



บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process)

กระบวนการเมมเบรน เป็นกระบวนการที่อาศัยเยื่อเมมเบรน ในการแยกตัวถูกละลายออกจากสารละลาย ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 แบบสำคัญคือ (1) อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis) ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแยกสารประกอบซึ่งแตกตัวเป็นไอออนได้ออกจากตัวทำละลาย (2) อุลตราฟิวเตรชั่น (Ultrafiltration) ใช้ความดันสูงแยกสารออกจากสารละลาย และ (3) ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) ใช้ความดันสูงแยกสารออกจากตัวทำละลาย

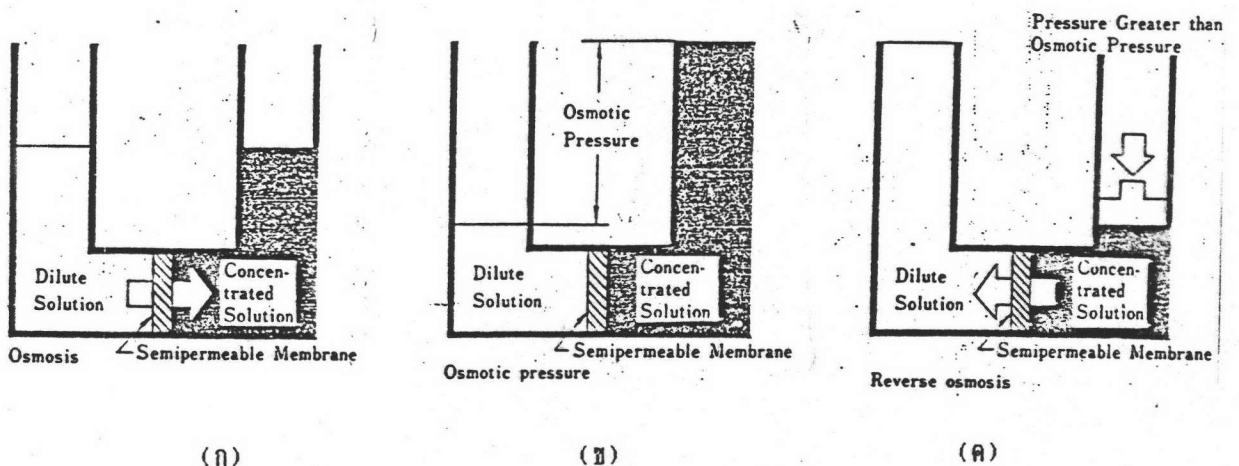
เยื่อเมมเบรนของกระบวนการทั้งสาม มีหน้าที่และขีดความสามารถไม่เท่ากันคือ ดังได้แสดงให้เห็นตามตารางที่ 3.1 (10)

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบกระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส, กระบวนการอุลตราฟิวเตรชั่น และกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ

กระบวนการ	ความเข้มข้น	สารที่แยกออกจากรน้ำได้
อิเล็กโทรไดอะไลซิส	ความดันไฟฟ้า	สารที่แตกตัวเป็นไอออนได้
อุลตราฟิวเตรชั่น	ความดัน 100 ปอนด์/ตร.นิ้ว หรือต่ำกว่า	สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุล มากกว่า 500
ออสโมซิสย้อนกลับ	ความดัน 300-1000 ปอนด์/ ตร.นิ้ว หรือสูงกว่า	เกลือแร่, กรด, ด่าง, สาร อินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 (รวมทั้งแบคทีเรีย ฯลฯ)

3.2 กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

ออสโมซิส (Osmosis) หมายถึง การเคลื่อนที่ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติของน้ำ (ตัวทำละลาย) ผ่านเยื่อเมมเบรนบาง ๆ (Semi-Permeable Membrane) จากสารละลายเจือจางไปยังสารละลายเข้มข้น ดังรูปที่ 3.1(ก) เยื่อเมมเบรนในอุดมคติยอมให้น้ำผ่านได้เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติ โพลีเอทิลีนหรือไอออนบางชนิด อาจไหลผ่านได้เช่นกัน ถ้าปล่อยให้มีการไหลของน้ำผ่านเยื่อเมมเบรนจนกระทั่งถึงจุดสมดุล (ไม่มีการไหลอีก) ระดับน้ำในด้านขวาซึ่งเป็นสารละลายเข้มข้น จะสูงกว่าระดับน้ำในด้านซ้ายซึ่งเป็นสารละลายเจือจางกว่า ดังรูปที่ 3.1(ข) ผลต่างของระดับน้ำนี้เรียกว่าความดันออสโมติก (Osmotic Pressure) ปรากฏการณ์ดังกล่าว เกิดเนื่องจากสารละลายเข้มข้นมีความดันไอ (Vapor Pressure) ต่ำกว่าสารละลายเจือจาง ถ้ามีความดันที่มีค่าสูงกว่าความดันออสโมติกมากกระทำต่อด้านที่มีสารละลายเข้มข้น น้ำจะไหลย้อนกลับดังรูปที่ 3.1 (ค) เป็นการต้านการไหลตามธรรมชาติ (11)



รูปที่ 3.1 ปรากฏการณ์ออสโมซิสและออสโมซิสย้อนกลับ

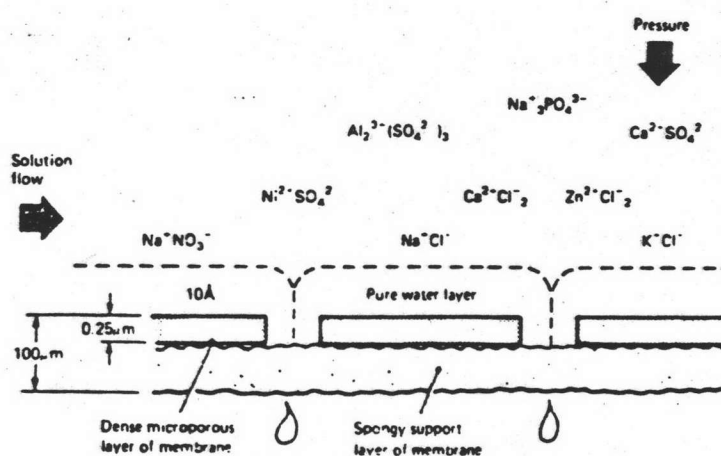
3.3 กลไกการทำงานของออสโมซิสย้อนกลับ

ออสโมซิสย้อนกลับ กำจัดเกลือและสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ด้วยกลไกที่แตกต่างจากกลไกของการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) หรือการดูดซับผิว (Adsorption) นักวิจัยเชื่อว่า กระบวนการออสโมซิสมีกลไกในการกำจัดเกลือแร่ (ไอออนต่าง ๆ) ต่างจากกลไก

การกำจัดสารอินทรีย์

3.3.1 กลไกการกำจัดเกลือต่าง ๆ

ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (10) เมมเบรนชั้นบนที่มีความสำคัญโดยทำหน้าที่กำจัดเกลือแร่และสารอินทรีย์ ชั้นล่างซึ่งมีเนื้อพรุน และหนามาก ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับกลไกในการกำจัดเกลือแร่ (Salt Rejection) ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนวาเลนซ์ (Valence) ของไอออนต่าง ๆ ไอออนที่มีวาเลนซ์สูงจะถูกเมมเบรนผลักได้ไกลกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ แรงผลักนี้เชื่อว่าเกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงกระทำต่อกันของประจุไฟฟ้า (Dielectric Interaction) ไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 1 จะถูกผลักให้อยู่ห่างจากผิวเมมเบรนประมาณ 1 ไมครอน ซึ่งห่างเท่า



