขีดจำกัดการละลายของสารละลายโมเลกุลใหญ่ สามารถล้างออกด้วยน้ำกลั่นที่อัตราการไหลต่ำ

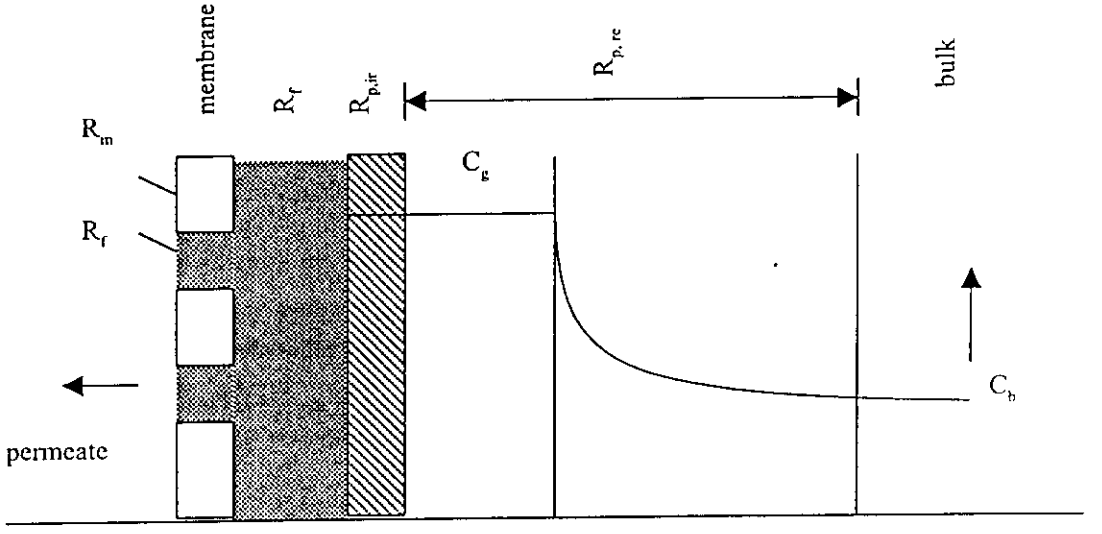
$R_{p,ir}$ เป็นความต้านทานเนื่องจากชั้นโพลาไรซ์ผันกลับไม่ได้ อยู่ระหว่างชั้น $R_{p,re}$ และ R_f ดังภาพประกอบ 1.9 ซึ่ง $R_{p,ir}$ เกิดจากแรงกระทำระหว่างสารละลายโมเลกุลใหญ่ สามารถล้างออกโดยอาศัยแรงเฉือนหรือที่อัตราการไหลของน้ำสูง

R_f เป็นความต้านทานเนื่องจากการเกิด fouling ที่ไม่ผันกลับโดยอาจเป็นการดูดซับของตัวถูกละลายบนผิวหน้าเมมเบรนและผิวภายในรูพรุน สามารถล้างออกโดยใช้สารเคมี

เมื่อล้างเมมเบรนที่กระบวนการ UF ด้วยน้ำกลั่นที่อัตราการไหลต่ำ ความต้านทานที่ถูกกำจัดออกไปคือ $R_{p,re}$ ฉะนั้นความต้านทานที่เหลืออยู่คือ $R_m + R_f + R_{p,ir}$

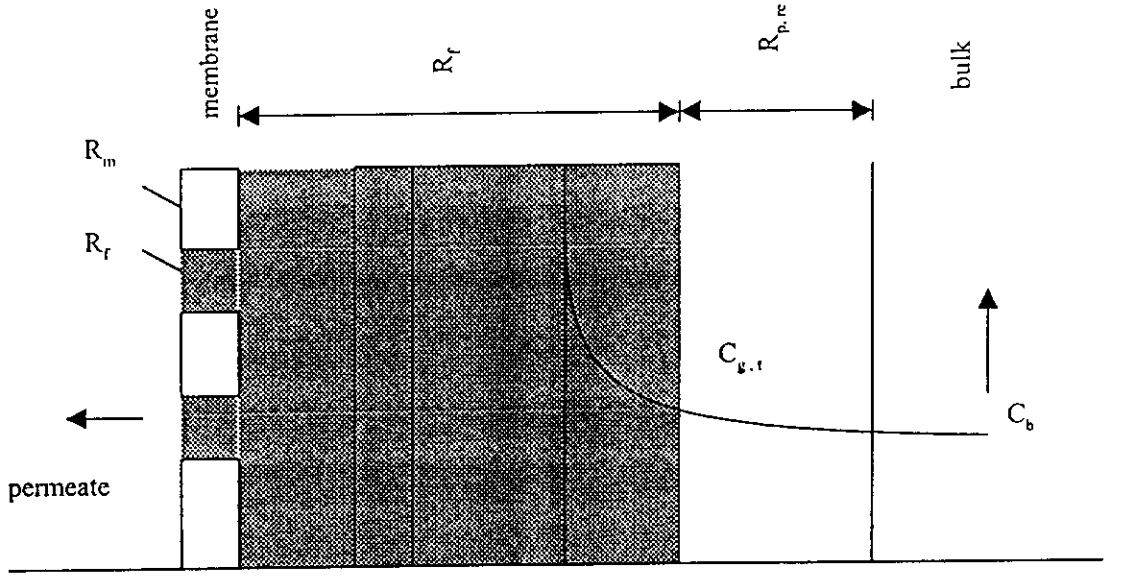
$$R_m + R_f + R_{p,ir} = \frac{\Delta P}{\mu_w J'_w} \quad (13)$$

เมื่อ J'_w = ฟลักซ์ของน้ำหลังการล้างเมมเบรนด้วยน้ำกลั่นที่อัตราการไหลต่ำ (เมตร^3/เมตร^2.วินาที)



C_g = precipitated gel concentration

a) no true gel formation



C_g = cross-linked gel concentration

b) true gel formation

ภาพประกอบ 1.9 ชั้นของความต้านทานต่าง ๆ

ที่มา : Jiraratananon และ Chanachai, 1996

เมื่อล้างเมมเบรนต่อด้วยน้ำกลั่นที่อัตราการไหลสูง ความต้านทานที่ถูกกำจัดออกไป คือ $R_{p,ir}$ ดังนั้นความต้านทานการไหลของน้ำคือ $R_m + R_f$

$$R_m + R_f = \frac{\Delta P}{\mu_w J''_w} \qquad (14)$$

เมื่อ J''_w = ฟลักซ์ของน้ำหลังการล้างเมมเบรนด้วยน้ำกลั่นที่อัตราการไหลสูง (เมตร^3/เมตร^2.วินาที)

