

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ เมมเบรน เทคโนโลยี

ปรากฏการณ์ออสโมติก (Osmotic Phenomena) เป็นที่รู้จักมากกว่า 2 ศตวรรษ กระบวนการใช้เมมเบรนได้ประสบความสำเร็จครั้งแรก เมื่อประมาณ 100 ปีมาแล้ว โดยที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วไปนั้นจะเป็น เมมเบรนชนิดกึ่งการยอมให้แพร่ผ่าน (Semipermeable Membrane) Fane, A.G. (1987) ได้ให้คำนิยามเมมเบรนไว้ว่า “ การที่นำแผ่นวัสดุบางที่มีช่องรูพรุนมาวางกั้นระหว่างสสารที่มีสถานะที่แตกต่างกัน 2 สถานะ แล้วมีอนุภาคบางกลุ่มถูกยอมรับให้เคลื่อนที่ผ่านช่องรูพรุนนั้น จากสถานะหนึ่ง ไปยังอีกสถานะหนึ่งที่อยู่ตรงข้ามได้ ” กระบวนการใช้เมมเบรนจึงเป็นกระบวนการที่สามารถใช้แยกสารประกอบต่าง ๆ ซึ่งจะต้องพิจารณาและเลือกใช้เมมเบรนให้เหมาะสม ในการที่จะแยกสารประกอบหนึ่งชนิดหรือมากกว่า ออกจากระบบที่มีสารประกอบหลายชนิด การแยกองค์ประกอบที่อยู่ในน้ำ นอกจากกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสที่ใช้เมมเบรนแล้ว ยังมีกระบวนการอื่น ๆ อีกมากมายที่ใช้เมมเบรนแยกองค์ประกอบที่อยู่ในน้ำ ซึ่งแต่ละกระบวนการมีคุณลักษณะ และประสิทธิภาพที่แตกต่างกันออกไป ในตารางที่ 2.1 แสดงเปรียบเทียบกระบวนการต่าง ๆ ที่ใช้เมมเบรนในการแยกองค์ประกอบที่อยู่ในน้ำ โดยการให้แรงขับเคลื่อนโดยตรง ซึ่งในแต่ละกระบวนการจะมีลักษณะที่เหมือนและแตกต่างกันออกไป เช่น กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส กับกระบวนการ Ultrafiltration ใช้ความดันควบคุมในระบบปฏิบัติการเป็นแรงขับเคลื่อนของกระบวนการเหมือนกัน แต่มีความแตกต่างกันที่ขนาดของอนุภาคที่สามารถแยกออกได้ หรืออย่างกระบวนการแยกสารประกอบด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) ที่ใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อนในกระบวนการ

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบกระบวนการต่างๆที่ใช้เมมเบรนในการแยกอนุภาค

PROCESS	CONCEPT	DRIVING FORCE	MATERIALS PASSED	MATERIALS RETAINED
GAS SEPARATION Gas Permeation (GP) Gas Diffusion (GD)		$\Delta P$ (GP) 100 kPa - 10 MPa or $\Delta C$ (GD)	Gases and vapours	Less permeable gases and vapours
Pervaporation (PV)		$\Delta$	Permeable volatile organics	Less permeable species
(GAS - GAP) Membrane Distillation (MD)		$\Delta T$ Temperature difference 1-10 °C	(Volatiles) Water vapour	Non volatiles
Liquid Membrane (LM)		$\Delta C$ Concentration difference	Cations/anions or low molecular organics or gases	Anions /cations or Less permeable organics or Less permeable gases

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบกระบวนการต่างๆที่ใช้ membran ในการแยกอนุภาค (ต่อ)

PROCESS	CONCEPT	DRIVING FORCE	MATERIALS PASSED	MATERIALS RETAINED
Dialysis (D)	<p>Feed Purified Stream Impurities Dialysis Membrane Dialysate Feed</p>	$\Delta C$ Concentration difference	SOLUTE, ions and low molecular weight organics (solvent passage small)	Dissolved and suspended solids, with molecular weight > 1000
Electrodialysis (ED)	<p>Concentrate Product Feed Concentrate</p>	$\Delta V$ Voltage difference 1-2 V/Cell pair	SOLUTE, ions (solvent passage small)	Non-ions and macro-molecular species
Reverse Osmosis (RO) (Hyperfiltration) (HF)	<p>Saline Water Feed Semipermeable Membrane Concentrate Water</p>	$\Delta P$ Pressure difference 1-10 MPa	SOLVENT, (water)	Virtually all dissolved and suspended solids
Ultrafiltration (UF)	<p>Feed UF Membrane Concentrate Water</p>	$\Delta P$ Pressure difference 100 - 800 kPa	SOLVENT (water) and Low molecular weight solutes (< 1000)	Macrosolutes and colloids
Microfiltration (MF) Cross-flow filtration (CFF)	<p>Feed Microporous Membrane Concentrate Water</p>	$\Delta P$ Pressure difference 100-150 kPa	SOLVENT (water) and Dissolved solutes	Suspended solids, fine particulates, some colloids

การกรองอนุภาคแขวนลอยโดยใช้เมมเบรนนี้เป็นการพิจารณาถึงกระบวนการแพร่ผ่านของของเหลว เริ่มตั้งแต่ของเหลวเกิดการแยกตัวและแพร่ผ่านเมมเบรน ซึ่งความสามารถในการกรองอนุภาคนี้นั้นขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค และค่าน้ำหนักของมวลโมเลกุลที่แตกต่างกัน Kootatep, S. (1979) ในความเป็นจริงแล้ว มีความเป็นไปได้ยาก สำหรับการที่จะแบ่งระดับชั้นความสามารถในการกรองอนุภาค เพราะขนาดของอนุภาคและค่าน้ำหนักของมวลโมเลกุล มีช่วงค่าที่คาบเกี่ยวกัน Dow Chemical Thailand Ltd. (1993) ได้แบ่งระดับชั้น กระบวนการกรองอนุภาคแขวนลอยโดยใช้ขนาดของอนุภาคที่น้อยกว่า 0.1 ไมครอน เป็นเกณฑ์ได้ดังนี้ คือ

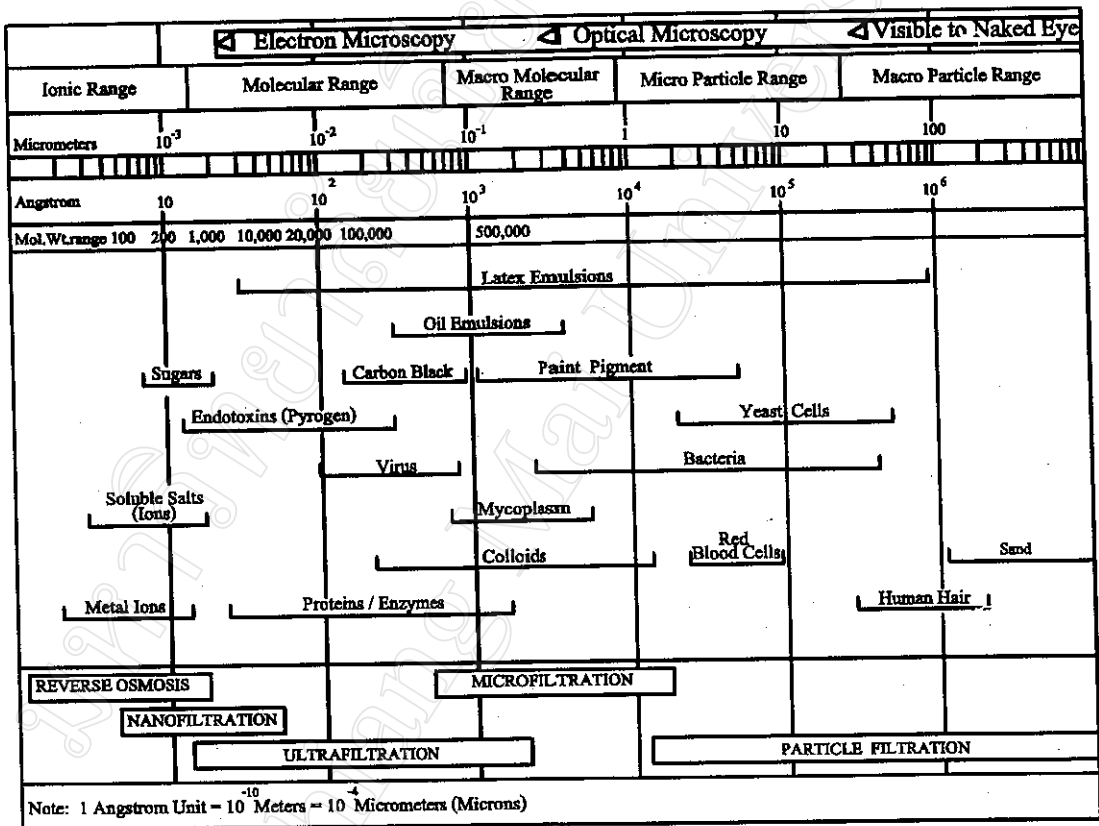
ก. Microfiltration (MF) การกรองสารระดับนี้จะสามารถกำจัดอนุภาคในช่วง 0.1 ถึง 1 ไมครอน โดยทั่วไปอนุภาคแขวนลอย คอลลอยด์ขนาดใหญ่ รวมไปถึงแบคทีเรีย จะถูกกำจัดออกได้ในการกรองระดับนี้ ในระบบปฏิบัติการทั่วไปจะใช้ความดันที่ 0.7 บาร์ หรือ 10 ปอนด์/ตร.นิ้ว

