บทที่ 1

บทนำ

เยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane) เป็นเยื่อแผ่นสังเคราะห์ (synthetic membrane) ประเภทหนึ่งที่รู้จักแพร่หลายมากว่าครึ่งศตวรรษว่าใช้สำหรับแยกสารหรือสกัดสารที่มีความเข้มข้นต่ำๆ และละลายอยู่ในสารละลายซึ่งอาจมีฤทธิ์เป็นกรดหรือเป็นเบส การทำงานของเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วยสารละลาย 3 วัฏภาคที่ไม่ละลายหรือผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ได้แก่ วัฏภาคสารละลายป้อน (feed phase) ซึ่งมีไอออนหรือสารที่ต้องการแยกละลายอยู่ วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane phase) และวัฏภาคสารละลายนำกลับ (strip phase) โดยทั่วไประบบเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่ต้องมีตัวรองรับหรือตัวพยุง เช่น เยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน (emulsion liquid membrane, ELM) และเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับหรือตัวพยุง (supported liquid membrane, SLM) เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับมีหลายชนิด ตัวอย่างเช่น เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบแผ่น (flat supported liquid membrane) เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบขดเป็นแผ่นม้วนหรือขดเป็นก้นหอย (spiral supported liquid membrane) และเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane, HFSLM) เป็นต้น การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงจัดเป็นศาสตร์ทางวิศวกรรมเคมีที่ต้องใช้สหศาสตร์ (multidisciplinary) HFSLM เป็นระบบที่ให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงเนื่องจากมีการแพร่ซึม (permeation) จากวัฏภาคหนึ่งไปอีกวัฏภาคหนึ่งอย่างรวดเร็ว และยังใช้ปริมาณสารสกัดและตัวทำละลายที่บรรจุอยู่ในรูพรุนจุลภาค (microporous) ของผนังท่อของมอดูลเส้นใยกลวงน้อยมากเมื่อเทียบกับวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับ นอกจากนี้การถ่ายเทมวลในปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับสามารถเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในขั้นตอนเดียว (simultaneous operation)

ผู้เขียนได้อธิบายลักษณะและการทำงานของระบบเยื่อแผ่นเหลว กลไกการถ่ายเทมวล การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงซึ่งจะอธิบายไว้ในรูปแบบของกรณีศึกษา ในบทที่ 2-4 จากประสบการณ์การทำงานวิจัยในการสกัดไอออนโลหะทั้งจากน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม น้ำจากหลุมขุดเจาะน้ำมันดิบหรือแก๊สธรรมชาติที่ต้องบำบัดหรือควบคุมไอออนโลหะที่มีให้อยู่ในปริมาณตามกฎหมายกำหนด เป็นที่ทราบดีว่า "ปฏิกิริยาการสกัด" ในระบบเยื่อแผ่นเหลวเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อน และวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว เป็นปฏิกิริยาระหว่างไอออนของโลหะที่ต้องการสกัดกับสารสกัดที่ละลายอยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และได้สารประกอบเชิงซ้อนแพร่ซึมอยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ส่วน "ปฏิกิริยาการนำกลับ" จะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

และวัฏภาคสารละลายนำกลับ สารประกอบเชิงซ้อนที่แพร่ซึมออกจากวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับและปลดปล่อยไอออนโลหะที่อยู่ในสารประกอบเชิงซ้อนไปสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับ อย่างไรก็ตามกว่าจะทราบปริมาณของไอออนโลหะที่ถูกสกัดออกมาได้จะต้องใช้เวลาพอสมควร เพราะต้องเตรียมสารละลายต่างๆ สารสกัด และใช้เวลาในการสกัดและการกำจัดหรือนำกลับไอออนโลหะ ประเด็นสำคัญของหนังสือเล่มนี้คือเสนอวิธีการใช้กราฟทำนายผลเพื่อวิเคราะห์จำนวนขั้นตอนของการสกัดปริมาณของไอออนโลหะที่จะสกัดได้เบื้องต้น และเวลาที่ต้องใช้โดยยังไม่ต้องทำการทดลองสกัดและนำกลับในห้องปฏิบัติการ จึงถือเป็นเครื่องมือที่จะช่วยให้สามารถจัดการและวางแผนคัดเลือกชนิดของสารสกัดและตัวทำละลายที่เหมาะสมกับไอออนโลหะที่ต้องการสกัดทั้งเชิงเทคนิคคือความสามารถในการสกัด และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ในหนังสือเล่มนี้จะนำเสนอการคำนวณด้วยมอดูลต่างๆ อาทิเช่น การคำนวณเพื่อนำไปสู่ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัด การนำกลับ จากมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวพยุงเป็นแผ่นราบ และจากมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง รวมทั้งวิธีเฉพาะในการใช้กราฟทำนายผลซึ่งอาจดูธรรมดาในยุคที่มีโปรแกรมการจำลองกระบวนการโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ แต่ข้อเด่นของการใช้กราฟนี้คือสามารถคำนวณได้อย่างง่าย สะดวก และรวดเร็ว โดยไม่จำเป็นต้องเขียนหรือซื้อโปรแกรมคำนวณที่ยุ่งยาก และผลที่ได้มีความแม่นยำเชื่อถือได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลของการสกัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

นอกเหนือจากการคำนวณโดยอาศัยมอดูลต่างๆ ดังที่กล่าวไว้แล้ว กล่าวคือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้มอดูลประเภทเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวพยุงชนิดราบ มีคณะนักวิจัยจากประเทศจีนซึ่งมี Huang เป็นหัวหน้าคณะแต่ในกรณีที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงได้นำเสนอโดย Pancharoen และคณะจากประเทศไทย ด้วยเหตุที่หนังสือเล่มนี้ได้ปรับปรุงและพัฒนาจากหนังสือ "กราฟทำนายผลการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง" และนำเสนอใหม่ในชื่อ "การสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง" ก็ตาม จึงยังต้องรวมเนื้อหาของการสร้างกราฟเข้าไปด้วย การสร้างกราฟเพื่อทำนายผลการสกัดโดยอิงหลักการพื้นฐานของ McCabe-Thiele ซึ่งอาศัยเส้นสมดุล (equilibrium line) เส้นปฏิบัติการ (operating line) เส้นโยงหรือเส้นเชื่อม (tie line) ทั้งนี้ Grevillot และคณะซึ่งเป็นกลุ่มนักวิจัยจากประเทศฝรั่งเศส พร้อมกันกับที่กลุ่มนักวิจัยซึ่งประกอบด้วย Chen และคณะจากประเทศสหรัฐอเมริกา ได้นำวิธีการสร้างกราฟลักษณะนี้ไปใช้อธิบายสมดุลในระบบ parametric pumping และทำนายผลของการแยกโปรตีนด้วยวิธีการ pH-parametric pumping สำหรับกลุ่มนักวิจัยจาก "ห้องปฏิบัติการวิจัยแยกมวลสาร (Separation Technology)" ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งทำการศึกษาวิจัยการสกัดไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำสังเคราะห์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำจากหลุมขุดเจาะน้ำมันดิบหรือแก๊สธรรมชาติ ฯลฯ ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงอย่างต่อเนื่องมากว่า 15 ปี ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ

สร้างกราฟอย่างง่ายเพื่อทำนายผลการสกัดไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงบนพื้นฐานของทฤษฎีสมดุล รายละเอียดของวิธีการสร้างกราฟ ใช้กราฟอธิบายไว้ในบทที่ 6 วิธีการของกราฟทำนายผลการสกัดที่นำเสนอนี้จะอาศัยหลักการเบื้องต้นตามวิธีของ McCabe-Thiele ซึ่งใช้ทำนายผลของการแยกสารจากระบบการกลั่น (distillation system) และระบบการแยกสกัด (extraction system) มีความแตกต่างที่เห็นได้ดังนี้

1. ระบบที่ใช้ในวิธีการของ McCabe-Thiele มีเพียง 2 วัฏภาค ที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน คือ วัฏภาคที่เป็นของเหลว และวัฏภาคที่เป็นไอ แต่ในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงประกอบด้วย 3 วัฏภาค ที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน คือ วัฏภาคสารละลายป้อน วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และวัฏภาคสารละลายนำกลับ

2. จำนวนเส้นสมดุลที่ใช้ในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงมีอย่างน้อย 2 เส้น (จะใช้มากกว่า 2 เส้น ในกรณีของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์) ขณะที่วิธีการของ McCabe-Thiele มีเส้นสมดุลที่ใช้ในระบบเพียง 1 เส้น เท่านั้น

3. เส้นสมดุลที่ใช้ในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงจะเป็นเส้นตรงเท่านั้น เพราะการสกัดแยกไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงมีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดเมื่อสกัดไอออนโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำระดับ ppm ถึงต่ำมากระดับ ppb หรือ ppt ส่วนเส้นสมดุลที่ใช้ตาม McCabe-Thiele จะเป็นเส้นโค้ง ซึ่งเรียกว่า เส้นโค้งสมดุล (equilibrium curve)

4. ทุกจุดสัมผัสบนเส้นสมดุลของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง หมายถึง ค่าการสกัดชั่วคราว (transient value) และจุดสุดท้ายจึงเป็นค่าของการสกัดที่ภาวะคงตัว (steady state value) ขณะที่วิธีการของ McCabe-Thiele มีแต่ค่าของการสกัดที่ภาวะคงตัว

5. วิธีการนับจำนวนชั้น จำนวนคอลัมน์ หรือจำนวนมอดูลที่ใช้ของระบบการสกัดผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงแตกต่างกับระบบการกลั่นด้วยวิธีการของ McCabe-Thiele

6. วิธีการนับจำนวนคอลัมน์ หรือจำนวนมอดูลที่ใช้ของระบบการสกัดผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงแตกต่างกับวิธีการนับจำนวนชั้นของระบบการกลั่นด้วยวิธีการของ McCabe-Thiele

ในบทนี้เพื่อให้ผู้อ่านมีความเข้าใจเกี่ยวกับเยื่อแผ่นสังเคราะห์และกระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ต่างๆ ผู้เขียนได้อาศัยข้อมูลและสรุปความจากตำราซึ่งเขียนโดย ศาสตราจารย์ ดร.รัตนา จิระรัตนานนท์ และ Baker ทั้งนี้จะกล่าวพอเป็นสังเขปเพราะรายละเอียดยังสามารถหาได้จากหนังสือและตำราต่างๆ

1.1 เยื่อแผ่นสังเคราะห์ (Synthetic membrane)

ลักษณะของเยื่อแผ่นสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต มี 2 แบบ คือ "เยื่อแผ่นแบบมีรูพรุน" และแบบที่ไม่มีรูพรุน หรือที่เรียก "เยื่อแผ่นแบบแน่น" การผลิตและการเลือกวัสดุที่ใช้ผลิตเยื่อแผ่นสังเคราะห์ต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการนำเยื่อแผ่นสังเคราะห์ไปใช้เป็นหลัก โดยทั่วไปวัสดุที่นำมาใช้ผลิตเยื่อแผ่นสังเคราะห์แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือ สารอินทรีย์ประเภทวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งมีทั้งพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ (hydrophilic polymer) และพอลิเมอร์ชนิดไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymer) ส่วนกลุ่มที่สองคือ สารอนินทรีย์ซึ่งมีทั้งโลหะและอโลหะ สำหรับเส้นใยกลวงสามารถผลิตได้จากวัสดุพอลิเมอร์เท่านั้น

กลุ่มวัสดุพอลิเมอร์ ควรมีสมบัติกายภาพดังต่อไปนี้

1. ความต้านแรงดึง (tensile strength)
2. สมบัติด้านความยืดหยุ่น (elastic property)
3. ความสามารถในการโค้งงอ (flexibility)
4. ความสะดวกต่อการตัดแต่ง (ease of cutting)
5. การคงสภาพและความทนต่อแรงดันแตกระเบิด (integrity and bursting pressure)
6. ความสามารถในการเกิดอันตรกิริยากับตัวพยุง (interaction with support)
7. ความสามารถยึดติดได้ตามต้องการ (sealing requirement)
8. ความต้านทานต่อการสึกกร่อนและต่อการฉีกขาด (resistance to wear and tear)

ตัวอย่างวัสดุพอลิเมอร์ที่น่าสนใจมีดังนี้

1. Polysulfone (PSO)
2. Polyacrylonitrile (PAN)
3. Cellulose acetate (CA) และ Cellulose triacetate (CTA)
4. Polyvinylidenefluoride (PVDF)
5. Polyethersulfone (PES)
6. Polycarbonate (PC)
7. Polypropylene (PP)
8. Polyethylene (PE)
9. Polystyrene (PS)
10. Nylon 6

