

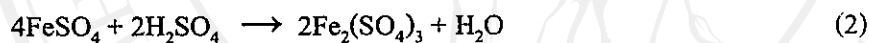
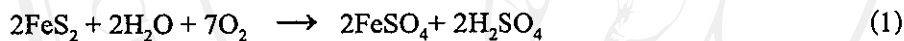
บทที่ 2

ทฤษฎี และ สารประกอบสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำระบายจากเหมือง (Mine Drainage)

ในการทำเหมือง เมื่อมีการเปิดเหมืองจนมีระดับที่น้ำได้ดินท่วมถึง โดยลักษณะโดยทั่วไปของชั้นหินจะมีการสะสมของไพไรต์ (Pyrite; FeS₂) เมื่อไพไรต์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและจุลินทรีย์บางชนิด จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปโดยการออกซิเดชันกลายเป็นกรดซัลฟูริกและสารประกอบไอออน กรดซัลฟูริกและสารประกอบของเหล็กจะละลายน้ำและทำให้น้ำมีระดับพีเอชต่ำและมีความสามารถในการละลายของสารประกอบโลหะและสารประกอบอื่นๆ โดยน้ำระบายจากเหมืองจะมีปริมาณไอออนต่างๆมากมาย

การเปลี่ยนรูปของไพไรต์เป็นเหล็กที่ละลายน้ำจะเป็นไปตามสมการที่ 1 และเหล็กเฟอร์รัส (Ferrus Iron) จะเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กเฟอร์ริก (Ferric Iron) ดังสมการที่ 2



โดย Schmit and Cohn (1969) , Colmer and Hinkle (1947) , Lorzlenz and Stephan (1969) , Syrance Univercity (1971) และ Baker and Wilshile (1970) ได้สรุปว่า จากปฏิกิริยาข้างต้นนี้มีแบบที่เร็วกว่าหนึ่งชนิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อไอออนของไฮดรอกซิล (Hydroxyl ion) รวมตัวกับซัลเฟตโดยอยู่ในรูปของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hidroxide; Fe(OH)₃) ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำในสภาพที่เป็นกรดทำให้ตกตะกอนจากน้ำ โดยตะกอนเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นสีเหลืองน้ำตาลในน้ำดังสมการที่ 3



จากสมการที่ 2 ไอออนของเฟอร์ริกสามารถทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ ทำให้ซัลไฟด์เปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟตได้ทำให้เกิดสภาพที่เป็นกรดดังสมการที่ 4



โดย Thompson (1980) และ Kemp (1983) ได้กล่าวถึงปัญหาที่เกิดจากน้ำที่มีปริมาณซัลเฟต สูง คือ

- 1) ถ้าเป็นซัลเฟตที่เกิดจากโปรตอนจำพวก H_2SO_4 จะทำให้น้ำมีระดับพีเอชต่ำและทำให้เกิดการกัดกร่อนในระบบท่อส่งน้ำ
- 2) ถ้าซัลเฟตรวมตัวในรูปของ $CaSO_4$ มากจะทำให้เกิดการอุดตันในระบบท่อส่งน้ำและทำให้ลดประสิทธิภาพของเครื่องจักร ทำให้เกิดความเสียหายในทางของเศรษฐศาสตร์
- 3) ถ้าน้ำมีปริมาณซัลเฟตสูง จะทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบทางเดินอาหาร คือ ทำให้เกิดอาการท้องเดิน โดย EPA ได้กำหนดให้น้ำดื่มมีปริมาณซัลเฟตได้ไม่เกิน 250 มก./ล. และองค์การอนามัยโลกได้กำหนดให้น้ำประปามีปริมาณซัลเฟตที่ยอมให้ 250 มก./ล. และสูงสุดไม่เกิน 400 มก./ล.
- 4) Visser และ คณะ (2001) ได้กล่าวว่าน้ำที่มี H_2SO_4 จะมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนเนต โดย H_2SO_4 ทำให้ยับยั้งละลายและถูกชะออกจากโครงสร้าง

โดย ตารางที่ 1 แสดงถึงคุณลักษณะของน้ำที่ระบายจากเหมืองแม่เมาะ

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของน้ำที่ระบายจากเหมืองแม่เมาะ

จากวันที่ 1 มค. 2547 ถึงวันที่ 31 กค. 2548

Parameter	Max	Min	Average	SD.
pH	8	7	7.9	0.35
Conductivity	2850	1909	2612.4	213.0
TDS ; mg/l	2892	2098	2520.5	239.9
Total Alk ; mg/l as $CaCO_3$	164	0	54.7	69.7
Total Hardness mg/l as $CaCO_3$	1560	1040	1372.7	113.2
Chloride ; mg/l	2	0	1	0.7
Sulfate ; mg/l	1944	1249	1661.5	214.1

ที่มา : แผนปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมเหมืองแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

2.2 กระบวนการเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรน คือ กระบวนการต่างๆที่อาศัยเยื่อเมมเบรนในการแยกสารละลายออกจากน้ำ หรือ ของเหลว หรือ เพิ่มความเข้มข้น สำหรับสารละลายหรือแก๊สผสม โดยจำกัดความของเมมเบรน คือ ตัวกลางซึ่งอาจเป็นฟิล์มบางๆที่มีรูพรุนขนาดเล็กที่ทำหน้าที่กั้นระหว่างสารสองสถานะ แล้วมีอนุภาคบางกลุ่มถูกยอมรับให้เคลื่อนผ่านช่องรูพรุนนั้นจากสถานะหนึ่งไปยังสถานะหนึ่งที่อยู่ตรงข้ามได้ โดยทั่วไปเมมเบรนจะเป็นของแข็งหรือเป็นของเหลว ซึ่งมีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารหนึ่งมากกว่าสารอื่น (semipermeable/permeable) โดยการเลือกผ่านสารเป็นผลจากโครงสร้างทางเคมี หรือทางกายภาพของเมมเบรน ซึ่งพิจารณาได้จากการมีการดึงดูด (affinity) ของเมมเบรนต่อสารนั้น หรือจากขนาดของรูพรุน หรือจากการมีประจุของเมมเบรน

ในการกรองอนุภาคแขวนลอยโดยใช้เมมเบรนนี้เป็นการพิจารณาถึงกระบวนการแพร่ผ่านของของเหลว เริ่มตั้งแต่ของเหลวเกิดการแยกตัวและแพร่ผ่านเมมเบรน ซึ่งความสามารถในการกรองอนุภาคจะขึ้นกับขนาดของอนุภาคและค่าน้ำหนักมวลโมเลกุลที่แตกต่างกัน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วมีความเป็นไปได้ยากในการแบ่งลำดับชั้นความสามารถในการกรองอนุภาค เพราะขนาดของอนุภาคและค่าน้ำหนักมวลโมเลกุลมีค่าที่คาบเกี่ยวกัน โดย Dow Chemical Thailand Ltd. (1993) ได้แบ่งระดับชั้นของกระบวนการกรองอนุภาคแขวนลอยโดยใช้ขนาดของอนุภาคที่น้อยกว่า 0.1 ไมครอนเป็นเกณฑ์ ดังนี้

2.2.1) กระบวนการไดอะไลซิส (Dialysis process) เป็นกระบวนการที่ใช้ผลต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลายระหว่างสองด้านของเยื่อเมมเบรนเป็นแรงขับเคลื่อนให้สารถ่ายเทผ่านเยื่อเมมเบรน ตัวถูกละลายขนาดเล็กจะถ่ายเทโดยการแพร่ผ่านเยื่อเมมเบรนจากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำ ดังนั้นจึงสามารถในการใช้แยกเกลือและตัวถูกละลายขนาดเล็กออกจากตัวถูกละลายขนาดใหญ่ กระบวนการนี้มีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมไม่มากนักเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ช้ามาก เพราะใช้ผลต่างของความเข้มข้นเป็นแรงขับเคลื่อน และเมมเบรนมีความสามารถในการแยกต่ำไม่สามารถที่จะแยกโมเลกุลที่มีขนาดใกล้เคียงกันได้

2.2.2) อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis ; ED) เป็นกระบวนการแยกองค์ประกอบที่มีไอออนจากสารอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนมาต่ออนุกรมกันและอยู่ระหว่างขั้วบวก (anode) และขั้วลบ (cathode) ทำให้เกิดการแยก โดยไอออนบวกจะผ่านเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนบวก ส่วนไอออนลบจะผ่านเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนลบเท่านั้น ทำให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสูงและสารละลายเจือจาง

การใช้งานที่สำคัญของกระบวนการ ED คือ การผลิตน้ำดื่มจากน้ำกร่อย หรือน้ำทะเล , การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเกลือและการบำบัดน้ำเสีย เช่น การแยกโลหะไอออนกลับคืน ในอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ (electroplating)

2.2.3) ไฮเพอร์ฟิลเตรชันหรือรีเวอร์สออสโมซิส (Hyperfiltration ; HF หรือ Reverse Osmosis; RO) เป็นระดับการกรองสารต่างๆที่ละเอียดที่สุด สามารถกรองสารละลายน้ำเกลือได้ทั้งหมด สารอินทรีย์ สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักมวลโมเลกุลน้อยกว่า 100 จึงทำให้สารละลายที่ผ่านออกมาได้เป็นน้ำบริสุทธิ์ กระบวนการ RO มีความสามารถในการกำจัดสารประกอบและสารแขวนลอยต่างๆตั้งแต่ร้อยละ 95 ถึงมากกว่าร้อยละ 99 และได้มีการใช้กระบวนการ RO อย่างกว้างขวาง เช่น การทำน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลให้เป็นน้ำบริสุทธิ์ การใช้ระบบ RO ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสีย ใช้แยกจุลชีวะภาพทางการแพทย์ ใช้ทำน้ำบริสุทธิ์สำหรับบริโภคตามที่อยู่อาศัยทั่วไป และใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมต่างๆที่ต้องการใช้น้ำบริสุทธิ์

2.2.4) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration ; NF) การกรองสารระดับนี้ต้องการเมมเบรนชนิดพิเศษที่สามารถแยกอนุภาคได้ในช่วงขนาด 1 นาโนเมตร (10 อังสตรอม) ด้วยเหตุนี้ช่วงปฏิบัติการของระดับการกรอง NF จะคาบเกี่ยวกับระดับการกรอง UF และ RO โดยอนุภาคที่มีค่าน้ำหนักมวลโมเลกุลมากกว่าช่วง 200 ถึง 400 จะถูกกำจัดออก ดังนั้นสารละลายของน้ำเกลือจะถูกกำจัดออกได้ประมาณร้อยละ 20 ถึง ร้อยละ 80 เช่น สามารถกำจัดแมกนีเซียมซัลเฟตได้ร้อยละ 90 ถึงร้อยละ 98 รวมถึงสามารถกำจัดสี ความกระด้าง แร่เรเดียม สารประกอบอินทรีย์ ของแข็งละลายน้ำ และสามารถแยกสารประกอบอินทรีย์ โดยระบบปฏิบัติการทั่วไปจะใช้เวลาที่ 3.5 ถึง 16 บาร์ (50 ถึง 225 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