ข. Ultrafiltration (UF) การกรองสารในระดับนี้สามารถกำจัดอนุภาคในช่วง 20 ถึง 1,000 อังสตรอม อนุภาคที่มีโมเลกุลขนาดเล็กทั้งหมด สารละลายน้ำเกลือ คอลลอยด์ โปรตีน สารปนเปื้อนระดับจุลชีวภาพ สามารถกำจัดออกได้ในการกรองระดับนี้ ช่วงค่าน้ำหนักของมวลโมเลกุลที่กรองได้ คือ 1,000 ถึง 100,000 โดยในระบบปฏิบัติการทั่วไปจะใช้ความดันที่ 1 ถึง 7 บาร์ (15 ถึง 100 ปอนด์/ตร.นิ้ว)

ค. Nanofiltration (NF) การกรองสารในระดับนี้ต้องการเมมเบรนชนิดพิเศษ สามารถกรองอนุภาคได้ในระดับขนาด 1 นาโนเมตร (10 อังสตรอม) ด้วยเหตุนี้ช่วงปฏิบัติการของระดับการกรอง Nanofiltration จะคาบเกี่ยวช่วงปฏิบัติการของ Ultrafiltration กับ รีเวอร์สออสโมซิส ค่าน้ำหนักของมวลโมเลกุลที่มากกว่าช่วง 200 ถึง 400 จะถูกกำจัดออก ดังนั้น สารละลายของน้ำเกลือจะถูกกำจัดออกได้ประมาณร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 80 เช่น แมกนีเซียมซัลเฟต สามารถกำจัดออกได้ประมาณร้อยละ 90 ถึงร้อยละ 98 รวมถึงสามารถกำจัดสี ความกระด้าง แร่เรเดียม สารประกอบอินทรีย์ ของแข็งละลายน้ำ และยังสามารถใช้แยกสารประกอบอินทรีย์ จากสารประกอบอนินทรีย์ โดยในระบบปฏิบัติการทั่วไปจะใช้ความดันที่ 3.5 ถึง 16 บาร์ (50 ถึง 225 ปอนด์/ตร.นิ้ว)

ง. Hyperfiltration (HF) หรือรีเวอร์สออสโมซิส เป็นระดับการกรองสารต่าง ๆ ที่ละเอียดที่สุด สามารถกรองสารละลายน้ำเกลือได้ทั้งหมด สารอนินทรีย์ สารอินทรีย์ช่วงค่าน้ำหนักของมวลโมเลกุลน้อยกว่า 100 จึงทำให้สารละลายที่สามารถผ่านออกมาได้เป็นน้ำบริสุทธิ์ มีความสามารถในการกำจัดสารประกอบ และสารแขวนลอยต่าง ๆ ตั้งแต่ ร้อยละ 95 ถึงมากกว่าร้อยละ 99 มีการใช้กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการทำน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล ให้เป็นน้ำบริสุทธิ์สามารถบริโภคได้ ใช้กับกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ใช้แยกจุลชีวภาพทางการแพทย์ ใช้ทำน้ำบริสุทธิ์ หรือที่เรียกว่า น้ำฟอก สำหรับบริโภคตามที่พกอาศัยทั่วไป และใช้ในกระบวนการ

ผลิต ของอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ต้องการน้ำบริสุทธิ์ เช่น อุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมผลิตสารกึ่งตัวนำ การทดลองวิจัยต่าง ๆ ทางการแพทย์ชั้นสูง ในรูปที่ 2.1 แสดงรายละเอียดแต่ละระดับชั้นของความสามารถในการกรองอนุภาคที่น้อยกว่า 0.1 ไมครอน และในตารางที่ 2.2 ได้แสดงรายละเอียดการนำเมมเบรนเทคโนโลยีไปประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 2.1 ช่วงการกรองอนุภาค ในระดับชั้นต่าง ๆ  
ที่มา : Dow Chemical Thailand Ltd. (1993)

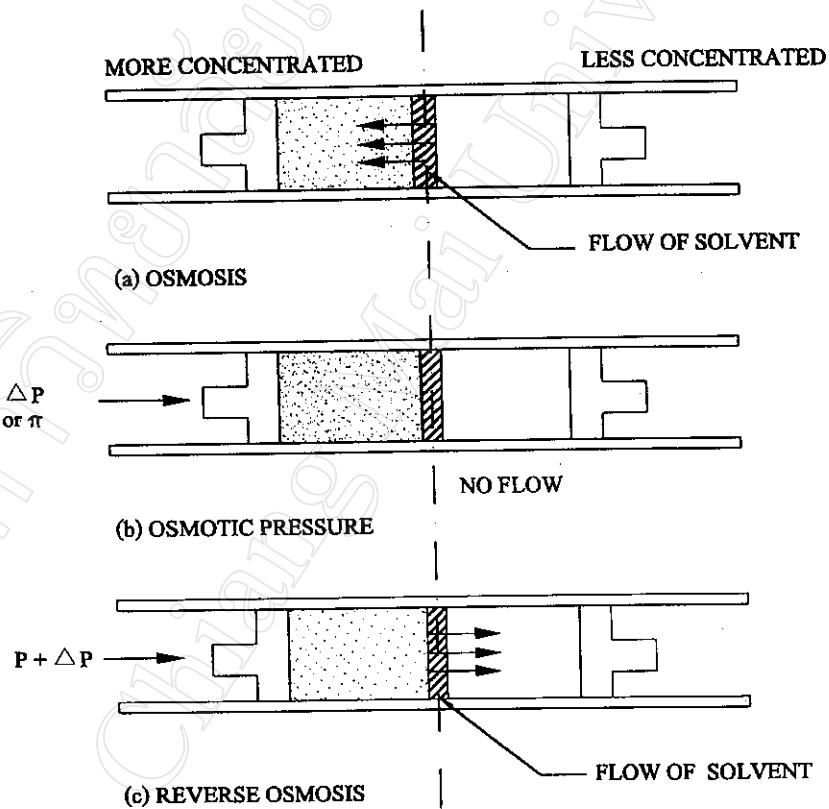
ตารางที่ 2.2 การนำกระบวนการใช้เมมเบรนไปประยุกต์ใช้งาน

ที่มา : Fane, A.G. (1987)

Membrane Process	Applications
Dialysis (D)	Hemodialysis (artificial kidney)
Electrodialysis (ED)	Water desalination Acidity reduction in citrus juice Deionisation of whey
Reverse osmosis (RO)	Water desalination Ultrapure water Dairy industry Effluents (metal-finishing photographic)
Ultrafiltration (UF)	Dairy (whey recovery, precheese concentration) Electrocoat colloids Effluents (oil-water, pulp and paper, dye-stuffs, tannery) Biological (enzymes, fermentations) Water purification
Microfiltration-Cross flow Filtration (MF-CFF)	Sterile solution/water purification Beverage filtration Effluents Cell Harvesting
Liquid membranes (LM)	Hydrometallurgy Effluents Gas separations
Gas permeation (GP)	Helium recovery Hydrogen recovery/removal CO <sub>2</sub> from hydrocarbons
Gas diffusion (GD)	Uranium enrichment
Pervaporation (PV)	Ethanol/water separation
Membrane distillation (MD)	Pure water

## 2.2 ทฤษฎี กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส

เมื่อนำเมมเบรนมาวางกั้นระหว่างสารละลาย 2 ชนิด ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน พบว่า สารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำจะเกิดการแพร่ผ่านเมมเบรน ชนิดกึ่งการยอมให้แพร่ผ่าน ไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า โดยสามารถให้แรงกระทำจากภายนอกเข้าไปเพื่อทำให้ปรากฏการณ์นี้อยู่ในสภาวะสมดุลได้ แรงดันหรือแรงกระทำจากภายนอก ที่ทำให้ปรากฏการณ์นี้อยู่ในสภาวะสมดุล เรียกว่า แรงดันออสโมติก (Osmotic Pressure) ถ้าเพิ่มแรงดันเข้าไปให้มากกว่าแรงดันออสโมติกแล้ว จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ย้อนกลับและเรียกปรากฏการณ์ที่ย้อนกลับนี้ว่า กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ในรูปที่ 2.2 เป็นรายละเอียดของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส

ที่มา : Koottatep, S. (1979)