11. Polyurethane (PU)

12. Polyamide

เยื่อแผ่นพอลิเมอร์ที่ผลิตได้ มีราคาถูก น้ำหนักเบา สามารถทำให้โค้งงอ (flexible) และง่ายต่อการขึ้นรูป ทนต่อสารเคมีและความร้อน

กลุ่มวัสดุอนินทรีย์ ถูกนำมาใช้ผลิตเยื่อแผ่นเพื่อทดแทนและชดเชยข้อจำกัดของเยื่อแผ่นที่ใช้วัสดุพอลิเมอร์ เพราะสามารถทนฤทธิ์ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ทนต่อสารเคมีได้หลากหลายกว่า ทนเชื้อจุลินทรีย์ ทนต่อความดันและความร้อนสูง และมีอายุการใช้งานนาน เยื่อแผ่นที่ผลิตจากวัสดุอนินทรีย์นี้มีรูพรุนค่อนข้างใหญ่ทำให้การใช้งานค่อนข้างจำกัด แต่ต่อมาได้มีการปรับปรุงโดยการผลิตชั้นรองรับเสริมเข้าไปเพื่อช่วยให้นำไปใช้งานได้ดีและกว้างขวางมากขึ้น เยื่อแผ่นในกลุ่มที่ผลิตจากเซรามิกเหมาะที่จะใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เพราะมีทั้งปฏิกิริยาเคมีและพลังงานความร้อน โดยทั่วไปมักอาศัยรูพรุนของเยื่อแผ่นเซรามิกพยุงตัวเร่งปฏิกิริยาขณะเกิดปฏิกิริยาในวัฏภาคของแก๊ส

ตัวอย่างวัสดุอนินทรีย์ที่น่าสนใจมีดังนี้

1. เซรามิก
2. แก้ว
3. เหล็กกล้าไม่เป็นสนิม (Stainless steel)
4. Derivatized carbon
5. Zirconium oxide (ZrO_3)
6. Aluminium oxide (Al_2O_3)
7. Titanium oxide (TiO_2)

เยื่อแผ่นอนินทรีย์ที่ผลิตได้

1. ทนต่อความดันที่สูงได้
2. โดยทั่วไปมีอายุการใช้งานนาน แต่เยื่อแผ่นเซรามิกหรือเยื่อแผ่นแก้วจะเปราะหรือแตกง่าย
3. ทนต่อสารเคมีได้อย่างดีและหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นกรด เบส หรือสารละลายเคมีต่างๆ
4. ง่ายต่อการทำความสะอาดโดยใช้ความร้อนฆ่าเชื้อจุลินทรีย์

ตัวอย่างของขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของสารที่มักพบในกระบวนการแยกสารแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขนาดและน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณของอนุภาคและโมเลกุลบางชนิด

อนุภาค/โมเลกุล	ขนาด (นาโนเมตร)
ยีสต์ รา	1,000-10,000
แบคทีเรีย	300-10,000
อิมัลชันน้ำมัน	100-10,000
คอลลอยด์	100-1,000
ไวรัส	30-300
โปรตีน/พอลิเซคคาไรด์ (MW 10^4-10^6)	2-10
เอนไซม์ (MW 10^4-10^5)	2-5
สารปฏิชีวนะ (MW 300-1,000)	0.6-1.2
สารอินทรีย์ (MW 30-500)	0.3-0.8
ไอออนอินทรีย์ (MW10-100)	0.2-0.4
น้ำ (MW18)	0.2

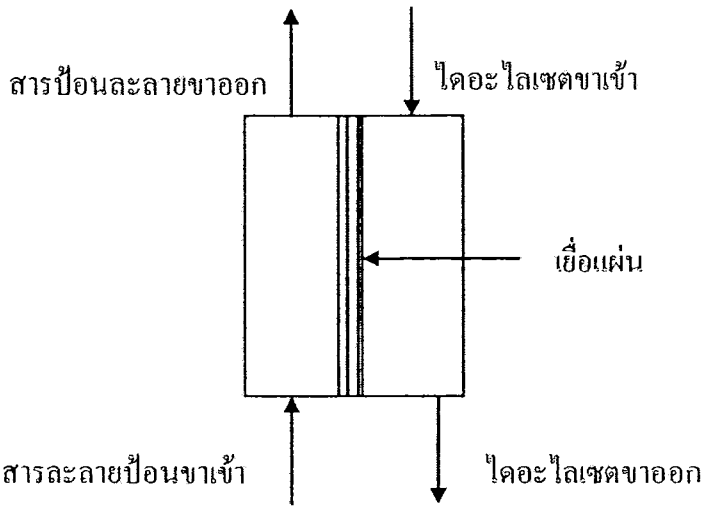
หมายเหตุ : 1 นาโนเมตร = 10 อังสตรอม, 1,000 นาโนเมตร = 1 ไมโครเมตร

1.2 กระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์

กระบวนการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์มีกลไกการถ่ายเทมวลสารที่แตกต่างกัน จึงเหมาะในการนำไปใช้ประโยชน์ที่ต่างกัน ดังตัวอย่างต่างๆ ต่อไปนี้

1.2.1 กระบวนการไดอะไลซิส (Dialysis process)

กระบวนการไดอะไลซิสเป็นกระบวนการที่แยกตัวถูกละลายขนาดเล็กออกจากสารละลายโดยใช้เยื่อแผ่นและมีผลต่างของความเข้มข้นเป็นแรงขับดัน สารละลายเจือจาง หรือน้ำ หรือเรียกว่าไดอะไลเซต (dialysate) จะทำหน้าที่เป็นสารรองรับตัวถูกละลายที่ผ่านออกมาจากเยื่อแผ่น การทำงานของกระบวนการไดอะไลซิสนี้ต้องควบคุมความเข้มข้นทางด้านไดอะไลเซตให้ต่ำอยู่เสมอ เพื่อรักษาระดับของแรงขับดันด้วยการเปลี่ยนสารไดอะไลเซตใหม่สำหรับระบบแบบกะ หรือทำเป็นระบบต่อเนื่องโดยป้อนไดอะไลเซตทางเดียว หรือสวนทางกับสารละลายป้อนที่มีตัวถูกละลาย ทั้งนี้ตัวถูกละลายแต่ละชนิดจะแยกออกจากกันโดยอาศัยความแตกต่างของการละลายและอัตราการแพร่ในเยื่อแผ่น กล่าวคือ อัตราการแพร่ของสารโมเลกุลเล็กจะแพร่ผ่านได้เร็วกว่าสารโมเลกุลใหญ่ รูปที่ 1.1 แสดงการทำงานของกระบวนการไดอะไลซิส



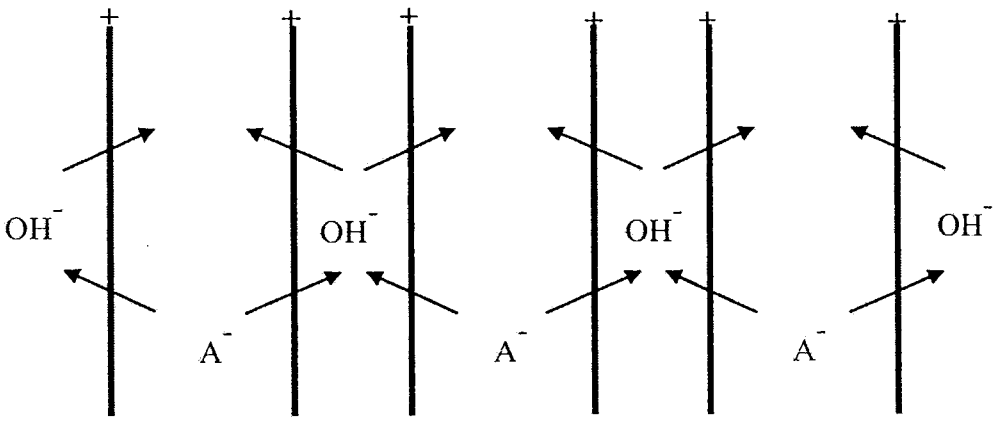
รูปที่ 1.1 การทำงานของกระบวนการไดอะไลซิส

เยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการไดอะไลซิสส่วนใหญ่เป็นเยื่อแผ่นสมมาตร (symmetric membrane) ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ เช่น เซลลูโลส พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ หรือผลิตจากพอลิเมอร์ชนิดไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิคาร์บอเนต ขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 15-100 อังสตรอม และความหนาจะอยู่ระหว่าง 10-100 ไมโครเมตร

การประยุกต์ใช้กระบวนการไดอะไลซิสยังไม่ค่อยแพร่หลาย เพราะข้อจำกัดที่อาศัยผลต่างของความเข้มข้นเป็นแรงขับดัน ทำให้กระบวนการแยกสารค่อนข้างช้า อุปกรณ์ไดอะไลซิสหรือไดอะไลเซอร์มีลักษณะเป็นแบบถัง แบบแผ่น แบบท่อ หรือแบบเส้นใยกลวง มีใช้สำหรับอุตสาหกรรมและการแพทย์ ไดอะไลเซอร์สำหรับอุตสาหกรรมจะมีขนาดใหญ่และคำนึงถึงความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์เป็นสำคัญ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ใช้ลดปริมาณของแอลกอฮอล์ในเบียร์ การแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ส่วนไดอะไลเซอร์สำหรับการแพทย์เป็นการใช้งานครั้งเดียวและต้องคำนึงถึงภาวะของคนไข้เป็นสำคัญ ไดอะไลเซอร์ชนิดนี้พัฒนาจากไดอะไลเซอร์แบบ rotating drum เพื่อใช้เป็นไตเทียม (artificial kidney) สำหรับผู้ป่วยโรคไตวายโดยเยื่อแผ่นไดอะไลซิสจะทำหน้าที่แยกยูเรีย ฟอสเฟต และคลอไรด์ ออกจากเลือด และได้พัฒนาต่อเป็นแบบขด (coil dialyzer) ในที่สุดจึงผลิตเป็นแบบเส้นใยกลวงเพื่อใช้เป็นไตเทียมอย่างกว้างขวางและเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

กระบวนการที่กล่าวมาเรียกได้ว่าเป็นกระบวนการไดอะไลซิสแบบธรรมดา เพราะเป็นการแพร่ของตัวถูกละลายที่เป็นกลาง แต่ในการแยกตัวถูกละลายที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะใช้เยื่อแผ่นที่มีประจุ ดังนั้นในกระบวนการแยกจะมีผลต่างของความเข้มข้นและผลของประจุเกี่ยวข้อง เรียกกระบวนการไดอะไลซิสแบบนี้ว่า "ดอนแนนไดอะไลซิส (donnan dialysis)" โดยเยื่อแผ่น

ที่แลกเปลี่ยนไอออนบวก จะให้ประจุลบอยู่กับที่ และมีประจุบวกเคลื่อนที่ได้ จึงยอมให้ไอออนบวกผ่านได้ ส่วนเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลบจะให้ประจุบวกอยู่กับที่ และมีประจุลบเคลื่อนที่ได้ จึงยอมให้ไอออนลบผ่านได้ รูปที่ 1.2 แสดงเยื่อแผ่นที่แลกเปลี่ยนไอออนลบ ซึ่งยอมให้ OH^- กับ A^- ผ่านได้



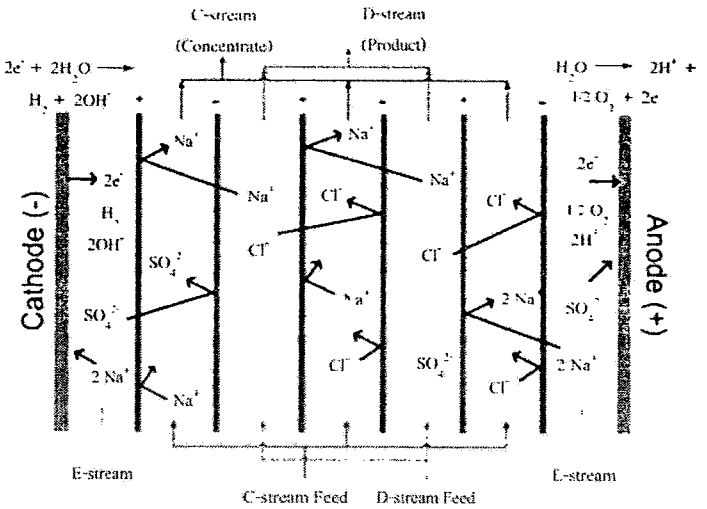
รูปที่ 1.2 เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลบ

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ดอนแนนไดอะไลซิส เช่น การแยกกลับคืนกรดจากอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะและการแยกกลับคืนเบสจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น

1.2.2 กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis process)