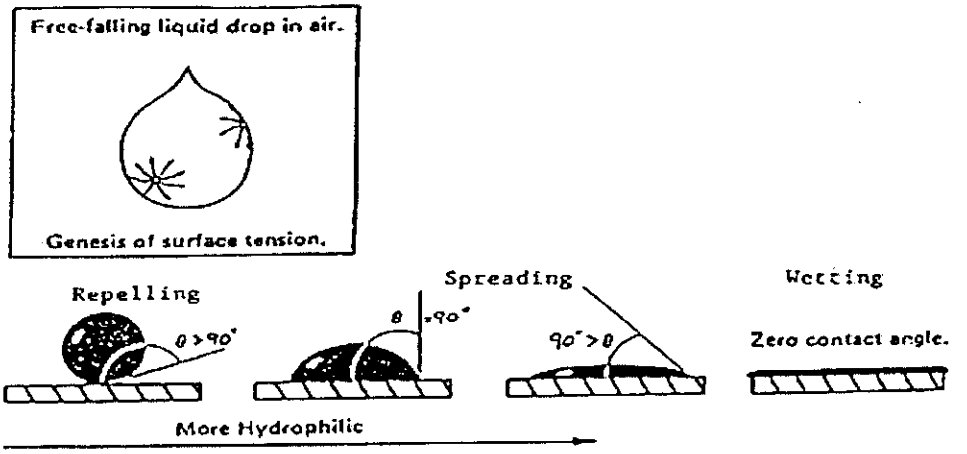
9.2 ปัจจัยต่อการเกิด fouling

9.2.1 คุณสมบัติของเมมเบรน

9.2.1.1 คุณสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilicity) เมมเบรนในอุดมคติจะมีคุณสมบัติความชอบน้ำ เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) สามารถดูดซับองค์ประกอบที่ไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้เกิดการอุดตันสูงกว่าเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำ คุณสมบัติความชอบน้ำของผิวเมมเบรนทั่วไปจะสามารถบอกด้วยค่ามุมสัมผัสของน้ำ (water contact angle, θ) โดยผิวเมมเบรนที่มีมุมเข้าใกล้ 0° (Cos (θ) = 1) จะมีคุณสมบัติความชอบน้ำและผิวเมมเบรนที่มีมุมมากกว่า 90° (Cos (θ) $\leq$ 0) มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำดังภาพประกอบ 1.10 ค่า water contact angle, θ สามารถอธิบายด้วยสมการของยัง (Young's equation) ที่สภาวะสมดุลจะได้

$$\gamma_l \text{Cos}\theta = \gamma_s - \gamma_{sl} \qquad (15)$$

เมื่อ γ_s และ γ_l คือแรงตึงผิวของแข็งและของเหลวที่อยู่ในสมดุลกับไอของเหลวตามลำดับ และ γ_{sl} คือแรงตึงผิวที่ผิวสัมผัสของแข็ง/ของเหลว เมมเบรนที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำผลิตจากโพลิเมอร์ที่คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ เช่น โพลีโพรพิลีน โพลีเอทิลีน โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ และโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน เป็นต้น นอกจากค่า θ จะขึ้นอยู่กับ



ภาพประกอบ 1.10 มุมสัมผัสของน้ำที่เกาะบนผิวหน้าเมมเบรน
ที่มา : บริษัท Osmonics

ชนิดของเมมเบรนแล้วยังขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวเมมเบรน ได้แก่ การปนเปื้อนบนผิวหน้าเมมเบรน ความขรุขระ ความหนาแน่นของรูพรุน เป็นต้น ผิวหน้าเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำจะมีหมู่ที่ชอบน้ำ ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล อีเทอร์ คาร์บอกซิล ซัลโฟเนต และ อะไมด์ ผิวหน้าของเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำจะมีหมู่ อะลิฟาติก และ อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น มุมของน้ำที่เกาะบนผิวหน้าเมมเบรนชนิดต่างๆ ดังตาราง 1.4 ตัวอย่าง เมมเบรนที่ผลิตจากเซลลูโลสจะเกิดการอุดตันน้อยกว่าวัสดุอื่นๆ โดยเฉพาะวัสดุที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ ตัวอย่างเช่น โปรตีนจะมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำในโครงสร้างซึ่งจะมีการกระทำต่อกันอย่างมากกับเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ

แต่ข้อมูล fouling บางข้อมูลก็ขัดแย้งกับข้อมูลเบื้องต้น เช่น เมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ จะเกิดการดูดซับหรือการอุดตันของโปรตีนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเมมเบรนชนิดโพลีอีเทอร์ซัลโฟน โพลีซัลโฟน และ เซลลูโลสอะซิเตท แต่ในกรณีอื่นๆ เช่น การดูดซับสารละลายโบวินซีรัมอัลบูมิน (bovine serum albumin) ของเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ ได้มากกว่าเมมเบรนชนิดอื่นทำให้เกิดการอุดตันมาก สาเหตุเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนให้มีคุณสมบัติความชอบน้ำโดยวิธีการดัดแปลง ซึ่งปัจจัยนี้ไม่มีการนำมาพิจารณาสำหรับศึกษา fouling บ่อยนัก เช่น เมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ชนิดมีคุณสมบัติความชอบน้ำ (GVWP) ของ บริษัท Millipore จำกัด ซึ่งเป็น

ตาราง 1.4 มุมของน้ำที่เกาะบนผิวหน้าเมมเบรนชนิดต่างๆ

Membrane	Contact Angle (°)	Reference
Cellulosic (unidentified)	24	Hodgins and Samuelson (1990)
Nova C-series	12-15	Gekas and Zhang (1989)
Desal CA-UF	45	Oldani and Schock (1989)
Ceramic	30	Rolchigo (1995)
Polyacrylonitrile (unidentified)	46	Hodgins and Samuelson (1990)
Membrex Ultrafilic	4	Hodgins and Samuelson (1990)
Poly(acrylonitrile-*co*-vinyl chloride)		
XM 50, Amicon	40	Jucker and Clark (1994)
XM100A, Amicon	60	Kim *et al.* (1989)
Polyethersulfone (unidentified)	65	Hodgins and Samuelson (1990)
IRIS UF3028	52	Gourley *et al.* (1994)
Nova FNS series	72-81	Gekas and Zhang (1989)
(Hydrophilized)	44	Hodgins and Samuelson (1990)
Desal E-100	56	Oldani and Schock (1989)
Polypropylene	108	Rolchigo (1995)
Polysulfone		
PM 10, Amicon	38	Oldani and Schock (1989)
PM 30, Amicon	60	Kim *et al.* (1989)
PM 30, Amicon	42	Jucker and Clark (1994)
PM 30, Amicon	43	Oldani and Schock (1989)
IRIS UF 3026	54	Gourley *et al.* (1994)
IRIS Rhone-Poulene	59	Kim *et al.* (1989)
PTGC, Millipore	65	Kim *et al.* (1989)
DDS-GR61	44	Oldani and Schock (1989)
DDS-GR81	45	Oldani and Schock (1989)
Desal E-500	81	Oldani and Schock (1989)
Kalle UF PS15	40	Oldani and Schock (1989)
PTFE (unidenified)	112	Rolchigo (1995)
PVDF (unidentified)	66	Rolchigo (1995)
Regenerated cellulose		
YM1, Amicon	96	Jucker and Clark (1994)
YM5, Amicon	48	Kim *et al.* (1989)
YM10, Amicon	6	Jucker and Clark (1994)
YM30, Amicon	7	Jucker and Clark (1994)
YM30, Amicon	49	Kim *et al.* (1989)
YM100, Amicon	31	Jucker and Clark (1994)