### 2.2.1 แบบจำลองการแพร่ผ่านเมมเบรน (Diffusion Model)

Koottatep, S. (1979) ได้กล่าวถึง แนวคิดแบบจำลองการแพร่ผ่านเมมเบรนไว้ว่า การศึกษากลไกทางกายภาพของการแพร่ผ่านเมมเบรน ของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส เริ่มจากปรากฏการณ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ แบบไม่มีปฏิกิริยาย้อนกลับ (Irreversible Thermodynamics) โดยมีปฏิภาคระหว่างอัตราการไหลของอนุภาค และแรงขับเคลื่อนเป็นสัดส่วนกัน จากความสัมพันธ์นี้สามารถแสดงเป็นสมการได้ คือ

$$J_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} x_k \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

โดย  $J_i$  = อัตราการไหลของอนุภาค  $i$   
 $L_{ik}$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของแบบจำลอง  
 $x_k$  = แรงขับเคลื่อนที่กระทำต่ออนุภาค  $k$

สามารถเขียนใหม่ตาม Binary System ได้เป็น

$$J_1 = L_{11} x_1 + L_{12} x_2 \quad (2)$$

$$J_2 = L_{21} x_1 + L_{22} x_2 \quad (3)$$

โดย ( $J_1$ ) คือ อัตราการไหลของน้ำ หรือตัวทำละลาย (Solvent) และ ( $J_2$ ) คือ อัตราการไหลของอนุภาคในน้ำหรือตัวถูกละลาย (Solute) ค่าสัมประสิทธิ์ ( $L_{11}$ ) คือ ค่าความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่กับแรงขับเคลื่อนของตัวทำละลาย ค่าสัมประสิทธิ์ ( $L_{12}$ ) คือ ค่าความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่กับแรงขับเคลื่อนของตัวถูกละลาย ส่วนค่าของ ( $L_{21}$ ) และ ( $L_{22}$ ) ก็เป็นทำนองเดียวกัน สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ ( $L_{12}$ ) และ ( $L_{21}$ ) จะขึ้นกับความแตกต่างกันของอนุภาค ในสมการที่ (2) และ (3) พจน์ทางขวามือของสมการเรียกว่า พจน์อัตราการไหลคู่ควบ ในแบบจำลองพจน์อัตราการไหลคู่ควบนี้จะสมมติยกเว้นไม่นำมาคิด ดังนั้น เขียนรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$J_1 = L_{11} x_1 \quad (4)$$

$$J_2 = L_{22} x_2 \quad (5)$$

แรงขับเคลื่อนที่นำมาใช้ในสมการขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการ เช่น การไหลของความร้อน แรงขับเคลื่อนของกระบวนการ คือ อุณหภูมิ ในแบบจำลองการแพร่ผ่านของสารละลาย ใช้ความต่างศักย์ทางเคมี และแรงกระทำจากภายนอกเป็นแรงขับเคลื่อนกระบวนการ นั่นคือ

$$X = -\text{grad } \mu + Y \quad (6)$$

โดย  $\mu$  = ค่าความต่างศักย์ทางเคมี  
 $Y$  = แรงกระทำจากภายนอก (ทางกล และ/หรือ ทางไฟฟ้า)

ในแบบจำลองสมมติให้ไม่มีแรงกระทำจากภายนอกต่อระบบเลย ดังนั้น จากสมการ (4) และ (5) จะได้เป็น

$$J_1 = -L_{11} \text{grad } \mu_1 \quad (7)$$

$$J_2 = -L_{22} \text{grad } \mu_2 \quad (8)$$

ในระบบออสโมซิสที่มีอุณหภูมิเท่ากัน (Isothermal Osmosis) ความต่างศักย์ทางเคมี ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ คือ ความเข้มข้น (Concentration Gradient) และความดัน (Pressure Gradient) พิจารณาองค์ประกอบทั้งสองนี้ ในรูปสมการจะได้เป็น

$$\text{grad } \mu = (\partial\mu/\partial C)_{P,T} \text{grad } C + V \text{grad } P \quad (9)$$

โดย  $C$  = ค่าความเข้มข้น  
 $V$  = Partial molar volume =  $(\partial\mu/\partial P)$   
 $P$  = ค่าความดัน

แทนสมการ (9) ลงในสมการ (7) และ (8) จะได้เป็น

$$J_1 = -L_{11} [(\partial\mu_1/\partial C_1) \text{ grad } C_1 + V_1 \text{ grad } P] \quad (10)$$

$$J_2 = -L_{22} [(\partial\mu_2/\partial C_2) \text{ grad } C_2 + V_2 \text{ grad } P] \quad (11)$$

แทนพจน์ความเข้มข้นของอัตราการไหลของตัวทำละลายด้วย ค่าความดันออสโมติก จะได้ สมการอัตราการไหลของตัวทำละลายขึ้นอยู่กับค่าความดันเพียงอย่างเดียว จากสมการ (10) เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$J_1 = -L_{11} V_1 [(\Delta P - \Delta\pi) / (\Delta x)] \quad (12)$$

โดย  $\Delta P$  = ค่าความดันประยุกต์ (Applied Pressure)  
 $\Delta\pi$  = ค่าความต่างของความดันออสโมติก  
 $\Delta x$  = ความหนาของเมมเบรน

พิจารณาอัตราการไหลของตัวถูกละลาย ค่าความดันมีผลน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้น จากสมการ (11) สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$J_2 = -L_{22} [(\partial\mu_2/\partial C_2)(dC_2/dx)] \quad (13)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ ( $L_{11}$ ) และ ( $L_{12}$ ) ในแบบจำลองการแพร่ผ่านของสารละลายจะขึ้นกับ ความหนาแน่นของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน (Concentration Times Membrane Mobility Factor) จากสมการ (12) และ (13) เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$J_1 = C_{1m} M_{1m} V_1 [(\Delta P - \Delta\pi) / \Delta x] \quad (14)$$

$$J_2 = -C_{2m} M_{2m} [(\partial\mu/\partial C_2)(dC_2/dx)] \quad (15)$$

โดย	$C_{1m}$	=	ค่าความเข้มข้นของตัวทำละลายในเมมเบรน
	$C_{2m}$	=	ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเมมเบรน
	$M_{1m}$	=	Membrane Mobility of Solvent
	$M_{2m}$	=	Membrane Mobility of Solute

ในสารละลายที่เจือจางสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนจะเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน คือ  $D_{1m} = M_{1m} RT$  และความต่างศักย์เคมีจะเกี่ยวข้องกับความเข้มข้น จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ในส่วนอัตราการไหลของตัวทำละลายจะได้ว่า  $\partial\mu = RT(\partial C/C)$  และสำหรับอัตราการไหลของตัวถูกละลาย คือ  $\partial\mu_2/\partial C_{2m} = RT/C_{2m}$  จากค่าความสัมพันธ์นี้ สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$J_1 = -[(C_{1m} D_{1m} V_1) / (RT \Delta x)] (\Delta P - \Delta \pi) \quad (16)$$

$$J_2 = -D_{2m} k (\Delta C_{2s} / \Delta x) \quad (17)$$

โดย	$k$	=	Distribution Factor = $\Delta C_{2m} / \Delta C_{2s}$
	$D_{1m} / D_{2m}$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของตัวทำละลาย และตัวถูกละลายในกระบวนการเมมเบรน
	$\Delta C_{2s}$	=	ค่าความต่างของความเข้มข้น ของตัวถูกละลาย กับตัวทำละลาย

สมมติให้องค์ประกอบอื่น ๆ ของเมมเบรนไม่มีผลต่อค่าความดัน หรือค่าความเข้มข้น ดังนั้น ค่า  $(C_{1m} D_{1m} V_1) / (RT \Delta x)$  และ  $(D_{2m} k) / \Delta x$  จะรวมให้เป็นพจน์ของค่าคงที่ A และ B ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่สำหรับทั้งของตัวทำละลายและของตัวถูกละลาย จะได้เป็น

$$J_1 = -A * (\Delta P - \Delta \pi) \quad (18)$$

$$J_2 = -B * \Delta C_{2s} \quad (19)$$

โดย A และ B เรียกว่า ค่าคงที่ของเมมเบรน (Membrane Performances)

## 2.3 ชนิด และลักษณะสมบัติ ของเมมเบรน

เมมเบรนที่มีผลิตและใช้งานโดยทั่วไปทั้งหมดจะทำมาจาก สารอินทรีย์รูปโพลิเมอร์ ใช้ เซลลูลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีในการผลิต การทดลองกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ครั้งแรกได้ใช้เมมเบรนที่ทำจาก เซลลูลูโลส อะซิเตท (Cellulose Acetate) Loeb and Sourirajan. (1960) วัสดุจำพวกเซลลูลูโลสจึงเป็นวัสดุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการผลิตเมมเบรน อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ ที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นเมมเบรนอย่างกว้างขวาง ส่วนใหญ่จะเป็นโพลิเมอร์รูปอื่น ๆ เช่น โพลีเอไมด์ (Polyamide) โพลีหรือพเพอร์ลิน (Polypropylene) โพลีซัลโฟน (Polysulphone) ฯลฯ ซึ่งมีความแข็งแรงทนทาน และมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่แตกต่างกันออกไป Fane, A.G. (1987) ได้จัดลำดับชั้นเมมเบรนโดยแยกเป็น เมมเบรนมีความพรุน (Porous) และเมมเบรนไม่มีความพรุน (Non-porous) และได้แบ่งประเภทของเมมเบรนตามลำดับชั้น ดังนี้