อิเล็กโทรไดอะไลซิสเป็นกระบวนการแยกทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้เยื่อแผ่นที่มีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange membrane) และมีความต่างศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่อยู่สองด้านของเยื่อแผ่นเป็นแรงขับดันในการแยกไอออนออกจากสารละลาย ตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการคือปริมาณไอออนที่สามารถถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นได้ซึ่งจะมีค่าแปรผันโดยตรงกับกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องคำนวณกระแสที่ต้องใช้สำหรับการแยกไอออนในกระบวนการ เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนประกอบด้วยสายโซ่ของพอลิเมอร์มาเชื่อมกันและมีน้ำอยู่ในโครงสร้าง แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามสมบัติของการเลือกผ่านไอออน ได้แก่ เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange membrane) และเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลบ (anion exchange membrane) ด้วยสมบัติที่คล้ายคลึงกับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจึงอาจกล่าวได้ว่า เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนก็คือ, เรซินที่เป็นแผ่นซึ่งมีการเสริมด้วยวัสดุเพื่อให้เกิดความแข็งแรงและมีความคงตัวสูงกว่า

กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิสประกอบด้วยเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบวก และเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลบ ต่ออนุกรมสลับกันอยู่ระหว่างขั้วบวก (cathode) กับขั้วลบ (anode) ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบวกไปสู่ขั้วลบ และจะถูกกักไว้ด้วยเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลบ ซึ่งจะมีลักษณะทำนองเดียวกันกับการที่ไอออนลบเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก และจะถูกกักไว้ด้วยเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบวก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ได้สารละลายสองกระแส คือสารละลายเข้มข้นที่มีปริมาณไอออนมากอยู่ระหว่างเยื่อแผ่นสลับช่องกับสารละลายเจือจางที่ไอออนถูกแยกออกไป ลักษณะทั่วไปของกระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิสแสดงรายละเอียดในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ลักษณะทั่วไปของกระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส

สมบัติที่สำคัญของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

1. ความแข็งแรงทนทานต่อแรงกระทำ ไม่เปลี่ยนรูประหว่างการใช้งาน และทนต่อสารเคมี เพราะต้องใช้งานกับสารละลายที่เป็นกรด-เบส

2. ปริมาณน้ำในเยื่อแผ่น (gel water content) เป็นสมบัติของเยื่อแผ่นที่มีผลกระทบต่อการเลือกผ่านและความต้านทานไฟฟ้า ปริมาณน้ำและการพองตัวขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพอลิเมอร์ที่ประกอบเป็นเยื่อแผ่น ความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง ความจุของการแลกเปลี่ยนไอออน ตลอดจนความเป็นเนื้อเดียวกันของเยื่อแผ่น

3. ความจุของการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchanger capacity) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมสมมูลของไอออนอยู่กับที่ต่อน้ำหนักแห้ง (กรัม) ของเยื่อแผ่น

4. สภาพการเลือกผ่าน (perm selectivity) ของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของเยื่อแผ่นในการถ่ายเทประจุของเคาน์เตอร์ไอออนตัวหนึ่งๆ เทียบกับปริมาณไอออนทั้งหมดที่ถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่น

5. ความต้านทานไฟฟ้าของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปริมาณการใช้ไฟฟ้าของกระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส มีหน่วยเป็น โอห์ม-เซนติเมตร (ความต้านทานจำเพาะ) แต่ในการใช้งานนิยมใช้หน่วยความต้านทานอ้างอิงกับพื้นที่ของเยื่อแผ่น คือ โอห์ม-ตารางเซนติเมตร เยื่อแผ่นที่ดีควรมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ความต้านทานไฟฟ้าของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2-10 โอห์ม-ตารางเซนติเมตร

อุปกรณ์อิเล็กโทรไดอะไลซิสอาจประกอบด้วยชุดคู่เซลล์หลายๆ ชุดต่อเรียงกันแบบขนานหรืออนุกรม โดยที่แต่ละคู่ของเยื่อแผ่นต่างก็ถูกกั้นด้วย spacer ซึ่งก็คือแผ่นตะแกรงพลาสติกที่ควบคุมการไหลและช่วยให้เกิดการปั่นป่วน (turbulence) นอกจากนี้จะมีปะเก็นซึ่งประกอบขึ้นคล้ายกับที่ใช้ในเครื่องกรองแบบเพลตและเฟรม (plate and frame) อุปกรณ์อิเล็กโทรไดอะไลซิสแบ่งออกเป็นแบบกะและแบบต่อเนื่อง ซึ่งแบบต่อเนื่องนิยมใช้มากกว่าและยังแบ่งย่อยออกเป็นแบบหลายชุดคู่เซลล์ (multiple stacks) แบบวนภายในชุดคู่เซลล์ (internally stacks) แบบป้อนและปล่อยออก (feed and bleed)

การประยุกต์ใช้งานอิเล็กโทรไดอะไลซิส

1. การแยกเกลือออกจากน้ำกร่อยเพื่อผลิตเป็นน้ำดื่ม ถ้าใช้กับน้ำทะเลต้องใช้พลังงานไฟฟ้าสูง

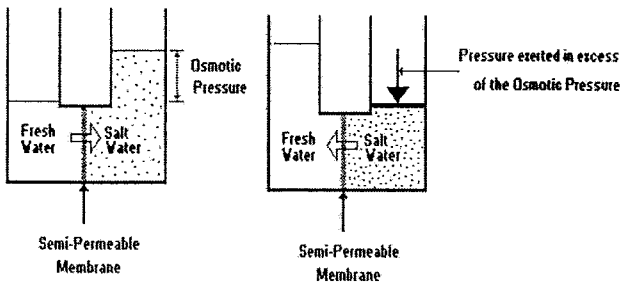
2. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้การแยกไอออนโลหะออกจากน้ำทิ้ง ซึ่งมีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีออสโมซิสผันกลับ กล่าวคือ สามารถทนต่อความร้อนได้สูงกว่า จึงสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ดี แต่มีข้อจำกัดคือแยกได้เฉพาะไอออนจึงทำให้มีสารโมเลกุลเล็กเหลือค้างอยู่

3. อุตสาหกรรมเคมี อาหารและยา การประยุกต์ใช้หลายอย่างมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ เช่น การแยกเกลือออกจากหางนมซึ่งเป็นโปรตีนที่ยังมีคุณภาพสูงแต่ก็มีปริมาณของเกลือที่สูงมาก

การใช้งานด้านอื่นๆ เช่น การทำกลีเซอรีนให้บริสุทธิ์ (glycerin purification) การผลิตน้ำเพื่อใช้ในด้านเกษตรกรรม เช่น ใช้ในเรือนกระจกสำหรับปลูกต้นไม้ สำหรับการชลประทาน และการปศุสัตว์เป็นต้น การแยกกรดทาทาริกและกรดซิตริกออกจากไวน์น้ำผลไม้ การแยกกรดอะมิโนเป็นต้น

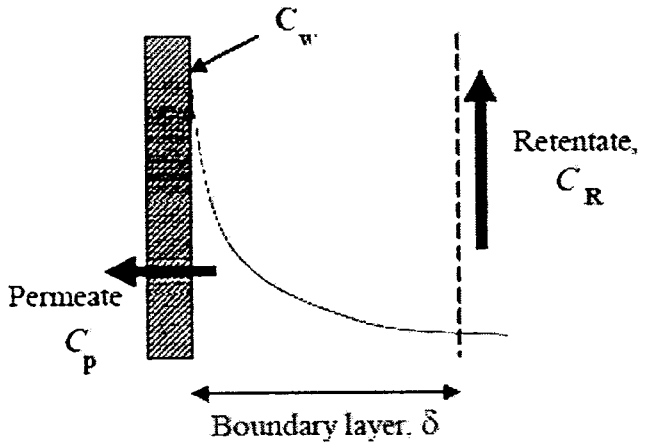
1.2.3 กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis, RO)

กระบวนการออสโมซิสผันกลับใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่มีสมบัติเลือกผ่านด้วยน้ำในการแยกน้ำออกจากสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก น้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 500 โดยป้อนสารละลายภายใต้ความดันสูง นิยมใช้ในการผลิตน้ำดื่มจากน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลและผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง (ultrapure water) หลักการของออสโมซิสคือน้ำในด้านสารละลายเจือจางซึ่งมีศักย์ทางเคมี (chemical potential) สูงกว่า จะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นที่มีสมบัติการเลือกผ่านด้วยน้ำไปยังด้านสารละลายเข้มข้นซึ่งมีศักย์ทางเคมีต่ำ ดังนั้นเมื่อถึงจุดสมดุลศักย์ทางเคมีของน้ำและของสารละลายทั้งสองด้านจะมีค่าเท่ากัน ทั้งนี้ผลต่างของความดันระหว่างสารละลายทั้งสองด้านคือ ผลต่างของ "ความดันออสโมติก (osmotic pressure, $\Delta\pi$)" ถ้าเพิ่มความดันด้านสารละลายเข้มข้นให้มากกว่าผลต่างของความดันออสโมติกมากๆ ($P >> \Delta\pi$) จะเกิดแรงขับทำให้ฟลักซ์ของน้ำที่ผ่านเยื่อแผ่นมีค่าสูง และเกิดการแพร่กลับทิศคือน้ำทางด้านสารละลายเข้มข้นจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นไปยังด้านสารละลายเจือจาง ซึ่งเรียกว่า ออสโมซิสผันกลับ ส่งผลให้ด้านสารละลายเข้มข้นยิ่งมีความเข้มข้นมากขึ้น และยิ่งความเข้มข้นสูงก็ยิ่งต้องใช้ความดันให้สูงมากกว่าความดันออสโมติกจึงเป็นข้อจำกัดของกระบวนการออสโมติกผันกลับวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่นออสโมซิสผันกลับ คือ เซลลูโลสแอซีเทต และพอลิเอไมด์ ส่วนรูปแบบการทำงานของออสโมซิสและออสโมซิสผันกลับ ดังรูปที่1.4



รูปที่ 1.4 กระบวนการออสโมซิส (ก) และออสโมซิสผันกลับ (ข)

ในกระบวนการเยื่อแผ่นมักเกิดการสะสมของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถซึมผ่านที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นและทำให้ความเข้มข้นบริเวณนั้นสูงกว่าในสารป้อน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า concentration polarization ซึ่งจะเกิดเฉพาะในขอบเขตที่มีความหนา δ ที่ภาวะคงตัว ดังรูปที่ 1.5 ผลเสียของการเกิด concentration polarization คือจะทำให้เกลือต่างๆ ถูกละลายหรือดูดซับเข้าไปในเยื่อแผ่นได้ง่ายขึ้น และเมื่อถึงขีดจำกัดของการละลายก็จะทำให้เกิดฟาวลิง ซึ่งมีผลทำให้ความดันออสโมติกสูงขึ้นและค่าฟลักซ์ของสารละลายลดลง



รูปที่ 1.5 การเกิด concentration polarization ในออสโมซิสผันกลับ (Darrell และคณะ)

ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการออสโมซิสผันกลับ ได้แก่

1. ความดัน เมื่อมีการเพิ่มความดัน แรงขับดันที่ให้แก่สารละลายก็จะเพิ่มตามขึ้นไปด้วย ทำให้ฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าการกักกันก็มีค่ามากขึ้นส่งผลให้โมเลกุลของสารผ่านเยื่อแผ่นได้น้อยลง

2. อุณหภูมิ ฟลักซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ การเพิ่มของอุณหภูมิจะส่งผลให้ความหนืดของสารละลายลดลง ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น และค่าการกักกันก็จะลดลง ทำให้โมเลกุลของสารผ่านเยื่อแผ่นได้ดีขึ้น

3. ความเข้มข้นของเกลือ ถ้าความเข้มข้นของเกลือมีค่าสูงจะส่งผลให้เกิดการสะสมของเกลือในเยื่อแผ่นเพิ่มมากขึ้นทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลง

4. อัตราการไหลของสารละลาย ถ้าอัตราการไหลของสารละลายมีค่าสูงจะทำให้การสะสมของตัวถูกละลายที่ผิวของเยื่อแผ่นลดลง ดังนั้นการเกิด concentration polarization ก็จะลดลงด้วย ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีค่าสูงขึ้น

5. ค่าความเป็นกรด-เบส (พีเอช) ค่าความเป็นกรด-เบสจะทำให้เกิดการแตกตัวของสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีผลต่อการมีขั้วของเยื่อแผ่นและอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกละลายและเยื่อแผ่น

1.2.4 นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF)

กระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีหลักการเดียวกันกับออสโมซิสผันกลับ โดยที่กระบวนการสามารถนำมาใช้แยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้ง และสารอนินทรีย์ต่างๆ เยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชันพัฒนามาจากเยื่อแผ่นออสโมซิสผันกลับ โดยปกติ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