2.2.5) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration ; UF) ในการกรองระดับนี้สามารถกำจัดขนาดของอนุภาคในช่วง 0.2-10 ไมครอน (20-1000 อังสตรอม) โดยทั่วไปจะเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กทั้งหมด , สารละลายน้ำเกลือ , คอลลอยด์ , โปรตีน และ สารปนเปื้อนระดับจุลชีวะภาพ ซึ่งช่วงค่าน้ำหนักมวลโมเลกุลที่กรองได้ คือ 1,000 ถึง 10,000 โดยในระบบปฏิบัติการทั่วไปจะใช้เวลาที่ 1 ถึง 7 บาร์ (15 ถึง 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

2.2.6) ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration ; MF) ในการกรองระดับนี้สามารถกำจัดขนาดของอนุภาคในช่วง 0.1-1 ไมครอน ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นอนุภาคแขวนลอย คอลลอยด์ขนาดใหญ่ รวมถึงแบคทีเรีย โดยระบบปฏิบัติการทั่วไปจะใช้เวลาที่ 0.7 บาร์ หรือ 10 ปอนด์/ตร.นิ้ว

2.2.7) กระบวนการแยกแก๊ส (Gas separation) เป็นกระบวนการที่ใช้แยกก๊าซผสมแบ่งเป็น 2 แบบ คือ

ก. gas permeation (GP) เป็นการแยกโมเลกุลของแก๊สผ่านเมมเบรนแบบแน่น/ไม่มีรูพรุน ด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ (คล้ายกับ RO) แรงดันที่ใช้ในการแยก คือ ความดันย่อย ซึ่งอยู่ในช่วง 100 kPa-10MPa

ข. gas diffusion (GD) เป็นการแยกแก๊สผ่านเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กซึ่งอาจใช้แรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างของความเข้มข้นหรือความดัน

โดยอุตสาหกรรมที่ใช้กระบวนการนี้ส่วนใหญ่ในการแยก helium , hydrogen หรือ carbon dioxide ออกจากแก๊สผสม

2.2.8) กระบวนการ Pevaporation (PV) เป็นกระบวนการที่แยกองค์ประกอบหนึ่งๆออกจากสารละลายผ่านเมมเบรนแบบแน่น ด้วยกลไกที่ผ่านองค์ประกอบที่ผ่านเมมเบรนแล้วจะอยู่ในรูปของไอ (ด้านของ permeate) ซึ่งเกิดจากการควบคุมความดันด้าน permeate ให้ต่ำกว่าความดันย่อยของสารที่ผ่านเยื่อเมมเบรน เยื่อเมมเบรนที่ใช้ในกระบวนการนี้อาจเป็นเมมเบรนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งอาจจะเลือกผ่านน้ำมากกว่าสารอินทรีย์ หรือถ้าเป็นเมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะเลือกผ่านสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ ดังนั้นการประยุกต์ใช้จึงเป็นการแยกน้ำ (dehydration) เพื่อผลิตสารอินทรีย์ เช่น การผลิตแอลกอฮอล์ความเข้มข้นสูง หรือการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์เจือจาง

2.2.9) การแยกด้วยเมมเบรนของเหลว (Liquid membrane ; LM) เป็นการแยกผ่านเมมเบรนที่มีลักษณะเป็นของเหลว เยื่อเมมเบรนของเหลวอาจเป็นอิมัลชัน (emulsion) หรือ เป็นฟิล์มของเหลว หรือ ฟิล์มของเหลวที่เกาะหรือพวยงตัวอยู่บนเมมเบรนธรรมดา

2.2.10) การกลั่นผ่านเมมเบรน (Membrane distillation ; MD) เป็นกระบวนการแยกองค์ประกอบที่ระเหยง่าย (โดยส่วนมากเป็นน้ำ) ออกจากสารละลายโดยมีผลต่างของความดันไอเป็นแรงขับเคลื่อน (driving force) หลักการ คือ การป้อนสารละลายที่มีอุณหภูมิสูงผ่านเมมเบรนรูพรุนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) น้ำจะกลายเป็นไอล้วนเคลื่อนผ่านรูพรุนของเมมเบรนไปยังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การทำให้อไอน้ำกลั่นตัวของเหลวทำได้โดยการใช้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าไหลผ่านเมมเบรนด้านที่ซึมผ่าน ไอน้ำจะกลั่นตัวเข้าไป หรือใช้ก๊าซเฉื่อยเป็นตัวพาไอน้ำออกไปเพื่อกลั่นตัวภายนอกรูพรุนของเมมเบรน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของ MD

กระบวนการ MD ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำสะอาด เช่น การแยกเกลือออกจากน้ำทะเลและ น้ำกร่อย การผลิตน้ำผลไม้เข้มข้น ดังนั้นการใช้งานของกระบวนการ MD จะใกล้เคียงกับกระบวนการ RO และการกลั่น แต่ยังมีปัญหาทางด้านเทคนิค

โดยรูปที่ 2.1 แสดงถึงรายละเอียดของระดับความสามารถในการกรองอนุภาคที่น้อยกว่า 1 ไมครอน และตารางที่ 4 แสดงรายละเอียดการนำกระบวนการเมมเบรนไปประยุกต์ใช้งาน

Ionic Range	Electron Microscopy			Optical Microscopy		Visible to Naked Eye
	Molecular Range	Macro Molecular Range	Micro Particle Range	Macro Particle Range		
Micron	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	100
Angstrom	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
Mol. Wt. Range	100 200 1000 10000	20000 100000	500000			
	Note : 1 Angstrom Unit = 10^{-10} Meters $\neq 10^{-4}$ Micrometers (Microns)					

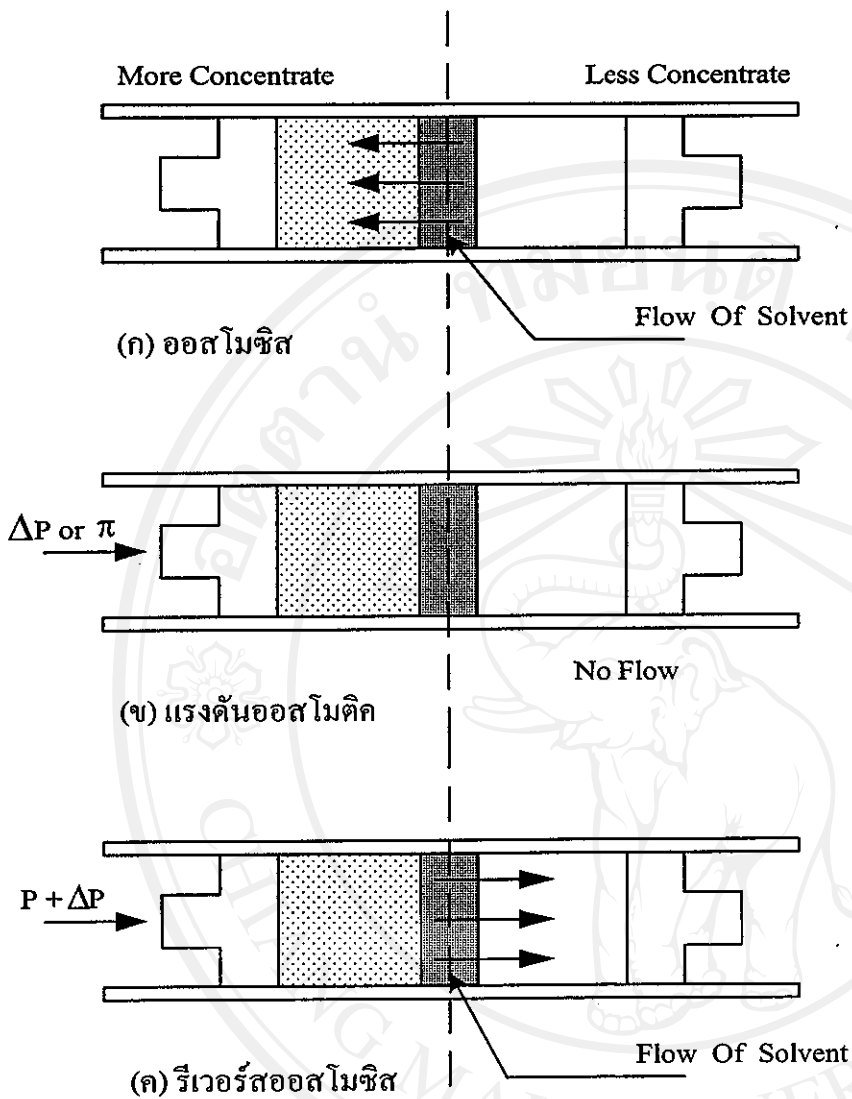
รูปที่ 2.1 ช่วงการกรองอนุภาคในระดับชั้นต่างๆ
ที่มา : Dow Chemical Thailand Ltd. (1993)

2.3 กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส

ออสโมซิส หมายถึง การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติของน้ำผ่านเยื่อเมมเบรนบางๆ (semipermeable membrane) จากสารละลายเจือจางไปยังสารละลายเข้มข้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยเยื่อเมมเบรนในอุดมคติจะยอมให้น้ำไหลผ่านได้เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติโมเลกุล หรือ ไอออน บางชนิดอาจไหลผ่านได้เช่นกัน ถ้าจัดระบบออสโมซิสให้มีการไหลเป็นแบบที่แสดงในรูปที่ 2.2(ก) เมื่อปล่อยให้มีการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนจนกระทั่งถึงจุดสมดุล (ไม่มีการไหลอีก) ระดับน้ำในด้านซ้ายซึ่งเป็นสารละลายเข้มข้นจะสูงกว่าระดับน้ำทางด้านขวาซึ่งเป็นน้ำจืด ผลต่างของระดับน้ำนี้เรียกว่า แรงดันออสโมซิส (osmotic pressure) ดังรูปที่ 2.2(ข) โดยนักวิทยาศาสตร์ได้อธิบายถึงปรากฏการณ์ออสโมซิส ว่า อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสารละลายเข้มข้นมี vapor pressure ต่ำกว่าสารละลายเจือจาง ระดับน้ำในทั้งสองข้างของเมมเบรนจึงมีการปรับตัว จนกระทั่งแรงดันบนผิวน้ำทั้งสองด้านเท่ากัน ถ้ามีแรงดันที่มีค่าสูงกว่าแรงดันออสโมซิสมากกระทำต่อด้านที่มีสารละลายเข้มข้น น้ำจะไหลย้อนกลับดังรูปที่ 2.2(ค) ซึ่งเป็นการดำเนินการไหลตามธรรมชาติ วิธีดังกล่าวนี้วิศวกรจึงนำมาใช้เพื่อการแยก น้ำออกจากสารละลายเข้มข้นต่างๆ และเรียกรีเวอร์สออสโมซิส ดังนั้นกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสจึงมีปัจจัย 2 อย่าง คือ แรงดัน และ เมมเบรน

โดยกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสได้มีการพัฒนา และนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเหตุผลที่ทำให้กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสได้รับความสนใจและนิยม ได้แก่ ความสามารถในการกำจัดสารละลาย และคอลลอยด์ดังต่อไปนี้

- 1) ลดปริมาณสารละลายในน้ำ (TDS)
- 2) ลดปริมาณความกระด้าง
- 3) ลดปริมาณฟลูออไรด์
- 4) ลด/หรือกำจัดโลหะหนักที่เป็นพิษและสร้างความรำคาญ
- 5) ลด/หรือกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ
- 6) ลด/หรือกำจัดจุลินทรีย์ต่างๆ รวมถึงไวรัส



รูปที่ 2.2 ออสโมซิสและรีเวอร์สออสโมซิส

ที่มา : Kootatep, S.(1979)

โดยกลไกในการทำงานของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส มีดังนี้

- ก. กลไกทางกายภาพ เนื่องจากเมมเบรนมีขนาดรูพรุนที่เล็กมาก ซึ่งสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 โดยวิธีการกรอง (Sieve)
- ข. กลไกเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต (Electrometric Interaction) เนื่องจากเมมเบรนส่วนใหญ่จะมีประจุเป็นลบ จึงทำให้เกิดกลไกในการกำจัดเกลือโดยการเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าของประจุลบ ส่งผลให้ไอออนที่มีประจุมากยิ่งถูกกำจัดได้มาก

ตารางที่ 2.2 การประยุกต์ใช้งานของกระบวนการเมมเบรน

Process	Application
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)	Dry (whey recovery, precheese concentration) Electrocoat colloids Effluents (oil-water, pulp and paper, dye-stuffs, tannery) Biological (enzymes, fermentations) Water purification
Microfiltration-Crossflow filtration (MF-CFF)	Sterile solution/water purification Beverage filtration Effluents Cell harvesting
Liquid membrane (LM)	Hydrometallurgy Effluents Gas separations
Gas permeation (GP)	Helium recovery Hydrogen recovery/removal CO ₂ from hydrocarbons
Gas diffusion (GD)	Uranium enrichment
Pervaporation (PV)	Ethanol/water separation
Membrane distillation (MD)	Pure water

ที่มา : Fane, A.G. (1987)

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการเมมเบรนแบบต่างๆ

Membrane Process	Separation Potential for	Driving Force	Permeating Component
Microfiltration	Suspension, emulsious	Pressure 0.1-500 kPa	Solvent
Ultrafiltration	Macromolecular solutions, emulsious	Pressure 100-1000 kPa	Solvent
Nanofiltration	Di and multivalent ions, macromolecukes, organics	Pressure 300-1400 kPa	Solvent
Reverse Osmosis	Aqueous low moleculant mass solution, organic solutions	Pressure 1000-10000 kPa	Solvent
Osmosis	Aqueous solutions	Concentration	Solvent
Dialysis	Aqueous solutions	Concentration	Solute (ions)
Electrodialysis	Aqueous solutions	Electric potential	Solute (ions)
Gas Separation	Gas mixures, vapourga mixture	Pressure 100-10000 kPa	Preferably permeating component
Pervaporation	Organic mixture, aqueousorganic mixture	Activity	Preferably permeating component
Membrane distillation	ions	Temperature	Solute (ions)
Pertraction	Metal from water	Concentration	Solute (metals)
Liquid membrane	Aqueous low molecular mass solution	Concentration	Solute (ions)

ที่มา : Rautenbach and Albert, (1989)

แรงดันออสโมซิส (π) เป็นคุณสมบัติของสารละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ดังแสดงด้วยสมการดังนี้

$$\pi = nCRT \quad (5)$$

โดยที่ π = แรงดันออสโมซิส (บรรยากาศ)

n = จำนวนไอออนในสารประกอบ

C = ความเข้มข้นของสารละลาย (โมล/ลิตร)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ = 0.082 บรรยากาศ-ลิตร/โมล-°K

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (°K) = 273 + °ซ

2.4 แบบจำลองการแพร่ของเมมเบรน (Diffusion Model)

กลไกทางกายภาพของการแพร่ผ่านของเมมเบรนของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส เริ่มจากปรากฏการณ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์แบบไม่มีปฏิริยาย้อนกลับ (Irreversible Thermodynamics) โดยมีปฏิภาครระหว่างอัตราการไหลของอนุภาคและแรงขับเคลื่อนเป็นสัดส่วนกัน จากความสัมพันธ์นี้สามารถแสดงเป็นสมการได้ คือ

$$J_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} x_k \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (6)$$

โดย J_i = อัตราการไหลของอนุภาค i

L_{ik} = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของแบบจำลอง

x_k = แรงขับเคลื่อนที่กระทำต่ออนุภาค k

สามารถเขียนใหม่ตาม Binary System ได้เป็น

$$J_1 = L_{11}x_1 + L_{12}x_2 \quad (7)$$

$$J_2 = L_{21}x_1 + L_{22}x_2 \quad (8)$$

โดย (J_1) คือ อัตราการไหลของน้ำหรือตัวทำละลาย (Solvent) และ (J_2) คือ อัตราการไหลของอนุภาคในน้ำหรือตัวถูกละลาย (Solute) ค่าสัมประสิทธิ์ (L_{11}) คือ ค่าความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่กับแรงขับเคลื่อนของตัวทำละลาย ค่าสัมประสิทธิ์ (L_{12}) คือ ค่าความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่

กับแรงขับเคลื่อนของตัวถูกละลาย ส่วนค่าของ (L_{21}) และ (L_{22}) ก็เป็นทำนองเดียวกัน สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ (L_{12}) และ (L_{21}) จะขึ้นกับความแตกต่างของอนุภาค ในสมการที่ 7 และ 8 พจน์ทางขวามือของสมการเรียกว่า พจน์อัตราการไหลคู่ควบ ในแบบจำลองพจน์อัตราการไหลคู่ควบนี้จะสมมติยกเว้นไม่นำมาคิด ดังนั้นเขียนรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$J_1 = L_{11}x_1 \quad (9)$$

$$J_2 = L_{22}x_2 \quad (10)$$

แรงขับเคลื่อนที่นำมาใช้ในสมการขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการ เช่น การไหลของความร้อน แรงขับเคลื่อนของกระบวนการ คือ อุณหภูมิ ในแบบจำลองการแพร่ผ่านของสารละลายใช้ความต่างศักย์ของเคมีและแรงกระทำจากภายนอกเป็นแรงขับเคลื่อนกระบวนการ นั่นคือ

$$X = -\text{grad } \mu + Y \quad (11)$$

โดย μ = ค่าความต่างศักย์

Y = แรงกระทำจากภายนอก (ทางกล และ/หรือ ทางไฟฟ้า) ในแบบจำลองสมมติให้ไม่มีแรงกระทำจากภายนอกต่อระบบเลย ดังนั้น จากสมการ 9 และ 10 จะได้เป็น

$$J_1 = -L_{11}\text{grad } \mu_1 \quad (12)$$

$$J_2 = -L_{22}\text{grad } \mu_2 \quad (13)$$

ในระบบออสโมซิสที่มีอุณหภูมิเท่ากัน (Isothermal Osmosis) ความต่างศักย์ทางเคมีประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ คือ ความเข้มข้น (Concentration Gradient) และ ความดัน (Pressure Gradient) พิจารณาองค์ประกอบทั้งสองนี้ ในรูปสมการจะได้เป็น

$$\text{grad } \mu = \left(\frac{\partial \mu}{\partial C} \right)_{P,T} \text{grad } C + V \text{ grad } P \quad (14)$$

โดย $C =$ ค่าความเข้มข้น

$$V = \text{Partial molar volume} = \left(\frac{\partial \mu}{\partial P} \right)$$

$P =$ ค่าความดัน

เมื่อแทนสมการ 12 ลงในสมการ 15 และ 16 จะได้เป็น

$$J_1 = L_{11} \left[\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial C_1} \right) \text{grad } C_1 + V_1 \text{ grad } P \right] \quad (15)$$

$$J_2 = L_{22} \left[\left(\frac{\partial \mu_2}{\partial C_2} \right) \text{grad } C_2 + V_2 \text{ grad } P \right] \quad (16)$$

แทนพจน์ความเข้มข้นของอัตราการไหลของตัวทำละลายด้วยค่าความดันออสโมติกจะได้สมการอัตราการไหลของตัวทำละลายขึ้นอยู่กับค่าความดันเพียงอย่างเดียว จากสมการ 15 เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$J_1 = -L_{11} V_1 [(\Delta P - \Delta \pi) / (\Delta x)] \quad (17)$$

โดยที่ $\Delta P =$ ค่าความดันประยุกต์ (Applied Pressure)

$\Delta \pi =$ ค่าความต่างของความดันออสโมติก

$\Delta x =$ ความหนาของเมมเบรน

พิจารณาอัตราการไหลของตัวถูกละลาย ค่าความดันมีผลน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้น จากสมการ 15 สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$J_2 = -L_{22} \left[\left(\frac{\partial \mu_2}{\partial C_2} \right) \left(\frac{dC_2}{dx} \right) \right] \quad (18)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ (L_{11}) และ (L_{12}) ในแบบจำลองการแพร่ผ่านของสารละลายจะขึ้นกับความหนาแน่นของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน (Concentration Times Membrane Mobility Factor) จากสมการ 16 และ 17 เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$J_1 = C_{1m} M_{1m} V_1 [(\Delta P - \Delta \pi) / (\Delta x)] \quad (19)$$

$$J_2 = -C_{2m} M_{2m} \left[\left(\frac{\partial \mu}{\partial C_2} \right) \left(\frac{dC_2}{dx} \right) \right] \quad (20)$$

โดย C_{1m} = ค่าความเข้มข้นของตัวทำละลายในเมมเบรน

C_{2m} = ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเมมเบรน

M_{1m} = Membrane Mobility of Solvent

M_{2m} = Membrane Mobility of Solute

ในสารละลายที่เจือจาง สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ผ่านของเมมเบรนจะเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน คือ $D_{1m} = M_{1m} RT$ และความต่างศักย์เคมีจะเกี่ยวข้องกับความเข้มข้น จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ในส่วนอัตราการไหลของตัวทำละลายจะได้ว่า $\partial \mu = RT \left(\frac{\partial C}{C} \right)$ และสำหรับอัตราการไหลของตัวถูกละลาย คือ $\frac{\partial \mu_2}{\partial C_{2m}} = \frac{RT}{C_{2m}}$ จากค่าความสัมพันธ์นี้ สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$J_1 = -(C_{1m} D_{1m} V_1) / (RT \Delta x) (\Delta P - \Delta \pi) \quad (21)$$

$$J_2 = -D_{2m} k (\Delta C_{2s} / \Delta x) \quad (22)$$

โดยที่ $k = \text{Distribution Factor} = \Delta C_{2m} / \Delta C_{2s}$

$D_{1m} / D_{2m} =$ สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของตัวทำละลายและตัวถูกละลายในกระบวนการเมมเบรน