ก. เมมเบรนความหนาแน่นสูง (Dense Membranes) เป็นเมมเบรนที่มีความหนาแน่นสูง ไม่มีความพรุน โดยขนาดรูพรุนมีความกว้างน้อยกว่า 5 นาโนเมตร หรือ 50 อังสตรอม จะถือว่าเมมเบรนมีผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพ และทางเคมีของสถานะสารทั้ง 2 ด้านที่กั้นด้วยเมมเบรนชนิดนี้

ข. เมมเบรนที่มีการเรียงตัวของโครงสร้างรูพรุนแบบสมมาตร (Symmetric Microporous Membranes) คุณลักษณะของเมมเบรนชนิดนี้ที่สำคัญ คือ มีโครงสร้างรูพรุนหลายรูปแบบซึ่งอาจเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ ทั้งนี้สามารถกำหนดรูปแบบได้ ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต แต่จะเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอตลอดความหนาของเมมเบรน เมื่อใช้งานสถานะของสารทั้ง 2 ด้านจะมีความสมมาตรกัน โดยขนาดและโครงสร้างรูพรุนไม่มีผลต่อระบบปฏิบัติการ

ค. เมมเบรนที่มีการเรียงตัวของโครงสร้างรูพรุนแบบไม่สมมาตร (Asymmetric Membranes) เป็นเมมเบรนที่โครงสร้างรูพรุนเรียงตัวกันไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาของเมมเบรน ซึ่งถ้าเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอนุภาคหนึ่งผ่านโครงสร้างรูพรุนของเมมเบรนชนิดนี้ จะเสมือนว่าอนุภาคนั้นเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนสองชั้น คือ เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนชั้นที่มีความพรุนสูง และเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนชั้นที่มีความพรุนต่ำ ในช่วงต่อมา

ง. เมมเบรนที่มีประจุไอออนในโครงสร้าง โพลีเมอร์ (Ion Exchange Membranes) เป็นเมมเบรนที่ได้เตรียมประจุไอออนไว้ในโครงสร้างโพลีเมอร์ มีทั้งชนิดที่อัดประจุไอออนไว้หนาแน่น (ED Membranes) และชนิดที่อัดประจุไอออนไว้เบา (UF, MF Membranes)

Beasley, J.K. (1978) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติโพลีเมอร์ 3 ชนิดที่นำมาใช้ทำเมมเบรน คือ เซลล์ลูโลส อะซิเตท อะโรมาติกโพลีไฮดราไซด์ (Aromatic Polyhydrazides) และอะโรมาติกโพลีเอไมด์ (Aromatic Polyamides) พบว่า โพลีเมอร์ชนิดอะโรมาติกโพลีเอไมด์ให้ประสิทธิภาพดีกว่า ชนิดอะโรมาติกโพลีไฮดราไซด์ และดีกว่าชนิดเซลล์ลูโลส อะซิเตท อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีผลงานวิจัยอย่างกว้างขวางด้วยเหตุผลที่ต้องการพัฒนาเมมเบรนชนิดที่ปราศจากองค์ประกอบที่เป็นเซลล์ลูโลส (Non-Cellulosic Membranes) ให้เป็นเมมเบรนที่สามารถนำมาใช้งานได้หลายสถานการณ์ เพราะเมมเบรนชนิดนี้จะมีความต้านทานต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมได้ในหลายระดับ แต่ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญก็คือ ราคาต่อหน่วยของเมมเบรนชนิดที่ปราศจากองค์ประกอบที่เป็นเซลล์ลูโลส จะสูงกว่า เซลล์ลูโลส อะซิเตท ประมาณ 2 ถึง 3 เท่า ในตารางที่ 2.3 แสดงเปรียบเทียบการแบ่งประเภทของเมมเบรน กรรมวิธีการผลิต และกระบวนการที่นำเมมเบรนแต่ละประเภทไปประยุกต์ใช้ และในตารางที่ 2.4 แสดงโพลีเมอร์บางรูปที่นำมาผลิตเป็นเมมเบรนชนิดที่ปราศจากองค์ประกอบที่เป็นเซลล์ลูโลส

ตารางที่ 2.3 ประเภทของเมมเบรน กรรมวิธีการผลิต และกระบวนการที่ใช้เมมเบรนแต่ละประเภท  
ที่มา : Fane, A.G. (1987)

Membrane Type	Method of Preparation	Structure	Membrane
Symmetric-Microporous	Stretching, hot and cold (PTFE)	Random network, pores 0.02 to 10 $\mu\text{m}$	Microfiltration
	Irradiation and track- etching (polycarbonate)	Parallel pores, 0.03 to $\mu\text{m}$	Microfiltration
	Casting and phase- inversion (cellulose esters, polypropylene)	Random pores 0.1 to 1 $\mu\text{m}$	Microfiltration Dialysis
	Molding and sintering (ceramics, PTFE)	Random pores 0.1 to 20 $\mu\text{m}$	Microfiltration
Asymmetric	Casting and phase- inversion (cellulosics, polyamides, polysul- phone)	Dense or finely- porous skin grading of (Macro) micro- porous substructure	Reverse Osmosis
Single Component			Ultrafiltration Microfiltration Gas Permeation
Composite	Film formation on microporous support	Dense skin on micro- porous sublayer	Reverse Osmosis Gas Permeation
Dynamic	Deposition of fine precoat on microporous Barrier	Thin (removable) layer on microporous membrane	Reverse Osmosis Ultrafiltration
Electrically Charged	Sulphonation and amination of homoge- neous dense membrane	Fixed charge groups in polymer matrix	Electrodialysis

ตารางที่ 2.4 โพลีเมอร์บางรูปที่นำมาผลิตเป็นเมมเบรน ชนิดที่ปราศจากองค์ประกอบ  
ที่เป็นเซลล์ลูไลต์  
ที่มา : Fane, A.G. (1987)

Reverse Osmosis	Ultrafiltration
Polyamide (aromatic) (PA)	Polysulphone (PS)
Polyacrylonitrile (PAN)	Polyamide (PA)
<u>Composite Membranes</u>	Polyelectrolyte Complexes
p-Phenylenediamine + Trimesoyl chloride	Modacryl Polymer
Polyethylenimine (PEI) + Toluylene diisocyanate (TDI)	Polyacrylonitrile
Polyether-/amide	Polyvinylidene Fluoride (PVDF)
Polyether-/urea	Polytetrafluoroethylene
Polybenzimidazolone	Polypropylene

## 2.4 รูปแบบ และข้อจำกัดของเมมเบรน

### 2.4.1 รูปแบบของเมมเบรน

Fane, A.G. (1987) ได้กล่าวไว้ว่าในการเลือกสร้างเมมเบรนแต่ละรูปแบบมีวัตถุประสงค์หลัก 5 ประการ คือ

ก. ความแข็งแรงทางกายภาพของการยึดเมมเบรน (Physical Support) ในระบบปฏิบัติการที่ใช้เมมเบรนส่วนใหญ่จะใช้แรงขับเคลื่อนที่สูง การยึดเมมเบรนจะต้องมีความแข็งแรงและทนต่อแรงขับเคลื่อนของระบบปฏิบัติการได้

ข. คลอบคลุมกับขอบเขตที่ต้องการใช้งาน (Effective Fluid Management) ในการ ออกแบบและสร้างเมมเบรน จะต้องสามารถกำจัดอนุภาคที่แตกตัวเป็นประจุ (Concentration Polarisation) ในระบบปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม ซึ่งจะเน้นความสำคัญกับ ระบบปฏิบัติการที่มีสถานะของเหลว

ค. ระบบบรรจุที่ให้ความหนาแน่นสูง (High Packing Density) ระบบบรรจุต้องบรรจุ เมมเบรนให้มีพื้นที่ผิวเมมเบรนต่อหน่วยปริมาตรที่สูง ถ้าสามารถบรรจุเมมเบรนต่อหน่วยปริมาตร ได้สูงและเหมาะสม จะเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน ลดค่าใช้จ่ายและลดพื้นที่ติดตั้ง

ง. ความสะดวกในการทำความสะอาด (Cleaning) เมมเบรนต้องออกแบบให้สามารถ ทำความสะอาดได้ง่ายและล้างทำความสะอาดอนุภาคต่าง ๆ ที่แตกตัวเป็นประจุ และตกตะกอน บริเวณผิวเมมเบรนได้อย่างหมดจด