กระบวนการออสโมซิสผันกลับสามารถแยกเกลือโซเดียมคลอไรด์ได้มากกว่า 98% แต่ถ้าต้องการแยกเกลือที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าโซเดียมคลอไรด์แต่ไม่เกิน 500 นั้น การใช้เยื่อแผ่นออสโมซิสผันกลับจะไม่เหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจากมีโครงสร้างที่แน่นเกินไปทำให้มีค่าฟลักซ์ต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชันขึ้นมาเพื่อใช้ในกรณีนี้ โดยมีขนาดของรูพรุนบนชั้นผิวประมาณ 2 นาโนเมตร อาจเรียกชื่อกระบวนการนาโนฟิลเตรชันนี้ว่า "ออสโมซิสผันกลับแบบความดันต่ำ (low pressure reverse osmosis, LPRO)" เนื่องจากมีค่าความดันในการดำเนินการอยู่ที่ประมาณ 10-20 บาร์ ซึ่งต่ำกว่าของกระบวนการออสโมซิสผันกลับมาก เยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชันจะเป็นเยื่อแผ่นเชิงประกอบ ซึ่งชั้นผิวจะทำจากพอลิเมอร์และมีประจุของชั้นผิวส่วนใหญ่เป็นประจุลบ สำหรับมอดูลที่นิยมใช้กันมากคือ แบบท่อม้วนและแบบเส้นใยกลวง เนื่องจากมีอัตราส่วนพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรสูง ในบรรดามอดูลแบบต่างๆ ที่มีอยู่มอดูลแบบเส้นใยกลวงและแบบท่อม้วนมีราคาต่อพื้นที่ต่ำกว่ามอดูลแบบอื่นๆ โดยทั่วไปกระบวนการนาโนฟิลเตรชันใช้ในการลดความกระด้างของน้ำ หรือการแยกสารพิษโมเลกุลเล็กออกจากน้ำ เป็นต้น

ทั้งนี้ก่อนที่จะนำน้ำหรือสารละลายป้อนผ่านเข้ากระบวนการเยื่อแผ่นออสโมซิสหรือนาโนฟิลเตรชันนั้นจะต้องมีการบำบัดเบื้องต้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดฟาวลิงและช่วยให้อายุการใช้งานของเยื่อแผ่นนานขึ้น องค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่เยื่อแผ่นคือความเข้มข้นของคลอรีนและค่าความเป็นกรด-เบส การแยกคลอรีนสามารถทำได้โดยการบำบัดด้วยโซเดียม-ไบซัลไฟต์ผ่านเครื่องกรองที่ใช้ถ่านหรือใช้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ส่วนค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมกำหนดให้อยู่ระหว่าง 4-6

สารที่จะทำให้เกิดการอุดตันในเยื่อแผ่นนั้น ได้แก่

1. ของแข็งแขวนลอยและอนุภาค
2. คอลลอยด์
3. ตะกรันเกลือโลหะออกไซด์
4. จุลินทรีย์

การประยุกต์ใช้ออสโมซิสผันกลับและนาโนฟิลเตรชัน

ข้อได้เปรียบต่างๆ ที่เกิดขึ้นของกระบวนการออสโมซิสผันกลับเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ เช่น ใช้พลังงานในการดำเนินการต่ำ เป็นกระบวนการที่สะอาด และยังมีการพัฒนาเยื่อแผ่นให้มีประสิทธิภาพในการแยกที่ดีขึ้น ดังนั้นจึงใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น

1. การผลิตน้ำดื่มและน้ำที่มีความสะอาดสูงสำหรับใช้ในภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งการแยกเกลือออกจากน้ำทะเลและออกจากน้ำกร่อยเพื่อการบริโภค

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 3 ต.ค. 2554
เลขทะเบียน 239835
เลขเรียกหนังสือ

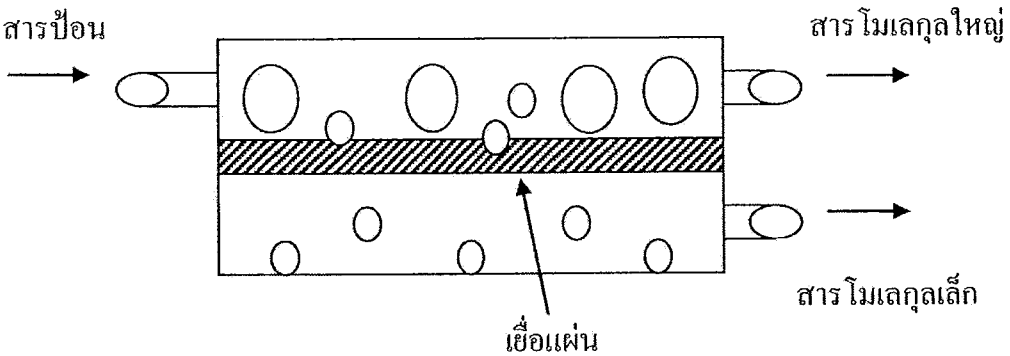
2. การบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การแยกไอออนโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมชุบ-เคลือบโลหะ ใช้แยกสิ่งเจือปนในน้ำทิ้งที่เกิดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ได้มาจากการฟอกสี ย้อมสี และการล้าง เป็นต้น

3. ใช้ในการบำบัดน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินเนื่องจากในแหล่งน้ำเหล่านี้อาจมีสารเคมีจำพวกปุ๋ย หรือยาฆ่าแมลงที่ใช้ในการเกษตรซึ่งตกค้างอยู่ในแหล่งน้ำ

4. ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ในอุตสาหกรรมนม โดยใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นให้กับหางนมเพื่อผลิตชีส ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้โดยใช้เพิ่มความเข้มข้นให้กับน้ำผลไม้ เป็นต้น

1.2.5 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration process, UF)

กระบวนการนี้ใช้สำหรับแยกสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (น้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 1,000) ออกจากสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (น้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 1,000) สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะไม่สามารถผ่านชั้นเยื่อแผ่น ขณะที่โมเลกุลขนาดเล็กจะสามารถผ่านออกไปได้ ตัวอย่างเช่น การแยกโปรตีนหรือเอนไซม์ออกจากน้ำ การแยกสารคอลลอยด์ออกจากน้ำ การทำโปรตีนให้เข้มข้นขึ้น การแยกสารปฏิชีวนะออกจากน้ำหมัก เป็นต้น กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันจะใช้เยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดเล็ก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-20 นาโนเมตร (20-200 อังสตรอม) ในการดำเนินงานแรงขับดันที่ใช้คือผลต่างของความดันประมาณ 2-10 บรรยากาศ ลักษณะของมอดูลที่ใช้มีหลายแบบ เช่น แบบท่อ แบบเส้นใยกลวง และแบบท่อม้วน รูปที่ 1.6 แสดงรูปแบบของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน



รูปที่ 1.6 รูปแบบของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

เยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชันผลิตจากทั้งวัสดุอินทรีย์ประเภทสารพอลิเมอร์ และจากวัสดุอนินทรีย์พวกเซรามิก แม้ว่าเซรามิกจะสามารถใช้งานได้ดีกว่าคือสามารถทนความร้อนได้สูง

ทนต่อความเป็นกรด-เบส ทนต่อสารเคมีต่างๆ ได้ดี และมีความคงตัวมากกว่าเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ ก็ตาม แต่ก็มีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ราคาแพงกว่าวัสดุพอลิเมอร์มาก เปราะและแตกหักง่าย ความสามารถในการกักกันโมเลกุลอยู่ในช่วงที่แคบ ดังนั้นเยื่อแผ่นที่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้งานมากกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ ความเหมาะสม และภาวะที่ใช้ในการแยกสารซึ่งเป็นข้อมูลที่ช่วยให้เลือกใช้ชนิดของเยื่อแผ่นได้ถูกต้อง

ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของฟลักซ์และการกักกันของกระบวนการอัลตราฟิล-เตรชัน มีหลายองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. ความดันในช่วงก่อนการเกิดเจล เมื่อเพิ่มความดันจะมีผลให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนั้นการเพิ่มความดันยังทำให้เจลถูกอัดแน่นขึ้น เป็นผลทำให้ฟลักซ์ไม่เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มที่จะคงที่

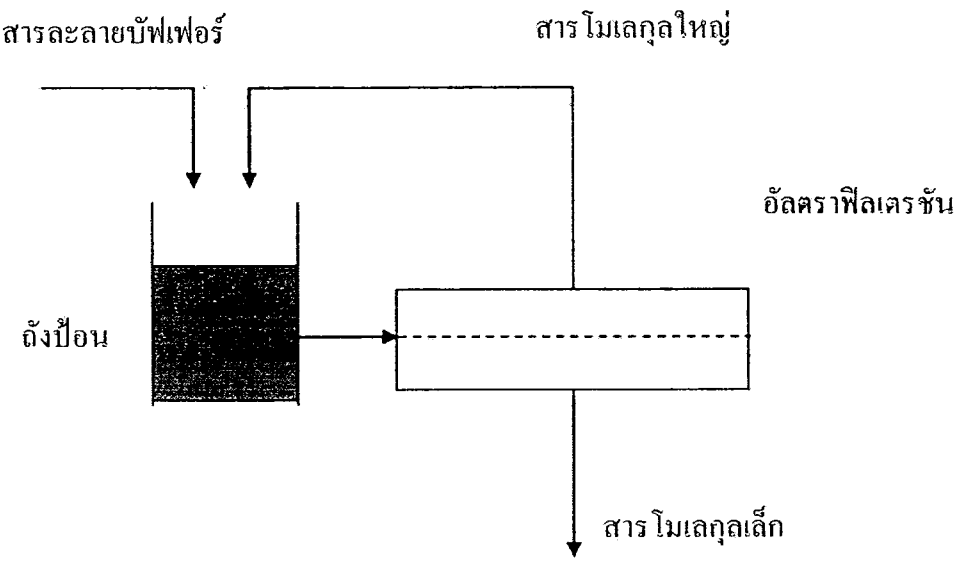
2. อัตราการไหลของสารป้อน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะมีผลทำให้ฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออัตราการไหลเพิ่มจะไปช่วยลดการเกิด concentration polarization และลดการเกิดฟาวลิง

3. อุณหภูมิ ความหนืดของสารละลายจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้ฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การแพร่สูงขึ้น ดังนั้นสารละลายจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้ดีขึ้น

4. ความเข้มข้น ขณะที่ระบบมีความเข้มข้นสูงโอกาสที่จะเกิด concentration polarization ก็สูงตามด้วย ผลก็คือทำให้เกิดเจลและฟาวลิงสูงกว่าระบบที่มีความเข้มข้นต่ำ

5. ค่าความเป็นกรด-เบส มีผลต่อฟลักซ์และการกักกันของเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะค่าความเป็นกรด-เบสมีอิทธิพลต่อการละลายของสารป้อน เช่น โปรตีนจะละลายในน้ำได้น้อยเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสมีค่าใกล้เคียงกับจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point) จึงเกิดการดูดซับของโปรตีนบนผิวเยื่อแผ่นมากโอกาสที่จะเกิดฟาวลิงจึงสูงขึ้น รูปแบบของกระบวนการอัตราฟิลเตรชันเพื่อการใช้งานมี 3 ลักษณะดังนี้

- การดำเนินการแบบกะ ทำได้ค่อนข้างง่าย แต่จะใช้เวลานาน มีความเหมาะสมเมื่อต้องการแยกสารละลายที่ปริมาณไม่มาก
- การดำเนินการแบบต่อเนื่อง เป็นระบบที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ เพราะมีข้อดีกว่าแบบกะหลายอย่าง สามารถผลิตสารละลายได้อย่างต่อเนื่อง ได้อัตราการผลิตสูงเพราะสามารถนำมอดูลมาต่อหรือจัดเรียงเพื่อขยายขนาดได้ ทั้งนี้ต้องมีการควบคุมกระบวนการให้เหมาะสม
- ไดอะฟิลเตรชัน เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชันที่สามารถทำให้ความเข้มข้นของสารโมเลกุลใหญ่ที่ไม่ได้ถูกแยกออกไปมีค่าคงที่และสารโมเลกุลเล็กผ่านเยื่อแผ่นไปได้มากขึ้นโดยการเติมน้ำหรือสารละลายบัฟเฟอร์ในสารละลายป้อน ทั้งนี้จะต้องเติมน้ำหรือสารละลายบัฟเฟอร์ด้วยปริมาณที่เท่ากับปริมาณของเพอร์มิเอทที่ถูกแยกออกไป รูปที่ 1.7 แสดงการดำเนินการแบบไดอะฟิลเตรชัน



รูปที่ 1.7 การดำเนินการแบบไดอะฟิลเตรชัน

ตัวอย่างการนำกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ

1. อุตสาหกรรมนม เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนในหางนมโดยป้อนหางนมเข้าไปในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ทั้งนี้น้ำหรือโมเลกุลขนาดเล็กจะผ่านเยื่อแผ่น ส่วนสารประกอบประเภทโปรตีนหรือไขมันแลคโทสจะไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ ส่วนที่เหลือจึงเป็นหางนมที่มีความเข้นข้นของโปรตีนเพิ่มขึ้น