$\Delta C_{2s} =$ ค่าความต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลายกับตัวทำละลาย

สมมติให้องค์ประกอบอื่นๆของเมมเบรนไม่มีผลต่อค่าความดัน หรือค่าความเข้มข้น ดังนั้น ค่า $(C_{1m} D_{1m} V_1) / (RT \Delta x)$ และ $(D_{2m} k) / \Delta x$ จะรวมเป็นพจน์ของค่าคงที่ A และ B ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่สำหรับทั้งของตัวทำละลายและตัวถูกละลายจะได้เป็น

$$J_1 = -A(\Delta P - \Delta \pi) \quad (23)$$

$$J_2 = -B\Delta C_{2s} \quad (24)$$

โดย A และ B เรียกว่า ค่าคงที่ของเมมเบรน (Membrane Performance)

2.5 พารามิเตอร์สำหรับการออกแบบและควบคุม

2.5.1 อัตราการผลิตน้ำบริสุทธิ์ (Water Flux; F_w) หมายถึงอัตราเร็วของน้ำที่ซึมผ่านเมมเบรนซึ่งเท่ากับอัตราการไหลของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ของเมมเบรน เช่น มล./ตร.ม.-วินาที โดยอัตราน้ำที่ซึมผ่านเมมเบรนได้จะขึ้นกับแรงดันของเครื่องสูบลูกสูบและแรงดันออสโมซิสที่ต้านไว้ดังสมการที่ 25

$$F_w = A(\Delta P - \Delta \pi) \quad (25)$$

โดยที่ F_w = อัตราการผลิตน้ำบริสุทธิ์ (Water Flux) (มล./ชม.²/วินาที)

A = ค่าสัมประสิทธิ์ของน้ำผ่านเมมเบรน (มล./ตร.ชม.-บรรยากาศ)

โดยเท่ากับ 1.5×10^{-5} มล./ตร.ชม.-บรรยากาศ

สำหรับเมมเบรนที่ทำจากเซลลูโลสอะซิเตท

ΔP = ความแตกต่างระหว่างแรงดันน้ำทั้ง 2 ข้างของเมมเบรน (บรรยากาศ)

$\Delta \pi$ = ความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมซิสของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน (บรรยากาศ)

2.5.2. อัตราการรั่วของสารละลาย (Salt Flux; F_s) ในทางอุดมคติเมมเบรนต้องไม่ยอมให้สารละลายซึมผ่านได้เลย แต่ในความเป็นจริงเมมเบรนไม่สามารถผลักโมเลกุลหรือไอออนได้หมดทุกตัว ทำให้น้ำที่ผลิตได้มีลทินเสมอ การรั่วของสารละลายผ่านเมมเบรนจะคำนวณได้ดังสมการที่ 26

$$F_s = \beta(C_0 - C_p) \quad (26)$$

โดยที่ F_s = อัตราการรั่วของสารละลาย (Salt Flux) (กรัม/ตร.ชม.-วินาที)

β = ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของสารละลายผ่านเมมเบรน (ชม./วท.)

= 1×10^{-5} ชม./วท. สำหรับเมมเบรนเซลลูโลสอะซิเตท

C_0 = ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำดิบ (กรัม/มล.)

C_p = ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำสะอาด (กรัม/มล.)

2.5.3 การกักกัน Rejection Factor หรือ %Rejection เป็นคุณสมบัติที่เมมเบรนจะต้องมี โดยเมมเบรนที่ดีจะต้องไม่ยอมให้โมเลกุลของไอออนไหลผ่านได้มาก นั่นคือ ต้องมี Rejection Factor หรือ %Rejection สูง (ในอุดมคติมีค่าเท่ากับ 100) ซึ่งค่า %Rejection คำนวณได้จากสมการที่ 27-30 ดังนี้

$$\%Rejection = R_j = 100 \left(\frac{C_0 - C_p}{C_0} \right) \quad (27)$$

$$= 100(1 - C_p/C_0) \quad (28)$$

เนื่องจาก $C_p = \frac{F_s}{F_w}$ ดังนั้น $R_j = 100 \left(1 - \frac{F_s}{C_0 F_w} \right) \quad (29)$

2.5.4 Recovery Factor หรือ %Recovery หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำสะอาดที่ผลิตได้ต่อปริมาณน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำสะอาด โดย Recovery Factor เป็นคุณสมบัติของเมมเบรนที่คู่กับ Rejection Factor ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ 26

$$\%Recovery = R = 100 \frac{Q_p}{Q_0} \quad (30)$$

โดยที่ Q_p = อัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จากระบบรีเวอร์สออสโมซิส
 Q_0 = อัตราการไหลของน้ำดิบที่เข้าระบบรีเวอร์สออสโมซิส

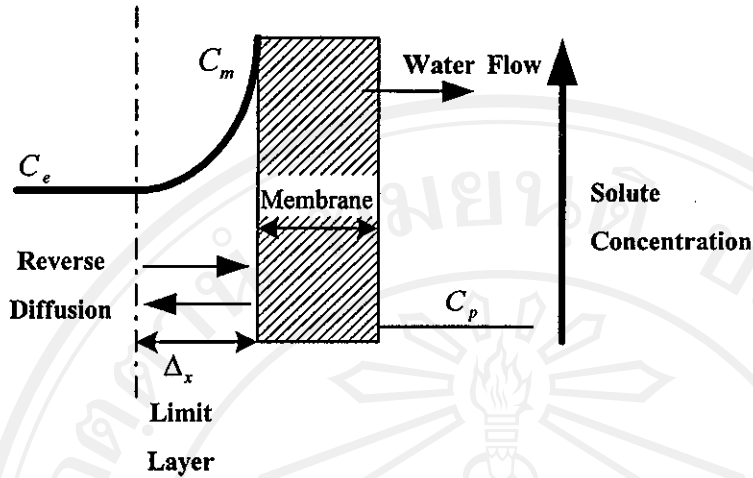
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบรีเวอร์สออสโมซิส

2.6.1 Concentration Polarization

ในระบบไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic) รวมทั้งระบบรีเวอร์สออสโมซิสจะมีชั้นน้ำเรียกว่า Boundary Layer ติดอยู่กับผิวเมมเบรน ชั้นน้ำดังกล่าวจะอยู่เป็นอิสระโดยไม่ผสมกับน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ภายนอก ความหนาของ boundary layer แปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำและความปั่นป่วน น้ำสะอาดถูกบังคับให้ออกจากชั้นนี้และกระจายซึมผ่านเมมเบรนออกด้านนอก ทำให้มีการสะสมตัวของสารละลายต่างๆเกิดขึ้นภายใน boundary layer (ดูรูปที่ 2.3) จนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำดิบหลายเท่า ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิด Concentration Polarization ระดับการเกิด Concentration Polarization อาจแสดงได้โดยอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นสูงสุด (ที่ผิวเมมเบรน) ของสารละลายใน boundary layer และความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำดิบ คือ C_m/C_0 ดังแสดงในรูปที่ 2.3

สมรรถนะในการกำจัดสารละลายของเมมเบรนขึ้นอยู่กับ Concentration Polarization เป็นอย่างมากเนื่องจากการสะสมตัวของเกลือแร่ใน boundary layer ทำให้เกิดผลเสียต่างๆต่อระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่กำลังทำงานอยู่ดังต่อไปนี้

- 1) ทำให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้นเป็นผลให้อัตราการผลิตน้ำสะอาด (Flux) ลดลง
- 2) ทำให้มีการรั่วของสารละลายผ่านเมมเบรน (Salt Flux) เพิ่มขึ้นเป็นผลให้น้ำที่ผลิตมีมลทินเพิ่มขึ้น



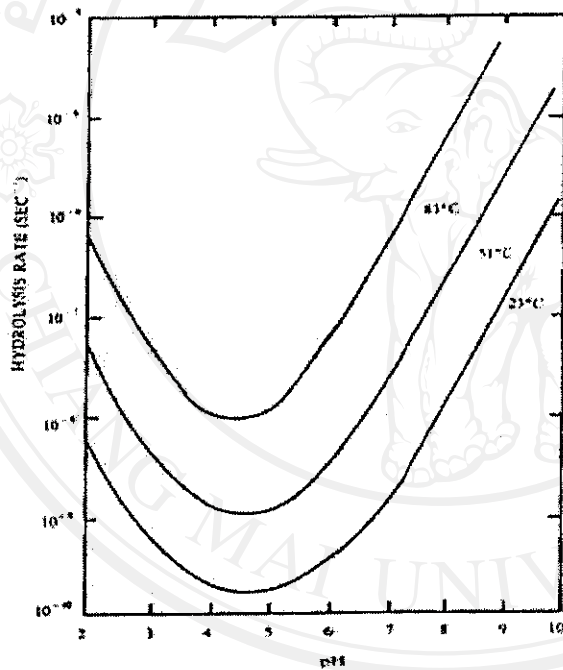
รูปที่ 2.3 Concentration Polarization ที่เกิดในระบบปริเวอร์สออสโมซิส
ที่มา : มั่นสิน ตันกุลเวศม์, (2538)

2.6.2 อุณหภูมิและพีเอช

การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแต่ละองศาในช่วง 15-30°C ช่วยให้อัตราของอัตราการผลิตน้ำบริสุทธิ์เพิ่มตามไปด้วยประมาณ 3-5% แต่ไม่เพิ่ม salt flux การที่เมมเบรนมีสารอินทรีย์เอสเตอร์ (Organic Ester) ซึ่งสามารถสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) อุณหภูมิและพีเอชจึงมีบทบาทดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาแปรตามอุณหภูมิของน้ำ และจะช้าสุดเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 4-5 ด้วยเหตุนี้ถ้าต้องการให้เมมเบรนมีอายุยืนนานจึงควรรักษา ระดับพีเอชให้อยู่ในช่วง 3-7 และอย่าทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูง รูปที่ 2.5 อัตราการผลิตน้ำสะอาดจะเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิสูงความหนืดของสารละลายจะลดลงทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำและตัวถูกละลายผ่านเมมเบรนได้ดี