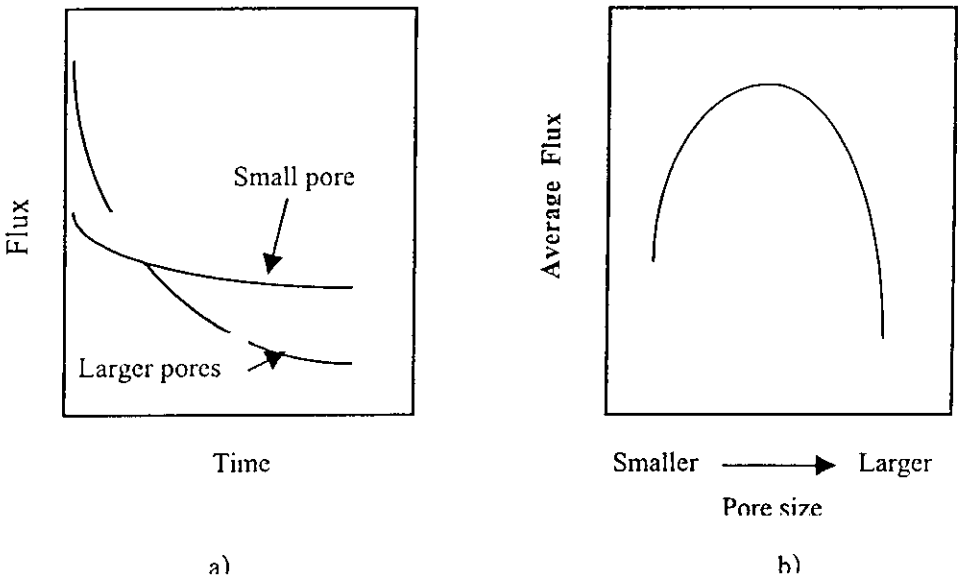
ที่มา : Cheryan, 1998

เมมเบรนผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติความผิวหน้าเมมเบรน ทำให้สามารถดูดซับปริมาณโปรตีน (84 มิลลิกรัม/เมตร^2) น้อยกว่า เมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (GVHP) ซึ่งสามารถดูดซับโปรตีน (1157 มิลลิกรัม/เมตร^2)

9.2.1.2 ลักษณะของผิวหน้าเมมเบรน : ลักษณะของผิวหน้าเมมเบรนชนิดเซลลูโลซิกเกิดการอุดตันน้อยกว่าเมมเบรนที่ผลิตจากโพลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากความขรุขระผิวหน้าเมมเบรนนั้นเอง ผิวหน้าเมมเบรนชนิดเซลลูโลสอะซิเตทจะมีความเรียบและมีความสม่ำเสมอ ส่วนเมมเบรนชนิดโพลีอะไมด์มีความขรุขระมากกว่า ทำให้เกิดการอุดตันได้ง่ายกว่าเมมเบรนชนิด เซลลูโลสอะซิเตท โดยเฉพาะการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์

9.2.1.3 ประจุของเมมเบรน : เมมเบรนส่วนใหญ่จะมีค่าประจุลบ ประจุบนผิวเมมเบรนมีความสำคัญต่อการกรองสารละลายที่มีขั้ว ตัวอย่างเช่น ค่าฟลักซ์ของสีเคลือบที่มีความเป็นประจุบวก จะมีค่ามากขึ้นเมื่อเราใช้เมมเบรนที่มีความเป็นประจุบวก ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการแรงผลักกันของอนุภาค และเมมเบรนที่มีขั้วหรือประจุชนิดเดียวกัน

9.2.1.4 ขนาดรูพรุน : ขนาดรูพรุนของเมมเบรนและขนาดอนุภาคในสารละลายป้อนมีความสำคัญมาก มีงานวิจัยต่างๆ มากมายที่ได้ศึกษาเรื่องนี้ ภาพประกอบ 1.11 พบว่าในช่วงแรกของการดำเนินการ เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะให้ฟลักซ์สูงกว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็ก แต่เมื่อเวลาผ่านไปเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่าจะให้ปริมาณฟลักซ์สูงกว่า ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดเนื่องจากเมมเบรนมีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่แต่อนุภาคของสารละลายมีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรน ทำให้เกิดการเกาะติดภายในรูพรุน ดังนั้นปริมาณฟลักซ์จึงลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 2 - 3 นาทีแรกของการดำเนินการ นอกจากนี้การดำเนินการภายใต้ความดันสูงจะทำให้การการอัดแน่นของเค็กมากขึ้น ส่งผลให้ทำความสะอาดยากมากขึ้นด้วย ในทางกลับกันถ้าขนาดรูพรุนของเมมเบรนเล็กกว่าอนุภาคของสารละลายป้อน อนุภาคจะไม่เข้าไปเกาะติดภายในรูพรุนแต่จะเกาะติดบนผิวหน้าเมมเบรน ดังนั้นถ้าเราดำเนินการแบบการกรองแบบไหลขวางจะมีแรงเฉือนทำให้การสะสมโมเลกุลของสารละลายบนผิวเมมเบรนน้อยดังนั้นจึงไม่มีผลกระทบต่อค่าฟลักซ์ การเลือกขนาดรูพรุนที่เหมาะสมมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ถ้าขนาดรูพรุนของเมมเบรนใกล้เคียงหรือเล็กกว่าขนาดของอนุภาคเล็กน้อย ปริมาณฟลักซ์ที่ลดลงในช่วงแรกจะเกิดช้าลง กฎการเลือกขนาดรูพรุนต่อขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยจะเลือกในอัตราส่วน 1 : 10 การเลือกขนาดรูพรุนที่เล็กเกินไปหรือใหญ่เกิน ไปปริมาณฟลักซ์ที่ได้จะน้อย ยกตัวอย่างเช่น การแยกหางนมโดยใช้



ภาพประกอบ 1.11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนของเมมเบรนกับฟลักซ์

a) ฟลักซ์ต่อเวลา ทุกสภาวะการดำเนินการมีค่าคงที่

b) ฟลักซ์เฉลี่ย โดยการดำเนินการที่มีการหมุนเวียน (เช่น ทำความสะอาด) กับขนาดรูพรุน เมื่อปัจจัยอื่นๆมีค่าสมดุล

ที่มา : Cheryan, 1998

เมมเบรนชนิดนิวคลิพอร์(Nuclepore membrane) ขนาดรูพรุน 0.08 ไมโครเมตร จะให้ปริมาณ ฟลักซ์มากกว่าการแยกด้วยขนาดรูพรุนเล็กกว่านี้ (0.01, 0.03 และ 0.05 ไมโครเมตร) หรือ ขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 0.1 ไมโครเมตร (Piot *et al.*, 1988 อ้างโดย Cheryan, 1998)

9.2.1.5 การปรับสภาพผิวหน้าเมมเบรน : เป็นการปรับสภาพผิวหน้าเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำให้มีคุณสมบัติความชอบน้ำเพื่อลดการอุดตัน โดยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำที่ผิวหน้าเมมเบรน เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) ด้วยวิธีการเคลือบลงผิวหน้าโดยกระบวนการดูดซับ วิธีการดัดแปลงด้วยรังสี การใช้ไมโครเวฟ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น วิธีการดัดแปลงนำไกลซีนลงบนผิวหน้าของเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ เป็นต้น

9.2.2 คุณสมบัติของสารละลาย

9.2.2.1 โปรตีน : มีหมู่ฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ ดังนั้นโปรตีนจึง

เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการอุดตันในเมมเบรน โครงสร้างที่ซับซ้อนของโปรตีนเกิดการจับตัวกันกลายเป็นเจลเสมือนเมมเบรนชั้นที่ 2 และ 3 ถัดจากผิวหน้าเมมเบรน ทำให้ปริมาณฟลักซ์ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

9.2.2.2 เกลือ : เกลือแร่ต่างๆ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิด fouling ของเมมเบรน โดยเกลือแร่จะตกตะกอนบนผิวหน้าเมมเบรนเนื่องจากความสามารถในการละลายไม่ดีหรือการเกิดแรงกระทำระหว่างขั้วประจุที่ต่างกันของเมมเบรนและเกลือแร่ ส่งผลให้ฟลักซ์ลดลง ตัวอย่างเกลือแร่ เช่น เกลือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เกลือแคลเซียมในนม เป็นต้น