รูปที่ 3.2 กลไกการกำจัดเกลือต่าง ๆ ของระบบออสโมซิสย้อนกลับ

กับน้ำ 2 โมเลกุลต่อกัน แรงผลักดันระหว่างเกลือและเมมเบรนทำให้เกิดชั้นน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งปกคลุมผิวหน้าของเมมเบรน และเชื้อเข้าไปถึงช่องว่างของเมมเบรนด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านชั้นเมมเบรนมิใช่เป็นการเคลื่อนที่อย่างสะดวกสบาย เหมือนการไหลผ่านท่อ น้ำ นักวิจัยเชื่อว่าน้ำไหลผ่านเมมเบรนทีละโมเลกุล โดยซึมเข้าไปในช่องว่างของโครงสร้างสามมิติของสารอินทรีย์ที่ใช้ทำเมมเบรน เมมเบรนที่ผลิตได้ในปัจจุบันยังไม่สมบูรณ์ถึงขั้นอุดมคติ จึงยังมีการรั่วของไอออนต่าง ๆ เกิดขึ้นได้ประมาณ 1-10 % (ของความเข้มข้นทั้งหมด) เนื่องจากไอออนที่มี

วาเลนซ์ต่ำ เช่น Na^+ , Cl^- , K^+ , NO_3^- เป็นต้น ถูกผลักน้อยที่สุด จึงอยู่ใกล้เมมเบรนมากที่สุด ไอออนเหล่านี้จึงรั่วผ่านเมมเบรนได้ดีกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์สูง ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความสามารถของกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ ในการกำจัดเกลือต่าง ๆ

Name	Rejection, %	Average passage, %	Maximum concentration, %
<i>Cations</i>			
Sodium (Na^+)	94-96	5	3-4
Calcium (Ca^{2+})	96-98	3	†
Magnesium (Mg^{2+})	96-98	3	†
Potassium (K^+)	94-96	5	3-4
Iron (Fe^{2+})	98-99	2	†
Manganese (Mn^{2+})	98-99	2	†
Aluminium (Al^{3+})	99†	1	5-10
Ammonium (NH_4^+)	88-95	8	3-4
Copper (Cu^{2+})	98-99	1	8-10
Nickel (Ni^{2+})	98-99	1	10-12
Zinc (Zn^{2+})	98-99	1	10-12
Strontium (Sr^{2+})	96-99	3	-
Hardness (Ca and Mg)	96-98	3	†
Cadmium (Cd^{2+})	96-98	3	8-10
Silver (Ag^+)	94-96	5	†
Mercury (Hg^{2+})	96-98	3	-
<i>Anions</i>			
Chloride (Cl^-)	94-95	5	3-4
Bicarbonate (HCO_3^-)	95-96	4	5-8
Sulphate (SO_4^{2-})	99†	1	8-12
Nitrate (NO_3^-)	93-96	6	3-4
Fluoride (F^-)	94-96	5	3-4
Silicate (SiO_2^{2-})	95-97	4	-
Phosphate (PO_4^{3-})	99†	1	10-14
Bromide (Br^-)	94-96	5	3-4
Borate ($\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$)	35-70‡	-	-
Chromate (CrO_4^{2-})	90-98	6	8-12
Cyanide (CN^-)	90-95‡	-	4-12
Sulphite (SO_3^{2-})	98-99	1	8-12
Thiosulphate ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$)	99†	1	10-14
Ferrocyanide ($\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$)	99†	1	8-14

† Must watch for precipitation; other ion controls maximum concentration.

‡ Extremely dependent on pH; tends to be an exception to the rule.

ด้วยเหตุนี้ สารประกอบที่มี Na^+ จึงรั่วออกจากกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับได้ง่ายกว่าสารประกอบที่มี Ca^+ ฟอสเฟตจึงถูกกำจัดได้ดีกว่า SO_4^- หรือ Cl^- สารอนินทรีย์ที่ไม่มีประจุไฟฟ้า เช่น ก๊าซต่าง ๆ จะไม่ถูกผลักจากเมมเบรน กระบวนการออส

การออสโมซิสย้อนกลับ ในการกำจัดออกได้

ตารางที่ 3.3 ความสามารถของออสโมซิสในการกำจัดสารอินทรีย์

	Molecular weight	Rejection, %	Maximum concentration, %
Sucrose sugar	342	100	25
Lactose sugar	360	100	25
Protein	10 000+	100	10-20
Glucose	198	99.9	25
Phenol	94	†	—
Acetic acid	60	†	—
Formaldehyde	30	†	—
Dyes	400-900	100	—
Biochemical oxygen demand (BOD)		90-99	—
Chemical oxygen demand (COD)		80-95	—
Urea	60	40-60	Reacts similar to a salt
Bacteria and virus	50 000-500 000	100	—
Pyrogen	1000-5000	100	—

† Permeate is enriched in material due to preferential passage through the membrane.

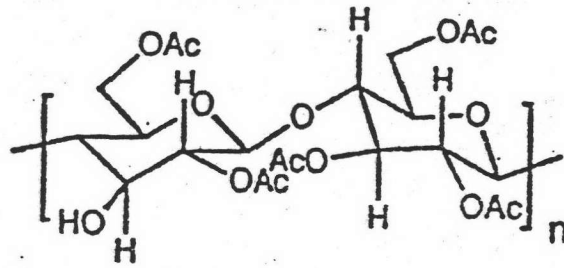
3.4 เมมเบรนสำหรับใช้กับกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ

ตั้งแต่ต้นทศวรรษปี 1970 ระบบออสโมซิสย้อนกลับได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อใช้ในกระบวนการดีซอลิเนชั่น (Desalination) ของน้ำกร่อย โดยเมมเบรนที่มีคุณสมบัติการไหลผ่านจำเพาะ (Specific Permeability) จะให้ฟลักซ์ (Flux) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของเมมเบรน คุณสมบัติสำคัญของเมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับคือ อัตราฟลักซ์, รีเจกชัน และความทนทานโดยรีเจกชันของเมมเบรนจะแปรเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบของตัวถูกละลายในน้ำป้อน พวกละลายที่เป็นมัลติเวเลนซ์ (Multivalent) จะถูกแยกได้ดีกว่าสารที่เป็นโมโนเวเลนซ์ (Monovalent) นอกจากนี้การเสื่อมสลายโดยสารเคมี และเชื้อจุลินทรีย์ รวมถึงการอุดตัน, พับตัว และการหลุดร่อน ก็มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเมมเบรนแต่ละชนิด

ปัจจุบัน เมมเบรนที่นิยมใช้กับระบบออสโมซิสย้อนกลับ สามารถแยกประเภทใหญ่ ๆ คือ เมมเบรนที่ผลิตจากโพลีเมอร์ (Polymer) ของเซลลูโลส และของโพลีเอไมด์ (Polyamide) โดยแสดงข้อมูลเปรียบเทียบดังต่อไปนี้

3.4.1 เมมเบรนที่ผลิตจากโพลีเมอร์ของเซลลูโลส (Cellulose)

ได้แก่เซลลูโลสอะซิเตด (Cellulose Acetate) และเซลลูโลสได-ไตรอะซิเตด (Cellulose Di-Triacetate) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง Reid และ Breton (12) พบว่าเมมเบรนชนิดนี้สามารถให้เปอร์เซ็นต์รีเจกชัน (% Rejection) ได้ประมาณ 86-89 % ของอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) สารประกอบของเมมเบรนไม่สามารถทนกรด หรือด่าง หรืออุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส เพราะจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เมมเบรนเสื่อมสภาพ