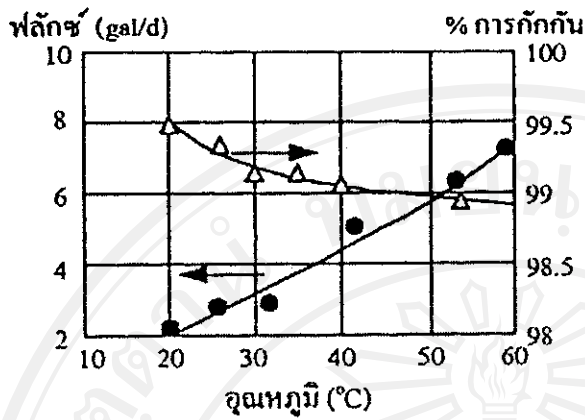
2.6.3 แรงดัน

แรงดันมีอิทธิพลโดยตรงต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) ของระบบรีเวอร์สออสโมซิสเป็นอย่างมาก แต่แทบไม่มีผลต่อการรั่วของสารละลาย (Salt Flux) ด้วยเหตุนี้การเพิ่มแรงดันจึงมีผลทำให้ระบบรีเวอร์สออสโมซิสสามารถผลิตน้ำสะอาดได้ดีขึ้นและทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามแรงดันสูงก็สามารถสร้างผลเสียได้เช่นกัน ทั้งนี้เพราะแรงดันทำให้โครงสร้างของเมมเบรนเกิดการอัดตัวแน่น (Compaction) จนกระทั่งน้ำไม่สามารถไหลผ่านได้สะดวก ผลเสียอันนี้ถือว่าเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราการผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) มีค่าลดลงเรื่อยๆ ในระหว่างใช้งาน รูปที่ 2.6 แสดงถึงความสัมพันธ์ต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด

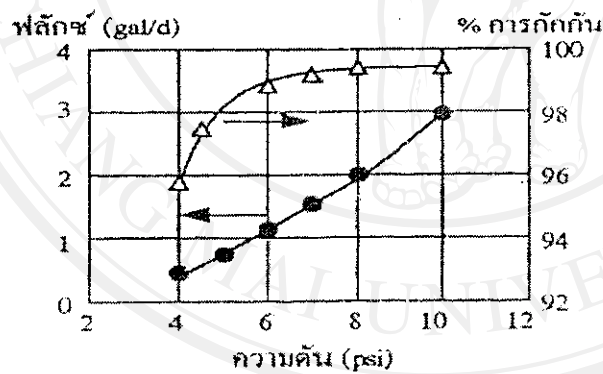


รูปที่ 2.4 อิทธิพลของพีเอชและอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเมมเบรน

ที่มา : มั่นสิน ตันทุลเวศม์, (2538)



รูปที่ 2.5 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาดและการกักกันที่ 25^oซ
 ความดัน 100 ปอนด์/ตร.นิ้ว ความเข้มข้น 3.5%(wt)
 ที่มา : รัตนา จิระรัตนานนท์, (2543)

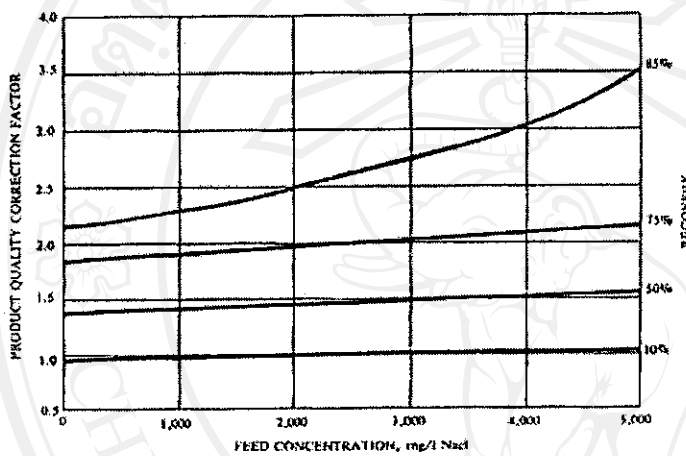


รูปที่ 2.6 ผลของความดันต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาดและการกักกันที่ 25^oซ
 ความดัน 100 ปอนด์/ตร.นิ้ว ความเข้มข้น 3.5%(wt)
 ที่มา : รัตนา จิระรัตนานนท์, (2543)

2.6.4 ความเข้มข้นของน้ำดิบ

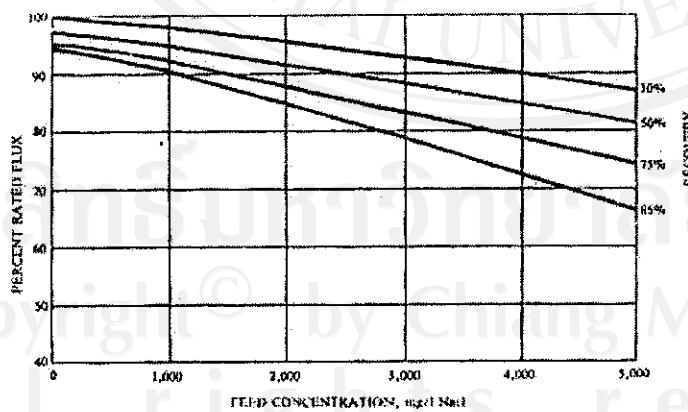
รูปที่ 2.7 และ 2.8 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของสารละลายในน้ำดิบที่มีต่อสมรรถนะของระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่มีต่อ %Recovery 4 ระดับ โดยอัตราการผลิตน้ำสะอาดจะไม่ลดลงตามการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายและ %Recovery

การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำดิบและ%Recovery ทำให้สมรรถนะของระบบรีเวอร์สออสโมซิสลดลงเนื่องจากอัตราการรั่วของสารละลาย (Salt Flux) มีอัตราเพิ่มขึ้นและแรงดันออสโมซิสก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.7 อิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำดิบและการ Recovery ที่มีต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้

ที่มา : มั่นสิน ดัณฑุลเวศม์, (2538)



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำดิบและการ Recovery ที่มีต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด

ที่มา : มั่นสิน ดัณฑุลเวศม์, (2538)

2.6.5 การอุดตันของเมมเบรน

น้ำดิบที่มีคุณสมบัติไม่เหมาะสมอาจสร้างความเสียหายแก่ระบบรีเวอร์สออสโมซิส โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากการอุดตันของเมมเบรน สาเหตุของการอุดตันของเมมเบรนอาจจำแนกได้ดังนี้

- 1) การเกิดตะกอนของเมมเบรนเนื่องจากการตกผลึกของ CaCO_3 และ CaSO_4
- 2) การตกผลึกของเหล็กและแมงกานีส
- 3) การอุดตันเนื่องจากสารแขวนลอย
- 4) การอุดตันเนื่องจากคอลลอยด์
- 5) การอุดตันเนื่องจากสิ่งมีชีวิต

การทำการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) เช่น การปรับพีเอช ป้องกันการตกผลึกของ CaCO_3 การเติมสารห้ามตะกอนเพื่อป้องกันการตกผลึกของ CaSO_4 และรวมถึงการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ โดยนำน้ำมากรองในระดับไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ก่อน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเมมเบรนผ่านการใช้เป็นเวลานานอาจเกิดการอุดตันเนื่องจากสาเหตุดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการล้างเมมเบรนเพื่อให้เมมเบรนกลับมีสภาพเดิมอีกครั้ง โดยทั่วไปการล้างเมมเบรนจะใช้สารเคมีที่มีสภาพเป็นกรดเพื่อกำจัดสารต่างๆที่ตกผลึกและติดค้างอยู่ในเมมเบรน ส่วนสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดการอุดตันจากสิ่งมีชีวิตต่างๆจะใช้สารเคมีประเภทเบส ตารางที่ 2.4 แสดงการใช้สารเคมีในการล้างเมมเบรนอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ

2.7 ชนิดและลักษณะสมบัติของเมมเบรน

เมมเบรนที่ผลิตและใช้งานโดยทั่วไปทั้งหมดจะทำมาจาก สารอินทรีย์รูปโพลิเมอร์ใช้เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีในการผลิต โดยการทดลองกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสครั้งแรกได้ใช้เมมเบรนทำจากเซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose Acetate) วัสดุจำพวกเซลลูโลสจึงเป็นวัสดุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของการผลิตเมมเบรน อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาผลิตเมมเบรนอย่างกว้างขวาง ส่วนใหญ่จะเป็นโพลิเมอร์รูปอื่นๆ เช่น โพลีเอไมด์ (Polyamide) โพลีพร็อพเพอรีลีน (Polypropylene) โพลีซัลโฟน (Polysulphone) ฯลฯ โดยโพลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีความแข็งแรงทนทาน และคุณสมบัติอื่นๆที่แตกต่างกันออกไป โดย Fane, A.G. (1987) ได้จัดลำดับชั้นของเมมเบรนโดยแยกออกเป็น เมมเบรนมีความพรุน (Porous) และ เมมเบรนไม่มีความพรุน (Non-porous) และได้แบ่งประเภทของเมมเบรนตามลำดับชั้น ดังนี้

2.7.1 เมมเบรนความหนาแน่นสูง (Dense Membranes) เป็นเมมเบรนที่มีความหนาแน่นสูงไม่มีความพรุน โดยขนาดของรูพรุนมีความกว้างน้อยกว่า 5 นาโนเมตร หรือ 50 อังสตรอม โดยจะถือว่าเมมเบรนมีผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีของสถานะสสารทั้งสองด้านที่กั้นด้วยเมมเบรนชนิดนี้

2.7.2 เมมเบรนที่มีการเรียงตัวของโครงสร้างรูพรุนแบบสมมาตร (Symmetric Microporous Membranes) เมมเบรนชนิดนี้มีคุณลักษณะที่สำคัญ คือ มีโครงสร้างรูพรุนหลายรูปแบบซึ่งอาจเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ ทั้งนี้สามารถกำหนดรูปแบบได้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต แต่จะเรียงตัวกันสม่ำเสมอตลอดความหนาของเมมเบรน เมื่อใช้งานสถานะของสสารทั้งสองจะมีความสมมาตรกัน โดยขนาดและโครงสร้างรูพรุนจะไม่มีผลต่อระบบปฏิบัติการ

2.7.3 เมมเบรนที่มีการเรียงตัวของโครงสร้างรูพรุนแบบไม่สมมาตร (Asymmetric Membranes) เป็นเมมเบรนที่มีโครงสร้างรูพรุนเรียงตัวกันไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาของเมมเบรน ซึ่งถ้าเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอนุภาคหนึ่งผ่านโครงสร้างรูพรุนของเมมเบรนชนิดนี้จะเสมือนว่าอนุภาคนั้นเคลื่อนผ่านเมมเบรนสองชั้น นั่นคือ เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนชั้นที่มีความพรุนสูงและเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนชั้นที่มีความพรุนต่ำในช่วงต่อมา