2. การทำน้ำผลไม้ให้ใส เช่น การทำน้ำมะเขือเทศ การทำน้ำแอบเปิลให้ใส การทำน้ำองุ่นที่ปราศจากตะกอน การผลิตไวน์ให้ใสปราศจากตะกอนดูน่าบริโภค การนำกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันมาประยุกต์จะให้ผลผลิตสูงและผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ เช่น การแยกเหวี่ยง การกรอง เป็นต้น

3. การบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรม เช่น น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมการตัดโลหะซึ่งเรียกว่าน้ำมันอิมัลชันและมีน้ำมันที่ละลายน้ำได้ละลายอยู่ กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันจะใช้แยกน้ำมันเหล่านี้ออกจากน้ำก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

4. อุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ เพื่อแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมัก เช่น การแยกสารปฏิชีวนะออกจากน้ำหมัก เป็นต้น

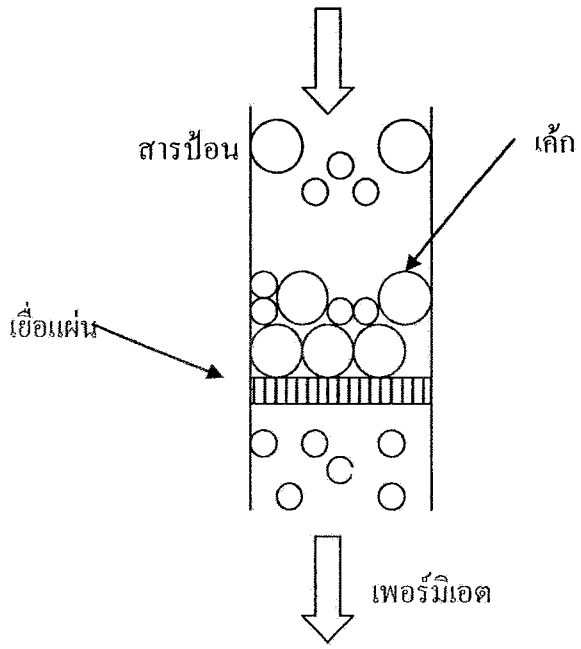
1.2.6 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration process, MF)

ไมโครฟิลเตรชันเป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดค่อนข้างใหญ่คือประมาณ 0.1 - 10 ไมโครเมตร ในการแยกโมเลกุลขนาดใหญ่ๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 300,000 ขึ้นไป เช่น

สารแขวนลอย สารคอลลอยด์ หรืออิมัลชัน โดยใช้แรงขับดันระหว่าง 1-5 บรรยากาศ หรือ 100-500 กิโลพาสคัล ทั้งนี้วัสดุที่นำมาผลิตเยื่อแผ่นในกระบวนการนี้จะใช้ทั้งพอลิเมอร์และเซรามิกบางชนิด เช่น อะลูมินา ซิลิกา ซิลิคอนคาร์ไบด์ เป็นต้น การเลือกวัสดุที่จะนำมาผลิตเยื่อแผ่นจะต้องคำนึงถึงภาวะที่ใช้ดำเนินการ เนื่องจากเยื่อแผ่นพอลิเมอร์มีข้อจำกัดเรื่องความทนทานต่อความร้อนและสารเคมีต่างๆ ดังนั้นอีกทางเลือกหนึ่งคือการใช้เยื่อแผ่นที่ทำจากวัสดุเซรามิก เพราะทนทานต่อความร้อนและสารเคมีได้เป็นอย่างดีและมีอายุการใช้งานที่นานกว่า อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นวัสดุเซรามิกมีข้อเสียอยู่คือมีราคาแพงกว่าวัสดุพอลิเมอร์ประมาณ 5-10 เท่า และแตกหักง่ายกว่า

การกรองของกระบวนการไมโครฟิลเตรชันนั้นแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

1. การกรองแบบ dead-end เป็นการกรองโดยปล่อยให้สารละลายป้อนไหลตั้งฉากกับเยื่อแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 1.8

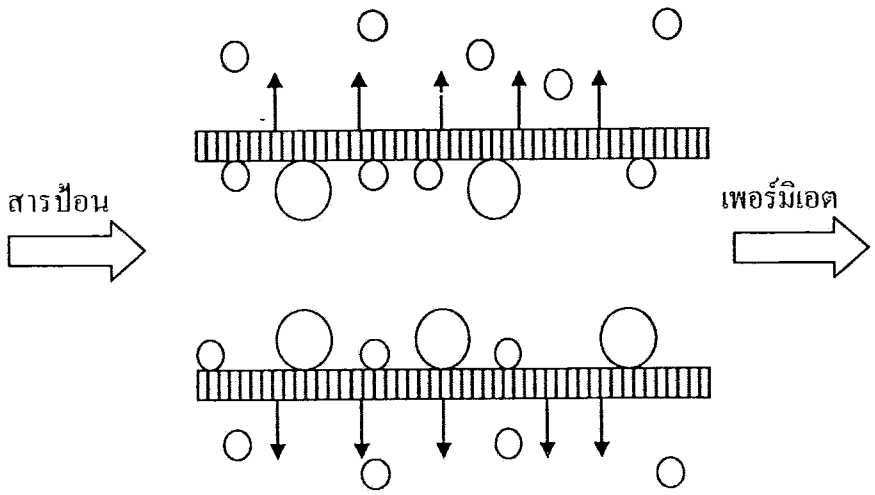


รูปที่ 1.8 การกรองแบบ dead-end

ทั้งนี้โมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 300,000 จะผ่านเยื่อแผ่นและจะเกิดการสะสมของโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 300,000 บนเยื่อแผ่น เรียกว่า เค้ก (cake) ทำให้เกิดความต้านทานการไหล ค่าฟลักซ์จะลดลงเมื่อความหนาของเค้กเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดเค้กออก ระบบนี้จึงค่อนข้างเหมาะสมหากจะดำเนินการแบบกะ

2. การกรองแบบไหลขวาง การกรองลักษณะนี้สารละลายป้อนจะไหลไปในแนวขนานกับเยื่อแผ่นดังรูปที่ 1.9 ปัจจุบันได้มีการนำรูปแบบนี้ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันส่วนใหญ่ เพราะทิศทางการไหลของสารละลายป้อนที่ตั้งฉากหรือขวางกับทิศทางของการกรอง

จะทำให้เกิดแรงเฉือน ส่งผลให้สารที่สะสมบนผิวของเยื่อแผ่นหลุดออกไป ซึ่งเป็นการช่วยลดการเกิด concentration polarization เกิดการสะสมของเค้กเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการลดลงของฟลักซ์จึงไม่มากเมื่อเทียบกับการกรองแบบ dead-end



รูปที่ 1.9 การกรองแบบไหลขวาง

มอดูลที่เลือกใช้ในการกรองแบบไหลขวางนั้นมีอยู่หลายชนิด มอดูลแบบแผ่นเรียบจะมีช่องว่างระหว่างสารละลายที่ไหลผ่านกับเยื่อแผ่นประมาณ 0.25-2.5 มิลลิเมตร มอดูลแบบท่อม้วนมีขนาดของช่องว่างที่ให้สารละลายไหลผ่านอยู่ระหว่าง 0.25-0.5 มิลลิเมตร ส่วนมอดูลแบบเส้นใยกลวงจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ให้สารละลายไหลผ่านได้ในช่วง 0.25-1.00 มิลลิเมตร

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันในอุตสาหกรรมต่างๆ

1. อุตสาหกรรมน้ำผลไม้และเครื่องดื่ม ใช้สำหรับกรองน้ำผลไม้ให้ใส เช่น กรองน้ำสับปะรดและไวน์ แทนการใช้อัลตราฟิลเตรชัน เพราะราคาของเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันมีราคาถูกกว่าและมีค่าฟลักซ์สูงกว่า

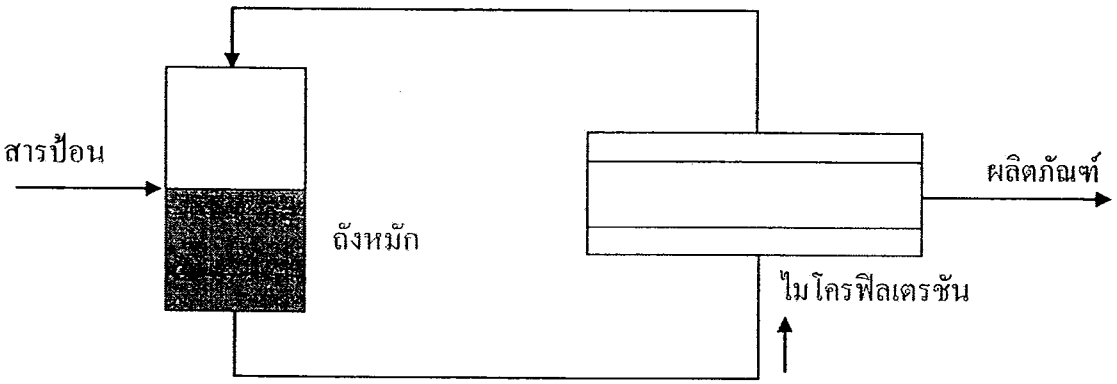
2. อุตสาหกรรมนมและอาหาร ใช้แยกตะกอนโปรตีนออกจากน้ำนมถั่วเหลือง แยกฟอส-โฟคาเซเนต (phosphocasenate) ออกจากน้ำนม แยกแบคทีเรียจากน้ำนม

3. อุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ กระบวนการไมโครฟิลเตรชันถูกใช้อย่างกว้างขวางในงานสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ นิยมใช้เยื่อแผ่นเซรามิกมากกว่าเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ เนื่องจากเยื่อแผ่นเซรามิกมีข้อดีในเรื่องของการทนความร้อนได้ดี เพราะในการทำความสะอาดต้องใช้การฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำ กระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ใช้สามารถแบ่งเป็น 2 แนวทาง คือ

- ใช้แยกเซลล์และผลิตภัณฑ์ออกจากกันเพื่อนำเซลล์กลับมาใช้ใหม่ในเครื่องปฏิกรณ์ หลังจากการใช้เครื่องปฏิกรณ์ในการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากการหมักสารที่แยกออกจากเครื่อง

ปฏิกรณ์นั้นอาจจะยังมีเซลล์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาจึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันนำกลับไปใช้ใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 1.10

- ใช้เพิ่มความเข้มข้นของเซลล์โดยจะใช้แยกกากเซลล์ออกจากผลิตภัณฑ์ซึ่งจะใช้งานร่วมกับกระบวนการไดอะฟิลเตรชัน



รูปที่ 1.10 การใช้เยื่อแผ่นร่วมกับการหมัก

1.2.7 กระบวนการแก๊สเพอร์มิเอชัน (Gas permeation process)

กระบวนการนี้เหมาะสำหรับการแยกของผสมในสถานะแก๊ส โดยทั้งสารป้อนและเพอร์มิเอตต่างก็เป็นแก๊ส การทำให้เกิดแรงขับดันอาจปรับให้ความดันด้านป้อนสูงและ/หรือให้ความดันขาออกต่ำ เช่น เป็นสุญญากาศ กระบวนการแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แก๊สดิฟฟิวชัน (gas diffusion) กับแก๊สเพอร์มิเอชัน (gas permeation) ทั้งนี้เป็นการแบ่งตามชนิดของเยื่อแผ่นและกลไกการทำงานของกระบวนการ

แก๊สดิฟฟิวชัน (Gas diffusion)

การทำงานโดยอาศัยเยื่อแผ่นรูพรุน มักเป็นงานเชิงพาณิชย์ เช่น การเพิ่มความเข้มข้นของยูเรเนียมเฮกซาฟลูออไรด์ ($^{235}UF_6$) ซึ่งมีราคาแพงมาก โดยการแยกออกจาก $^{238}UF_6$ ด้วยเยื่อแผ่นรูพรุนเซรามิก และให้ค่าการแยกที่ต่ำมากคือ 1.0064 ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการแยกแก๊สด้วยเยื่อแผ่นรูพรุน กลไกการแยกมี 2 กลไก และต่างก็ขึ้นกับขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่น กล่าวคือ

1. ถ้ารูพรุนของเยื่อแผ่นมีขนาดเล็กกว่าระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่ได้โดยไม่ชนกัน (mean free path) โมเลกุลจะเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนด้วยกลไก Knudsen diffusion โดยจะชนกับผนังมากกว่าที่จะชนกันเอง ดังนั้นแยกสารจึงเกิดขึ้นได้โดยอาศัยความแตกต่างของการแพร่เป็นหลัก

2. ถ้ารูพรุนของเยื่อแผ่นมีขนาดเล็กมากๆ จนแก๊สที่มีโมเลกุลใหญ่กว่าไม่สามารถผ่านออกไปได้ การแยกจะเกิดขึ้นด้วยกลไกการคัดขนาด

แก๊สเพอร์มิเอชัน (Gas permeation)

กระบวนการแก๊สเพอร์มิเอชันจะต้องใช้เยื่อแผ่นแบบแน่น และแรงขับดันในการถ่ายเทจะเป็นผลต่างของความดันหรือความดันย่อยในช่วง 0.1-10 เมกะพาสคัล ดังนั้นแก๊สจะถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นด้วยกลไกการละลาย-การแพร่

ค่าการแยก (Separation factor, α_{ij})

$$\alpha_{ij} = \frac{y_{ip}/y_{jp}}{y_{if}/y_{jf}} \qquad (1.1)$$

y_{ip} , y_{jp} , y_{if} , y_{jf} คือ เศษส่วนเชิงโมลของแก๊ส i และ j ในเพอร์มิเอตและในสารป้อน ถ้า α_{ij} มีค่าสูง แสดงว่าเยื่อแผ่นมีประสิทธิภาพในการแยกสารสูง ตัวแปรที่มีผลต่อค่าการแยกคือสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อแผ่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกชนิดและโครงสร้างเยื่อแผ่นให้เหมาะสมกับแก๊สที่ต้องการแยก

รูปแบบของการดำเนินการอาจเป็นแบบขั้นตอนเดียวแบบไม่มีการวนกลับ แต่ถ้าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์และมีอัตราการแยกกลับคืนต่ำ ก็อาจใช้วิธีการวนกลับ (recycle) หรือใช้ระบบต่อเนื่องแบบหลายขั้นตอนเช่นเดียวกับใน RO/UF/MF มอดูลของเยื่อแผ่นที่ใช้ในการแยกแก๊สส่วนมากเป็นท่อม้วนหรือเส้นใยกลวงเพราะมีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง

การประยุกต์ใช้งานกระบวนการแยกแก๊สด้วยเยื่อแผ่นในระยะแรกๆ จะเน้นที่อุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันและปิโตรเคมีเพื่อแยกแก๊สไฮโดรเจนออกจากแก๊สอื่นๆ ตัวอย่างเช่น การแยกแก๊สไฮโดรเจนเพื่อปรับอัตราส่วนโดยโมลของ H_2/CO ในแก๊สสังเคราะห์ (synthesis gas) เพราะอัตราส่วนของ H_2/CO ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต เช่น ถ้าผลิตโดยวิธี steam reforming ของแก๊สธรรมชาติ (มีเทน) จะได้ H_2/CO ประมาณ 3/1 ถ้าผลิตโดยวิธี steam reforming ของแนฟทา จะได้ H_2/CO ประมาณ 2/1 ถ้าผลิตจากการกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันอัตราส่วนของ H_2/CO จะประมาณ 1/2 แต่นอกจากนี้ยังใช้แยกแก๊สไฮโดรเจนกลับคืนจากโรงงานผลิตแอมโมเนียและจากกระบวนการผลิตไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ

ตารางที่ 1.2 แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้กระบวนการแก๊สเพอร์มิเอชัน การประยุกต์ที่ตามมาคือใช้แยก O_2/N_2 ออกจากอากาศ ซึ่งพบว่าเป็นกระบวนการที่พัฒนาอย่างรวดเร็วและมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และทางเทคนิคง่ายกว่าการแยกแก๊สไฮโดรเจน เพราะสารป้อนซึ่งเป็นอากาศไม่มีความแตกต่างเหมือนแก๊สอื่นๆ ที่มีแก๊สไฮโดรเจนปนอยู่ เยื่อแผ่นส่วนใหญ่ยอมให้

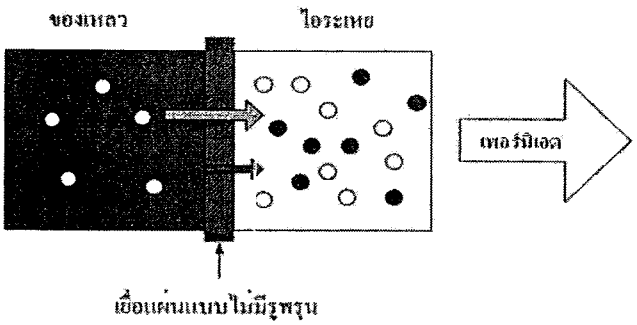
แก๊สออกซิเจนผ่าน แต่กักกันแก๊สไนโตรเจน ทำให้สามารถแยกแก๊สไนโตรเจนความเข้มข้นสูงในด้านสารป้อนและแก๊สออกซิเจนด้านเพอร์มิเอต

ตารางที่ 1.2 การประยุกต์ใช้กระบวนการแก๊สเพอร์มิเอชัน

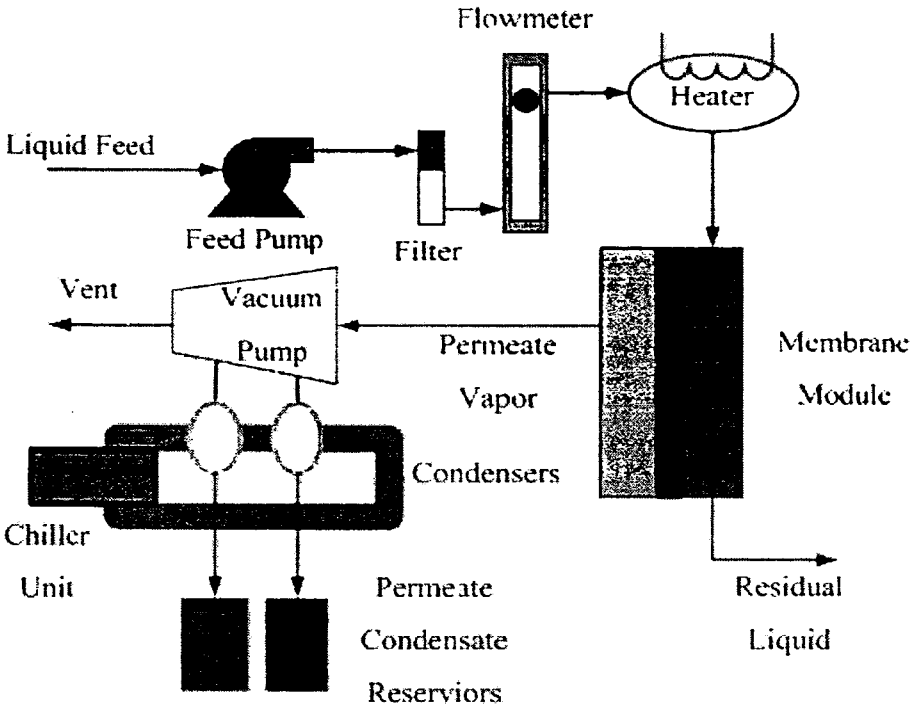
แก๊ส	วัตถุประสงค์ของการประยุกต์ใช้
O_2/N_2	เพิ่มความเข้มข้นของ O_2 หรือ N_2
H_2/ไฮโดรคาร์บอน	แยกกลับคืน H_2
H_2/CO	ปรับอัตราส่วนของแก๊สสังเคราะห์
CO_2/ไฮโดรคาร์บอน	การกำจัด acid gas (คือ CO_2)
H_2O/ไฮโดรคาร์บอน	แยกน้ำจากแก๊สธรรมชาติ
H_2S/ไฮโดรคาร์บอน	กำจัด sour gas (คือ H_2S)
He/ไฮโดรคาร์บอน	การแยกแก๊สฮีเลียม
H_2O/อากาศ	การแยกความชื้นจากอากาศ

1.2.8 กระบวนการเพอร์แวปพอเรชัน (Pervaporation process, PV)

หลักการทำงานใช้แยกสารละลายผ่านเยื่อแผ่นแบบแน่นที่ไม่มีรูพรุน สารที่ผ่านเยื่อแผ่นหรือเพอร์มิเอตจะอยู่ในสภาพของไอ ดังแสดงในรูปที่ 1.11 โดยการควบคุมความดันด้านขาออกให้ต่ำกว่าความดันไออิ่มตัวของสารดังกล่าวตามกลไกการละลาย-การแพร่ การแยกเกิดขึ้นได้เนื่องจากองค์ประกอบต่างๆ ในสารละลายมีความสามารถในการละลาย-การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นไม่เท่ากัน เหมาะสำหรับแยกของเหลวผสมที่แยกได้ยากโดยวิธีการแยกแบบธรรมดา เช่น ของผสมอะซีโอโทรป (azeotropic mixture) ได้แก่ สารละลายเอทานอล-น้ำ หรือของผสมที่แต่ละองค์ประกอบมีจุดเดือดใกล้เคียงกัน รูปที่ 1.12 แสดงระบบการแยกแบบเพอร์แวปพอเรชัน



รูปที่ 1.11 กระบวนการเพอร์แวปพอเรชันผ่านเยื่อแผ่น



รูปที่ 1.12 แผนผังของระบบการแยกแบบเพอร์แวปพอเรชัน

กระบวนการเพอร์แวปพอเรชันแบ่งตามวัตถุประสงค์การใช้งานได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. การแยกน้ำ (dehydration) ออกจากของเหลวอินทรีย์ด้วยเยื่อแผ่นชอบน้ำ เช่น การแยกน้ำจากสารละลายแอลกอฮอล์เพื่อผลิตแอลกอฮอล์บริสุทธิ์

2. การแยกสารอินทรีย์ออกจากสารละลายเจือจางของสารอินทรีย์-น้ำ ด้วยเยื่อแผ่นไม่ชอบน้ำ เช่น การแยกฟีนอลจากน้ำทิ้ง การแยกสารที่ให้กลิ่นให้รส (aroma compound) จากน้ำผลไม้

3. การแยกของผสมอินทรีย์ด้วยเยื่อแผ่นไม่ชอบน้ำ เช่น การแยก o-xylene จาก p-xylene

ปัจจุบันกระบวนการเพอร์แวปพอเรชันที่ประยุกต์ใช้งานในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ การใช้แยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล 95% เพื่อผลิตเอทานอล (99.5%) แทนการกลั่นแบบอะซีโอโทรป ซึ่งมีข้อดีคือ ประหยัดพลังงานและไม่ต้องใช้สารเคมี ส่วนเยื่อแผ่นที่ใช้สำหรับกระบวนการเพอร์แวปพอเรชันในกลุ่มต่างๆ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. เยื่อแผ่นชอบน้ำ (hydrophilic membrane) การดูดซับเกิดจากแรงกระทำระหว่างขั้ว (dipole-dipole interaction) หรือการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเยื่อแผ่นและโมเลกุลของของเหลวสารที่มีไดโพลโมเมนต์สูงกว่า และ/หรือที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเยื่อแผ่นได้จะดูดซับบนเยื่อแผ่นชอบน้ำได้มากกว่า เยื่อแผ่นประเภทนี้ยอมให้น้ำผ่านได้ดีกว่าสารอินทรีย์ ใช้แยกน้ำออกจากสารละลายแอลกอฮอล์เป็นหลักโดยได้มีการพัฒนาขึ้นจากพอลิเมอร์หลายชนิด เยื่อแผ่นชอบน้ำ

ที่มีการผลิตในเชิงการค้าชนิดแรกเป็นของบริษัท GFT สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ผลิตจาก PVA ซึ่งมีการเชื่อมขวางโดยวิธีเคมี

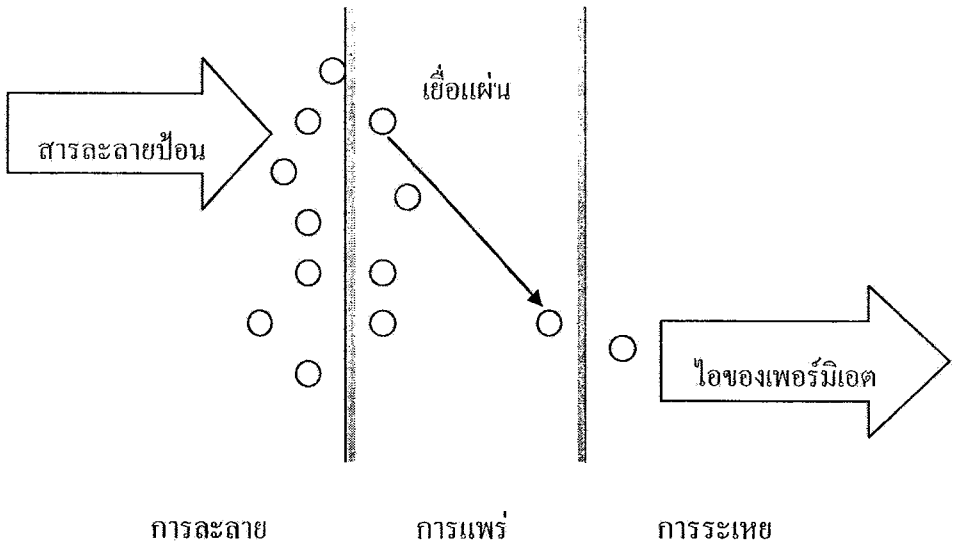
2. เยื่อแผ่นไม่ชอบน้ำ (hydrophobic membrane) ดูดซับสารด้วยแรงกระทำระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว (dispersio หรือ non-polar force เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์) ตัวอย่าง พอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเยื่อแผ่นในกลุ่มนี้ คือ กลุ่มซิลิโคน เช่น PDMS, POMS, PTMSP และ PEBA เยื่อแผ่นประเภทนี้เลือกผ่านเฉพาะสารอินทรีย์ ใช้แยกสารละลายอินทรีย์เจือจางออกจากน้ำหรือออกจากสารอินทรีย์ด้วยกัน เช่น การแยกเอทานอลออกจากเบียร์ในการผลิตเบียร์แอลกอฮอล์ต่ำ การแยกสารอินทรีย์ เช่น ฟีนอล โทลูอีน ไตรคลอโรมีเทน ที่เจือปนอยู่ในน้ำใต้ดินหรือในน้ำทิ้ง การแยกสารให้กลิ่นให้รสจากน้ำผลไม้

การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเพอร์แวปพอเรชันอาศัยกลไกการละลาย - การแพร่ (solution - diffusion mechanism) ดังแสดงในรูปที่ 1.13 ซึ่งมีกลไกดังนี้

1. การละลายหรือการดูดซับของสารเข้าสู่เยื่อแผ่น ซึ่งขึ้นกับชนิดของเยื่อแผ่นและสารที่ต้องการแยก

2. การแพร่ของสารผ่านเยื่อแผ่น ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของโมเลกุลของสารที่แพร่โดยส่วนใหญ่สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่าจะแพร่ได้เร็วกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่

3. การคายออก (desorption) หรือการระเหยของสารในรูปของไอทางด้านเพอร์มิเอต โดยจะลดความดันที่ด้านเพอร์มิเอตลงจนต่ำกว่าความดันไอของสารที่ผ่านเยื่อแผ่น ทำให้สารที่ผ่านเยื่อแผ่นมีจุดเดือดลดลงจึงเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ นอกจากนี้การลดความดันนี้ยังเป็นการเพิ่มแรงขับดันให้กับระบบ



รูปที่ 1.13 การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นด้วยกลไกการละลาย-การแพร่

ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการเพอร์แวปพอเรชันได้แก่

1. ความเข้มข้นของสารป้อน เมื่อความเข้มข้นของสารป้อนหรือองค์ประกอบที่ผ่านเยื่อแผ่นได้ดีกว่าเพิ่มขึ้น สารละลายก็สามารถเข้าไปในเยื่อแผ่นได้มากขึ้น ทำให้มีผลต่อการเกิด coupling และ plasticization ตัวอย่างเช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลโดยใช้เยื่อแผ่นชอบน้ำพบว่าเมื่อน้ำในสารป้อนมากขึ้น ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการแยกลดลง

2. อัตราการป้อนส่งผลต่อการเกิด concentration polarization ในชั้นขอบเขตของเหลว กล่าวคือ การเพิ่มความเร็วในการป้อนสารจะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นขอบเขต จึงทำให้ concentration polarization ลดลง หรือค่าความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลลดลง ฟลักซ์จึงเพิ่มขึ้น แต่ค่าการแยก (ซึ่งแปรผกผันกับฟลักซ์) จะลดลง

3. อุณหภูมิของสารป้อน การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้การถ่ายเทมวลในด้านสารป้อนและในเยื่อแผ่นสูงขึ้น พร้อมกับการละลายในเยื่อแผ่นที่เพิ่มขึ้น และทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้มาก ดังนั้นฟลักซ์จึงเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการแยกลดลง การที่ค่าของฟลักซ์เพิ่มเมื่ออุณหภูมิสูงเป็นไปตามกฎของอาร์เรเนียส (Arrhenius law)

$$J_i = A_i \exp\left[\frac{-E_p}{RT}\right] \qquad (1.2)$$

โดยที่ A_i = ค่าคงตัว ($mol/m^2 \cdot s$)

E_p = พลังงานกระตุ้นสำหรับการซึมผ่าน (J/mol)

4. ความดันด้านเพอร์มิเอต เป็นตัวแปรสำคัญ เพราะการทำให้เกิดสุญญากาศมีค่าใช้จ่ายสูง ทั้งนี้การลดความดันด้านเพอร์มิเอตให้ต่ำลงก็เพื่อเพิ่มแรงขับดันในการถ่ายเทมวล ดังนั้นค่าฟลักซ์จึงเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการแยกอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้เมื่อความดันด้านเพอร์มิเอตเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการระเหยขององค์ประกอบที่ผ่านเยื่อแผ่น แต่โดยส่วนใหญ่แล้วค่าการแยกจะลดลงเมื่อความดันด้านเพอร์มิเอตเพิ่มขึ้น

ข้อดีของกระบวนการเพอร์แวปพอเรชัน

- สะดวกต่อการดำเนินการ
- สามารถแยกได้ในขั้นตอนเดียว
- ประหยัดพลังงาน
- ได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาด
- สะดวกในการเพิ่มอุปกรณ์อื่นๆ เข้าไปในกระบวนการ
- ไม่ต้องใช้สารเคมี

อย่างไรก็ตาม การที่นำกระบวนการเพอร์แวปพอเรชันไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมนั้น ยังมีข้อจำกัดอยู่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเยื่อแผ่นแบบอื่นๆ ซึ่งมีเยื่อแผ่นที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ที่มีประสิทธิภาพสูง ราคาถูก และยังสามารถเลือกใช้เยื่อแผ่นให้เหมาะสมกับการใช้งาน กระบวนการเพอร์แวปพอเรชันเป็นกระบวนการที่มีการพัฒนาค่อนข้างช้าจึงมีความพยายามที่จะปรับปรุงเยื่อแผ่นที่จะนำมาใช้ในกระบวนการเพอร์แวปพอเรชันอยู่ตลอดเวลา เพื่อเพิ่มค่าฟลักซ์และค่าการแยกให้เกิดความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

1.2.9 เยื่อแผ่นเหลว (Liquid membrane, LM)

ในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว วัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ถูกกำหนดให้อยู่ตรงกลางระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ ทำให้การถ่ายเทมวลและปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในขั้นตอนเดียวคือรวมขั้นตอนการสกัดและการนำกลับไว้ด้วยกัน ชนิดของสารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด ดังนี้

1. สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant)
2. สารสกัดชนิดเบส (basic extractant)
3. สารสกัดชนิดกลาง (neutral extractant)

เยื่อแผ่นเหลวแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พยุงด้วยตัวรองรับ (unsupported liquid membrane) โดยทั่วไปจะรู้จักกันในชื่อ bulk liquid membrane หรือ เยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน (emulsion liquid membrane, ELM)

2. เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับ (supported liquid membrane, SLM) เช่น เยื่อแผ่นแบบแผ่นแบน เยื่อแผ่นแบบแผ่นม้วน และเยื่อแผ่นแบบเส้นใยกลวง เป็นต้น

เยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันอยู่ในสภาพของเหลวและไม่มีรูพรุน ตัวถูกละลายในสารป้อนจะถูกสกัดและแยกโดยชั้นอิมัลชัน วิธีนี้มีพื้นที่แลกเปลี่ยนมากกว่าวิธีเยื่อแผ่นของเหลวที่มีตัวรองรับ และสามารถเตรียมขึ้นได้ง่าย ตัวกลางหรือเมมเบรนทำหน้าที่เลือกสกัดจึงให้ค่าการเลือกผ่านของสาร (selectivity) สูงมาก ดังนั้นจึงทำให้จำนวนขั้นตอนที่ต้องใช้ในการแยกสารเพื่อให้ได้ความเข้มข้นในระดับที่ต้องการน้อยลง

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันมีจุดเด่นที่สำคัญ คือ มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสูงมากถึง 3,000 ตารางเมตร อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ก็ยังคงมีปัญหาบางประการจึงยากที่จะนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ได้แก่

1. ในการเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactant) หรือตัวประสาน (emulsifier) ลงไปเพื่อให้อิมัลชันเกิดการเสถียรมากขึ้นนั้น ผลที่ตามมาก็คือการแตกของอิมัลชันทำให้การแยกวัฏภาคสารละลายนำกลับที่อยู่ภายในอิมัลชันออกทำได้ยาก (ภายหลังจากที่สารละลายนำกลับอิ่มตัวกับองค์ประกอบที่ต้องการแยกแล้ว) ส่งผลให้วัฏภาคสารละลายนำกลับปนเป็นเนื้อเดียวกับวัฏภาคสารละลายป้อน ทำให้ประสิทธิภาพของการสกัดลดลง ซึ่งก็ได้รับการยืนยันโดยกลุ่มวิจัยของ Ramakul

2. ค่าฟลักซ์ซึ่งแสดงปริมาณการถ่ายเทมวลต่อพื้นที่ต่อเวลาอาจต่ำลง เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวมารวมตัวกันที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค (interfacial film) ทำให้การถ่ายเทมวลเข้าและออกจากวัฏภาคสารละลายนำกลับถูกจำกัดด้วยสารลดแรงตึงผิว

วิธีการพื้นฐานที่ใช้ในการแตกอิมัลชันนั้นมี 2 วิธี คือ

1. วิธีทางเคมี เป็นการเติมสารลดการประสาน (demulsifier) ลงในอิมัลชัน วิธีนี้มีประสิทธิภาพสูง แต่อาจทำให้สมบัติของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเปลี่ยนไปและไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะสม

2. วิธีทางกายภาพ เช่น การให้ความร้อน การเหวี่ยงแยก การใช้ประจุไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อแตกอิมัลชัน แต่อุปกรณ์ของวิธีการใช้ประจุไฟฟ้าค่อนข้างยุ่งยากและมีความซับซ้อน

ในการแยกสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆ ด้าน เช่น การเลือกสารลดแรงตึงผิว ตัวทำละลายในเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน ความคงตัวของเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันและความเข้มข้นของสารสกัด ปัจจุบันเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันถูกนำมาประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรม เช่น งานที่เกี่ยวข้องกับการแยกไอออนโลหะ สังกะสี ทองแดง นิกเกิล และโคบอลต์ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ หรือการแยกโลหะมีค่า ธาตุหายาก รวมทั้งใช้แยกไอออนที่มีความเป็นพิษออกจากสารละลาย

1.3 การทำความสะอาดและการเก็บรักษาเยื่อแผ่น

(Cleaning and storage of membrane)

การล้างทำความสะอาดและการเก็บรักษาเยื่อแผ่นเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญ เพราะจะช่วยให้สามารถใช้งานเยื่อแผ่นได้นานและเพิ่มสมรรถนะในการใช้งาน สิ่งที่ติดค้างอยู่ในเยื่อแผ่นเมื่อจบสิ้นการใช้งาน นอกจากสารละลายแล้วยังมีฟาวลิง (fouling) ซึ่งเกิดจากการสะสมขององค์ประกอบในสารละลายอยู่บริเวณผิวหน้าและในรูพรุนของเยื่อแผ่น การทำความสะอาดเป็นขั้นตอนสำคัญและใช้เวลาค่อนข้างนานเพราะการล้างด้วยน้ำธรรมดาไม่สามารถกำจัดองค์ประกอบที่ติดค้างอยู่ใน

รูพรุนของเยื่อแผ่นได้หมด การทำความสะอาดต้องคำนึงถึงชนิดของสารประกอบเชิงซ้อนที่อุดตันอยู่ในรูพรุนของเยื่อแผ่น วัสดุอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่ใช้ผลิตเยื่อแผ่น เวลาที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้น รวมทั้งความยากง่ายของขั้นตอนการล้าง ซึ่งมีทั้งวิธีทางกายภาพและทางเคมี

วิธีกายภาพ (Physical method)

การทำความสะอาดเยื่อแผ่นด้วยวิธีปรับอัตราการไหลของน้ำโดยอาศัยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น หรือวิธีการใส่ฟองน้ำ (sponge balls) ซึ่งมีขนาดเหมาะสมกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเยื่อแผ่นแบบท่อเข้าไปในท่อพร้อมการไหลของน้ำหรือสารทำความสะอาดเพื่อให้ฟองน้ำไปขูดสารที่เกาะและอุดตันสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนที่เกาะอยู่บนผิวหน้าเยื่อแผ่นและอุดตันอยู่ในรูพรุนของเยื่อแผ่นได้เพียงระดับหนึ่ง แต่ไม่สามารถกำจัดได้ทั้งหมด วิธีกายภาพที่ให้ผลเป็นที่น่าพอใจคือการป้อนน้ำหรือสารทำความสะอาดภายใต้ความดันเข้าสู่กระบวนการในทิศที่สวนทางกับการทำงานตามปกติ (back washing) คือเข้าทางด้านเพอร์มิเอต ซึ่งการไหลออกของน้ำหรือสารทำความสะอาดภายใต้แรงดันนี้จะดันสารที่เกาะหรืออุดตันในเยื่อแผ่นให้หลุดออกได้ นอกจากนั้นอาจใช้ความดันจากการพ่นอากาศเข้าทางด้านเพอร์มิเอตก็ได้เช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามยังคงต้องใช้น้ำเพื่อนำพาสารอุดตันออกจากเยื่อแผ่น

วิธีเคมี (Chemical method)

เป็นวิธีที่ใช้สารเคมีช่วยละลายสารที่เกาะหรืออุดตันในเยื่อแผ่น หรืออาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบที่สามารถละลายได้ดีในน้ำ หรือใช้สารเคมีทำให้สารที่อุดตันในเยื่อแผ่นเกิดการหดตัวหลุดออกจากรูพรุนของเยื่อแผ่น ทั้งนี้สารเคมีที่นำมาใช้ต้องไม่ก่อให้เกิดการอุดตันเพิ่มขึ้นและต้องไม่ทำให้เยื่อแผ่นเกิดการเสื่อมสภาพ สารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดนี้ เช่น

1. กรด
2. เบส
3. เอนไซม์
4. สารลดแรงตึงผิว
5. สารฆ่าเชื้อ (disinfectant)
6. สารทำความสะอาดกำหนดสูตร (formulated cleaner)

การเลือกใช้สารทำความสะอาดอาจต้องใช้มากกว่า 1 ชนิด เช่น ในกรณีที่สารอุดตันอาจมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ดังนั้นอาจจำเป็นต้องใช้ทั้งกรดและเบส และล้างหลายรอบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เพื่อให้เยื่อแผ่นมีสมรรถนะและประสิทธิภาพของการใช้งานใกล้เคียงกับก่อน

การเริ่มใช้งานมากที่สุด ซึ่งต้องมีค่าฟลักซ์ของน้ำที่ภาวะหนึ่งๆ เป็นค่าอ้างอิง และตรวจสอบจนกว่าจะได้ค่าฟลักซ์ของน้ำไม่ต่ำกว่า 85% ของค่าเริ่มต้น ขั้นตอนการล้างโดยทั่วไปมีดังต่อไปนี้

1. นำสารละลายออกจากระบบ
2. ล้างระบบด้วยน้ำสะอาดหลายๆ รอบ
3. ล้างด้วยสารทำความสะอาดโดยให้ไหลวนหลายๆ รอบ และตามด้วยน้ำสะอาด ในกรณีที่ใช้สารทำความสะอาดมากกว่า 1 ชนิด จะต้องทำซ้ำในขั้นตอนนี้ ก่อนที่จะดำเนินการในขั้นต่อไป
4. ล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดสารทำความสะอาดที่ติดค้างอยู่
5. ทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำจนได้ไม่ต่ำกว่า 85% ของค่าเริ่มต้น หรือจนกว่าจะพอใจ ทั้งนี้อาจต้องกลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 และขั้นตอนที่ 4 ใหม่

การเก็บรักษาเยื่อแผ่นแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ "เยื่อแผ่นใหม่" ซึ่งหมายถึง เยื่อแผ่นที่ยังไม่เคยใช้งานเลยและต้องจัดเก็บเพื่อรอการนำไปใช้งาน และ "เยื่อแผ่นเก่า" ซึ่งหมายถึง เยื่อแผ่นที่ผ่านการใช้งานมาระยะเวลาหนึ่งและจะหยุดการใช้งานไม่ว่าจะเป็นช่วงสั้นหรือช่วงยาว รายละเอียดของการจัดเก็บอธิบายได้ดังนี้

1. การเก็บรักษาเยื่อแผ่นใหม่ เยื่อแผ่นที่ยังไม่เคยผ่านการใช้งานเลยสามารถเก็บอยู่ได้ทั้งในสภาพแห้งและสภาพเปียก หากต้องการเก็บในสภาพแห้งจะต้องเคลือบผิวหน้าของเยื่อแผ่นด้วยสารประเภท "กลีเซอรอล" ก่อน แล้วจึงทำให้แห้ง บรรจุลงภาชนะปิดไม่ให้อากาศผ่านเข้า-ออก และเก็บไว้ในที่แห้งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 20-35 °ซ ไม่ควรให้กระทบกับแสงแดดโดยตรง ส่วนการเก็บในสภาพเปียกทำโดยนำเยื่อแผ่นแช่ลงในสารเก็บรักษาที่บรรจุในภาชนะปิด และเมื่อต้องการใช้งานไม่ว่าจะผ่านการเก็บรักษาโดยสภาพใดก็ต้องนำไปแช่และล้างในน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง

2. การเก็บรักษาเยื่อแผ่นเก่า ก่อนจะเก็บต้องผ่านการทำความสะอาดในเบื้องต้น ปกติเยื่อแผ่นเหล่านี้ขณะใช้งานจะประกอบอยู่ในมอดูล ดังนั้นการทำความสะอาดจึงต้องทำทั้งที่อยู่ในมอดูล การเก็บรักษาเยื่อแผ่นเก่ามีทั้งระยะสั้นและระยะยาว เยื่อแผ่นที่ผ่านการใช้แล้วไม่สามารถจะจัดเก็บแบบแห้งได้เหมือนกับเยื่อแผ่นใหม่

ก) การเก็บรักษาระยะสั้น หมายถึง การหยุดใช้งานตั้งแต่ 5 วันขึ้นไป แต่ไม่เกิน 30 วัน วิธีการคือภายหลังจากการล้างให้สะอาดแล้ว จะต้องผ่านน้ำสะอาดให้บรรจุอยู่ในมอดูลและระบบท่อ จากนั้นให้ปิดทางเข้า-ออกทุกทาง เพื่อกันไม่ให้อากาศเข้าไปในระบบได้ และจะต้องทำซ้ำกันดังนี้ทุก 5 วัน โดยไม่ต้องใส่สารเก็บรักษา

ข) การเก็บรักษาระยะยาว หมายถึง ช่วงเวลาการหยุดใช้งานเกินกว่า 30 วัน วิธีการคล้ายคลึงกันกับเก็บรักษาระยะสั้น เพียงแต่ใช้สารเก็บรักษาบรรจุแทนน้ำ และต้องทำซ้ำขั้นตอนนี้

ทุก 30 วัน หากเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 27°ซ แต่ถ้าอุณหภูมิของการเก็บเกินกว่า 27 °ซ ก็จะต้องทำซ้ำทุก 15 วัน ผู้จัดจำหน่ายจะเป็นผู้แนะนำการเลือกใช้สารเก็บรักษา

ในกรณีที่เป็นเยื่อแผ่นเซรามิก ทุกครั้งที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วควรจะถอดเยื่อแผ่นออกจากมอดูล และนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 50-70°ซ ก่อนที่จะนำไปบรรจุไว้ในภาชนะปิด โดยไม่ต้องใส่สารเก็บรักษา

ส่วนการเก็บรักษาเยื่อแผ่นสำหรับการแยกแก๊สและเพอร์แวปพอเรชันต้องแน่ใจว่าเยื่อแผ่นอยู่ในสภาพที่แห้งภายหลังจากการใช้งาน จากนั้นจึงสามารถเก็บได้ในสภาวะที่แห้งและเย็น

บทสรุป

เยื่อแผ่นเหลวทั้งที่มีตัวรองรับและไม่ต้องมีตัวรองรับถูกนำมาใช้ในการสกัดและนำกลับไอออนโลหะที่มีพิษและไม่มีพิษ ไอออนโลหะมีค่า และไอออนของธาตุหายาก ซึ่งการสกัดและนำกลับไอออนโลหะเหล่านี้จะต้องทำการทดลองที่ใช้เวลาพอสมควร กว่าจะทราบปริมาณของไอออนโลหะที่ถูกสกัดออกมาได้ ดังนั้นการนำเสนอประเด็นสำคัญคือวิธีการของกราฟทำนายผลเพื่อวิเคราะห์จำนวนขั้นตอนของการสกัด ปริมาณของไอออนโลหะที่จะสกัดได้เบื้องต้น และเวลาที่ต้องใช้ในการสกัดโดยไม่ต้องทำการทดลอง จึงช่วยให้สามารถจัดการและวางแผนคัดเลือกชนิดของสารสกัดและตัวทำละลายที่เหมาะสมกับไอออนโลหะที่ต้องการสกัดได้ และเกิดความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์โดยเยื่อแผ่นเหลวเป็นเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่ผลิตจากวัสดุอินทรีย์ประเภทพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ และวัสดุอนินทรีย์ สำหรับการเลือกวัสดุที่ใช้ผลิตเยื่อแผ่นนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำเยื่อแผ่นไปใช้งาน ซึ่งเยื่อแผ่นที่ได้จะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน คือเยื่อแผ่นแบบมีรูพรุนและเยื่อแผ่นแบบแน่นที่ไม่มีรูพรุน เยื่อแผ่นที่ผลิตจากวัสดุพอลิเมอร์จะมีราคาถูก มีน้ำหนักเบา ตัวเยื่อแผ่นสามารถทำให้โค้งงอ และง่ายต่อการขึ้นรูป ส่วนเยื่อแผ่นที่ใช้วัสดุอนินทรีย์นั้นผลิตขึ้นเพื่อทดแทนข้อจำกัดของเยื่อแผ่นที่ใช้วัสดุพอลิเมอร์ เพราะสามารถทนต่อความดันและอุณหภูมิสูงได้ดี ทนต่อสารเคมีได้หลากหลาย และมีอายุการใช้งานนาน กระบวนการแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์ เช่น กระบวนการไดอะไลซิส กระบวนการไมโครฟิล-เตรชัน และกระบวนการเพอแวปพอเรชัน เป็นต้น มีกลไกการถ่ายเทมวลที่แตกต่างกันจึงเหมาะต่อการนำไปใช้งานที่ต่างกัน ในส่วนของการทำความสะอาดและการเก็บรักษาเยื่อแผ่นเป็นสิ่ง จำเป็นและสำคัญ เพราะจะช่วยให้เยื่อแผ่นสามารถใช้งานได้นานและเพิ่มสมรรถนะในการใช้งาน โดยการทำความสะอาดต้องคำนึงถึงชนิดของสารประกอบเชิงซ้อนที่อุดตันอยู่ในรูพรุนของเยื่อแผ่น วัสดุอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่ใช้ผลิตเยื่อแผ่น เวลาที่ต้องใช้ทำความสะอาด ค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้น รวมทั้งความยากง่ายของขั้นตอนการล้าง ซึ่งมีทั้งวิธีทางกายภาพและทางเคมี สำหรับการเก็บรักษาต้องพิจารณาตามหลักการเก็บรักษาเยื่อแผ่นใหม่และเยื่อแผ่นเก่า

คำถามท้ายบท

1) เยื่อแผ่นสังเคราะห์ ที่ผลิตจากวัสดุพอลิเมอร์ สามารถแบ่งได้เป็นกี่กลุ่มอะไรบ้าง
2) เยื่อแผ่นพอลิเมอร์ (ที่ผลิตจากพอลิเมอร์อินทรีย์) แตกต่างจากเยื่อแผ่นอนินทรีย์อย่างไรบ้าง
3) การทำความสะอาดเยื่อแผ่นทำได้กี่วิธีอย่างไรบ้าง
4) ฟาวลิง (fouling) ที่เหลืออยู่ในเยื่อแผ่นคืออะไร
5) ขั้นตอนวิธีการทำความสะอาดเยื่อแผ่นเหลวที่ถูกต้องควรทำอย่างไร
6) เยื่อแผ่นเหลวชนิดเยื่อแผ่นเก่าและเยื่อแผ่นใหม่แตกต่างกันอย่างไรบ้าง
7) การเก็บรักษาเยื่อแผ่นเก่าและเยื่อแผ่นใหม่แตกต่างกันอย่างไรบ้าง
8) จงอธิบายหลักการทำงานของกระบวนการไดอะไลซิส (dialysis process)
9) จงอธิบายหลักการทำงานของดอนแนนไดอะไลซิส (donnan dialysis)
10) กระบวนการแก๊สเพอมิเอชัน (gas permeation process) แบ่งตามชนิดของเยื่อแผ่นและกลไกการทำงานได้อย่างไรบ้างจงอธิบาย
11) กลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ สามารถแบ่งได้เป็นกี่แบบ อะไรบ้าง
12) จงอธิบายขั้นตอนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวมีกี่ขั้นตอน อะไรบ้าง
13) คุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์และวัสดุอนินทรีย์ที่นำมาใช้ผลิตเยื่อแผ่นมีอะไรบ้าง
14) วิธีการของกราฟทำนายผลมีประโยชน์ต่อการสกัดไอออนโลหะอย่างไร
15) วิธีการของกราฟทำนายผลต่างจากวิธีการของ McCabe-Thiele อย่างไร