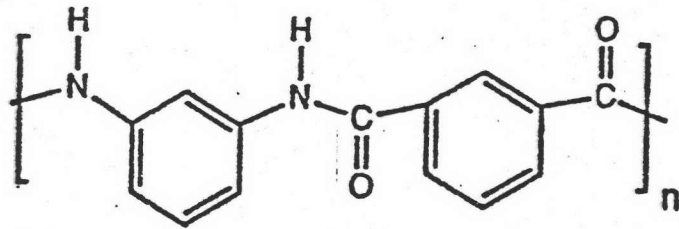
รูปที่ 3.4 โครงสร้างโมเลกุลโพลีเมอร์ของเซลลูโลสได-ไตรอะซิเตด (Cellulose Di-Triacetate)

อย่างไรก็ตาม เมมเบรนชนิดนี้มีความทนทานต่อออกซิไดซิงเอเจนต์ (Oxidizing Agent) ได้ดี (ทนต่อคลอรีนไม่เกิน 1 มก./ล.) ให้อัตราไหลที่สูงเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิว ซึ่งมักใช้ในรูปโมดูลแบบท่อ (Tubular Module) และแบบม้วน (Spiral Wound Module) มีอายุการใช้งานไม่มากนัก

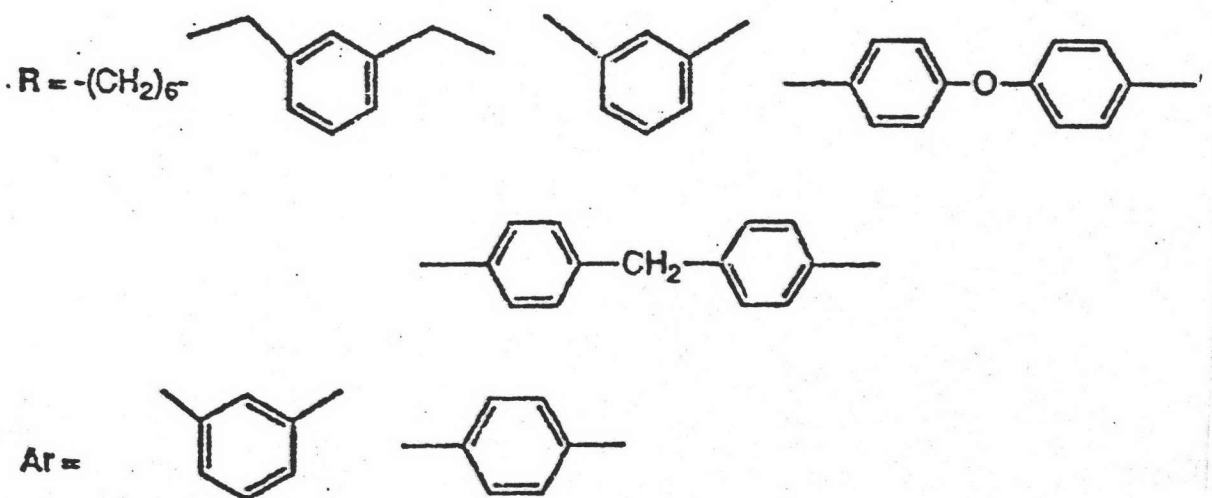
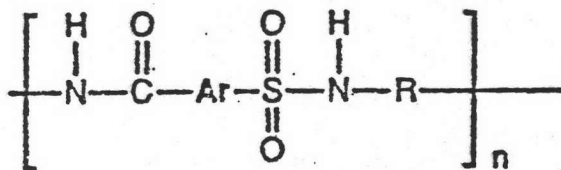
3.4.2 เมมเบรนที่ผลิตจากโพลีเมอร์ของโพลีเอไมด์

ได้แก่ Polyamides และ Poly(amide-sulfonamides) ดังแสดงโครงสร้างโมเลกุลในรูปที่ 3.5 ก. และ ข. ตัวอย่างเมมเบรนโพลีเอไมด์ ได้แก่ Poly(m-phenyleneisophthalamide)

จากการศึกษาของ McKinney และ Rhodes เมมเบรนประเภทนี้ให้เปอร์เซ็นต์รีเจกชันของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จากอิเล็กโตรไลต์ 500 พีพีเอ็ม (ppm) ถึง 98 % ที่แรงดัน 1000 ปอนด์/ตร.นิ้ว อัตราฟลักส์ 2.5 แกลลอน/วัน.ตร.ฟุต (g.f.d)



รูปที่ 3.5 ก. โครงสร้างโมเลกุลของ Poly(m-phenyleneisophthalamide)



รูปที่ 3.5 ข. โครงสร้างโมเลกุลของ Poly(amide-sulfonamides)

เมมเบรนชนิดนี้ มีความคงทนต่อพีเอช และอุณหภูมิได้ดีกว่าชนิดแรก แต่สามารถทนทานต่อออกซิไดซิ่งเอเจนต์ได้ต่ำ (ทนต่อคลอรีนได้ไม่เกิน 0.1 มก./ล.) ให้อัตราการไหลจำเพาะ (Specific Rate of Flow) ต่ำกว่าชนิดแรก ในขณะที่อายุการใช้งานนานกว่า มีความทนทานต่อการเสื่อมสลายจากสารเคมีและเชื้อจุลินทรีย์ (Chemical and Biological Degradation) ดีกว่าชนิดแรก ดังแสดงข้อมูลเปรียบเทียบในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับบางชนิด ที่นิยมใช้ในทางการค้า

Type	Maker	Polymer	pH Range	Temp. Limit	Fouling Resistance	Cl ₂ Tolerance	Bacteria Resistance	% Rejection		
								50 psi	200 psi	400 psi
Spiral wound	Many	CA	2-8	95°F	Good	Good	Poor	80%	95%	97%
Hollow fiber	Dow	CTA	4-7.5	95°F	Poor	Good	Fair	70%	90%	95%
Spiral wound	UOP	Polyetheramide	2-12	110°F	Good	Poor	Good	90%	95%	95%
Hollow fiber	DuPont	Aromatic Polyamide	4-11	95°F	Poor	Poor	Good	80%	85%	90%
Spiral wound	FilmTec	Modified Aromatic Polyamide	3-11	120°F	Good	Fair	Good	92%	95%	95%

3.5 โมดูลชนิดต่าง ๆ ของระบบออสโมซิสย้อนกลับ

ปัญหาอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณา ในการใช้แผ่นเมมเบรนสำหรับแยกสารจากน้ำ คือ จะนำแผ่นเมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไร ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงปัจจัยดังต่อไปนี้

- (ก) เนื่องจากเมมเบรนมีความหนาน้อยมาก และเปราะ แต่ต้องรับความดันสูงประมาณ 200-1000 ปอนด์/ตร.นิ้ว จึงต้องการอุปกรณ์รองรับที่สามารถป้องกันมิให้แผ่นเมมเบรนแตกหักได้ง่าย แต่ในขณะที่เดียวกันต้องมีทางให้ตัวทำละลายไหลทะลุผ่านเมมเบรนได้ด้วย

- (ข) ภาชนะบรรจุเมมเบรนหรือโมดูล (module) ต้องออกแบบให้กระตัดรัดและสามารถบรรจุแผ่นเมมเบรนได้มากที่สุด
- (ค) ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization) ต้องเกิดขึ้นน้อย
- (ง) การอุดตันเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ ต้องเกิดขึ้นน้อยที่สุด และทำความสะอาดได้ง่าย
- (จ) ต้องไม่มีรอยรั่วเกิดขึ้นตามรอยต่อต่าง ๆ ของระบบ