9.2.2.3 ความเป็นกรด-ด่าง : ปริมาณฟลักซ์ของโปรตีนจะต่ำสุดที่จุดไอโซอิเล็คตริกของโปรตีน และได้ปริมาณฟลักซ์สูงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง สูงกว่าจุดไอโซอิเล็คตริก

9.2.2.4 ไขมันและน้ำมัน ในการแยกสารละลายน้ำมันในน้ำ ถ้าเมมเบรนที่ใช้มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ น้ำมันอิสระจะเคลือบบนผิวหน้าเมมเบรนส่งผลให้ได้ปริมาณฟลักซ์น้อยมาก น้ำมันจะมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับหมู่ฟังก์ชันของเมมเบรน เช่น โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ และโพลีซัลโฟน ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอุดตันในเมมเบรน เมมเบรนที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำจะไม่เกิดพฤติกรรมดังกล่าวข้างต้น นั่นคือจะได้ปริมาณฟลักซ์สูงนั่นเอง

9.2.2.5 สารป้องกันการเกิดฟอง : เพื่อป้องกันการเกิดฟองในเครื่องระเหยน้ำและถังหมัก สารป้องกันการเกิดฟองเชิงพาณิชย์ทั่วไป เช่น โพลีออกซีเอทิลีน โพลีออกซีโพรพิลีน เอเลอิล อีเทอร์ โพไกลคอล และน้ำมันซิลิโคน เป็นต้น จะเกิดการอุดตันได้ง่ายในเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ ส่วนเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำจะเกิดการอุดตันเนื่องจากสารป้องกันการเกิดฟองน้อยมาก

9.2.2.6 สารประกอบที่มีอยู่ในดิน (Humic substances) : มีความเป็นสารละลายอิเล็กโตรไลซ์กรดอ่อนๆ ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลิกและฟีโนลิก มีปริมาณร้อยละ 80 ของสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในน้ำธรรมชาติ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ลดลงจะมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำมากขึ้น ดังนั้นจะเกิดการอุดตันในเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำๆ

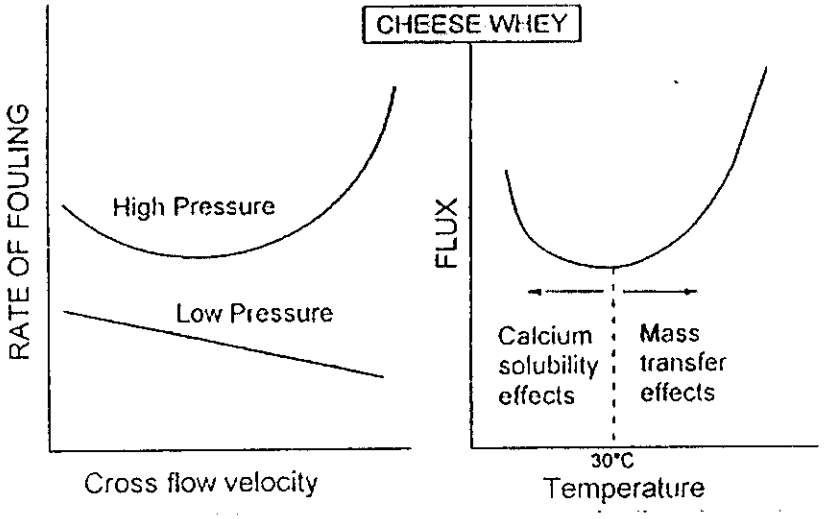
9.2.3 กระบวนการทางวิศวกรรม

การออกแบบกระบวนการ เราต้องคำนึงถึงความซับซ้อนของปฏิกิริยาทางเคมี

ฟิสิกส์ของส่วนประกอบของสารละลายป้อน พารามิเตอร์ของกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลสารป้อน ความดันและความเข้มข้นของสารละลายป้อน เนื่องจากเป็นปัจจัยหลักที่จะส่งผลต่อการอุดตันของเมมเบรน

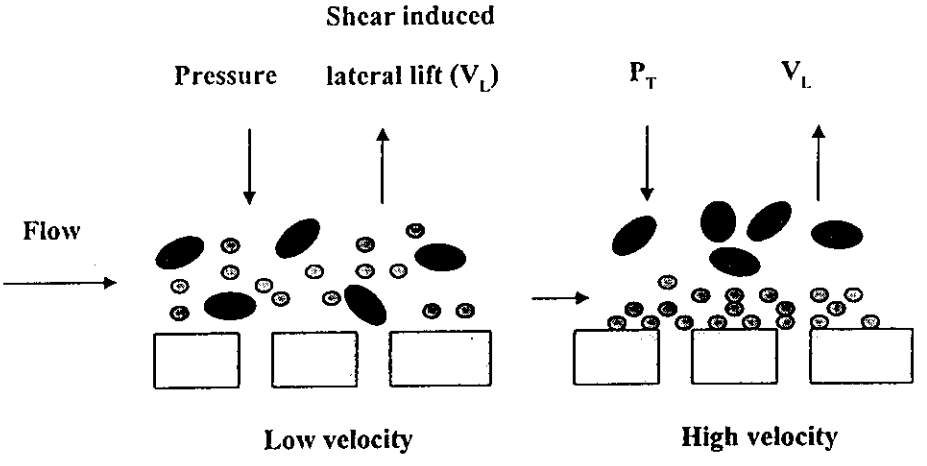
9.2.3.1 อุณหภูมิ : ผลของอุณหภูมิต่อการเกิด fouling ไม่แน่ชัดนัก จากสมการของ Hagen-Poiseuille แสดงถึงการไหลที่เกิดขึ้นภายในรูพรุน การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปริมาณฟลักซ์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามมีรายงานพบว่า การแยกหางนมที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ปริมาณฟลักซ์จะลดลงเพราะความสามารถในการละลายของแคลเซียมฟอสเฟสต่ำลง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเกิน 30 องศาเซลเซียส ปริมาณฟลักซ์จะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยเสริม เช่น ความหนืดต่ำ และความสามารถในการเลือกผ่านสูงกว่า แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปโปรตีนนมจะเกิดการเสียสภาพ ทำให้เกิดการอุดตันบนเมมเบรน ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการกรองอยู่ ในช่วง 30 - 60 องศาเซลเซียส