2.7.4 เมมเบรนที่มีประจุไอออนในโครงสร้างโพลีเมอร์ (Ion Exchange Membrane) เป็นเมมเบรนที่ได้เตรียมประจุไอออนไว้ในโครงสร้างโพลีเมอร์ โดยมีทั้งชนิดที่อัดประจุไอออนไว้หนาแน่น (ED Membrane) และชนิดที่อัดประจุไอออนไว้เบา (UF, MF Membrane)

ตารางที่ 2.4 แสดงชนิดของสารเคมีที่เหมาะสมต่อการล้างสิ่งอุดตันจากสาเหตุต่างๆของเมมเบรน

	0.1%(w) NaOH and pH 12, 30°C Max or 1.0%(w) Na ₄ EDTA and pH 12, 30°C	0.1%(w) NaOH and pH 12, 30°C Max or 0.025%(w) Na-DSS and pH 12, 30°C	0.2%(w) HCl	0.1%(w) Na ₂ S ₂ O ₄	0.5%(w) H ₃ PO ₄	1.0%(w) NH ₂ SO ₃ H
Inorganic Salts				Alternative	Alternative	
Sulfate Scales	OK					
Metal Oxides				Preferred	Alternative	Alternative
Inorganic Colloids						
Silica	Alternative		Preferred			
Biofilms	Alternative		Preferred			
Organic	Alternative		Preferred			

ที่มา : Filmtec Corporation

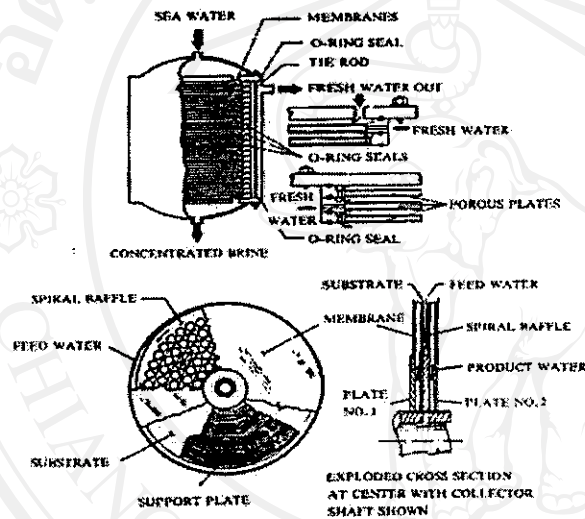
หมายเหตุ – ใช้พิจารณาสำหรับเมมเบรนชนิด FT-30 จาก Filmtec Corporation

2.8 รูปแบบและข้อจำกัดของเมมเบรน

2.8.1 รูปแบบของเมมเบรน

1) เมมเบรนแบบแผ่น (Plate and Frame Module)

เมมเบรนชนิดนี้เป็นการจัดแผ่นเมมเบรนแบบที่ง่ายที่สุด (รูปที่ 2.9) เมมเบรนที่ใช้เทคนิคนี้มีลักษณะการทำงานคล้ายการกรองผ่าน (Filter Press) โดยแผ่นเมมเบรนจะวางอยู่บนแผ่นรองรับที่มีรูพรุน (Porous Plate) หรือแผ่นรองรับที่มีร่องให้น้ำไหลออกได้ เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางสลับกัน น้ำถูกบังคับให้ผ่านเมมเบรนและแผ่นรองรับและไหลออกจากโมดูล โดยเมมเบรนแบบนี้จะมีค่าติดตั้งและค่าดูแลรักษาแพงมาก

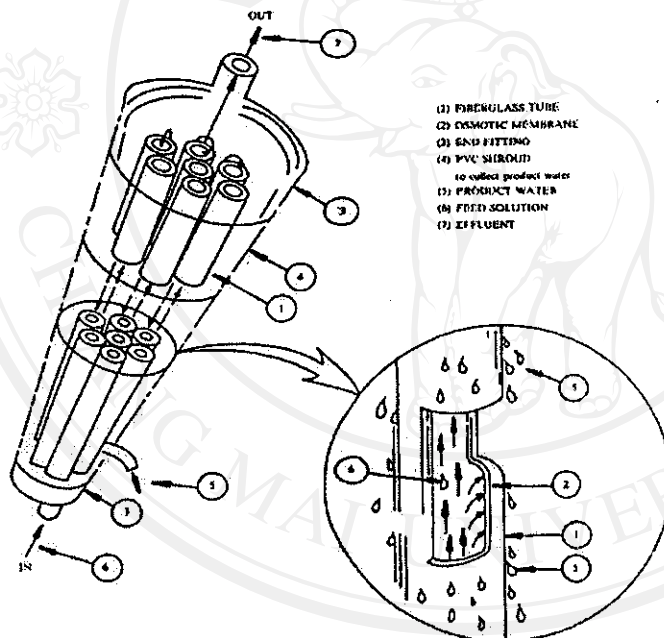


รูปที่ 2.9 เมมเบรนแบบแผ่น (Plate and Frame Module)

ที่มา : มั่นสิน ตันจุลเวศม์, (2538)

2) เมมเบรนแบบท่อ (Tubular Module)

วิธีนี้เป็นการม้วนแผ่นเมมเบรนให้เป็น หลอดหรือท่อขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 มม. และยึดติดไว้ภายในท่ออีกอันหนึ่งที่ทำด้วยกระดาษหรือแผ่นใยสังเคราะห์ (รูปที่ 2.10) โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับแผ่นเมมเบรนไม่ให้ฉีกขาดระหว่างการใช้งาน และใช้เป็นทางออกของน้ำสะอาดอีกด้วย น้ำดิบที่มีแรงดันสูงจะถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อที่มีแผ่นเมมเบรนอยู่ภายใน แรงดันของน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำซึมผ่านแผ่นเมมเบรนและท่อรองรับออกสู่ภายนอก โดยเทคนิคนี้จะผลิตน้ำได้น้อยและทำความสะอาดได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ต้องแยกน้ำออกจากสารต่างๆ

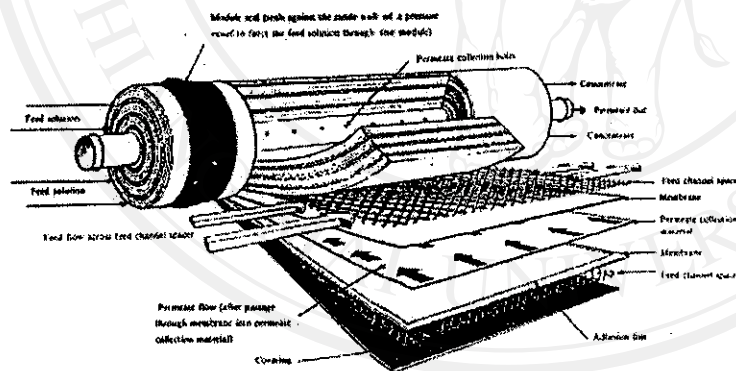


รูปที่ 2.10 เมมเบรนแบบท่อ (Tubular Module)

ที่มา : มั่นสิน ตันจุลเวศม์, (2538)

3) เมมเบรนแบบก้นหอย (Spiral Wound Module)

เมมเบรนแบบนี้ประกอบด้วยแผ่นเมมเบรน 2 แผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่กลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นเมมเบรนประมาณ 3 รอบ โดยมีแผ่นตะแกรงทำด้วย Polypropylene คลุมปิดอยู่ด้านนอก (รูปที่ 2.11) โดยขอบของแผ่นเมมเบรนทั้งสามด้านถูกอุดด้วยกาวพิเศษ ขอบที่เหลือปล่อยให้เปิดตามปกติและยึดติดกับท่อที่เจาะรู ลักษณะเช่นนี้ทำให้น้ำถูกบังคับให้ไหลไปยังท่อเจาะรูเสมอ การม้วนเมมเบรน, แผ่นรองรับ, และตะแกรงพลาสติก ทำให้ได้เมมเบรนรูปทรงกระบอกที่สามารถบรรจุไว้ในท่อโลหะธรรมดาได้ โดยเมมเบรนแบบนี้อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 10 20 หรือ 30 ซม. และมีความยาวต่างกันแต่ไม่เกิน 1 เมตร น้ำดิบถูกบังคับให้ไหลในแนวแกนของเมมเบรนเข้าไปตามแผ่นตะแกรง จากนั้นให้แรงอัดทำให้น้ำซึมทะลุผ่านเมมเบรนตามแนวรัศมีของโมดูลลงไปถึงแผ่นรองรับซึ่งทำหน้าที่ส่งน้ำบริสุทธิ์ไปยังท่อเจาะรูเพื่อนำออกจากเมมเบรน

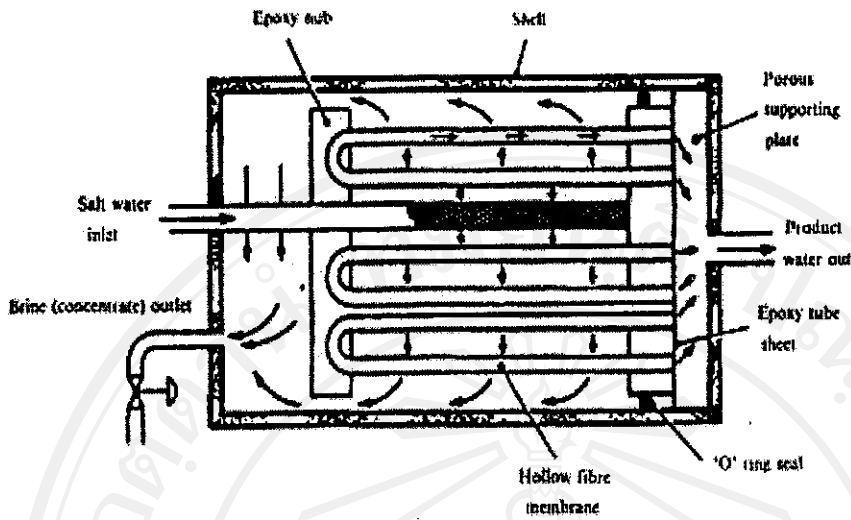


รูปที่ 2.11 เมมเบรนแบบก้นหอย (Spiral Wound Module)

ที่มา : มั่นสิน ตันจุลเวศม์, (2538)

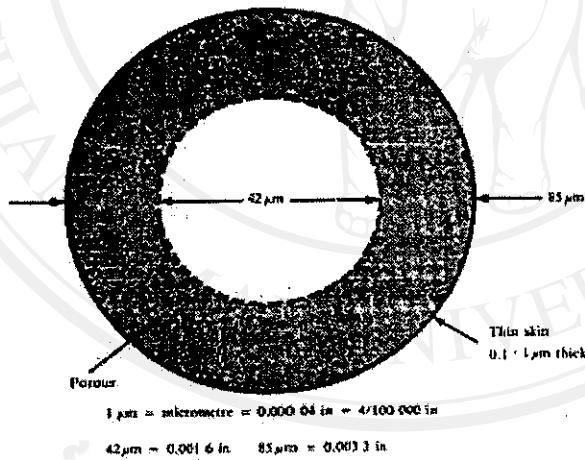
4) เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module)