ตารางที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของโมดูลออสโมซิสย้อนกลับทั้ง 4 แบบ

ชนิดของโมดูล	ชนิดของเมมเบรน	Packing Density* (m^2/m^3)	พีเอช	ความสะอาดในการล้าง	Salt Rejection	Water Flux** (m^3/m^2 -day)
แบบแผ่น	เซลลูโลส อะเซเตต	150	2-8	พอใช้	ดีมาก	0.5
แบบท่อ	เซลลูโลส อะเซเตต	450	2-8	ดีมาก	ดีมาก	0.5
แบบม้วน	เซลลูโลส อะเซเตต	750	2-8	ดี	ดีมาก	0.5
แบบเส้นใยกลวง	โพลีเอไมด์	7500- 15,000	4-11	พอใช้	ดี	0.5- 0.2

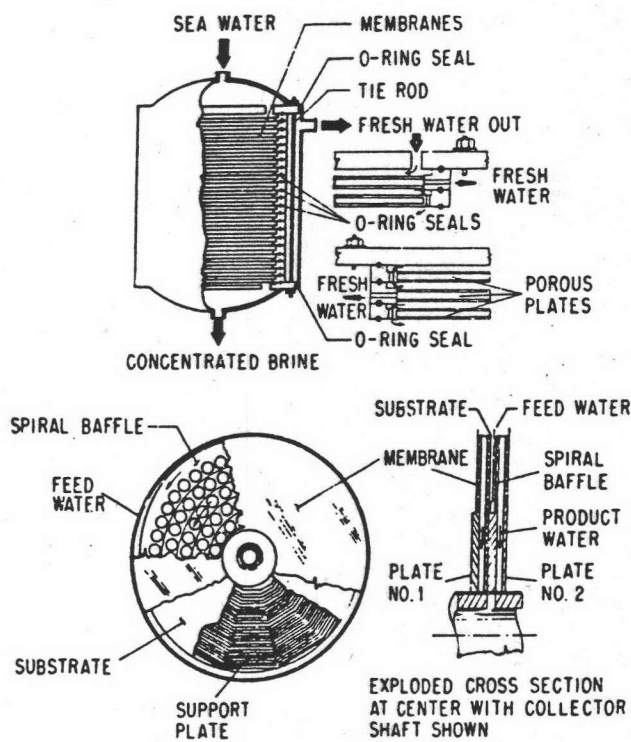
* พื้นที่เมมเบรนต่อปริมาตรของโมดูล

** ที่แรงดัน 40 บรรยากาศ

ในปัจจุบันนี้ มีการสร้างโมดูลออสโมซิสย้อนกลับแบบต่าง ๆ 4 แบบ คือ แบบแผ่น (Plate and Frame) แบบท่อ (Tubular) แบบม้วน (Spiral) และแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber) ข้อแตกต่างกันของโมดูลทั้ง 4 แบบสรุปอยู่ในตารางที่ 3.5

3.5.1 โมดูลแบบแผ่น (Plate and Frame Module)

เทคนิคนี้เป็นการจัดแผ่นเมมเบรนที่ง่ายที่สุด (ดูรูปที่ 3.6) โมดูลที่ใช้เทคนิคนี้มีลักษณะการทำงานคล้ายเครื่องกรองความดัน (Filter Press) แผ่นเมมเบรนวางอยู่บนแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน (Porous Plate) หรือแผ่นรองรับที่มีร่องให้น้ำไหลออกได้ เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางซ้อนและสลับกัน น้ำหรือตัวทำละลายจะถูกบังคับให้ซึมผ่านเมมเบรนและแผ่นรองรับและไหลออกจากโมดูล

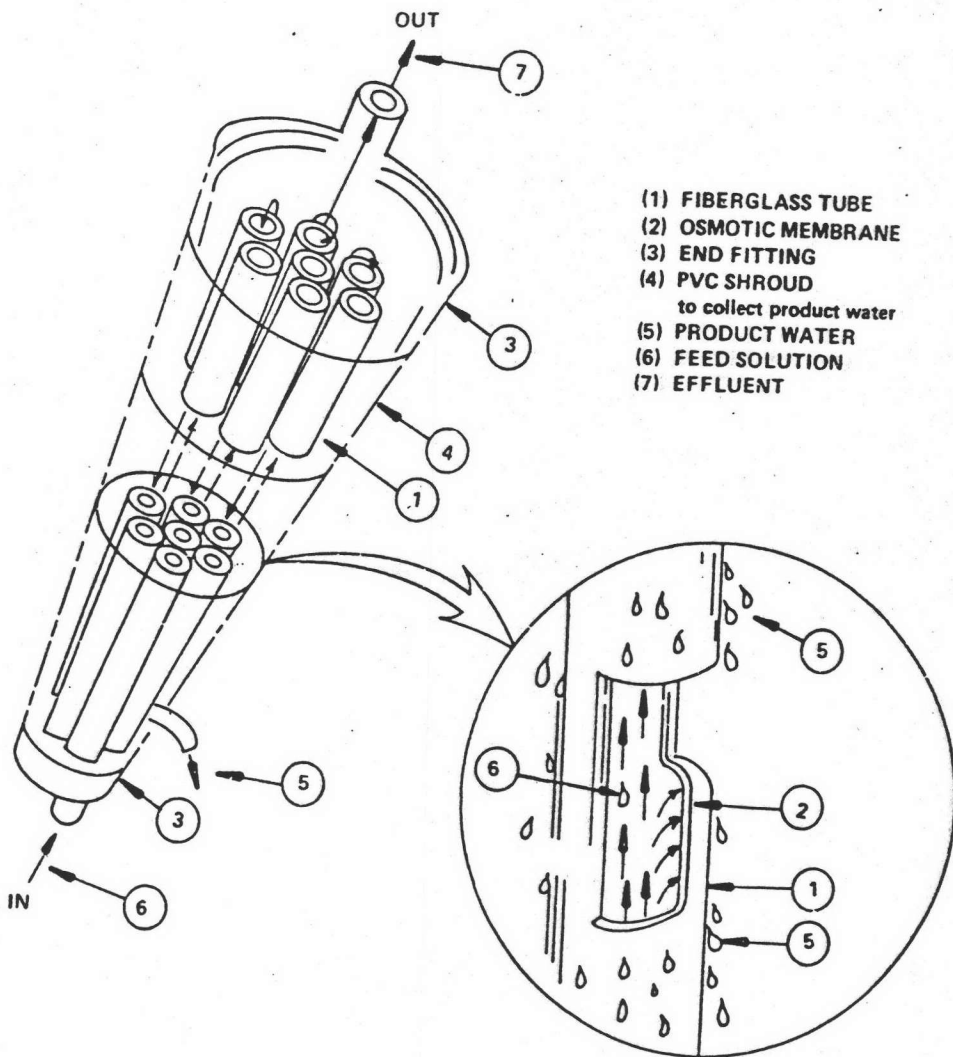


รูปที่ 3.6 แสดงโมดูลแบบแผ่น

3.5.2 โมดูลแบบท่อ (Tubular Module)

วิธีนี้เป็นการม้วนแผ่นเมมเบรนให้เป็นหลอดหรือท่อขนาดเล็ก ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12 มิลลิเมตร และยึดติดไว้ภายในท่ออีกอันหนึ่ง ที่ทำด้วยกระดาษ หรือใยสังเคราะห์ (ดูรูปที่ 3.7) และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับแผ่นเมมเบรน มิให้ฉีกขาดในระ

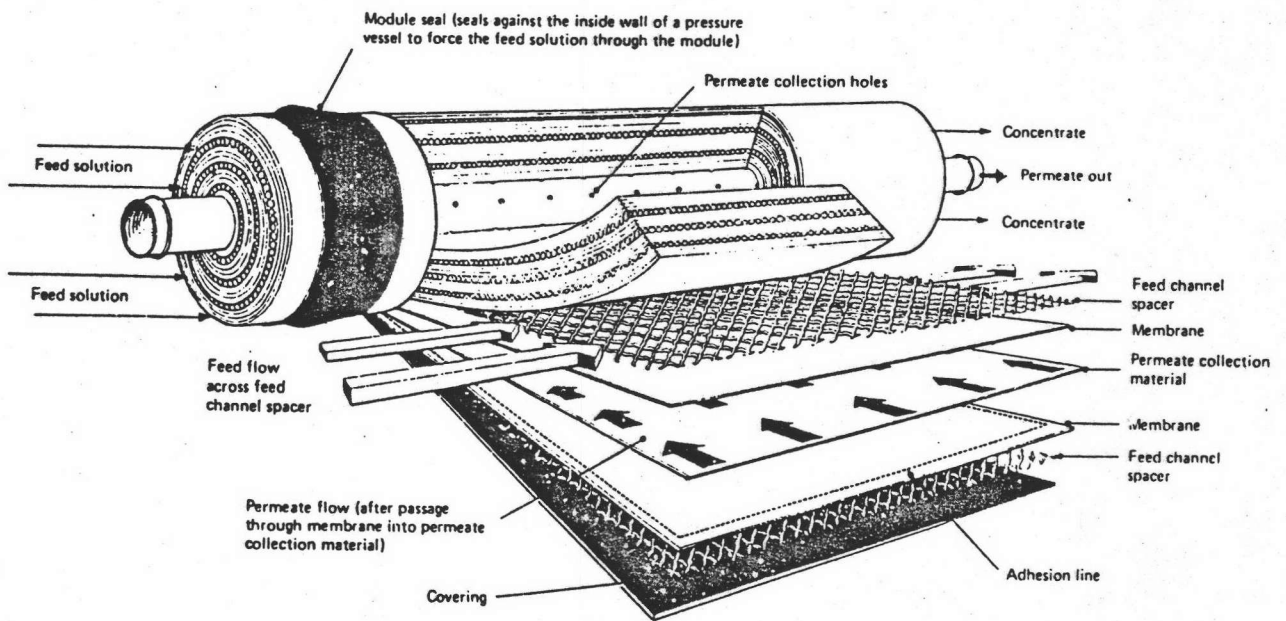
ระหว่างการใช้งาน และใช้เป็นทางออกของน้ำหรือตัวทำละลายที่ผ่านเมมเบรนอีกด้วย สารละลายเริ่มต้นจะถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อที่มีแผ่นเมมเบรนอยู่ภายใน ความดันของสารละลายทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายสามารถซึมผ่านเมมเบรนและท่อรองรับ ออกไปสู่ภายนอก



รูปที่ 3.7 แสดงโมดูลแบบท่อ

3.5.3 โมดูลแบบม้วน (Spiral Wound Module)

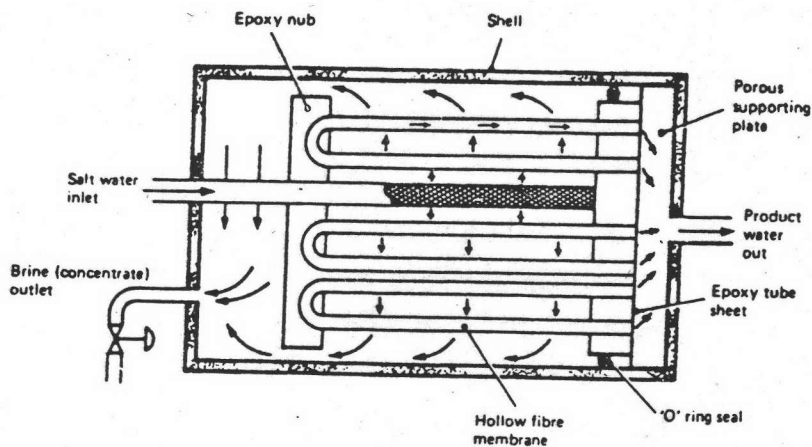
โมดูลแบบม้วนประกอบด้วยเมมเบรน 2 แผ่นประกบกันโดยมีแผ่นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่กึ่งกลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นแบบทั้งสามรอบท่อเจาะรู โดยมีแผ่นตะแกรงทำด้วยโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) คลุมปิดอยู่ด้านนอก (ดูรูปที่ 3.8) ขอบของแผ่นเมมเบรนทั้งสามด้านถูกอุดไว้ด้วยกาวพิเศษ ขอบที่เหลือปล่อยให้เปิดตามปกติและยึดติดกับท่อเจาะรู ลักษณะเช่นนี้ทำให้สารละลายถูกบังคับให้ไหลไปยังท่อเจาะรูเสมอ การม้วนเมมเบรน, แผ่นรองรับ, และตะแกรงพลาสติก ทำให้ได้โมดูลรูปทรงกระบอกที่สามารถบรรจุไว้ในท่อโลหะธรรมดาได้ โมดูลแบบนี้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5, 10, 20, หรือ 30 เซนติเมตร และมีความยาวต่าง ๆ กันแต่ไม่เกิน 1 เมตร สารละลายจะไหล (ในแนวแกนของโมดูล) เข้าไปตามแผ่นตะแกรงจากนั้นแรงอัดทำให้สารละลายซึมผ่านเมมเบรน (ตามแนวแกนรัศมีของโมดูล) ลงถึงแผ่นรองรับซึ่งทำหน้าที่ส่งสารละลายที่ผ่านเมมเบรน ไปยังท่อเจาะรูออกจากโมดูล



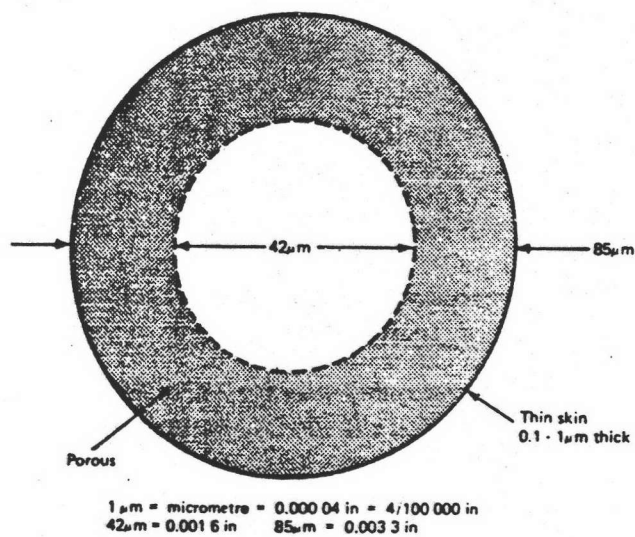
รูปที่ 3.8 แสดงโมดูลแบบม้วน

3.5.4 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module)

แผ่นเมมเบรนที่ใช้ในโมดูลทั้งสามชนิดที่กล่าวมาแล้ว ล้วนทำมาจากเซลลูโลสอะซิเตด แต่โมดูลแบบเส้นใยกลวงมักใช้เมมเบรนที่ทำมาจากวัสดุโพลีเอไมด์ (Polyamide) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกประมาณ 50-85 ไมครอน และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณครึ่งหนึ่งของภายนอก ส่วนเส้นใยกลวงที่ทำจากเซลลูโลสอะซิเตด มี



รูปที่ 3.9 ก. แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของโมดูลแบบเส้นใยกลวง