9.2.3.2 อัตราการไหลและความปั่นป่วน : การเกิดแรงเฉือนสูงบนผิวหน้าเมมเบรนจะทำให้สารละลายไม่สามารถเกาะติดผิวหน้าเมมเบรนได้ ดังนั้นจึงลดความต้านทานเชิงกลของชั้น fouling ปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นจะไม่เกิดขึ้นถ้าดำเนินการโดยใช้ความดันสูงร่วมกับความเร็วสูงดังภาพที่ 1.12 สารละลายที่มีขนาดเล็กจะมีลักษณะการแพร่แบบบราวเนียนเมื่อดำเนินการโดยใช้แรงเฉือนต่ำ และการแพร่ผ่านแบบนี้ไม่ขึ้นอยู่กับแรงเฉือน แต่แปรผกผันกับขนาดรูพรุนของอนุภาค การแพร่แบบแรงเฉือนเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นกับสารละลายซึ่งมีอนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่ ความเร็วยกตัวเนื่องจากแรงเฉือนเหนี่ยวนำ (lift velocity; V_L) เป็นสัดส่วนกับ $\gamma.d_p^n$ เมื่อ n = 1.3 – 4 โดย γ คือ แรงเฉือน และ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค เมื่อเพิ่มความเร็วของสารป้อน อนุภาคขนาดใหญ่ของสารละลายจะถูกแรงเนื่องจากความเร็วทำให้ลอยตัวขึ้นจากผิวหน้าเมมเบรน ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะยังเกาะอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้เกิดการแบ่งเป็นชั้นของอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่ออกจากกัน ทำให้การอุดตันของเมมเบรนมีมากขึ้นโดยเป็นการอุดตันที่เกิดภายในรูพรุน ดังภาพประกอบ 1.13 จากการศึกษาการแยกหางนมพบว่า เมื่อดำเนินการที่ความดันต่ำและการเพิ่มความเร็วสารละลายป้อนจะเกิดแรงเฉือนขึ้นทำให้เกิดการสะสมบนผิวหน้าเมมเบรนน้อยที่สุด แต่เมื่อดำเนินการที่ความดันสูงจะทำให้อนุภาคของสารละลายเกาะติดผิวหน้าของเมมเบรนด้วยอัตราเร็วกว่าการที่อนุภาคของสารละลายที่หลุดออกเนื่องจากแรงเฉือนจากอัตราไหลที่สูงขึ้น ทำให้การเกิดการอุดตันมากยิ่งขึ้น ชั้นของสารที่อุดตันเพิ่มขึ้นเนื่องจาก



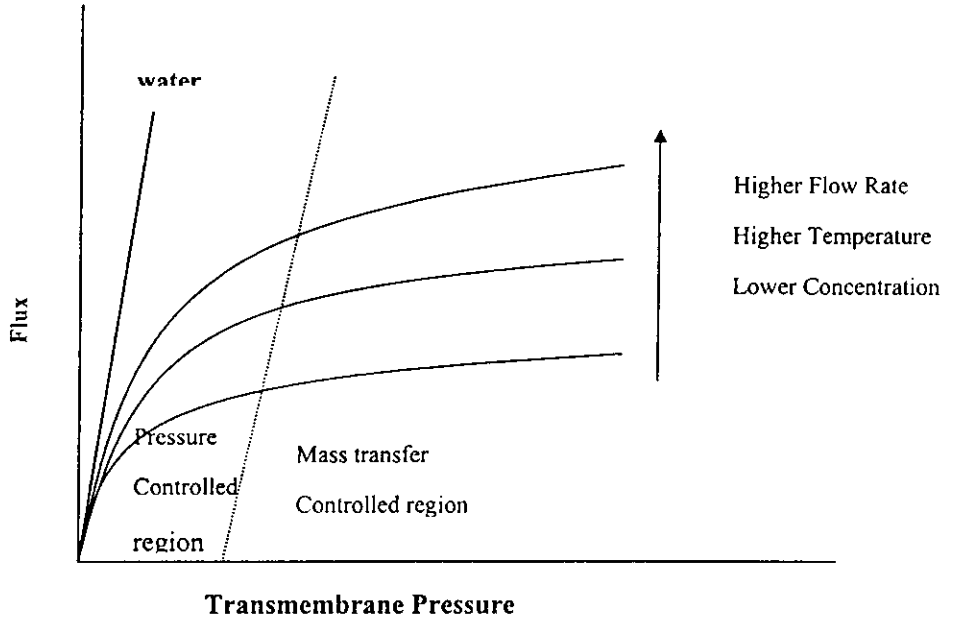
ภาพประกอบ 1.12 การเกิด Fouling ของการกรองหางนมด้วยเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน

ที่มา : Cheryan, 1998



ภาพประกอบ 1.13 การเกิด Fouling โดยอนุภาคขนาดต่างๆ

ที่มา : Cheryan, 1998



ภาพประกอบ 1.14 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์สภาวะการดำเนินการกับฟลักซ์
ที่มา : Cheryan, 1998

ความดันและความเร็วที่ใช้ ส่งผลให้เกิดการอุดตันมากขึ้นเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น

9.2.3.3 ความดัน : ผลของความดันในช่วงเริ่มต้นของการเกิดชั้นเจลบนผิวเมมเบรนจะเกิดเนื่องจากแรงขับดัน เมื่อเพิ่มความดันปริมาณฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ไม่แปรผันตรงสำหรับสารละลายโมเลกุลใหญ่ เมื่อเพิ่มความดันสูงขึ้นชั้นคอนเซนเตรชันโพราไรเซชันเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงขีดจำกัดความเข้มข้น ปริมาณฟลักซ์จะไม่ขึ้นอยู่กับความดันแต่ขึ้นอยู่กับการถ่ายเทมวล การเพิ่มความดันให้สูงขึ้นปริมาณฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ แต่เมื่อถึงจุดสมดุล ปริมาณฟลักซ์จะไม่เปลี่ยนแปลง ชั้นเจลที่เกิดขึ้นจะถูกอัดแน่นเนื่องจากความดันที่สูงขึ้น นั้นเมื่อเพิ่มความดันจนถึงจุดวิกฤตจะผลให้ส่งปริมาณฟลักซ์ต่ำ จากภาพประกอบ 1.14 เมื่อดำเนินการด้วยความดันต่ำ ความเข้มข้นสารป้อนต่ำและความเร็วสารป้อนสูง ผลของคอนเซนเตรชันโพราไรเซชันต่อฟลักซ์จะน้อยมาก ปริมาณฟลักซ์ขึ้นกับความดันที่ให้กับระบบ แต่เมื่อดำเนินการที่ความดันสูงปริมาณฟลักซ์จะไม่ขึ้นกับความดันที่ให้กับระบบ แต่จะขึ้นกับการถ่ายเทมวล

10. การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันได้ถูกนำมาประยุกต์ในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้เพื่อเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ โดยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันสามารถกรองโปรตีน ของแข็งแขวนลอย คอลลอยด์ สารประกอบโพลีฟีโนลิค แป้ง เพกทิน และจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำผลไม้ ส่วนใสที่ได้จากการกรองจะมีความคงตัวแม้ในช่วงการเก็บรักษาไว้รอการบริโภค ในยุคแรกของการนำเอากระบวนการเมมเบรนมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ เพื่อใช้แทนในขั้นตอนการจับตะกอนของสารช่วยตกตะกอน และขั้นตอนการพักเพื่อตกตะกอนสารแขวนลอย โดยเริ่มมีการใช้ตั้งแต่ ค.ศ.1970 และจากการสำรวจในช่วงปลาย ค.ศ.1970 นี้ พบว่าการนำเอากระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันมาใช้แทนขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการผลิตน้ำผลไม้ได้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก

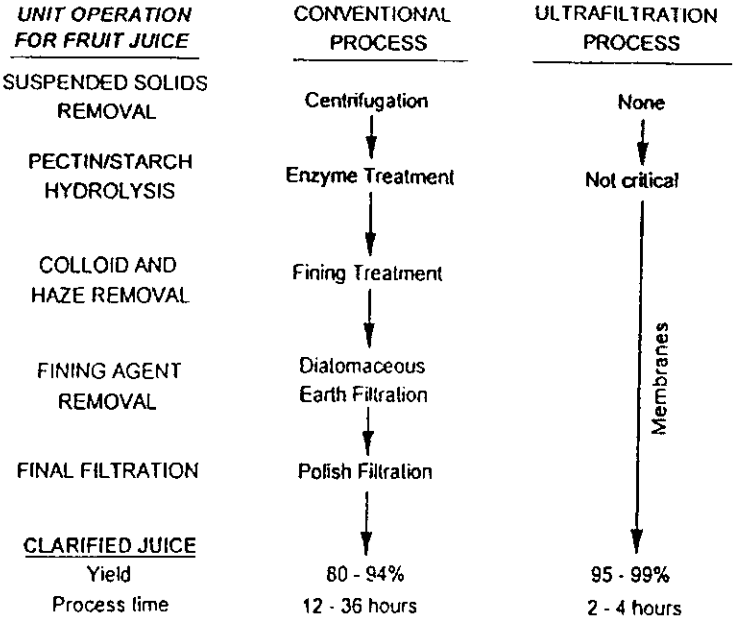
การนำเอาเมมเบรนมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปน้ำผลไม้ได้ 3 ลักษณะ คือ

1.) การทำให้ใส (Clarification) ได้แก่ ในผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้และเบียร์ที่ต้องการความใสโดยใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน สามารถแยกเส้นใยและสารโมเลกุลใหญ่ออกจากน้ำผลไม้

2.) การเพิ่มความเข้มข้น (Concentration) เนื่องจากสามารถเพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้ได้โดยที่ไม่ต้องเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งเป็นข้อดีคือไม่เกิดกลิ่นคาราเมลจากการไหม้ของน้ำตาล (Off-flavour) เหมือนการดำเนินการโดยระบบการระเหยน้ำโดยปกติทั่วไป และสีของน้ำผลไม้ไม่เปลี่ยนแปลง และได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการ

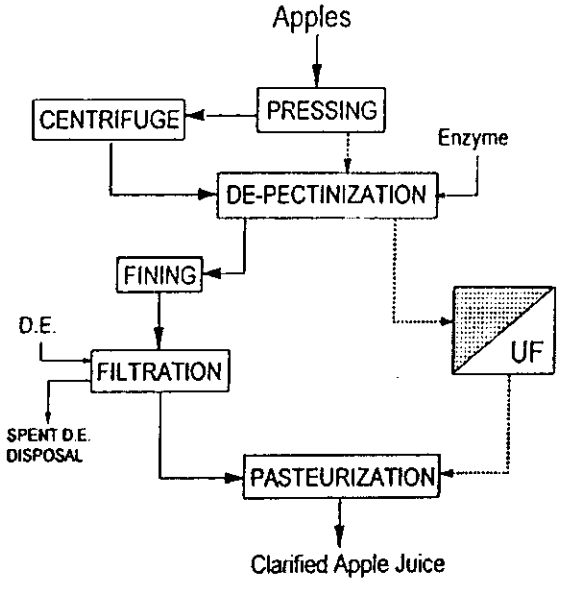
3.) การลดความเป็นกรด (Deacidification) เช่น การใช้กระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซีสและนาโนฟิลเตรชัน เพื่อลดความเป็นกรดในน้ำผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว เช่น น้ำส้มและน้ำมะนาว

นอกจากนี้จึงได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเบียร์และไวน์ต่าง ๆ ด้วย จากภาพประกอบ 1.15 เป็นการเปรียบเทียบกระบวนการทำน้ำผลไม้ให้ใสด้วยกระบวนการกรองแบบเดิมและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน และภาพประกอบ1.16 เป็นแผนผังแสดงกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิลด้วยกระบวนการกรองแบบเดิมและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน แสดงให้เห็นว่ากระบวนการกรองด้วยเมมเบรนนั้น สามารถใช้แทนขั้นตอนในกระบวนการผลิต



ภาพประกอบ 1.15 การเปรียบเทียบกระบวนการทำน้ำผลไม้ให้ใสด้วยกระบวนการกรองแบบเดิมและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ที่มา : Cheryan, 1998



ภาพประกอบ 1.16 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิลด้วยกระบวนการกรองแบบเดิมและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

ที่มา : Cheryan, 1998

น้ำผลไม้แบบเดิมได้หลายขั้นตอน ซึ่งการใช้วิธีการกรองด้วยเมมเบรนส่งผลให้

1.) สามารถลดขั้นตอนในการทำให้ใส การใช้สารช่วยตกตะกอนและการพักเพื่อการตกตะกอนรวมไว้ในขั้นตอนเดียวกัน ในกระบวนการกรองแบบเดิมต้องการสารช่วยจับตะกอน (เบนโทไนต์ และ เจลาติน เป็นต้น) เอนไซม์ (เอนไซม์เพคติเนส และ เอนไซม์อะไมเลส) การเหวี่ยงแยกและการกรองด้วยดินไดอะตอม (diatomaceous earth) ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวใช้เวลา 12 – 36 ชั่วโมง แต่การกรองด้วยกระบวนการเมมเบรน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะใสโดยใช้เวลาเพียง 2 – 4 ชั่วโมง

2.) ทำให้ได้ปริมาณของน้ำผลไม้เพิ่มขึ้น การกรองด้วยกระบวนการเมมเบรนจะมีปริมาณผลผลิตสุดท้ายร้อยละ 96 – 98 ซึ่งกระบวนการกรองแบบเดิมจะให้ปริมาณผลผลิตสุดท้ายร้อยละ 80 – 94 เท่านั้น ปริมาณน้ำผลไม้ที่เพิ่มขึ้นนี้เนื่องจากการลดขั้นตอนใช้ดินไดอะตอมและสารช่วยตกตะกอน ซึ่งสารเหล่านี้จะดูดซับเอาน้ำผลไม้ไว้ โรงงานที่มีกำลังผลิตน้ำผลไม้ 350,000 ลิตรต่อวัน การเพิ่มขึ้นของผลผลิตทุกร้อยละ 1 จะเพิ่มรายได้ 150,000 เหรียญสหรัฐต่อครั้งการผลิต

3.) ลดการใช้สารที่ใช้ในการกรองและเครื่องฟิลเตอร์เพรส เฉพาะขั้นตอนนี้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำผลไม้ได้ 10 – 25 เหรียญสหรัฐต่อแกลอนของน้ำผลไม้ที่ได้ เช่นเดียวกับการลดการใช้สารช่วยตกตะกอนและดินไดอะตอม

4.) คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น เนื่องจากกระบวนการเมมเบรนสามารถกำจัดสารประกอบที่ทำให้เกิดตะกอนลอยและฟอง (ของแข็งที่ละลายน้ำได้ อนุภาคคอลลอยด์ โปรตีน และโพลีฟีนอล) ในน้ำผลไม้ได้ดีกว่ากระบวนการกรองแบบเดิมคือ น้ำผลไม้มีความขุ่นน้อยกว่า 0.1 – 0.3 NTU ในขณะที่กระบวนการกรองแบบเดิมน้ำผลไม้จะมีความขุ่น 2 – 5 NTU น้ำผลไม้ที่ได้จะมีความใสปราศจากความขุ่นและตะกอน ซึ่งการกรองนี้นอกจากสามารถ กำจัดเพกทินและคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนแล้ว ยังสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของ แทนนินและโปรตีนได้ แต่อย่างไรก็ตามถ้าเมมเบรนมีขนาดรูพรุนมากกว่า MWCO 25,000 แทนนินจะสามารถผ่านเมมเบรนรวมอยู่ในเพอมิเอทได้ ส่งผลให้น้ำผลไม้ที่ได้มีลักษณะสีน้ำตาลและมีกลิ่นแรง ถ้าปริมาณแทนนินมากทำให้น้ำผลไม้ส่วนใสเกิดความขุ่นขึ้นมาในขณะที่เก็บรักษา การกรองด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กจะทำให้น้ำผลไม้มีลักษณะสีเหลืองทองอ่อนๆ เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase) ซึ่งเป็น

ตาราง 1.5 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตในการกำจัดรสขมในน้ำส้มโดยกระบวนการเมมเบรนและกระบวนการกรองแบบเดิม

	Conventional (Centrifuge + hydrophilic Absorbent)	Membrane (+Absorbent resin)
Electric power ($0.05/kWh)	9,000	19,000
Stream ($4/1000 kg)	3,000	2,000
Water ($1/$m^3$)	9,000	2,000
Chemicals	45,000	4,000
Labor ($12/hour)	5,000	5,000
Solids loss (pulp in column)	40,000	0
Solids loss (regeneration)	40,000	9,000
Absorbent ($40,000/$m^3$)	35,000	10,000
Membrane replacement	0	75,000
Total annual cost	$186,000	$126,000
Cost per ton of 68 °Brix Concentration	$34	$23

ที่มา : Cheryan, 1998

สาเหตุของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) จะสามารถถูกกักกันไว้ได้โดยเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน ดังนั้นน้ำผลไม้จะไม่มีความขุ่นเกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา น้ำแอปเปิลที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟนและโพลีเอมีน ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันจะสามารถกักกันสารประกอบของกลิ่นหอมเฉพาะตัวของแอปเปิลไว้ได้มาก ทำให้เกิดการสูญเสียกลิ่นหอมเฉพาะตัวมากกว่าเมื่อกรองด้วยเครื่องฟิลเตอร์เพรส

5.) สามารถลดการใช้เอนไซม์ โดยสามารถลดการใช้เอนไซม์เพคติเนส บางครั้งการใช้เอนไซม์เพื่อย่อยโมเลกุลใหญ่ ๆ (เพกทิน แป้ง) ให้เป็นโมเลกุลที่เล็กลงในน้ำผลไม้ก่อนการกรองจะช่วยลดการอุดตันของเมมเบรนและลดความหนืดของน้ำผลไม้ด้วย จากเหตุผลดัง

ตาราง 1.6 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของการทำน้ำแอปเปิลให้ใสด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและกระบวนการกรองแบบเดิม

		Annual cost ($/yr)	
Expense	Basis	Ultrafiltration	Conventional
Pectinase	$0.4/1000 L juice (UF)	20,000	80,000
	$0.4/1000 L juice (conv.)		
Gelatin	0.025 kg/1000 L juice	-	6,300
	$5/kg gelatin		
Diatomaceous earth	2 kg/1000 L juice	-	100,000
	$1/kg DE		
Membrane	$175/$m^2$/yr	31,300	-
Filter pads/support	(Blank and Eykamp, 1986)	-	25,000
Power (pumping)	$0.1/kW-hr	4,200	12,500
Cleaning chemicals	$25/$m^2$/yr	4,500	-
Labor	0.2 persons/ day (UF)	10,000	120,000
	2 persons/ day (conv.)		
Maintenace	(Blank and Eykamp, 1986)	2,400	5,000
Total		72,400	348,000

ที่มา : Zeman และ Zydney, 1996

กล่าวทำให้ได้ปริมาณฟลักซ์สูงขึ้น และใช้พลังงานในการปั๊มต่ำกว่าการไม่ใช้เอนไซม์ร่วมกับการกรองในขั้นตอนการทำน้ำผลไม้ให้ใส ยกตัวอย่าง น้ำแอปเปิลที่ไม่ใช้เอนไซม์ร่วมจะให้ปริมาณฟลักซ์ 35 ลิตร/เมตร^2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ส่วนที่ใช้เอนไซม์ร่วมจะให้ปริมาณฟลักซ์ 120 ลิตร/เมตร^2 ชั่วโมง โดยการกรองด้วยเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงของบริษัท Romicon ซึ่งการใช้เอนไซม์เพกทินเนสสามารถเติมในถังป้อนของหน่วยการกรองด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันได้เลย ซึ่งการเติมเอนไซม์ในขั้นตอนนี้จะมีการ

เวียนกลับของรีเทนเทท ดังนั้นปริมาณเอนไซม์ที่ใช้จึงน้อยกว่าปริมาณที่ใช้ในกระบวนการทำน้ำผลไม้ให้ใสแบบเดิมร้อยละ 50 – 75

6.) ลดขั้นตอนการฆ่าเชื้อ ในการใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กมาก ๆ จะสามารถกรองหรือกักเชื้อจุลินทรีย์ไว้ได้ และเป็นการลดพลังงานจากขั้นตอนการฆ่าเชื้อด้วยเพราะต้องใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงและผลจากการไม่ใช้อุณหภูมิสูงนี้เอง ส่งผลให้กลิ่นเฉพาะตัวของน้ำผลไม้ยังคงอยู่ และไม่เกิดกลิ่นไหม้ของน้ำตาลเกิดขึ้น

ผลการประยุกต์ใช้กระบวนการเมมเบรนนี้ทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น ดังตาราง 1.5 เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตในการกำจัดรสขมในน้ำส้ม โดยกระบวนการเมมเบรนและกระบวนการกรองแบบเดิม ซึ่งการใช้เมมเบรนจะมีต้นทุนต่ำกว่ากระบวนการกรองแบบเดิม ตาราง 1.6 เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของการทำน้ำแอปเปิลให้ใสด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและกระบวนการกรองแบบเดิม เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าต้นทุนการผลิตโดยใช้เมมเบรนจะต่ำกว่า 275,000 เหรียญสหรัฐต่อปี มีการใช้เอนไซม์เพคติเนสเพียงร้อยละ 25 ของกระบวนการการกรองแบบเดิม ไม่มีการใช้เจลลาตินและดินไดอะตอมในการกรองด้วยเมมเบรน นอกจากนี้ระยะเวลาในกระบวนการผลิตของทั้งสองแตกต่างกันมากโดยกระบวนการกรองแบบเดิมใช้เวลา 20 ชั่วโมง แต่กระบวนการเมมเบรนใช้เวลาเพียง 2 – 4 ชั่วโมงเท่านั้น (Zeman and Zydney, 1996)

พบว่ามีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในน้ำผักและผลไม้มาก ผลไม้ที่นิยมนำมาผลิตได้แก่ น้ำแอปเปิล แอปปริคอท แครอท เชอรี่ แคนเบอรี่ องุ่น กีวี มะนาว แตงไทย พลัม เสาวรส ส้ม ลูกพีช ลูกแพร์ สับปะรด ราสเบอรี่ สตอเบอรี่ และมะเขือเทศ ปริมาณ น้ำตาลและกรดอินทรีย์ถูกกักกันไว้ได้ร้อยละ 10 – 40 เมื่อดำเนินการที่สภาวะความดันสูง (12 บาร์) และอุณหภูมิต่ำ (20 องศาเซลเซียส) ซึ่งจะเกิด fouling แบบแผ่นไดนามิกส์ ทำให้ค่าการกักกันเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งความสามารถในการกักกันนี้ทำให้ความเข้มข้นในด้านรีเทนเททเพิ่มขึ้น สารที่ทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส น้ำตาล กรดซิตริก และเพกทิน

Yu และคณะ (1986) ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถในการกักสารประกอบในน้ำเสาวรสโดยใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งใช้เมมเบรนชนิดท่อ ขนาดรูพรุน MWCO 25,000 เมมเบรนชนิดนี้สามารถกักสารประกอบสำคัญของกลิ่นหอมเฉพาะตัวในน้ำเสาวรสได้ถึงร้อยละ 80 หรือมากกว่า ซึ่งความเป็นจริงขนาดของโมเลกุลของสารประกอบกลิ่นหอม

ระเหยดังกล่าวสามารถผ่านเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันได้ เพราะน้ำเสาวรสเป็นน้ำผลไม้ที่จัดว่าเข้มข้นตามธรรมชาติ ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นโมเลกุลซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำเสาวรส จะก่อให้เกิดการอุดตันที่ผิวหน้าเมมเบรน ทำให้สามารถกักโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ไว้ได้ สารประกอบกลิ่นหอมระเหยที่สามารถกักกันไว้ได้ เช่น เบต้า – ไอโอโนน (β-ionone) เอทิลเฮกซะโนเอท (ethyl hexanoate) เฮกซิลบิวทิวเรท (hexyl butyrate) และ เฮกซิลเฮกซะโนเอท (hexyl hexanoate) เมมเบรนชนิดนี้มีความสามารถในการกักน้ำตาล (เช่น ฟรุกโตส กลูโคส และซูโครส) และกรดอินทรีย์ (เช่น กรดซิตริก กรดมัลลิก และกรดแลกติค) ได้อยู่ระหว่างร้อยละ 10 - 40

Chiang และ Yu (1987) ได้ศึกษาการอุดตันและการเวียนกลับของฟลักซ์ในการกรองน้ำเสาวรสด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันพบว่า ตะกอนจากการกรองน้ำเสาวรสด้วยเมมเบรนชนิดท่อประกอบด้วย เพกทิน น้ำตาล กรดซิตริก เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส พฤติกรรมการไหลของตะกอนที่อุดตัน จะขึ้นอยู่กับการขึ้นรูปเป็นเจล จากภาพที่ถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแสดงชั้นของตะกอนที่อุดตันบนเมมเบรน การหยุดพักและการไหลเวียนกลับในการกรองด้วยอัลตราฟิลเตรชัน จะทำให้ประสิทธิภาพของฟลักซ์เพิ่มขึ้น การคืนกลับของชั้นเจลเกิดเนื่องจากความดันที่เป็นผลจากการเปิดปิดของฟลักซ์ที่ย้อนกลับ

Sheu และคณะ (1987) ศึกษาการเก็บเกี่ยวตัวถูกละลายและเอนไซม์ในการทำน้ำแอปเปิลให้ใสด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยเติมเอนไซม์ลงในน้ำแอปเปิลหลังกระบวนการบีบคั้น แล้วกรองด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันแบบแผ่น ขนาดรูพรุน MWCO 50,000 ดำเนินการที่ 50 องศาเซลเซียส และความดัน 5 บาร์ จะสามารถเก็บเกี่ยวของแข็งละลายได้ร้อยละ 99.6 และ ค่าความเป็นกรดร้อยละ 99.3 ในเพอมิเอทและรีเจคชัน มีปริมาณเพกทินอิสระร้อยละ 36.3 ซึ่งเพียงพอสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การทำความสะอาดเมมเบรนอย่างถูกต้องเหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณฟลักซ์สูง มีความจำเป็นต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการทำน้ำแอปเปิลให้ใส โดยการทำความสะอาดจะใช้อัลตราซิล (Ultrasil) ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้ผลดีกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ และช่วยลดการเหวี่ยงแยกหรือการกรองแบบสูญญากาศในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

Capannelli และคณะ (1994) ได้ทำการกรองน้ำส้มและน้ำมะนาวด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในระดับ Pilot plant scale โดยใช้เมมเบรนชนิดท่อทำจากโพลิเมอร์และ

เซรามิกส์ โดยน้ำส้มและน้ำมะนาวที่ใช้มีความเข้มข้นคงที่ พบว่าเพอมิเอทฟลักซ์จะขึ้นอยู่กับความเร็วของสารป้อนแต่ไม่ขึ้นกับแรงดันเฉลี่ยระหว่างเมมเบรนที่มากกว่า 0.2 ไมโครปาสคาล ทำการวัดผลในรูปตะกอนเพกทินของเนื้อส้มและมะนาวที่เกาะติดบนเมมเบรน ซึ่งเป็นตัวบอกถึงประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เมมเบรนชนิดเซรามิกส์และโพลีเมอริก มีลักษณะโครงสร้างของผิวหน้าซึ่งเกิดความขรุขระเนื่องจากการเกาะติดของตะกอนเพกทินแตกต่างกัน เมมเบรนชนิดเซรามิกส์จะให้เพอมิเอทฟลักซ์สูงกว่าเมมเบรนโพลีเมอริก จากผลดังกล่าวข้างต้นและพฤติกรรมของท่อแบบเรียบจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการนำเมมเบรนชนิดเซรามิกส์ไปใช้ในระดับโรงงาน เนื่องจากมีความเป็นไปได้ของประสิทธิภาพทางด้านพลังงาน (Energy efficiency) มากกว่าเมมเบรนชนิดโพลีเมอริก

Gökman และคณะ (1998) ปรับปรุงกระบวนการกรองด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเพื่อลดสีและความคงตัวในน้ำแอปเปิล ปัจจัยที่ใช้ในการเลือกกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยเมมเบรนชนิดโพลีอีเทอร์ซัลโฟน (polyethersulfone) และ โพลีไวนิลไพโรดิโดน (polyvinyl pyrodidone) คือ โพลีฟีนอล (polyphenol) เป็นตัวบอกลักษณะความขุ่นและการเกิดสีน้ำตาลใน น้ำแอปเปิลที่ทำให้ใสและน้ำแอปเปิลเข้มข้นในขณะที่เก็บ ผลการเก็บรักษาจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันโดยใช้เมมเบรนชนิดเซลลูโลสอะซีเตท (cellulose acetate) ทำการทดลองโดยการใช้ แลคเคส (laccase) ในการกำจัดโพลีฟีนอลและสีในน้ำแอปเปิลได้ทำการทดสอบโดยเมมเบรนทั่วไป จะมีผลต่อการลดปริมาณโพลีฟีนอลและมีรายงานว่าสามารถลดสีของน้ำแอปเปิลได้ ผลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความคงตัวในด้านของสีและความใสขณะที่เก็บไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 6 สัปดาห์ การเติมแลคเคสจะเพิ่มเปอร์เซ็นต์การกำจัดโพลีฟีนอลออกจากน้ำแอปเปิล อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วย แลคเคสในตัวอย่างประสบความสำเร็จในการคงตัวของสีและความขุ่นในระหว่างการเก็บ

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการกรองด้วยกระบวนการเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน
2. เพื่อนำเทคโนโลยีเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันมาประยุกต์ใช้กับน้ำฝรั่ง
3. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกอนในน้ำฝรั่งโดยการกรองด้วยเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน ซึ่งได้แก่ ความดัน และอัตราการไหล
4. เพื่อศึกษาความต้านทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการกรองด้วยเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงกระบวนการกำจัดตะกอนในน้ำฝรั่งด้วยกระบวนการเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน
2. ทราบประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการกำจัดตะกอนในน้ำฝรั่งด้วยกระบวนการเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้
4. สามารถนำเอาข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาที่จะเกิดขึ้นต่อไป
5. นำไปเป็นแนวทางที่จะศึกษาพัฒนาในขั้นต่อไป