จ. การบำรุงรักษา (Maintenance) เมมเบรนจะออกแบบให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และสามารถถอดเปลี่ยนได้สะดวก

การพัฒนาารูปแบบของเมมเบรน ได้ออกแบบตามวัตถุประสงค์และการใช้งาน โดยส่วน ใหญ่จะเป็นรูปแบบแผ่น (Sheet Form) และรูปทรงกระบอก (Cylindrical Form) ในปัจจุบันมีการ สร้างเมมเบรนแบ่งตามรูปแบบได้ 4 แบบ คือ

ก. เมมเบรนแบบหลอด (Tubular Module) ใช้เมมเบรนแบบหลอดมีผนังเป็นรูปทรงแท่ง มีความทนทานต่อความดันสูง เพราะการใช้งานจะให้สารละลายไหลผ่านเข้าไปในหลอดนั้นภายใต้ ความดันสูง และน้ำบริสุทธิ์จะซึมผ่านออกมาตามผนังรูปทรงแท่งของหลอดเมมเบรน หลอดเมมเบรน จะมีที่ยึดถาวรเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวระหว่างการใช้งาน สามารถถอดเปลี่ยนเมมเบรนหลอดใหม่ ได้ สามารถใช้กับระบบที่มีความดันไม่คงที่ หรือระบบที่มีช่วงค่าความดันกว้าง Fane, A.G. (1987)

ข. เมมเบรนแบบแผ่นซ้อนกัน (Plate and Frame Module) ใช้เมมเบรนรูปวงกลมวาง ซ้อนกันและสลับด้วยเฟรมเป็นชั้น ๆ โดยยึดสลักกกลางตรงกลาง เหมาะสำหรับระบบที่สารละลาย มีความเข้มข้นต่ำ และกับระบบที่มีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) เพราะช่องระบายน้ำ มีลักษณะแคบและเป็นชั้น ๆ Kooattatep, S. (1979) ในการบำรุงรักษาสามารถเปลี่ยนเฉพาะแผ่น เมมเบรนซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายน้อย Fane, A.G. (1987)

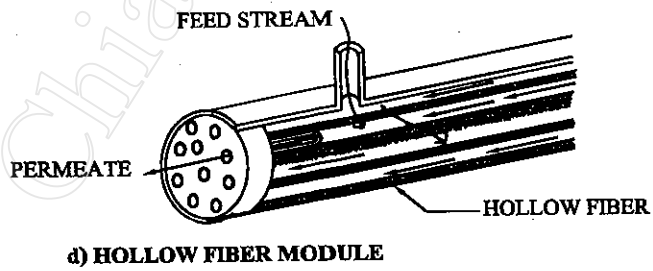
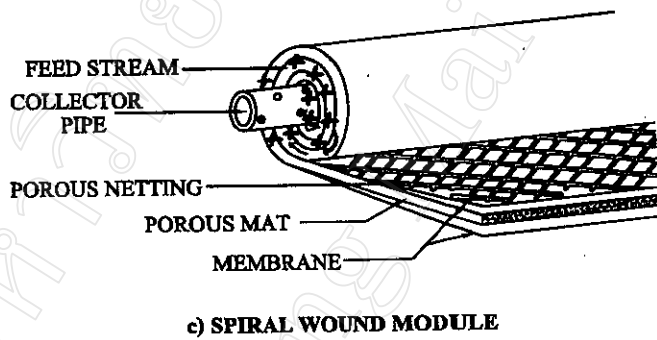
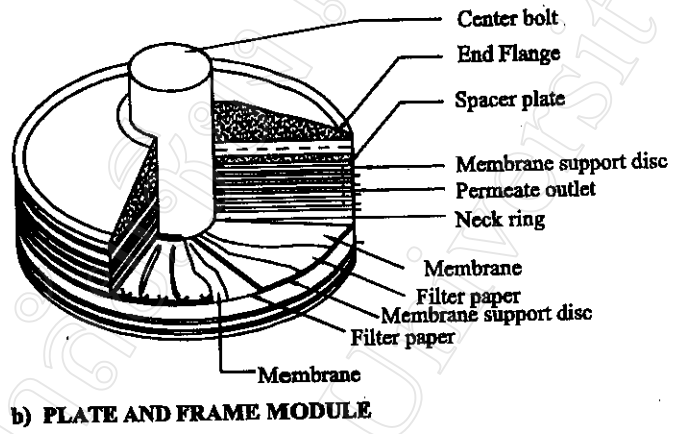
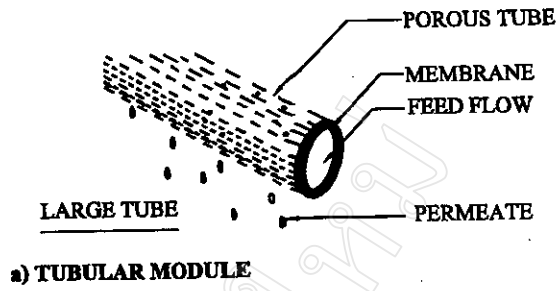
ค. เมมเบรนแบบม้วนรูปก้นหอย (Spiral Wound Module) รูปแบบนี้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง จะใช้เมมเบรนแบบแผ่นวางสลับกับแผ่นรองที่มีความพรุน คลุมทับผิวหน้าด้วยตาข่ายพรุน (Porous Netting) ทั้งหมดจะถูกม้วนเข้ากับท่อรับน้ำ และบรรจุไว้ในกระบอก การไหลเวียนของสารละลาย จะไหลผ่านไปตามแนวกระบอกภายใต้ความดันสูง ในขณะที่น้ำบริสุทธิ์ จะแพร่ผ่านเมมเบรนเข้าสู่ท่อรับน้ำที่อยู่ใจกลางกระบอก Koottatep, S. (1979) เมมเบรนรูปแบบนี้จะมีพื้นที่ผิวเมมเบรนต่อหน่วยปริมาตรที่สูง นิยมใช้กับระบบที่มีการไหลแบบราบเรียบ สามารถใช้งานได้ดีกับระบบที่มีสถานะเป็น ของไหล และแก๊ส Fane, A.G. (1987)

ง. เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fibre Module) ใช้เมมเบรนที่มีลักษณะเป็นเส้นใยกลวงจำนวนมากเป็นล้านเส้นใยนำมารวมกัน แต่ละเส้นมีลักษณะคล้ายกับเส้นผม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 100-200 ไมโครเมตร บรรจุลงในกระบอกปิดผนึกที่มีช่องเปิดสำหรับให้สารละลายผ่านเข้าไปภายในกระบอก และไหลเวียนออกจากท่อสารละลายเข้มข้น น้ำบริสุทธิ์จะไหลซึมผ่านเส้นใยเมมเบรนออกจากท่อรับน้ำ Koottatep, S. (1979) เมมเบรนชนิดนี้สามารถบรรจุให้มีพื้นที่ผิวเมมเบรนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรได้สูงมาก นิยมใช้กับระบบที่มีการไหลแบบราบเรียบ สามารถใช้งานได้ดีกับกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส และ กระบวนการแยกแก๊ส การใช้เมมเบรนชนิดนี้ ต้องการระบบกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ในเบื้องต้น Fane, A.G. (1987) ในตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติ และข้อดี ข้อด้อยของเมมเบรนแต่ละชนิด และในรูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของเมมเบรน

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติ ข้อดี และข้อด้อย ของเมมเบรนแต่ละชนิด

ที่มา : Fane, A.G. (1987)

ลักษณะสมบัติ	Module Concept			
	Tublar	Plate Frame	Spiral Wound	Hollow Fibre
Packing Density (ตร.ม./ลบ.ม.)	150-300	200-400	300-900	9,000-30,000
Flux (ล./ตร.ม. - ชม.)	10-50	10-50	10-50	0.5-5
Flux Density (ล./ลบ.ม. - ชม.)	1,500-15,000	2,000-20,000	3,000-45,000	4,500-150,000
Channel Diameter or Height (มม.)	13	5	1.5	0.1
Membrane Replacement	As Tubes	Sheet	Module Cartridge	As Module
Replacement Labour	High	High	Medium	Medium
Feed Side Pressure Loss	High	Medium	Medium	Low
Concentration Polarisation	High	Medium	Medium	Low
Suspended Solids Capability	Good	Medium	Poor	Poor
Space Requirements	Very High	High	Low	Very Low
Cost	High	High	Moderate	Moderate
Fouling Susceptibility	Low	Low	Moderate	High



รูปที่ 2.3 รูปแบบต่าง ๆ ของเมมเบรน  
ที่มา : Koottatep,S. (1979)

## 2.4.2 ข้อจำกัดของเมมเบรน

สำหรับกระบวนการแยกอนุภาคโดยใช้เมมเบรน Fane, A.G. (1987) กล่าวว่าข้อจำกัดที่จะต้องพิจารณาประกอบการดำเนินการหลายประการด้วยกัน คือ

ก. ความเข้มข้นของประจุออนของอนุภาค เป็นข้อจำกัดหนึ่งที่จะต้องพิจารณาโดยเฉพาะกับระบบปฏิบัติการที่มีสถานะเป็นของไหล เพราะเมื่อน้ำบริสุทธิ์ได้ถูกแยกออกโดยแพร่ผ่านเมมเบรนไปแล้ว ประจุออนของอนุภาคต่าง ๆ ที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนออกไปจะตกตะกอนอยู่บริเวณชั้นผิว ทำให้อัตราการผลิตน้ำบริสุทธิ์ลดลงตามความเข้มข้นของประจุออนของอนุภาคต่าง ๆ ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ระบบปฏิบัติการจึงต้องการระบบกำจัดอนุภาคเข้มข้นนี้โดยตรง คือ หยุดการเดินระบบปฏิบัติการ และทำความสะอาดเมมเบรนล้างสิ่งอุดตันต่าง ๆ

ข. ความสกปรกของเมมเบรน เกิดจากการตกตะกอนของอนุภาคต่าง ๆ บริเวณผิวหน้าเมมเบรนที่ไม่สามารถทำความสะอาดออกได้ทั้งหมด ทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรนลดลง ต้องทำความสะอาดบ่อยขึ้น และอาจจะต้องเปลี่ยนเมมเบรนใหม่แทนของเดิมเร็วขึ้น ถ้าในตะกอนของอนุภาค มีสารประกอบเป็นเบื้อนที่มีผลต่อลักษณะสมบัติเมมเบรนโดยตรง

ค. รูปแบบ และการออกแบบ การออกแบบกระบวนการใช้เมมเบรนที่คืนนอกจากจะต้องพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นเมมเบรนแล้ว จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการศึกษาทดลอง โดยใช้แบบจำลองสภาพตามการใช้งานจริงประกอบ ซึ่งจะช่วยให้ได้ระบบปฏิบัติการที่มีประสิทธิภาพ และเกิดประโยชน์สูงสุด

ง. เสถียรภาพของเมมเบรน ลักษณะสมบัติของสารประกอบโพลีเมอร์ มีปัจจัยหลายอย่างที่เป็นข้อจำกัด และมีผลต่อเสถียรภาพของเมมเบรน เช่น ค่าพีเอช สำหรับเมมเบรนชนิดเซลลูลูโลส ช่วงค่าพีเอชที่ใช้งานได้คือ 4.0 ถึง 8.0 และสำหรับเมมเบรนที่เป็นวัสดุโพลีเมอร์ชนิดโพลีซัลโฟน ช่วงค่าพีเอชที่ใช้งานได้คือ 2.0 ถึง 12.0 อุณหภูมิก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่เป็นข้อจำกัดและมีผลต่อเสถียรภาพของเมมเบรน โดยทั่วไปอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งานได้ คือ 60°ซ และข้อจำกัดที่สำคัญอีกประการ คือ เมมเบรนมีความต้านทานต่อคลอรีนน้อย

จ. ความไม่สมบูรณ์ของการแยกอนุภาค แม้จะเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่า น้ำแพร่ผ่านเมมเบรนจะค่อนข้างมีความบริสุทธิ์สูง แต่ยังไม่มีการบวนการใช้เมมเบรนใดที่สามารถกำจัดสารประกอบ และอนุภาคแขวนลอยในน้ำได้ทั้งหมด เช่น สามารถกำจัดเกลือได้ร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 99.9 กับสารแขวนลอยอื่น ๆ อาจกำจัดได้มากกว่าร้อยละ 99.9 ในทางกลับกัน ฟีนอล สามารถผ่านเมมเบรน ที่ทำจากเซลล์ลูโลสอะซิเตทได้ทั้งหมด สารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีในน้ำบ่อสามารถผ่านเมมเบรนได้ทุกชนิด ถ้าจะกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เมมเบรน จะต้องออกซิไดส์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็นซัลเฟอร์ซึ่งเมมเบรนสามารถกำจัดออกได้ แต่ปริมาณซัลเฟอร์จำนวนมากจะทำให้เมมเบรนอุดตันเร็วและเกิดความเสียหาย ทำให้เมมเบรนมีอายุการใช้งานที่สั้นลง ดังนั้นการกำจัดสารประกอบแขวนลอยในน้ำบ่อโดยใช้เมมเบรน ควรให้ซัลเฟอร์ผ่านเมมเบรนออกไปในรูปสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วใช้กระบวนการอื่นกำจัดสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นขั้นตอนต่อไป เช่น ใช้กระบวนการทางเคมี หรือการออกซิไดส์ เป็นต้น และถึงมีชีวิตระดับจุลชีวะวิทยา เช่น แบคทีเรีย ไวรัส เมมเบรนสามารถกำจัดออกได้ร้อยละ 99.7 ถึงร้อยละ 99.99 แต่ไม่มีสารปนเปื้อนหรืออนุภาคใดที่เมมเบรนจะกำจัดออกได้ทั้งหมด Bhumkratana, S. (1987)

## 2.5 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอย

น้ำชะมูลฝอย หมายถึง ของเหลวใด ๆ ซึ่งไหลซึมผ่านชั้นมูลฝอย และได้ละลายหรือชะเอาสารต่าง ๆ จากมูลฝอยไปด้วย ของเหลวนี้ ได้แก่ ของเหลวที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยสลายของมูลฝอย และของเหลวจากภายนอกที่ไหลผ่านเข้ามาในชั้นมูลฝอยโดยที่น้ำชะมูลฝอยจะเป็นน้ำเสียที่จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน น้ำชะมูลฝอยนอกจากมีความเข้มข้นของปริมาณ บีโอดี และซีโอดี สูงแล้วยังมีโลหะหนัก และสารพิษปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่สูงอีกด้วย ปรัทศน์ ชมเชย (2537) ได้กล่าวไว้ในกรณีศึกษาว่าปริมาณของน้ำชะมูลฝอยจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

ก. น้ำจากธรรมชาติ คือ น้ำที่เกิดจากธรรมชาติ ได้แก่ น้ำฝน น้ำไหลบนพื้นผิว น้ำใต้ดิน การซึม การกักเก็บน้ำ และการย่อยสลายของมูลฝอย น้ำฝนที่ตกลงบนพื้นที่ทำการฝังกลบหรือใกล้เคียงกับพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยสามารถไหลเข้าสู่พื้นที่ฝังกลบมูลฝอยได้ ถ้าพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยอยู่เหนือทางเดินน้ำ น้ำใต้ดินก็จะมีผลต่อน้ำชะมูลฝอยด้วย ส่วนน้ำที่เกิดจากการย่อยสลายของมูลฝอยหรือน้ำที่มาจากมูลฝอยเปียกหรือโคลนตะกอนจะมีปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับน้ำจากธรรมชาติ หรือน้ำที่เข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวของพื้นที่ฝังกลบ เช่น น้ำฝน น้ำไหลล้นจากบริเวณอื่น หรือน้ำจากการกักเก็บ เป็นต้น

ข. สภาพพื้นผิวของพื้นที่ฝังกลบ จะมีผลต่อปริมาณน้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้น เช่น ลักษณะของดินซึ่งได้แก่ ขนาดของอนุภาคดิน ความชื้น ความหนาแน่น และความสามารถที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ เป็นต้น นอกจากนี้ยังขึ้นกับพืชคลุมดิน ความชื้นของผิวดินด้วย

ค. ลักษณะของมูลฝอย ได้แก่ ลักษณะของมูลฝอยที่นำมาฝังกลบ ในพื้นที่ฝังกลบมูลฝอย เช่น มูลฝอยเปียก มูลฝอยจำพวกเศษอาหาร เศษผักผลไม้จากตลาดสด ซึ่งมูลฝอยเหล่านี้จะมีผลต่อการเกิดน้ำชะมูลฝอยด้วย

ในตารางที่ 2.6 แสดงถึงลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอย ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยโดยทั่วไป สำหรับลักษณะสมบัติที่เป็นค่าเฉพาะของสถานที่ฝังกลบมูลฝอยแต่ละแห่งนั้นขึ้นกับปริมาณของชะมูลฝอย และองค์ประกอบลักษณะของมูลฝอยที่ฝังกลบนั้น จากตารางจะเห็นว่าน้ำชะมูลฝอยมีความเข้มข้นของมลสารส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่สูง

ตารางที่ 2.6 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยของสถานที่ฝังกลบมูลฝอยใหม่และเก่า  
ที่มา: Tchobanoglous, G. et al. (1993)

พารามิเตอร์	ค่าความเข้มข้น (มก./ล)		
	New landfill (Less than 2 years)		Mature landfill (Greater than 10 years)
	Range	Typical	
BOD <sub>5</sub>	2,000 - 30,000	10,000	100 - 200
TOC	1,500 - 20,000	6,000	80 - 160
COD	3,000 - 60,000	18,000	100 - 500
TSS	200 - 20,000	500	100 - 400.
Organic nitrogen	10 - 800	200	80 - 120
Ammonia nitrogen	10 - 800	200	20 - 40
Nitrate nitrogen	5 - 40	25	5 - 10
Total phosphorus	5 - 100	30	5 - 10
Ortho phosphorus	4 - 80	20	4 - 8
Alkalinity as CaCO <sub>3</sub>	1,000 - 10,000	3,000	200 - 1,000
pH	4.5 - 7.5	6	6.6 - 7.5
Total hardness	300 - 10,000	3,500	200 - 500
Chloride	200 - 3,000	500	100 - 400
Calcium	200 - 3,000	1,000	100 - 400
Magnesium	50 - 1,500	250	50 - 200
Potassium	200 - 1,000	300	50 - 400

## 2.6 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 เมมเบรนเทคโนโลยี กับกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

การใช้เมมเบรนเทคโนโลยี กับกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ส่วนใหญ่เป็นกรณีศึกษาในระดับประยุกต์ใช้ และในระดับจุลชีวภาพ เช่น ต้องการกำจัดไวรัสในน้ำเสีย การใช้เมมเบรนเป็นกระบวนการบำบัดขั้นประยุกต์ เพื่อให้ น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความบริสุทธิ์สูง มีรายละเอียดกรณีศึกษาเป็นตัวอย่างประกอบ ดังนี้

Angelo Chianese , Rolando Ranauro and Nicola Verdone (1998) ได้ทำการศึกษา การบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากพื้นที่ฝังกลบ ขนาด 4,000 ตร.ม. มีอัตราการเกิดน้ำชะมูลฝอย 5,000 ล./ชม. โดยใช้แบบจำลองกระบวนการ รีเวอร์สออสโมซิสกับเมมเบรนแบบม้วนรูปก้นหอย ค่าความดันควบคุมในระบบปฏิบัติการสูงสุด 53 บรรยากาศ น้ำชะมูลฝอยตัวอย่างที่นำมาศึกษามี ค่าซีโอดี ในช่วง 0 ถึง 1,759 มก./ล. จากกรณีศึกษาพบว่า อัตราการไหลของน้ำที่แพร่ผ่านเมมเบรนมีค่าลดลง เมื่อน้ำชะมูลฝอยตัวอย่างมี ค่าซีโอดี เพิ่มขึ้น และอัตราการผลิตน้ำที่แพร่ผ่านเมมเบรนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความดันควบคุมในระบบปฏิบัติการ ค่าประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี ขึ้นกับค่าความดันควบคุมในระบบปฏิบัติการ และไม่ขึ้นกับ ค่าซีโอดี ในน้ำชะมูลฝอยตัวอย่าง โดยประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี จะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 96 เป็นร้อยละ 98 เมื่อเพิ่มค่าความดันควบคุมในระบบปฏิบัติการจาก 20 บรรยากาศ เป็น 53 บรรยากาศ และพบว่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของโลหะหนักนั้น ๆ แต่ค่าสัมประสิทธิ์ในการกำจัด สังกะสี มีค่าลดลง เมื่อน้ำชะมูลฝอยตัวอย่างมีค่า ซีโอดี เพิ่มขึ้น

Thomas A. Peters. (1996) ได้ศึกษาการกำจัดองค์ประกอบ ต่าง ๆ ในน้ำชะมูลฝอยจากพื้นที่ฝังกลบโดยใช้เมมเบรน พบว่า จากระบบปฏิบัติการใช้เมมเบรนชนิด Octagonal แบบ Disc-tube ความดันควบคุมระบบปฏิบัติการ 120 และ 200 บาร์ อัตราการผลิตน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนเฉลี่ย 15.0 ล./ตร.ม.-ชม. และมีประสิทธิภาพการกำจัดองค์ประกอบต่าง ๆ มากกว่าร้อยละ 99 สามารถปล่อยคืนกลับสู่ธรรมชาติได้โดยไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ และข้อดีจากการใช้เมมเบรน คือ ให้ผลที่มีความแน่นอนสูง ใช้พลังงานน้อยสามารถดำเนินการได้รวดเร็ว ต่อเนื่อง และควบคุมง่าย โดยเฉพาะยังช่วยลดมลภาวะ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดจากระบบปฏิบัติการ

Japie J, Schoeman., et al. (1996) ศึกษาเกี่ยวกับ การใช้กระบวนการรีเวอร์ส ออสโมซิส บำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเหล็กในแอฟริกาใต้ ทำการศึกษาโดยใช้ เมมเบรนชนิดเซลล์ลูโลส อะซิเตท รูปแบบหลอดจำนวน 2 หน่วย มีพื้นที่เมมเบรนรวม 3.5 ตร.ม. ความดันควบคุมระบบ ปฏิบัติการ 4,000 กิโลปาสกาล น้ำเสียจะบำบัดเคลือบด้วย Soda Ash Softening ก่อนเข้าสู่ กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส จากการศึกษาพบว่า ระบบปฏิบัติการมีอัตราการถดถอยของการ ผลิตน้ำแปรผ่านเมมเบรน ในช่วง 5 ชั่วโมงแรกของการเดินระบบค่อนข้างสูง คิดเป็นอัตราการถด ถอยจาก 278 ล./ตร.ม.-วัน ลดลงเหลือ 243 ล./ตร.ม.-วัน จากนั้นอัตราการผลิตน้ำแปรผ่านเมมเบรน จึงเริ่มคงที่ และวัดค่าได้ 205 ล./ตร.ม.-วัน เมื่อเดินระบบครบ 372 ชั่วโมง และพบว่า การล้าง เมมเบรนด้วยสารละลายสิ่งสกปรก (Detergent) มีความจำเป็นและมีผลต่อการเพิ่มอัตราการผลิตน้ำ แปรผ่านเมมเบรน และได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ผลการศึกษา ดังนี้ ในน้ำเสียมีปริมาณของแข็งละลายน้ำ 34,253 มก./ล. หลังจากผ่านระบบปฏิบัติการ ในน้ำแปรผ่าน เมมเบรนมีปริมาณของแข็งละลายน้ำ 1,560 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 95.5 และ สามารถกำจัด ซีไอดี ได้ร้อยละ 81.0 กำจัดไนโตรเจนรวมได้ร้อยละ 76.2 กำจัดแอมโมเนีย ในไนโตรเจนได้ร้อยละ 85.3 กำจัดไนเตรทในไนโตรเจนได้ร้อยละ 84.6 กำจัดโซเดียมได้ร้อยละ 96.3 กำจัดโปแตสเซียมได้ร้อยละ 94.9 กำจัดแคลเซียมได้ร้อยละ 97.3 กำจัดแมกนีเซียมได้ร้อยละ 97.4 กำจัดซัลเฟตได้ร้อยละ 87.4 กำจัดคลอไรด์ได้ร้อยละ 97.6 กำจัดแมงกานีสได้ร้อยละ 91.9 กำจัดโครเมียม<sup>(vi)</sup> ได้ร้อยละ 99.8 กำจัดฟลูออไรด์ได้ร้อยละ 96.9 และ สามารถลดค่าการนำไฟฟ้าได้ร้อยละ 93.5 และได้ประมาณค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบดังกล่าว ในอัตราการบำบัด 600 ลบ.ม.ต่อวัน คิดเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการใช้ Lime Softening กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส และ กระบวนการออกซิเดชัน U.S. \$58,000 , U.S. \$350,000 และ U.S. \$87,500 ตามลำดับ

Bilstad, T. and Madland, M.V. (1992) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่เป็นพิษ โดย ใช้กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสในระดับแบบจำลอง ประกอบด้วยเมมเบรนชนิด เซลล์ลูโลส อะซิเตท รูปแบบหลอด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12.5 มม. ความยาว 1,219 มม. จำนวน 18 หน่วย มีพื้นที่เมมเบรนรวม 0.86 ตร.ม. ใช้ความดันควบคุมระบบปฏิบัติการ 53 บาร์ ความเร็ว ในการป้อนน้ำเสียผ่านเข้าไปในหลอดเท่ากับ 2.5 ม./วินาที เพื่อเปรียบเทียบกับระบบปฏิบัติการจริง จากผลการศึกษา พบว่า ระบบปฏิบัติการในระดับแบบจำลอง สามารถกำจัดเหล็ก ทองแดง สังกะสี ได้มากกว่าร้อยละ 99 และสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ทั้งหมด

Pietro Canepa., et al. (1988) ได้ศึกษาการใช้กระบวนการใช้เมมเบรนร่วมกับกระบวนการดูดซับอนุภาค (Adsorption) ในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตน้ำมันมะกอก ซึ่งในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีค่าซีไอสูงถึง 90,000 พีพีเอ็ม ทำการศึกษาโดยในเบื้องต้นจะส่งน้ำเสียเข้าสู่ กระบวนการ Ultrafiltration (UF) จำนวน 4 ชุดต่ออนุกรม แต่ละชุดประกอบด้วยเมมเบรนชนิดโพลีซัลโฟน รูปแบบหลอดขนาดความยาว 300 ซม. จำนวน 3 หลอดมีพื้นที่เมมเบรนรวม 2 ตร.ม. ความดันควบคุมระบบปฏิบัติการ 102 กิโลปาสกาล น้ำที่ผ่านกระบวนการออกมาจะส่งต่อไปยัง กระบวนการดูดซับอนุภาคมีปริมาตรรวม 300 ล. อัตราการไหล 200 ล./นาที่ และส่งต่อไปยังกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส จำนวน 2 หน่วยต่ออนุกรมเช่นเดียวกัน โดยหน่วยแรกใช้เมมเบรนชนิดโพลิไพเพอราซีน แอมไมด์ (Polypiperazine amide) แบบม้วนรูปก้นหอยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ยาว 100 ซม. ประสิทธิภาพการกำจัดโซเดียมคลอไรด์ ร้อยละ 97 ความดันควบคุมระบบปฏิบัติการ 40 กิโลปาสกาล และหน่วยที่สองใช้เมมเบรนชนิดและรูปแบบเดียวกัน แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโซเดียมคลอไรด์ ร้อยละ 95 ความดันควบคุม 102 กิโลปาสกาล พบว่า ระบบดังกล่าวสามารถกำจัดความปนเปื้อนของน้ำเสียได้มากกว่าร้อยละ 95 โดยเฉพาะสามารถกำจัดซีไอได้สูงถึงร้อยละ 99 และน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนที่ได้คิดเป็นร้อยละ 70 ของน้ำเสียทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบ สามารถนำกลับมาใช้กับกระบวนการทางการเกษตร หรือกับการชลประทานได้เป็นอย่างดี ส่วนน้ำเสียเข้มข้นร้อยละ 30 ที่เหลือนำไปใช้ประโยชน์ โดยใช้กระบวนการแยกน้ำมันและนำไปใช้ในการเผาไหม้เพื่อผลิตพลังงาน และได้ประมาณค่าใช้จ่ายของระบบสำหรับการใช้งานกับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีน้ำเสีย 10,000 ตันต่อปี เครื่องระบบบำบัด 300 วันต่อปี จะเสียค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้น 3 เซ็นต์ต่อลิตร

DeWalle, F.B. and Chian, S.K. (1978) ได้ศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการบำบัดทางเคมีและทางกายภาพต่าง ๆ ในการกำจัดสารประกอบจากน้ำทิ้ง ที่ได้จากกระบวนการกรองแบบไร้ออกซิเจน พบว่า แต่ละกระบวนการมีประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบ เรียงจากสูงไปต่ำตามลำดับได้ดังนี้คือ กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสมีประสิทธิภาพสูงกว่า กระบวนการใช้คาร์บอน (Activated Carbon) และสูงกว่า กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) และสูงกว่า กระบวนการกรองระดับ Ultrafiltration และสูงกว่า กระบวนการใช้โอโซน (Ozonation) และสูงกว่า กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) และได้สรุปผลการศึกษาไว้ว่า กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสและกระบวนการใช้คาร์บอน มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นกระบวนการบำบัดในระดับประยุกต์

## 2.6.2 เมมเบรนเทคโนโลยี กับกระบวนการผลิตน้ำสะอาด

การใช้เมมเบรนเทคโนโลยีผลิตน้ำสะอาด (Water Supply) เพื่อการอุปโภค บริโภค ส่วนใหญ่จะทำการทดลองกับน้ำทะเล (Sea Water) น้ำกร่อย (Brackish Water) ที่มีค่าความเข้มข้นสูงมาก ๆ 10,000 พีพีเอ็ม (ของแข็งละลายน้ำ) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมมเบรนเทคโนโลยีสามารถใช้ได้ดีกับการผลิตน้ำสะอาด โดยมีรายละเอียดกรณีศึกษาเป็นตัวอย่างประกอบ ดังนี้

Rozelle, L. T. et al. (1968) ได้ศึกษาการเลือกใช้เมมเบรนชนิดต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ในการผลิตน้ำบริสุทธิ์จากน้ำกร่อย ทำการศึกษาโดยใช้เมมเบรน Ultrathin Anisotropic ชนิด Beta-glucan Acetates (41.2-percent Acetyl Beta-glucan Acetate) กับ เมมเบรนชนิด เซลล์ลูโลส อะซิเตท (39.8-percent Acetyl CA) ใช้ความหนาเมมเบรน 2 ขนาด คือ 1,000 และ 2,000 อังสตรอม การใช้เมมเบรนความหนา 1,000 อังสตรอม เมื่อทดลองผ่านไป 18 ชั่วโมง พบว่า เมมเบรนชนิด Beta-glucan Acetate วัตต์อัตราการผลิตน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้ 23.0 แกลลอนต่อตารางฟุตเมมเบรนต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดเกลือร้อยละ 95 และชนิด เซลล์ลูโลส อะซิเตท อัตราการผลิตน้ำแพร่ผ่านเมมเบรน 11.5 แกลลอนต่อตารางฟุตเมมเบรนต่อวัน ประสิทธิภาพการกำจัดเกลือร้อยละ 97 และการใช้เมมเบรนความหนา 2,000 อังสตรอม เมื่อทดลองผ่านไป 24 ชั่วโมง พบว่า เมมเบรนชนิด Beta-glucan Acetate วัตต์อัตราการผลิตน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้ 11.0 แกลลอนต่อตารางฟุตเมมเบรนต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดเกลือร้อยละ 96 และชนิด เซลล์ลูโลส อะซิเตท อัตราการผลิตน้ำแพร่ผ่านเมมเบรน 11.5 แกลลอนต่อตารางฟุตเมมเบรนต่อวัน ประสิทธิภาพการกำจัดเกลือร้อยละ 97 และเมื่อทำการทดลองในช่วงเวลายาวนาน (200 ชั่วโมง) ความดันควบคุม 150 บาร์ พบว่า เมมเบรนทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพ และคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาอัตราการถดถอยของการผลิตน้ำแพร่ผ่านเมมเบรน พบว่า เมมเบรนชนิด Beta-glucan Acetate ให้คุณสมบัติดีกว่า ชนิดเซลล์ลูโลส อะซิเตท คือ มีอัตราการไหลถดถอย 0.5 แกลลอนต่อตารางฟุตเมมเบรนต่อวัน และ 2.5 แกลลอนต่อตารางฟุตเมมเบรนต่อวัน ตามลำดับ Ultrathin Anisotropic ชนิด Beta-glucan Acetates จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาผลิตเป็นเมมเบรนใช้กับกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ซึ่งมีคุณสมบัติเทียบได้กับชนิดเซลล์ลูโลส อะซิเตท

Larson, T. J. et al. (1968) ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้เมมเบรนแบบม้วนรูปก้นหอยของ 3 บริษัทที่เป็นผู้ผลิตและจำหน่ายเมมเบรน กับกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ทำการศึกษา โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 2,500 พีพีเอ็ม กับค่าความดันควบคุมที่แตกต่างกัน 3 ค่าคือ 60 บาร์ 80 บาร์ และ 100 บาร์ ระยะเวลาการทดลอง 1,000 ชั่วโมง พบว่า อัตราการผลิตน้ำแปรผ่านเมมเบรนที่ค่าความดันควบคุม 60 และ 80 บาร์ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก คิดเป็น อัตราการผลิตน้ำแปรผ่านเมมเบรนเฉลี่ย 8.0 แกลลอนต่อตารางฟุตต่อวัน ประสิทธิภาพการกำจัดโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 97 และอัตราการผลิตน้ำแปรผ่านเมมเบรนเฉลี่ย 7.5 แกลลอนต่อตารางฟุตต่อวัน ประสิทธิภาพการกำจัดโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 97 ตามลำดับ ส่วนที่ค่าความดันควบคุม 100 บาร์ สามารถผลิตน้ำแปรผ่านเมมเบรนได้สูงสุด ถึง 9.5 แกลลอนต่อตารางฟุตต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 98 และได้สรุปผลการศึกษาไว้ว่า การใช้เมมเบรนเทคโนโลยีในการผลิตน้ำบริสุทธิ์มีความเหมาะสม และให้ประสิทธิภาพสูง ทั้งนี้การเลือกใช้ชนิดหรือรุ่นของเมมเบรนจะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง เช่น ค่าอัตราการผลิตน้ำบริสุทธิ์ ค่าความดันควบคุมที่เหมาะสม คุณสมบัติของเมมเบรน ฯลฯ ซึ่งถ้าเลือกชนิดหรือรุ่นที่เหมาะสมกับข้อกำหนดในการออกแบบระบบแล้ว จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง และคุ้มกับการลงทุน