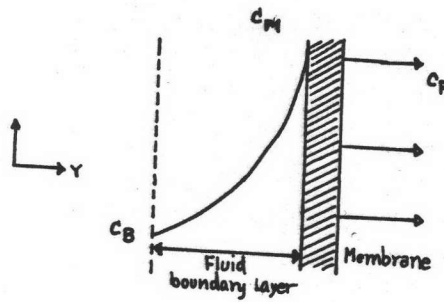


รูปที่ 3.9 ข. แสดงขนาดของเส้นใยกลวง

เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกประมาณ 200-300 ไมครอน ให้นำเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมาใช้ประโยชน์กระทำได้โดยนำมาวมกันเป็นมัด ๆ และงอพับเป็นรูปเกือกม้าหรือตัว U ปลายทั้งสองข้างของเส้นใยทั้งมัดถูกตรึงติดอยู่กับทางสารละลายออก เส้นใยเมมเบรนทั้งหมดวางอยู่ในตรงกลางของถังทรงกระบอก และกระจายสารละลายไปยังส่วนต่าง ๆ ความดันทำให้สารละลายซึมเข้าเส้นใยเมมเบรน และทะลุถึงภายใน สารละลายที่ผ่านเมมเบรนจะซึมไปตามรูกลวงของเส้นใยและไปรวมกันที่ทางออก

3.6 ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ

3.6.1 คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization)



รูปที่ 3.10 ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน

ปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการไหลผ่านเมมเบรน สารละลายจะถูกบังคับให้ซึมผ่านเมมเบรนออกไปอีกด้าน โมเลกุลของตัวถูกละลายจะสะสมไว้ที่ผิวเมมเบรน ทำให้การสะสมของโมเลกุลที่ผิวของเมมเบรนนั้นเร็วขึ้น ๆ จนทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างที่ผิวของเมมเบรน กับบริเวณที่อยู่ห่างออกไป เรียกว่า Boundary Layer ความหนาของชั้นดังกล่าวแปรผกผันกับอัตราไหลของสารละลายและความปั่นป่วน ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีผลกระทบต่อกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ ดังนี้

- ก. ทำให้ความดันออสโมติกสูงขึ้น เป็นผลให้เพอมีเอชันฟลักส์ลดลง
- ข. ทำให้มีการรั่วไหลของตัวถูกละลายผ่านเมมเบรนมากขึ้น

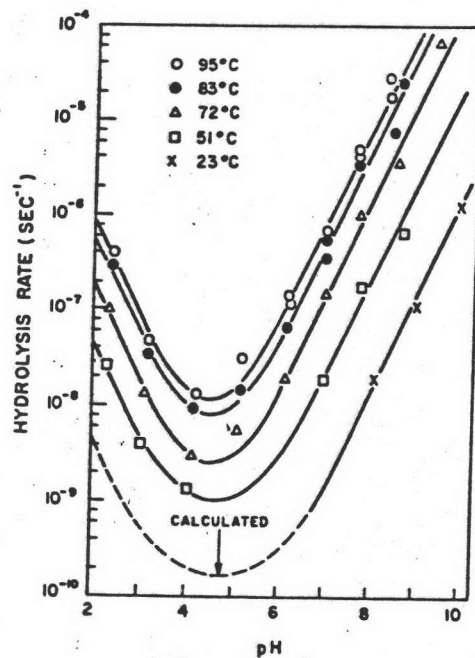
ค. เร่งเมมเบรนให้เสื่อมสภาพเร็วขึ้น

ง. ทำให้การตกผลึกของสารประกอบบางชนิด เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และ/หรือ แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) หรือสารประกอบอื่น ๆ

โดยจะได้กล่าวถึงการคำนวณเพื่ออธิบายปรากฏการณ์นี้ จะได้แสดงในลำดับต่อไป

3.6.2 อุณหภูมิและพีเอช

การเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายแต่ละองศาในช่วง 15-30 องศาเซลเซียส ช่วยให้ความเข้มข้นฟลักซ์ของน้ำเพิ่มตามไปด้วยประมาณ 3-5 % แต่ไม่เพิ่มฟลักซ์ของตัวถูกละลาย



รูปที่ 3.11 อัตราปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเมมเบรนเซลลูโลสอะซิเตต

(Cellulose Acetate, acetyl content 39.8 wt.%)

และการที่เมมเบรนเป็นสารอินทรีย์เอสเตอร์ (Organic Ester) ซึ่งสามารถสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ออกฤทธิ์และมีพิษจึงมีบทบาทสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาแปรตามอุณหภูมิของน้ำ และจะช้าที่สุดเมื่อมีพิษอยู่ในช่วง 4-5 ด้วยเหตุนี้ ถ้าต้องการให้เมมเบรนมีอายุยืนนาน ควรรักษาพิษให้อยู่ในช่วง 3-7 และไม่ใช้กับสารละลายที่มีอุณหภูมิสูง

3.6.3 ความดัน

ความดันมีอิทธิพลโดยตรงต่อเพอมีเอชันฟลักซ์ ของกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ อย่างมาก แต่แทบไม่มีผลกระทบต่ออัตราเร็วของตัวถูกละลาย (Solute Flux) อย่างไรก็ดี ความดันสูงก็สามารถสร้างผลเสียได้เช่นกัน ทั้งนี้เพราะความดันทำให้โครงสร้างของเมมเบรนเกิดการอัดตัวแน่น (Compaction) ทำให้เพอมีเอชันฟลักซ์ลดลงเรื่อย ๆ ระหว่างใช้งาน

3.6.4 ความเข้มข้นของสารละลาย

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ทำให้ฟลักซ์ของตัวถูกละลายผ่านเมมเบรนมากขึ้น และความดันออสโมติกก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

3.7 การคำนวณ

3.7.1 ความดันออสโมติก

ตัวถูกละลายบริสุทธิ์ B และสารละลายของสาร A ใน B ที่สภาวะเริ่มต้น อุณหภูมิ T และ ความดัน P ถูกขึ้นด้วยเมมเบรน มีความดัน $\Delta P_{osmotic}$ กดด้านสารละลายเพื่อทำให้ทั้งสองด้านของเมมเบรนสมดุล (ไม่มีการแพร่ผ่านของสาร) ดังรูป 3.1 จะพบว่าสมดุลของ chemical potential (13)

$$\mu(T, P, X_B=1) = \mu(T, P+\Delta P_{OSM}, X_B) \quad (1)$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันด้านสารละลาย พบว่า

$$\begin{aligned}\Delta\mu &= \mu(T, P+\Delta P_{OSM}, X_B) - \mu(T, P, X_B) \\ &= (1/RT) \int_P^{P+\Delta P} V_B dP \\ &= -RT \ln a_B = -RT \ln \gamma_B X_B\end{aligned}\quad (2)$$

ความดันออสโมติก , $\pi_B = (-RT/V_B) \ln (X_B \gamma_B)$ (3)

โดย R = ค่าคงที่ของก๊าซ

V_B = ปริมาตรของโมลขององค์ประกอบ B

X_B = สัดส่วนโมลขององค์ประกอบ B

γ_B = สัมประสิทธิ์แอกติวิตีขององค์ประกอบ B ในสารละลาย

3.7.2 ปรากฏการณ์ออสโมซิสย้อนกลับ

การเอาชนะความดันออสโมติก โดยให้ความดันกระทำด้าน (14) พบว่า

$$\Delta\mu_B = V_B (\Delta P - \Delta\pi) \quad (4)$$

ฟลักซ์ของสารทำละลาย B

$$N_B = -C_{BM} M_{BM} (d\mu_A/dy) = -C_{BM} M_{BM} \Delta\mu_B/\theta \quad (5)$$

ซึ่ง

N_B คือ เอมิเอชันฟลักซ์ของสารทำละลาย B

θ คือ ความหนาของเมมเบรน

C_{BM} คือ ความเข้มข้นของสาร B ในเนื้อเมมเบรน

M_{BM} คือ ค่า mobility ของสาร B

D_{BM} คือ Fick's law diffusion coefficient ของสาร B ในเนื้อเมมเบรน

$$D_{BM} = M_{BM} RT \quad (6)$$

จะได้ว่า

$$N_B = \frac{-C_{BM} D_{BM} V_B (\Delta P - \Delta\pi)}{RT\theta} \quad (7)$$

สรุปคือ $N_B = A (\Delta P - \Delta \pi)$ (8)

หรือ $= (\Delta P - \Delta \pi) / R_o$ (9)

โดย A คือ ค่าคงที่ของเมมเบรน

R_o คือ ค่าการต้านทานรวม (15)

อย่างไรก็ตามผลต่างของความดันบนเมมเบรน ไม่มีผลต่อการดูดซึมของตัวถูกละลาย A

$$N_A = -D_{AM} \Delta C_{AM} / \delta = -D_{AM} K_A \Delta C_A / \delta \quad (10)$$

$$= B \Delta C_A \quad (11)$$

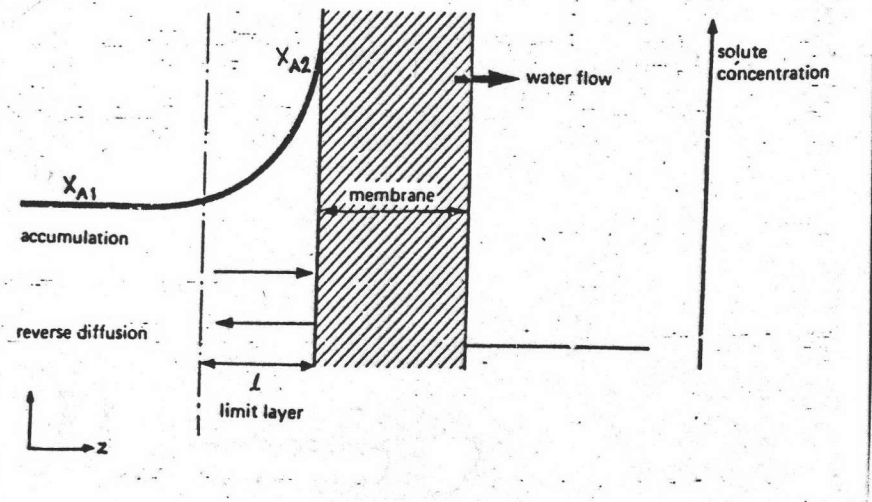
โดย N_A คือ เอมิเอชั่นฟลักซ์ของตัวถูกละลาย A

D_{AM} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร A ในเมมเบรน

K_A คือ ค่าคงที่ Distribution coefficient

B คือ สัมประสิทธิ์การไหลของสารละลายผ่านเมมเบรน

3.7.3 คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization)



รูปที่ 3.12 การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน

ปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการไหลผ่านเมมเบรน คือโมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกกักไว้ที่ผิวเมมเบรน ทำให้การสะสมของโมเลกุลที่ผิวของเมมเบรนมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่าง ที่ผิวของเมมเบรน กับบริเวณที่อยู่ห่างไกลออกไป ดังในรูปที่ 3.12 ผลที่เกิดขึ้นคือ เกิดการถ่ายเทกลับทิศทางของตัวถูกละลายจากผิวของเยื่อแผ่นไปยังสารละลาย (Bulk solution) ที่สภาวะคงตัว (Steady state) สมดุลย์ของตัวถูกละลายเขียนสมการได้ดังนี้

การถ่ายเทมวลสารด้านความดันสูงของเมมเบรน เนื่องจากตัวถูกละลายชั้นขอบเขตมีการแพร่กลับไปยังส่วนของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นต่ำกว่าของบริเวณผิวหน้าเมมเบรนด้านความดันสูง ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้น สามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีแผ่นฟิล์ม (film theory) (5) ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราที่ตัวถูกละลายผ่านเมมเบรน} &= \text{อัตราที่ตัวถูกละลายเข้าสู่เมมเบรน} \\ &- \text{อัตราการแพร่ของตัวถูกละลาย} \end{aligned} \quad (12)$$

จะได้ว่า

$$N_A = X_A(N_A + N_B) - D_{AB} c_1 (dX_A/dz) \quad (13)$$

- เมื่อ
- N_A = เวมโมเอชันฟลักซ์ของสารละลาย
 - X_A = สัดส่วนโมลของตัวถูกละลาย
 - D_{AB} = สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลาย
 - c = ความหนาแน่นโมลในสารละลาย
 - z = ระยะทิศทางความหนาของชั้นขอบเขต
- ตัวห้อย
- 1 = สารละลายใน bulk
 - 2 = สารละลายในชั้นขอบเขต
 - 3 = สารละลายในเพอมีเอต

สภาวะขอบเขต (Boundary condition) ของสมการ (13) คือ

$$\text{ที่ } z = 0, \quad X_A = X_{A1}$$

$$z = 1, \quad X_A = X_{A2}$$

เมื่อ l เป็นความหนาของชั้นขอบเขต

และจากความสัมพันธ์

$$N_A = N_B [X_{A3} / (1 - X_{A3})] \quad (14)$$

อินทิเกรต สมการ (13) จะได้

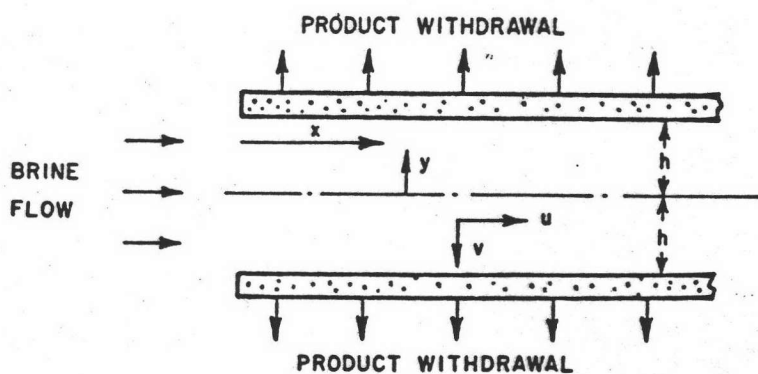
$$N_B = (D_{AB}/l) c_1 (1 - X_{A3}) \ln[(X_{A2} - X_{A3}) / (X_{A1} - X_{A3})] \quad (15)$$

หรือ

$$N_B = k c_1 (1 - X_{A3}) \ln[(X_{A2} - X_{A3}) / (X_{A1} - X_{A3})] \quad (16)$$

เมื่อ $k = D_{AB}/l =$ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของตัวถูกละลาย

จากสมการ (16) จะเห็นได้ว่า ค่าเพมิเอชันฟลักส์จะสูงขึ้นเมื่อค่า k สูงขึ้น ค่า k อาจหาได้จากสมการถ่ายเทมวล สำหรับระบบที่เป็นแผ่นเรียบคู่ขนานกัน ห่างกัน $= 2h$ ตามรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 สารละลายไหลผ่านเมมเบรนแผ่นเรียบคู่ขนาน

(Flat Parallel Membranes)

ได้มีการเสนอค่า Sherwood Number ดังนี้ (5)

$$N_{Sh} = 4kh/D = 0.023(N_{Re})^{0.8}(N_{Sc})^{0.33} \quad (17)$$

เมื่อ N_{Sh} = Sherwood Number

N_{Re} = Reynolds Number

N_{Sc} = Schmidt Number

สมการ (17) แสดงว่า ค่า k มากขึ้นเมื่อ N_{Re} , N_{Sc} และ D_{AB} มีค่าสูงขึ้น และลดลงเมื่อ h มีค่ามากขึ้น แต่เนื่องจาก D_{AB} และ N_{Sc} ไม่ขึ้นกับสภาวะการทำงานของระบบ ฉะนั้นตัวแปรที่ปรับได้ คือ N_{Re} และ h เท่านั้น การเพิ่ม N_{Re} อาจทำได้โดยกวนสารละลาย หรือเพิ่มความเร็วของสารละลาย ซึ่งจะมีผลให้เกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันลดลง และการที่ค่า k เพิ่มขึ้นนี้ จะมีผลให้เพอมีเอชันฟลักส์เพิ่มขึ้นด้วย ดังสมการ (16)

3.7.4 การคำนวณค่าต่าง ๆ ในการทดลอง

3.7.4.1 ความดันออสโมติก

นอกจากการหาความดันออสโมติก โดยการคำนวณจากสมการ

(3) แล้วเราสามารถหาได้จากกราฟในสมการ (8) และ (9) โดยพบว่าความดันออสโมติกเท่ากับความดันที่เพอมีเอชันฟลักส์เป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวยังอาจมีข้อผิดพลาดเนื่องจาก :

- ก. จากสมการดังกล่าว ไม่คำนึงถึงการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ซึ่งอาจมีขึ้นที่ผิวหน้าของเมมเบรนในสภาวะการทดลอง
- ข. เป็นการพิจารณาให้ค่าเพอมีเอชันฟลักส์แปรตาม $(\Delta P - \Delta \pi)$ โดยให้เมมเบรนมีสัมประสิทธิ์รีเจกชัน 100 % นั่นคือ ไม่คำนึงถึงความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเพอมีเอท

3.7.4.2 ความต้านทานในการไหลผ่านเมมเบรน

จากสมการ (9)

$$N_p = (\Delta P - \Delta \pi) / R_o \quad (9)$$

กรณี⁴ที่สารละลายเป็นตัวทำละลายเพียงอย่างเดียว

$$N_B = \Delta P / R_m = N_{B_a} \quad (18)$$

เมื่อ N_{B_a} = เอมิเอชันฟลักซ์ของตัวทำละลายก่อนใช้งานเมมเบรน

R_m = ความต้านทานของเมมเบรน

$$N_{B_b} = \Delta P (R_m + R_f) \quad (19)$$

เมื่อ N_{B_b} = เอมิเอชันฟลักซ์ของตัวทำละลายหลังใช้งานเมมเบรน

R_f = ความต้านทานเนื่องจากการอุดตันของเมมเบรน

กรณี⁴ที่เป็นสารละลายชนิดต่าง ๆ

$$N_B = (\Delta P - \Delta \pi) / (R_m + R_f + R_d) \quad (20)$$

เมื่อ R_d = ความต้านทานเนื่องจาก Interaction ระหว่างตัวถูกละลาย
กับเมมเบรน

3.7.4.3 คุณสมบัติอื่น ๆ ในการแยกสารของเมมเบรน

กำหนดให้

C = ความเข้มข้นของสารละลาย

P = ความดันของสารละลาย

Q = อัตราไหลของสารละลาย

$\%R$ = รีโควารี คือ อัตราส่วนปริมาตรของเพมิเอตต่อสารละลายป้อนเริ่มต้น

R_s = รีเจคชันของเมมเบรน

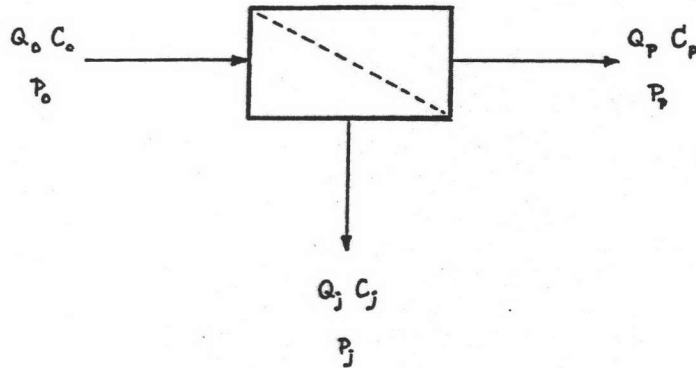
V_p = ปริมาตรสะสมของเพมิเอต

V_o = ปริมาตรสารละลายป้อนเริ่มต้น

ตัวห้อย o, p, j = สารละลายป้อน, เพมิเอต, และคอนเซนเตรท ตามลำดับ

$0, i$ = ที่เวลาเริ่มต้น และ ที่เวลาใด ๆ ตามลำดับ

ขอให้พิจารณารูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 รูปสัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

ก. รีเจคชั่นแฟกเตอร์ หรือ เปอร์เซนต์รีเจคชั่น

$$R_r = 100(C_o - C_p)/C_o \quad (21)$$

ข. เปอร์เซนต์รีโคเวอรีโดยปริมาตร (% Volume recovery)

$$\%R = 100 V_p/V_o \quad (22)$$

ค. สัมประสิทธิ์การไหลผ่านเมมเบรนของสารละลาย

จาก
$$N_A = B \Delta C_c = B(C_o - C_p) \quad (11)$$

ง. เปอร์เซนต์รีโคเวอรีโดยมวล (% Solvent removed or % Mass recovery)

$$\%SR = C_{o,i} V_{o,i} * 100 / C_{o,o} V_{o,o} \quad (23)$$

3.7.5 การกลั่นลำดับส่วนอย่างง่าย

กำหนดให้

C = ความเข้มข้นของสารละลาย

Q = อัตราไหลของสารละลาย

$\%R_D$ = รีโคเวอรีโดยปริมาตร คือ อัตราส่วนปริมาตรของสารละลายที่กลั่นได้
ต่อสารละลายป้อนเริ่มต้น

$\%SR_D$ = รีโคเวอรีโดยมวล คือ อัตราส่วนมวลของสารทำละลายที่กลั่นได้
ต่อมวลของสารทำละลายเริ่มต้น

V = ปริมาตรสะสม

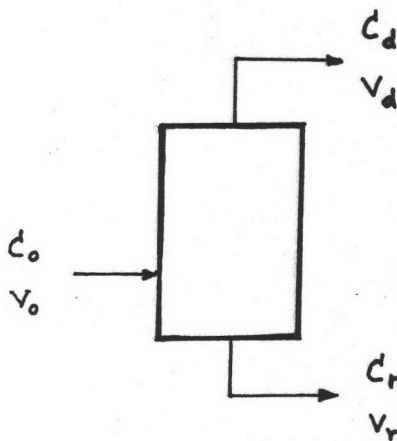
ตัวห้อย

o = สารละลายป้อน,

d = สารละลายที่กลั่นได้,

และ r = สารละลายที่เหลือในขวดกลั่น

ขอให้พิจารณารูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 รูปสัญลักษณ์ในการคำนวณการกลั่นลำดับส่วนอย่างง่าย

ก. เปอร์เซนต์รีโคเวอรีโดยปริมาตร

$$\%R_D = 100 V_d / V_o \quad (24)$$

ข. เปอร์เซนต์รีโคเวอรีโดยมวล

$$\%SR_D = 100 C_d V_d / C_o V_o \quad (25)$$