เมมเบรนชนิดนี้มักใช้แผ่นเมมเบรนที่ทำมาจากวัสดุไนลอนจำพวกโพลีเอไมด์ซึ่งสร้างโดยบริษัท Du Pont Co. ต่อมาบริษัท Dow Chemical Co. ได้พัฒนาเมมเบรนที่ทำด้วยเซลลูโลสไตรอะซิเตทและสร้างเป็นเส้นใยกลวงได้ โดยเส้นใยกลวงที่ทำจากโพลีเอไมด์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 50-58 ไมครอน และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณครึ่งหนึ่งของภายนอก ส่วนเส้นใยกลวงที่ทำจากเซลลูโลสไตรอะซิเตทจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 200-300 ไมครอน โดยวิธีนำเมมเบรนชนิดนี้มาใช้ประโยชน์กระทำได้โดยนำมารวมกันเป็นมัดและงอพันเป็นรูปตัวยูหรือเกือกม้าปลายทั้งสองข้างของเมมเบรนทั้งมัดจะถูกตรึงอยู่กับทางน้ำออกซึ่งเส้นใยทั้งหมดจะถูกวางไว้ในถังทรงกระบอก (รูปที่ 2.12) โดยน้ำดิบจะผ่านมายังท่อเจาะรูซึ่งวางอยู่ตรงกลางของถังและกระจายน้ำไปยังส่วนต่างๆ แรงดันทำให้น้ำซึมเข้าในเส้นใยเมมเบรนและทะลุถึงภายใน น้ำบริสุทธิ์จะซึมผ่านไปตามรูกลวงของเส้นใยและรวมกันที่ทางออก



รูปที่ 2.12 (ก) ส่วนประกอบต่างๆของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง

ที่มา : มั่นสิน ตันจุลเวศม์, (2538)



รูปที่ 12 (ข) เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module)

ที่มา : มั่นสิน ตันจุลเวศม์, (2538)

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติ ข้อดี และข้อด้อยของเมมเบรนแต่ละชนิด

ลักษณะสมบัติ	Module Concept			
	Tubular	Plate&Frame	Spiral Wound	Hollow Fiber
Packing Density (ตร.ม./มม.)	150-300	200-400	300-900	9,000-3,000
Flux (ล./ตร.ม.-ชม.)	10-50	10-50	10-50	0.5-5
Flux Density (ล./ตร.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 Cartige	As Moduke
Replacement Labour	High	High	Medium	Medium
Feed Side Pressure Loss	High	Medium	Medium	Low
Concentration Polarization	High	Medium	Medium	Low
Suspended Solids Capassity	Good	Medium	Poor	Poor
Space Requirements	Very High	High	Low	Very Low
Cost	High	High	Moderate	Moderate
Fouling Suscepibility	Low	Low	Moderate	High

ที่มา : Fane, A.G. (1987)

2.8.2 ข้อจำกัดของเมมเบรน

สำหรับกระบวนการแยกอนุภาคโดยเมมเบรน Fane, A.G.(1987) กล่าวว่าข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาประกอบการดำเนินการหลายประการด้วยกัน คือ

- 1) ความเข้มข้นของประจุไอออนของอนุภาค เป็นข้อจำกัดหนึ่งที่ต้องพิจารณาโดยเฉพาะกับระบบปฏิบัติการที่มีสถานะเป็นของไหล เพราะเมื่อน้ำบริสุทธิ์โคถูกแยกออกโดยแพร่ผ่านเมมเบรนไปแล้ว ประจุไอออนของอนุภาคต่างๆที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนจะตกตะกอนบริเวณชั้นผิว ทำให้อัตราการผลิตน้ำบริสุทธิ์ลดลงตามความเข้มข้นของประจุไอออนของอนุภาคต่างๆที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นระบบปฏิบัติการจึงต้องการระบบกำจัดอนุภาคเข้มข้นนี้โดยตรง คือ หชุดการเดินระบบปฏิบัติการและทำความสะอาดเมมเบรนล้างสิ่งอุดตันต่างๆ
- 2) ความสกปรกของเมมเบรน เกิดจากการตกตะกอนของอนุภาคต่างๆบริเวณผิวหน้าเมมเบรนที่ไม่สามารถทำความสะอาดออกได้ทั้งหมด ทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรนลดลง ต้องทำความสะอาดบ่อยขึ้น และอาจจะต้องเปลี่ยนเมมเบรนใหม่แทนของเดิมเร็วขึ้น ถ้าในตะกอนของอนุภาคมีสารประกอบปนเปื้อนที่มีผลต่อลักษณะของเมมเบรนโดยตรง
- 3) รูปแบบและการออกแบบ การออกแบบกระบวนการเมมเบรนที่ดีนอกจากจะต้องพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นเมมเบรนแล้ว จำเป็นจะต้องใช้ข้อมูลจากการศึกษาทดลอง โดยใช้แบบจำลองสภาพตามการใช้งานจริงประกอบ ซึ่งจะช่วยให้ได้ระบบปฏิบัติการที่มีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด
- 4) เสถียรภาพของเมมเบรน ลักษณะสมบัติของสารประกอบโพลิเมอร์มีปัจจัยที่จำกัดหลายอย่างและมีผลต่อเสถียรภาพของเมมเบรน เช่น ค่าพีเอช สำหรับเมมเบรนชนิดเซลลูโลส ช่วงค่าพีเอชที่ใช้งานได้คือ 4.0 ถึง 8.0 และสำหรับเมมเบรนที่เป็นวัสดุโพลิเมอร์ชนิดโพลีซัลโฟน ช่วงค่าพีเอชที่ใช้งานได้คือ 2.0 ถึง 12.0 อุณหภูมิก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่เป็นข้อจำกัดและมีผลต่อเสถียรภาพของเมมเบรน โดยทั่วไปอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งานได้คือ 60°C และข้อจำกัดที่สำคัญอีกประการ คือ เมมเบรนมีความต้านทานต่อคลอรีนน้อย

- 5) ความไม่สมบูรณ์ของการแยกอนุภาค แม้จะเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าน้ำแพร่ผ่านเมมเบรน จะมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง แต่ยังไม่มีการบวนการเมมเบรนใดที่สามารถกำจัดสารประกอบและอนุภาคแขวนลอยในน้ำได้ทั้งหมด เช่น สามารถกำจัดเกลือได้ร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 99.9 กับสารแขวนลอยอื่นๆอาจกำจัดได้มากกว่าร้อยละ 99.9 ในทางกลับกันที่นอลสามารถผ่านเมมเบรนที่ทำจากเซลลูโลสอะซิเตทได้ทั้งหมด สารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีในน้ำสามารถผ่านเมมเบรนได้ทุกชนิด ถ้าต้องการกำจัดสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เมมเบรนจะต้องออกซิไดซ์สารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็นซัลเฟต ซึ่งเมมเบรนสามารถกำจัดออกได้ แต่ปริมาณซัลเฟตจำนวนมากจะทำให้เมมเบรนอุดตันเร็วและเกิดความเสียหายทำให้อายุการใช้งานของเมมเบรนสั้นลง ดังนั้นการกำจัดสารแขวนลอยในน้ำบ่อโดยใช้เมมเบรนควรให้ซัลเฟตผ่าน เมมเบรนออกไปในรูปของสารประกอบสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วใช้กระบวนการอื่นๆกำจัดในขั้นตอนต่อไป และถึงมีชีวิตระดับจุลชีวะวิทยา เช่น แบคทีเรีย ไวรัส เมมเบรนสามารถกำจัดออกได้ร้อยละ 99.7 ถึงร้อยละ 99.99 แต่ไม่มีสารปนเปื้อนหรืออนุภาคใดที่เมมเบรนจะกำจัดออกได้ทั้งหมด

2.9 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

วีระโชค เลิศพรสวรรค์ (2542) ได้ทำการศึกษาถึงการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยจากพื้นที่ฝังกลบมูลฝอย โดยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส โดยการศึกษาเป็นการทดลองโดยใช้กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส กับเมมเบรนแบบม้วนรูปก้นหอย โดยใช้แบบจำลองของ Osmonics โมเดล OSMO 12E ECONOPURES เมมเบรน ยี่ห้อ SEPA รุ่น HR และใช้น้ำชะมูลฝอยจากพื้นที่ฝังกลบมูลฝอยของเทศบาลนครเชียงใหม่ โดยพิจารณาน้ำตัวอย่างเข้มข้นสูง (มีค่า ซีไอดีพิสัย 1,000 ถึง 3,000 มก./ล.) และน้ำตัวอย่างเข้มข้นต่ำจากการเจือจางด้วยน้ำประปา (มีค่า ซีไอดีพิสัย 500 ถึง 1,000 มก./ล.) จากผลของการศึกษาพบว่า น้ำตัวอย่างความเข้มข้นสูง ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด ซีไอดี ของแข็งละลายน้ำ ของแข็งแขวนลอย อินทรีย์ในโตรเจน คลอไรด์ ความเป็นค่ารวม ความกระด้างแคลเซียม และความกระด้างแมกนีเซียม พิสัยร้อยละ 82.9 ถึง 91.4 ร้อยละ 78.6 ถึง 78.7 ร้อยละ 87.9 ถึง 99.0 ร้อยละ 39.3 ถึง 91.5 ร้อยละ 31.7 ถึง 51.3 ร้อยละ 57.3 ถึง 71.5 ร้อยละ 97.9 ถึง 98.2 ร้อยละ 95.3 ถึง 98.0 ตามลำดับ น้ำตัวอย่างความเข้มข้นสูง ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด ซีไอดี ของแข็งละลายน้ำ ของแข็งแขวนลอย อินทรีย์ในโตรเจน คลอไรด์ ความเป็นค่ารวม ความกระด้างแคลเซียม และความกระด้างแมกนีเซียม พิสัยร้อยละ 86.7 ถึง 94.4 ร้อยละ 80.2 ถึง 91.5 ร้อยละ 88.4 ถึง 97.8 ร้อยละ 79.9 ถึง 83.0 ร้อยละ 74.6 ถึง 87.5 ร้อยละ 89.3 ถึง 93.6 ร้อยละ 99.6 ถึง 99.8 ร้อยละ 99.1 ถึง 99.7 ตามลำดับ การหาค่าคงที่ (A) สำหรับการเคลื่อนที่ของตัวทำละลาย (น้ำ) สามารถหาค่าได้เฉลี่ย 1.10×10^{-4} ล./กก.-ชม. การหาค่าคงที่ (B) สำหรับการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลาย (สารอินทรีย์) สามารถหาค่าได้ คือ การหาค่าคงที่ (B) สำหรับการเคลื่อนที่ของ ซีไอดี ของแข็งละลายน้ำ อินทรีย์ในโตรเจน คลอไรด์ ความเป็นค่ารวม ความกระด้างแคลเซียม และความกระด้างแมกนีเซียม เท่ากับ 0.175 0.241 0.312 0.543 0.090 0.027 0.028 และ 0.453 ตามลำดับ การหาอัตราการถดถอยของการผลิตน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนโดยการเดินระบบที่ยาวนาน พบว่า ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ของแข็งละลายน้ำ และ ของแข็งแขวนลอย แต่มีผลต่ออัตราการผลิตน้ำแพร่ผ่านเมมเบรน โดยมีอัตราการถดถอยในช่วง 60 ชั่วโมงแรกค่อนข้างสูง คิดเป็นอัตราการถดถอยเฉลี่ย 116.67 มล./ตร.ม.-ชม. คิดเป็นร้อยละ 51.2 ของอัตราการผลิตน้ำแพร่ผ่านเมมเบรน จากนั้นอัตราการผลิตน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนจึงเริ่มคงที่ ซึ่งการล้างเมมเบรนด้วยน้ำประปาหลังจากการเดินระบบเสร็จสิ้นในแต่ละวันไม่มีผลต่อการเพิ่มอัตราการผลิตน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนในวันถัดไป

รัชย์ ทวีทรัพย์ (2543) ได้ทำการศึกษาถึงการกำจัดซัลเฟตในน้ำระบายจากเหมืองลิกไนต์ โดยระบบน้ำไหลแนวอนได้อัตโนมัติ โดยใช้น้ำเสียจากเหมืองลิกไนต์แม่เมาะผสมกับน้ำเสียจากมูลสุกรเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอน โดยผสมกันให้มีอัตราส่วนความเข้มข้น COD/SO₄ ประมาณ 0.25-1 และอัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ 7.5-17.5 ชม./วัน หรือระยะเวลาเก็บกักน้ำในช่วง 4.9-11.5 วัน โดยการทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตของบ่อดูดที่มีพีช (กกตั้งกา) และบ่อดูดที่ไม่มีพีช ที่มีการเติมเศษเหล็กและไม่เติมเศษเหล็กที่มีอัตราส่วน COD/SO₄ เท่ากับ 0.25 และอัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ 7.5 ชม./วัน หรือระยะเวลาเก็บกักน้ำในช่วง 11.5 วัน พบว่า บ่อดูดที่ไม่มีพีชทั้งสองบ่อ (มีเศษเหล็กและไม่มีเศษเหล็ก) มีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตได้ดีกว่าบ่อดูดที่มีพีชทั้งสองบ่อ (มีเศษเหล็กและไม่มีเศษเหล็ก) โดยมีค่าประมาณร้อยละ 30 และ 14 ตามลำดับ และได้ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตของบ่อดูดที่ไม่มีพีชทั้งสองบ่อ (มีเศษเหล็กและไม่มีเศษเหล็ก) ที่มีอัตราส่วน COD/SO₄ ต่างกัน คือ 0.25 และ 1 ที่อัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ 7.5 ชม./วัน หรือระยะเวลาเก็บกักน้ำในช่วง 11.5 วัน โดยพบว่า ที่อัตราส่วน COD/SO₄ เท่ากับ 1 ของบ่อที่เศษเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตสูงสุด คือ ร้อยละ 75.5

ปฏิรูป ผลจันทร์ (2544) ได้ทำการศึกษาถึงการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) ออกจากน้ำโดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน โดยใช้ น้ำดิบจากคลองประปาบริเวณจุดรับน้ำของโรงกรองน้ำสามเสน และน้ำจากเขื่อนวชิราลงกรณ์ และเมมเบรนสามชนิด คือ ES-10, NTR-729HF และ NTR-7410 โดยต้องมีการล้างเมมเบรนโดยใช้ น้ำ Demineralization , สารละลาย HCl พีเอชประมาณ 3 จากการปรับพีเอชของน้ำ Demineralization ปริมาตร 5 ล. โดยใช้ HCl 0.1 N , สารละลาย NaOH พีเอชประมาณ 10.5 จากการปรับพีเอชของน้ำ Demineralization ปริมาตร 5 ล. โดยใช้ NaOH 0.1 N โดยการล้างเมมเบรน เริ่มจาก ป้อนสารละลาย HCl เป็นเวลา 30 นาที ต่อด้วย สารละลาย NaOH เป็นเวลา 30 นาที เข้าสู่ระบบผ่านเครื่องสูบน้ำที่ค่าความดันประมาณ 2 บาร์ ทำการผ่านน้ำ Demineralization เข้าสู่ระบบโดยใช้ความดันประมาณ 3 บาร์ และ Cross flow Velocity 0.7 m/s ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำแพร่ผ่านเมมเบรน หลังจากเดินระบบ 1 และ 2 ชั่วโมง โดยเมื่อระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้ว ค่าอัตราการไหลของน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนที่เวลาทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน หรือ แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และดำเนินระบบกับน้ำที่จะทำการศึกษาต่อไป

Al-Wazzan และ คณะ (1999) ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบรีเวอร์สออสโมซิสในการบำบัดน้ำจากใต้ดินในเขตที่พสกาศัยของประเทศคูเวต โดยทำการสูบน้ำที่ความลึก 50 ม. คุณลักษณะของน้ำมีระดับพีเอช 7.12 ปริมาณ TDS 11,435 มก./ล. ปริมาณซัลเฟต 3,016 มก./ล. ความเป็นด่าง 133 มก./ล. ไบคาร์บอเนต 133 มก./ล. โซเดียม 2,462 มก./ล. แมกนีเซียม 303.0 มก./ล. แคลเซียม 693 มก./ล. และคลอไรด์ 4,013 มก./ล. โดยการศึกษาใช้ระบบรีเวอร์สออสโมซิสชนิดก้นหอย (Spiral Wound Module) ที่ใช้เมมเบรนแบบ Toray, SU 810M ระบบมีอัตราการผลิตน้ำสะอาด 19 ม³/วัน หลังจากทดลองโดยการเดินระบบที่ความดัน 20 บาร์ ต่อเนื่องเป็นเวลา 2200 ชม. จากการศึกษาพบว่าระบบสามารถลดปริมาณ TDS เหลือ 117 มก./ล. ปริมาณซัลเฟต เหลือ 14.8 มก./ล. ไบคาร์บอเนต เหลือ 10.8 มก./ล. โซเดียม เหลือ 32 มก./ล. แมกนีเซียม เหลือ 0.5มก./ล. แคลเซียม เหลือ 1.2 มก./ล. และคลอไรด์ เหลือ 43.2 มก./ล. คิดเป็นร้อยละ 98.9 99.5 91.88 98.7 99.83 93.83 และ 99.15 ตามลำดับ

Ebrahim และ คณะ (2001) ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบรีเวอร์สออสโมซิสในการบำบัดน้ำใต้ดินที่ระดับความลึก 50 ม. ในประเทศคูเวต โดยน้ำใต้ดินมีระดับพีเอช 7.15 , ปริมาณ TDS 10,786 มก./ล. ปริมาณซัลเฟต 3,019 มก./ล. ไบคาร์บอเนต 309.9 มก./ล. โซเดียม 3,045 มก./ล. แมกนีเซียม 342.4 มก./ล. แคลเซียม 869 มก./ล. และคลอไรด์ 3,982 มก./ล. โดยเป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบรีเวอร์สออสโมซิส ระหว่างชนิดก้นหอย (Spiral Wound Module) ที่ใช้เมมเบรน Fluid System, 480x12 ระบบมีอัตราการผลิตน้ำสะอาด 18 ม³/วัน และชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fine Fiber Module) ที่ใช้เมมเบรนแบบ SW-M-8540 ระบบมีอัตราการผลิตน้ำสะอาด 21 ม³/วัน โดยน้ำตัวอย่างจะต้องผ่านระบบบำบัดขุ่นดินโดยการเติมสาร Antiscalant และผ่านเครื่องกรองขนาด 5 ไมครอน เมื่อทดลองโดยการเดินระบบที่ความดัน 20 บาร์ต่อเนื่องเป็นเวลา 5000 ชม. สำหรับเมมเบรนชนิด Spiral Wound Module และ 4500 ชม. สำหรับเมมเบรนชนิด Hollow Fine Fiber Module จากการศึกษาพบว่าระบบ Spiral Wound Module สามารถลดปริมาณ TDS เหลือ 152 มก./ล. , ปริมาณซัลเฟต เหลือ 30.3 มก./ล. , ไบคาร์บอเนต เหลือ 9.86 มก./ล. , โซเดียม เหลือ 35 มก./ล. , แมกนีเซียม เหลือ 0.7 มก./ล. , แคลเซียม เหลือ 1.2 มก./ล. และคลอไรด์ เหลือ 43.2 มก./ล. คิดเป็นร้อยละ 98.6, 99.0, 93.75, 98.86, 99.84, 99.86 และ 98.92 ตามลำดับ และระบบ Hollow Fine Fiber Module สามารถลดปริมาณ TDS เหลือ 139.3 มก./ล. , ปริมาณซัลเฟต เหลือ 20.7 มก./ล. , ไบคาร์บอเนต เหลือ 17.2 มก./ล. , โซเดียม เหลือ 28.0 มก./ล. , แมกนีเซียม เหลือ 0.1 มก./ล. , แคลเซียม เหลือ 0.2 มก./ล. และคลอไรด์ เหลือ 30.6 มก./ล. คิดเป็นร้อยละ 98.7, 99.3, 87.97, 99.1, 99.98, 99.98 และ 99.23 ตามลำดับ

Visser และ คณะ (2001) ได้ศึกษาถึงการบำบัดน้ำที่เกิดจากเหมืองทองคำและเหมืองถ่านหินในประเทศแอฟริกาใต้ ซึ่งคุณลักษณะของน้ำมีปริมาณซัลเฟตสูงถึง 3000 ppm ทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดสูง (มีระดับพีเอชในช่วง 2-4) โดยการศึกษาใช้ระบบนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) ที่มีโมดูลแบบ Dead-End โดยเมมเบรนที่ใช้ในการทดสอบเป็นเมมเบรนจากต่างบริษัทผู้ผลิต 5 ตัวอย่าง เมื่อทดลองโดยการเดินระบบที่ช่วงความดัน 3-20 บาร์ จากการศึกษาพบว่า ที่สภาวะเป็นกลางระบบสามารถกำจัดปริมาณซัลเฟตได้ร้อยละ 95-99 โดยระบบสามารถให้อัตราการผลิตน้ำสะอาดในช่วง 2-7 ลิ./ม².ชม.บาร์

The logo of Chiang Mai University is a circular emblem. In the center is a stylized elephant facing left, with a decorative tusk. Above the elephant is a traditional Thai lamp (Lampang) with a flame. The emblem is surrounded by a circular border containing the university's name in Thai script at the top and 'CHIANG MAI UNIVERSITY 1964' in English at the bottom. There are also decorative floral motifs on the sides.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved