บทที่2

หลักการพื้นฐาน

2.1 กระบวนการเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรน หมายถึง กระบวนการต่างๆ ที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (semi-Permeable Membrane) ในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลว [1, 2] กระบวนการเมมเบรนที่สำคัญมี 3 แบบ คือ Electrodialysis (ED), Reverse Osmosis (RO), และ Ultrafiltration ความแตกต่างของกระบวนการทั้งสามประเภทอยู่ที่ความสามารถในการแยก สารละลายที่มีขนาดต่างๆ และแรงดันขับ ที่ทำให้ เกิดการแยกสารละลาย และน้ำ ออกจากกัน Electrodialysis (ED) ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับดันให้เกิดการแยกสารประกอบซึ่ง แตก ตัวเป็นไอออนได้ ออกจากน้ำ แต่ไม่สามารถแยกสารอินทรีย์ ส่วน Reverse Osmosis (บางครั้ง เรียกว่า Hyperfiltration) และ Ultrafiltration(UF) ใช้แรงดันในการแยกสารต่างๆ เกือบทุกชนิด ออกมาได้ แต่ UF มีความสามารถด้อยกว่า รีเวอร์สออสโมซีส เพราะความสามารถแยกสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ เท่านั้น อย่างไรก็ตาม UF มักใช้แรงดันประมาณ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือน้อยกว่า ส่วน รีเวอร์สออสโมซีส มักใช้แรงดันตั้งแต่ 300-1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือสูงกว่า ตารางที่ 2.1 สรุปถึงความแตกต่าง ของกระบวนการทั้งสามประเภท

เยื่อเมมเบรนของกระบวนการทั้งสาม มีหน้าที่และขีดความสามารถไม่เท่ากัน กล่าวคือแผ่นเมมเบรนของ รีเวอร์สออสโมซีส สร้างขึ้น เพื่อให้น้ำไหลผ่านเท่านั้น และไม่ตั้งใจให้สารอื่นๆ ไหลผ่านได้ แผ่นเมมเบรนสำหรับ UF นั้นมักได้เฉพาะสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 500 และ ยอมให้ สารอื่นๆ รวมทั้งน้ำไหลผ่าน แผ่นเมมเบรนสำหรับ ED มี 2 ชนิด คือ แผ่นบวกและแผ่นลบ ซึ่งยอม ให้เฉพาะไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเหมือนกันไหลผ่าน โมเลกุลของน้ำไหลผ่าน แผ่นเมมเบรนได้ยาก

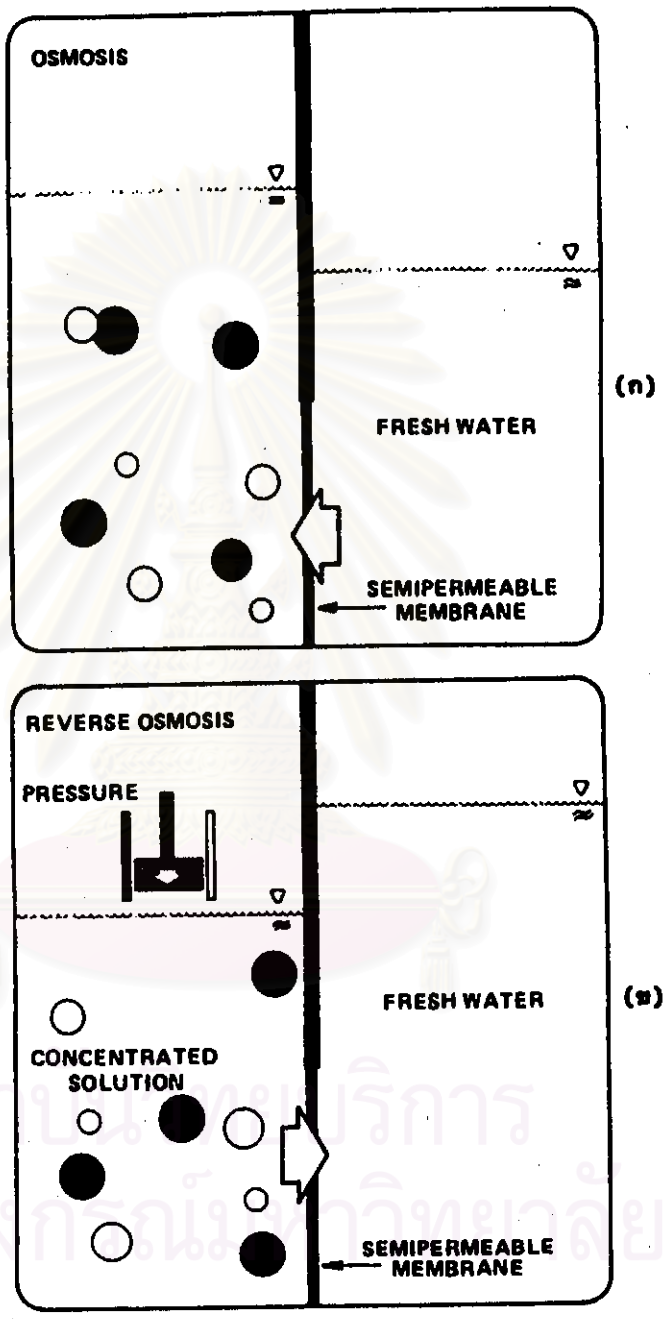
ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่าง ED, RO, และ UF

กระบวนการ	แรงขับดัน	สารที่แยกออกจากน้ำได้
RO	แรงดัน 300-1000 PSI หรือสูงกว่า	เกลือแร่, กรด, ด่าง, สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 (รวมทั้งแบคทีเรีย)
UF	แรงดัน 100 PSI หรือต่ำกว่า	สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 500
ED	แรงดันไฟฟ้า	สารที่แตกตัวเป็นไอออนได้

ในปัจจุบันความจำเป็นที่ต้องใช้น้ำสะอาดที่มีปริมาณสารละลายต่ำ และความสกปรกที่ เพิ่มขึ้นของแหล่งน้ำดิบ ทำให้กระบวนการเมมเบรนต่างๆ มีความสำคัญเพิ่มขึ้นและกลายเป็น ระบบที่จำเป็นในหลายกรณี เนื่องจากระบบรีเวอร์สออสโมซิส นั้น มีขีดความสามารถกว้าง ขวางกว่า UF และ ED ดังนั้นจึงมีการนำรีเวอร์สออสโมซิสไปใช้ในการทำความสะอาดน้ำดีมากกว่าระบบ เมมเบรนแบบอื่น

2.2 ออสโมซิส (Osmosis) และรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

ออสโมซิส (Osmosis) หมายถึง การเคลื่อนที่ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติของน้ำผ่าน เยื่อเมมเบรนบางๆ (Semi Permeable Membrane) จากสารละลายเจือจางไปยังสารละลาย เข้มข้น (ดูรูปที่ 2.1) เยื่อเมมเบรนในอุดมคติยอมให้น้ำไหลผ่านได้เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติ โมเลกุลหรือไอออนบางชนิด อาจไหลผ่านได้เช่นกัน ถ้าจัดระบบออสโมซิสให้มีการไหลเป็นแบบที่ แสดงในรูปที่ 2.1ก เมื่อปล่อยให้มีการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน จนกระทั่งถึงจุดสมดุล (ไม่มี การไหลอีก) ระดับน้ำในด้านซ้ายซึ่งเป็นสารละลายเข้มข้นจะสูงกว่าระดับน้ำในด้านขวาซึ่งเป็น น้ำจืด ผลต่างของระดับน้ำนี้เรียกว่า **แรงดันออสโมซิส (Osmosis Pressure)** นักวิทยาศาสตร์ ได้อธิบายถึงปรากฏการณ์ออสโมซิสว่า อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสารละลายเข้มข้นมี **Vapor pressure** ต่ำกว่าสารละลายเจือจาง ระดับน้ำในทั้งสองด้านของเมมเบรนจึงมีการปรับตัวจนกระทั่งแรงดันบนผิวน้ำทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน ถ้ามีแรงดันที่มีค่าสูงกว่าแรงดันออสโมซิสมากระทำต่อด้านที่มี สารละลายเข้มข้น น้ำจะไหลย้อนกลับ (ดูรูปที่ 2.1ข) ซึ่งเป็นการต้านการไหล ตามธรรมชาติ วิธีดังกล่าวนี้ วิศวกรนำมาใช้เพื่อแยกน้ำออกจากสารละลายเข้มข้นต่างๆ และเรียกว่า Reverse Osmosis(RO) หรือ รีเวอร์สออสโมซิส ดังนั้นกระบวนการ รีเวอร์สออสโมซิส จึงอาศัยปัจจัยสำคัญ 2 อย่าง คือ **แรงดัน และเมมเบรน**



รูปที่ 2.1 แสดง ออสโมซีส และ รีเวอร์สออสโมซีส

2.3 ขีดความสามารถของ รีเวอร์สออสโมซีส (Reverse Osmosis)

แม้ว่าวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์จะรู้จัก รีเวอร์สออสโมซีส มานานนับสิบๆ ปีแล้ว แต่ก็เพิ่งมีการพัฒนา รีเวอร์สออสโมซีส จนสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้ประมาณ10ปีมานี้เอง กระนั้นก็ตามปรากฏว่าวิศวกรได้เห็นประโยชน์ของ รีเวอร์สออสโมซีส เป็นอย่างมาก ทำให้เป็นที่นิยมใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การพัฒนา อย่างไม่หยุดยั้งเพื่อให้ได้แผ่นเมมเบรนซึ่งมีประสิทธิภาพและราคาถูก เป็นปัจจัยเสริมที่สำคัญใน การสร้างความนิยมให้กับ รีเวอร์สออสโมซีส ในอนาคต

เหตุผลที่ทำให้ รีเวอร์สออสโมซีส ได้รับความสนใจและเป็นที่นิยม ได้แก่ ความสามารถในการกำจัดสารละลายและคอลลอยด์ ดังต่อไปนี้

ก. ลดปริมาณของสารละลายน้ำ (TDS)

ข. ลดปริมาณของความกระด้าง

ค. ลดปริมาณของฟลูออไรด์

ง. ลดหรือกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ

จ. ลดหรือกำจัดโลหะหนักที่เป็นพิษและสร้างความรำคาญ

ช. ลดหรือกำจัดจุลินทรีย์ต่างๆ รวมทั้งไวรัสด้วย

น้ำที่ผ่านรีเวอร์สออสโมซีส แล้วจึงเป็นน้ำที่ใสมาก ทำให้สะดวกต่อการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน โดยทั่วไป อาจกล่าวได้ว่าสารอินทรีย์ที่ทะลุผ่านเมมเบรนได้โดยไม่ถูกกำจัดมักเป็น ประเภทที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 200 ละลายน้ำได้ และเป็น nonpolar อย่างไรก็ตามหลักเกณฑ์ ดังกล่าวก็ไม่เป็น จริงเสมอไป ยกตัวอย่างเช่น ระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) สามารถกำจัดกรด อินทรีย์และ Amines ได้เช่นเดียวกับกรดอ่อนและด่างอ่อนทั่วไป ทั้งๆ ที่กรดอินทรีย์และ Amines มีน้ำหนัก โมเลกุลต่ำ

ระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) มักไม่มีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลาย ได้ยากและเป็นพิษที่อยู่ในน้ำประปา เช่น ฟีนอล (Phenol), Chlorinated Hydrocarbon (ทั้งที่มี น้ำหนักโมเลกุลสูงและต่ำ), ยาฆ่าแมลง(Pesticides), และแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นต้นเหตุของสีในน้ำ เช่น กรดฮิวมิก (Humic Acid), กรดฟัลวิก (Fulvic Acid), MBAS เป็นต้น

แม้ว่าระบบ รีเวอร์สออสโมซีส จะมีประสิทธิภาพสูงมากในการกำจัดจุลินทรีย์ต่างๆ รวมทั้งไพโรเจน (Pyrogen) ด้วย แต่ไม่มี รีเวอร์สออสโมซีส เครื่องใดสามารถรับประกันได้ 100% ว่าจะผลิตน้ำที่ปราศจากจุลินทรีย์ (Sterile Water) ได้ตลอดเวลา ทั้งนี้เพราะเมมเบรนไม่สามารถกำจัด จุลินทรีย์ได้ 100% และการรั่วของน้ำดิบผ่านรอยต่อเล็กๆ ก็อาจเกิดขึ้นได้เสมอ (เนื่องจากไม่สามารถอุดรอยต่อต่างๆ ได้สนิท) นอกจากนี้ ถ้าแผ่นเมมเบรนเกิดฉีกขาดหรือรั่ว น้ำดิบจะไหลผ่านออกไปได้พร้อมๆ กับน้ำสะอาดที่ผลิตได้ ด้วยเหตุนี้การใช้ รีเวอร์สออสโมซีส ในการผลิตน้ำบริสุทธิ์ ให้กับโรงงานผลิตยา และโรงงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ต้องตามด้วย UV หรือเครื่องกรองจุลินทรีย์ เนื่องจากน้ำใช้สำหรับ โรงงานทั้งสองประเภทดังกล่าว ต้องปราศจากจุลินทรีย์หรือผลผลิตของจุลินทรีย์

2.4 กลไกการทำงานของรีเวอร์สออสโมซีส (RO)

รีเวอร์สออสโมซีส (RO) กำจัดเกลือและสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ด้วยกลไกที่แตกต่างจาก กลไกของการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) หรือการดูดติดผิว (Adsorption)นักวิจัยเชื่อว่าระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) มีกลไกในการกำจัดเกลือแร่ (ไอออนต่างๆ) ไม่เหมือนกับกลไกใน การกำจัดสารอินทรีย์ ระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) สามารถกำจัดสารละลายต่างๆ ได้ เนื่องจาก เมมเบรนยอมให้เฉพาะโมเลกุลของน้ำไหลผ่าน ไอออนต่างๆ ของเกลือถูกเมมเบรนผลักดันออกไป จึงไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ ส่วนโมเลกุลของสารอินทรีย์ นั้นไม่ถูกเมมเบรนผลัก แต่ถูกกำจัด โดยการกรองติดค้าง (Seive)

2.4.1 กลไกในการกำจัดเกลือต่างๆ

กลไกของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซีสมี 2 อย่าง คือ กลไกที่ใช้ในการกำจัดเกลือ (ดูรูปที่ 2.2) และกลไกที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ (ดูรูปที่ 2.3) กลไกทั้งสองแบบมีความ แตกต่างกัน ดังจะเห็นได้จากภาพทั้งสอง รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างตัดขวางของแผ่นเมมเบรนซึ่งมี 2 ชั้น และหนาประมาณ 100 ไมครอน ชั้นบนซึ่งติดอยู่กับน้ำดิบเป็นส่วนที่มีเนื้อ แน่นแต่บาง ชั้นนี้หนาเพียงประมาณ 0.25 ไมครอน และมีรูขนาดประมาณ 0.2 ไมครอน กระจายอยู่ทั่วไป เมมเบรนชั้นบนนี้มีความสำคัญมาก เพราะทำหน้าที่กำจัดเกลือแร่และสาร อินทรีย์ ชั้นล่างซึ่งมีเนื้อพรุนและหนามาก ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับ และ ขนส่งน้ำบริสุทธิ์ จากชั้นบนไปยังภายนอก การไหลของน้ำต้องเป็นแบบที่มี ความปั่นป่วน (Turbulent Flow) ทั้งนี้เพื่อรักษาความสะอาดของเมมเบรน น้ำบริสุทธิ์ถูกบีบให้ซึมผ่านเมมเบรนและไหลออกไปข้างนอก สารละลายต่างๆ ที่ไหลผ่านเมมเบรนไม่ได้จะสะสมตัวจนมีความเข้มข้นสูง และถูก ระบายออกจากระบบ

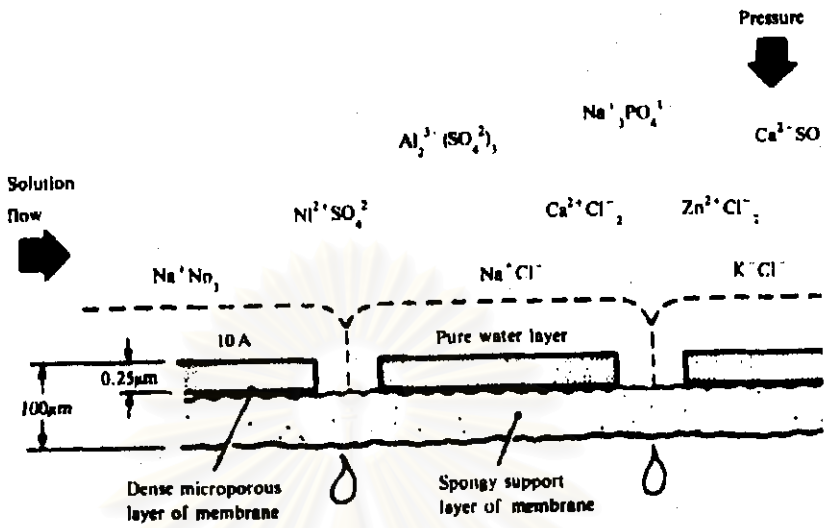
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่2.2 ความสามารถของ รีเวอร์สออสโมซิส ในการกำจัดเกลือต่างๆ

Name	Rejection %	Average passage %	Max concentration %
Cations			
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	-
Anions			
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 ($B_4O_2^{2-}$)	35-70++	-	-
Chromate (CrO_4^{2-})	90-98	8	8-12
Cyanide (CN^-)	90-95++	-	4-12
Sulphite (SO_3^{2-})	98-99	1	8-12
Thiosulphate ($S_2O_3^{2-}$)	99+	1	10-14
Ferrocyanide ($Fe(CN)_6^{2-}$	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.



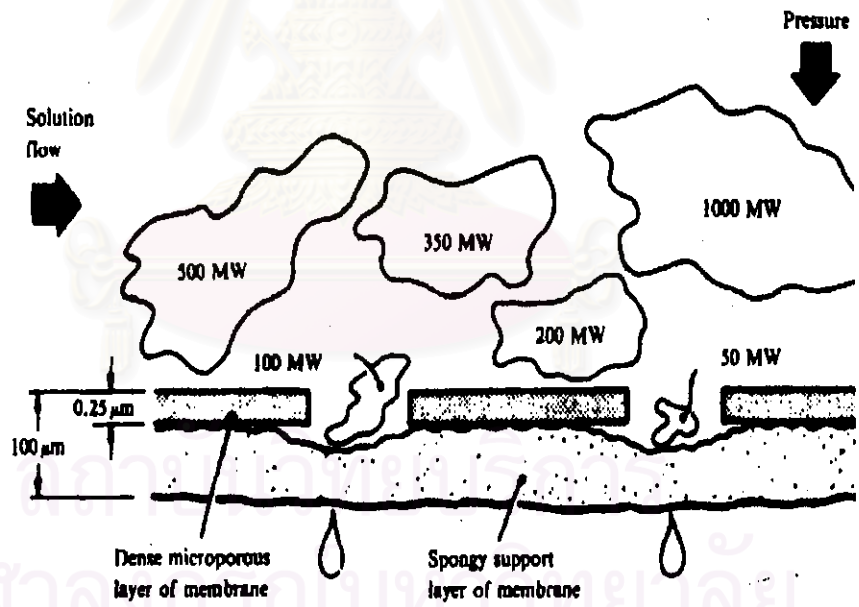
รูปที่ 2.2 กลไกการกำจัดเกลือต่างๆ ของระบบรีเวอร์สออสโมซีส

กลไกในการกำจัดเกลือแร่ (เรียกว่า Salt Rejection) ขึ้นอยู่กับจำนวนวาเลนซ์ (Valance) ของไอออนต่างๆ ไอออนที่มีวาเลนซ์สูงจะถูกเมมเบรนผลักได้ไกลกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ แรงผลักนี้เชื่อว่าเกิดขึ้นเนื่องจากมี Dielectric Interaction ไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 1 จะถูกผลัก ให้อยู่ห่างจากผิวเมมเบรนประมาณ 1 ไมครอน ซึ่งห่างเท่ากับน้ำ 2 โมเลกุลต่อกัน แรงผลักดัน ระหว่างเกลือและเมมเบรนทำให้เกิดชั้นน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งปกคลุมผิวหน้าของเมมเบรนและยื่นเข้าไปถึงช่องว่าง(รู) ของเมมเบรนด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านชั้นเมมเบรนมิใช่เป็นการเคลื่อนที่ อย่างสะดวกสบาย เหมือนการไหลผ่านท่อน้ำ นักวิจัยเชื่อว่า น้ำไหลผ่านเมมเบรนทีละโมเลกุล โดยซึมเข้าไปในช่องว่างของโครงสร้างสามมิติของสารอินทรีย์ที่ใช้ทำเมมเบรน เมมเบรนที่ผลิตได้ในปัจจุบันยังไม่สมบูรณ์ถึงขั้นอุดมคติ จึงยังมีการรั่วของไอออนต่างๆ เกิดขึ้นได้ประมาณ 1-10% (ของความเข้มข้นทั้งหมด) เนื่องจากไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ เช่น Na^+, Cl^-, K^+, NO_3^- เป็นต้น ถูกผลักน้อยที่สุด จึงอยู่ใกล้เมมเบรนมากที่สุด ไอออนเหล่านี้จึงรั่วผ่านเมมเบรนได้ดีกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์สูง (ดูตารางที่ 2.2)

ด้วยเหตุนี้ สารประกอบที่มี Na^+ จึงรั่วออกจากระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) ได้ง่ายกว่า สารประกอบที่มี Ca^{++} ฟอสเฟตจึงถูกกำจัดได้ดีกว่า SO_4^- หรือCl สารอนินทรีย์ที่ไม่มีประจุไฟฟ้าเช่นกาซต่างๆ จะไม่ถูกผลักจากเมมเบรน ระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) จึงไม่กำจัด กาซดังต่อไปนี้ เช่น CO_2, O_2, Cl_2, H_2S, และ SO_2

2.4.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์

ระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) กำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำได้โดยวิธีกรองติดค้าง (Sieve) โมเลกุลขนาดใหญ่ถูกกำจัดออกจากน้ำเพราะไม่สามารถลอดผ่านรูบนเมมเบรน (ดูรูปที่ 2.3) แต่โมเลกุลขนาดเล็กสามารถลอดรู และทะลุออกไปจากเมมเบรนได้ ระบบออสโมซิส ย้อนกลับ มีเมมเบรนที่สามารถกำจัดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 200 ได้เกือบทั้งหมด ส่วนสารซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 200 จะทะลุผ่านเมมเบรนไปได้มากน้อยขึ้นอยู่กับรูปร่าง และขนาดของโมเลกุล (ดูตารางที่ 2.3) ยกตัวอย่างเช่น ฟอร์แมลดีไฮด์ (Formaldehyde) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 30 สามารถทะลุผ่านเมมเบรนได้โดยตลอด ส่วนน้ำตาลไม่สามารถผ่านได้เลย เพราะมีน้ำหนักโมเลกุล 342 (ความสามารถในการทะลุผ่านเมมเบรนได้ของฟอร์แมลดีไฮด์ ทำให้สามารถใช้สารเคมีตัวนี้ในการฆ่าเชื้อโรคให้กับน้ำที่อยู่ทั้งสองด้านของเมมเบรนได้) แบคทีเรีย, ไวรัส และสารที่ผลิตโดยจุลินทรีย์หรือไพโรเจน (Pyrogen) ล้วนมีขนาดใหญ่เกินไปจนไม่สามารถ ทะลุผ่านเมมเบรนได้จึงสามารถใช้ระบบรีเวอร์สออสโมซีส ในการกำจัดออกได้



รูปที่ 2.3 กลไกในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบรีเวอร์สออสโมซีส

ตารางที่2.3 สรุปความสามารถของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซีส ในการกำจัดสารอินทรีย์

	Molecular Weight	Rejection, %	Maximum Concentration,%
Sucrose sugar	342	100	25
Lactose sugar	360	100	25
Protein	10000+	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	50000-500000	100	-
Pyrogen	100-5000	100	-

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบรีเวอร์สออสโมซีส

2.5.1 Concentration Polarization

ในระบบไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic) ใด รวมทั้งระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) จะมีชั้นน้ำที่เรียกว่า Boundary Layer อยู่ติดกับผิวหน้าของเมมเบรน ชั้นน้ำดังกล่าวจะอยู่เป็น อิสระโดยไม่ผสมกับน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ภายนอก ความหนาของ Boundary Layer แปรผกผันกับ อัตราไหลของน้ำและความปั่นป่วน น้ำสะอาดถูกบังคับให้ออกจากชั้นนี้และกระจายซึมผ่าน เมมเบรนออกไปภายนอก ทำให้มีการสะสมตัวของสารละลายต่างๆ เกิดขึ้นภายใน Boundary Layer (ดูรูปที่ 2.4) จนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำดิบหลายเท่า ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่าเกิด Concentration Polarization ระดับของการเกิด Concentration Polarization อาจแสดงได้ด้วยอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นสูงสุด (ที่ผิวเมมเบรน) ของสารละลายใน Boundary Layer และความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำดิบ หรือ Cm / Ce ในรูปที่ 2.4

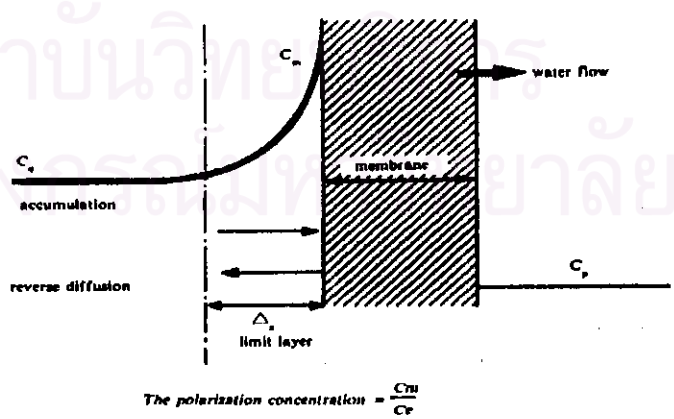
สมรรถนะในการกำจัดสารละลายของเมมเบรนขึ้นอยู่กับ Concentration Polarization เป็นอย่างมาก เนื่องจากการสะสมตัวของเกลือแร่ใน Boundary Layerให้เกิดผลเสียต่างๆต่อระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) ที่กำลังทำงานอยู่ ดังต่อไปนี้

(1) ทำให้ แรงดันออสโมติกสูงขึ้น เป็นผลให้อัตราการผลิต น้ำสะอาด (Water Flux) ลดลง

(2) ทำให้มีการรั่วไหลของสารละลายผ่าน เมมเบรน (Salt Flux) เพิ่มขึ้น เป็นผลให้น้ำที่ผลิตได้มีมลทินเพิ่มขึ้น

(3) เร่งเมมเบรนให้เสื่อมสภาพเร็วขึ้น

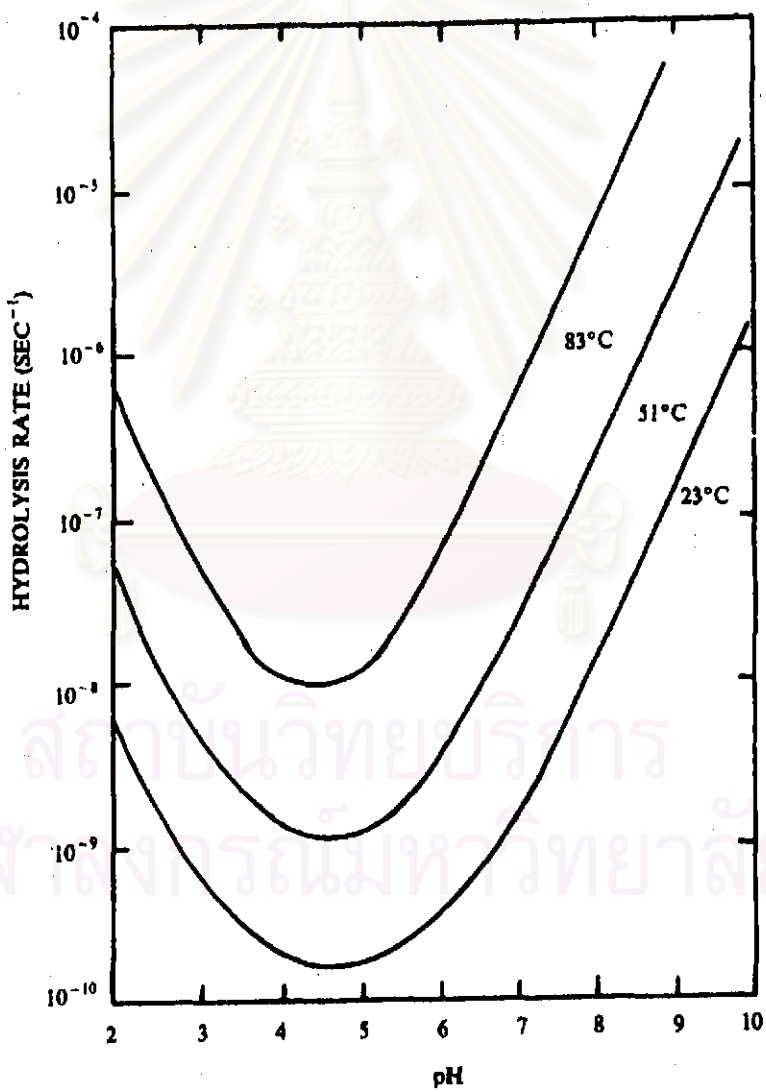
(4) ทำให้มีการตกผลึกของ $CaCO_3$ และ/หรือ $CaSO_4$ หรือสารประกอบอื่นๆ



รูปที่ 2.4 แสดง Concentration Polarization ที่เกิดขึ้นในระบบ รีเวอร์สออสโมซีส

2.5.2 อุณหภูมิและพีเอช

การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแต่ละองศาในช่วง 15-30 องศาเซลเซียส ช่วยให้อัตราของ Water Flux เพิ่มตามไปด้วยประมาณ 3-5% แต่ไม่เพิ่ม Salt Flux การที่เมมเบรนเป็นสารอินทรีย์เอสเตอร์ (Organic Ester) ซึ่งสามารถสลายตัวเนื่องจากปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) อุณหภูมิและ พีเอชจึงมีบทบาทสำคัญดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะเป็นได้ว่า อัตราเร็วของปฏิกริยาแปรตาม อุณหภูมิของน้ำ และจะช้าที่สุดเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 4-6 ด้วยเหตุนี้ ถ้าต้องการให้เมมเบรนมีอายุยืนนาน ควรรักษาระดับพีเอชให้อยู่ในช่วง 3-7 และอย่าใช้กับน้ำที่มีอุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.5 แสดงอิทธิพลของ พีเอช และอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเมมเบรน

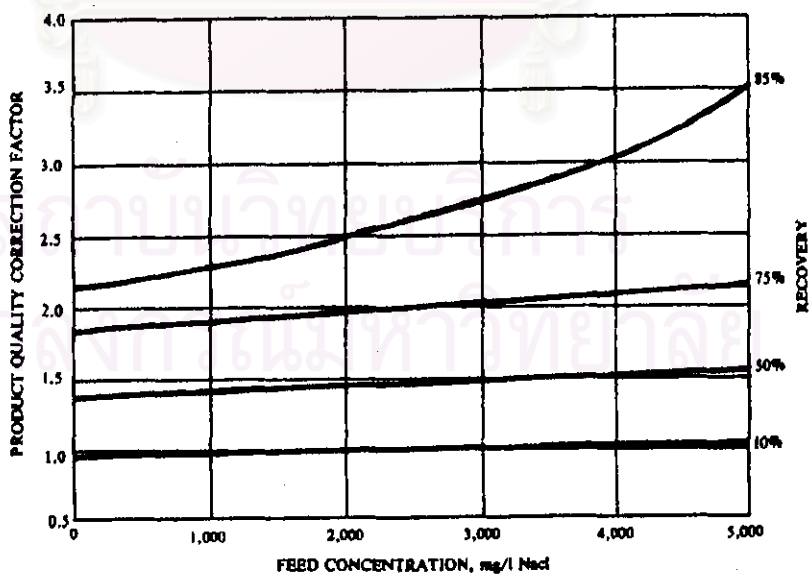
2.5.3 แรงดัน

แรงดันมีอิทธิพลโดยตรงต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) ของระบบรีเวอร์สออสโมซิส เป็นอย่างมาก แต่แทบไม่มีผลกระทบต่ออัตรารั่วของสารละลาย (Salt Flux) ด้วยเหตุนี้ การเพิ่มแรงดันจึงมีผลทำให้ระบบรีเวอร์สออสโมซิส (RO) สามารถผลิตน้ำสะอาดได้เพิ่มขึ้น และทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม แรงดันสูงก็สามารถสร้างผลเสียได้เช่นกัน ทั้งนี้เพราะแรงดันทำให้โครงสร้างของเมมเบรนเกิดการอัดตัวแน่น (Compaction) จนกระทั่งน้ำไม่สามารถไหลผ่านได้สะดวก ผลเสียอันนี้ถือว่าเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราการผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) มีค่าลดลงเรื่อยๆ ในระหว่างใช้งาน

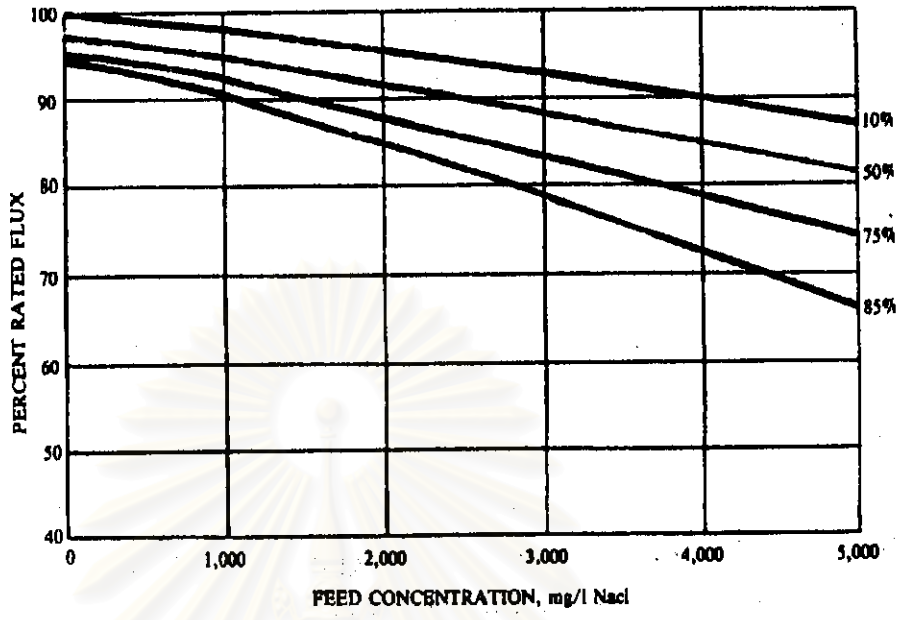
2.5.4 ความเข้มข้นของน้ำดิบ

รูปที่ 2.6 และ 2.7 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของสารละลายในน้ำดิบ ที่มีต่อสมรรถนะของระบบรีเวอร์สออสโมซิส (RO) ที่มี %Recovery 4 ระดับ อัตราการผลิตน้ำ (Water Flux) มีค่าลดลงตามการเพิ่มของความเข้มข้นของสารละลาย และ ของ %Recovery

การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำดิบ และ % Recovery ทำให้สมรรถนะของระบบ รีเวอร์สออสโมซิสลดลง เนื่องจาก Salt Flux มีอัตราเพิ่มขึ้น และแรงดันออสโมซิสก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่2.6 แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำดิบ และ Recovery ที่มีต่อคุณภาพของน้ำที่ผลิต



รูปที่ 2.7 แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำดิบและ Recovery ที่มีต่ออัตราการผลิตน้ำ

2.5.5 ระบบควบคุมอัตราไหลของน้ำเข้มข้นที่ต้องระบายทิ้ง

การควบคุมอัตราผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) กระทำได้โดยควบคุม อัตราไหลของน้ำเข้มข้น (Concentrate) หรือ Rejected water ด้วยวาล์วแบบธรรมดา น้ำสะอาดที่ถูกบีบออกจากโมดูล จะมีการไหลเป็นแบบอิสระเสมอ ทั้งนี้เพื่อให้น้ำสะอาดมีความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศตลอดเวลา ถ้ามีการติดวาล์วควบคุมอัตราไหลของน้ำสะอาด อัตราผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) จะลดน้อยลง เนื่องจากมีการสะสมแรงดันในท่อน้ำสะอาด โดยปกติน้ำเข้มข้นจะมีความดันต่ำกว่าของน้ำดิบประมาณ 5-20 ปอนด์/ตร.นิ้ว (0.3-1.3 บาร์)

2.6 เมมเบรนสำหรับใช้กับกระบวนการรีเวอร์สออสโมซีส (RO)

ในปัจจุบัน แผ่นเมมเบรนสำหรับใช้กับระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) มักผลิตมาจากโพลีเมอร์ 2 ประเภท คือ เซลลูโลส(Cellulose) และ โพลีเอไมด์ (Polyamide) เซลลูโลสที่ใช้ผลิตเมมเบรน มี 2 ชนิด คือ เซลลูโลสอะซีเตด(Cellulose Acetate) และ เซลลูโลส ไตรอะซีเตด (Cellulose Triacetate) สารประกอบเหล่านี้ไม่สามารถทนกรด หรือด่าง หรือ อุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส เพราะจะเกิดปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เมมเบรนเสื่อมสภาพ (ดูรูปที่ 2.5) เมมเบรนที่ทำจากโพลีเอไมด์ มักมีความทนทานต่อพีเอชและอุณหภูมิ ได้ดีกว่าชนิดแรก อย่างไรก็ตาม เมมเบรนเซลลูโลสสามารถทนคลอรีนเข้มข้นไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้เป็นเวลานานๆ และสามารถทนคลอรีนเข้มข้น 10-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายในเวลาสั้นๆ และเป็นครั้งคราว แต่เมมเบรนโพลีเอไมด์ทนคลอรีนได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

แผ่นเมมเบรนที่นิยมใช้กันมาก ทำมาจากเซลลูโลสอะเซเตต ซึ่งโดยปกติจะหนาประมาณ 100 ไมครอน และมี 2 ชั้น ชั้นที่ใช้งานจริงๆ มีความหนาประมาณ 0.2 ไมครอน และทำหน้าที่ขัดขวางหรือกักสารละลายต่างๆ มิให้ซึมผ่านเมมเบรนออกไปพร้อมกับน้ำ ชั้นที่หนากว่า ทำหน้าที่เป็นพื้นรองรับและมีรูพรุนเต็มไปหมดสำหรับให้น้ำไหลผ่านได้ ชั้นบางมีได้มีเนื้อพรุนเหมือนชั้นหนา รูที่ยอมให้โมเลกุลของน้ำไหลผ่านไปได้เป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลของโพลีเมอร์ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเยื่อเมมเบรนเป็นการแพร่กระจายของน้ำผ่านช่องว่างดังกล่าวทีละโมเลกุล

2.7 โมดูลชนิดต่างๆ ของระบบรีเวอร์สออสโมซีส

ปัญหาอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการใช้แผ่นเมมเบรนสำหรับแยกสารจากน้ำคือจะนำแผ่นเมมเบรนรีเวอร์สออสโมซีสมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไร ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงปัจจัยดังต่อไปนี้ [3, 11]

(ก) เนื่องจากเมมเบรนมีความหนาน้อยมาก เปราะ แต่ต้องรับแรงดันสูงประมาณ 200-1000 ปอนด์/ตารางนิ้ว จึงต้องการอุปกรณ์รองรับที่สามารถป้องกันมิให้แผ่นเมมเบรนแตกหักได้ง่าย แต่ในขณะเดียวกันต้องมีทางให้น้ำไหลทะลุผ่านเมมเบรนได้ด้วย

(ข) ภาชนะบรรจุเมมเบรนหรือโมดูล (Module) ต้องออกแบบให้กะทัดรัดและสามารถผลิตน้ำสะอาดได้มาก (คิดต่อหน่วยปริมาตรของถัง) หรืออาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่า ต้องออกแบบโมดูลให้สามารถบรรจุแผ่นเมมเบรนได้มากที่สุด

(ค) Concentration Polarization ต้องเกิดขึ้นน้อย

(ง) การอุดตันเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ต้องเกิดขึ้นน้อยที่สุด และทำความสะอาดได้ง่าย

(จ) ต้องไม่มีรอยรั่วเกิดขึ้นตามรอยต่อต่างๆ ของระบบ

ในปัจจุบันนี้ มีการสร้างโมดูลรีเวอร์สออสโมซีสแบบต่างๆ 4 แบบ คือ แบบแผ่น (Plate and Frame) แบบท่อ (Tubular) แบบม้วน (Spiral) และแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber) ข้อแตกต่างกันของทั้ง 4 แบบ สรุปอยู่ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของโมดูลรีเวอร์สออสโมซีสทั้ง 4 แบบ

ชนิดของโมดูล	ชนิดของเมมเบรน	Packing Density* (m^2/m^3)	pH	ความสะดวกในการล้าง	Salt Rejection	Water Flux**(m^3/m^2-day)
แบบแผ่น	เซลลูโลสอะเซเตต	150	2-8	พอใช้	ดีมาก	0.5
แบบท่อ	เซลลูโลสอะเซเตต	450	2-8	ดีมาก	ดีมาก	0.5
แบบม้วน	เซลลูโลสอะเซเตต	750	2-8	ดี	ดีมาก	0.5
แบบเส้นใยกลวง	โพลีเอไมด์	7500-15000	4-11	พอใช้	ดี	0.5-0.2

* พื้นที่เมมเบรนต่อปริมาตรของโมดูล

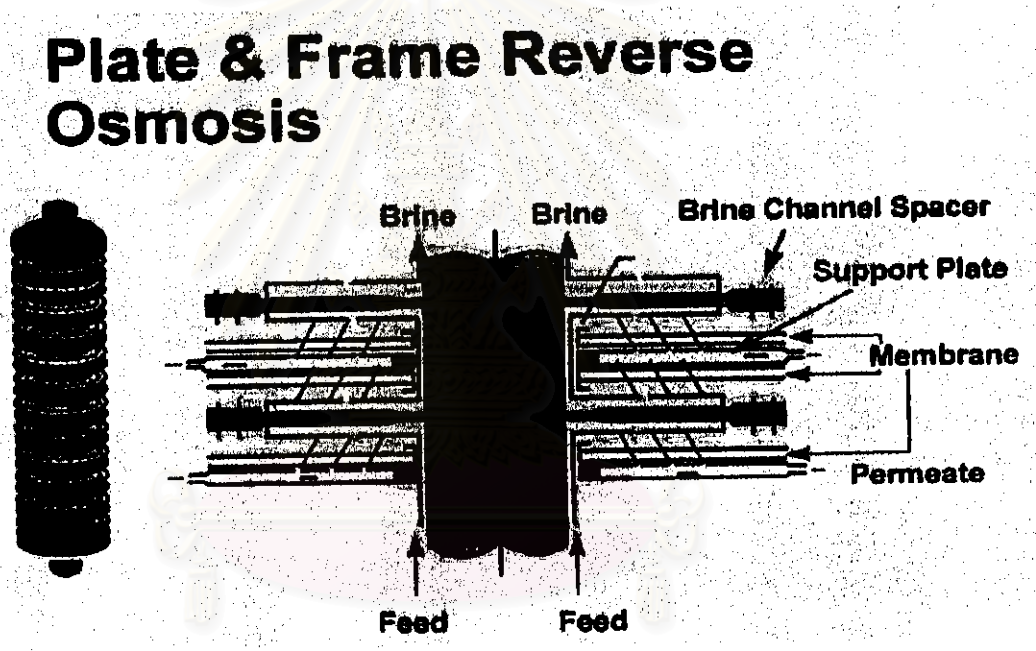
** ที่แรงดัน 40 บรรยากาศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7.1 โมดูลแบบแผ่น (Plate and Frame Module)

เทคนิคนี้เป็นการจัดแผ่นเมมเบรนแบบที่ง่ายที่สุด (ดูรูปที่ 2.8) โมดูลที่ใช้เทคนิคนี้มีลักษณะการทำงานคล้าย Filter Press แผ่นเมมเบรนวางอยู่บนแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน(Porous Plate) หรือแผ่นรองรับที่มีร่องให้น้ำไหลออกมาได้ เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางซ้อนและสลับกัน น้ำถูกบังคับให้ซึมผ่านเมมเบรนและแผ่นรองรับและไหลออกจากโมดูล โมดูลแบบนี้ต้องเสียเงินค่าติดตั้ง และดูแลรักษาแพงมาก

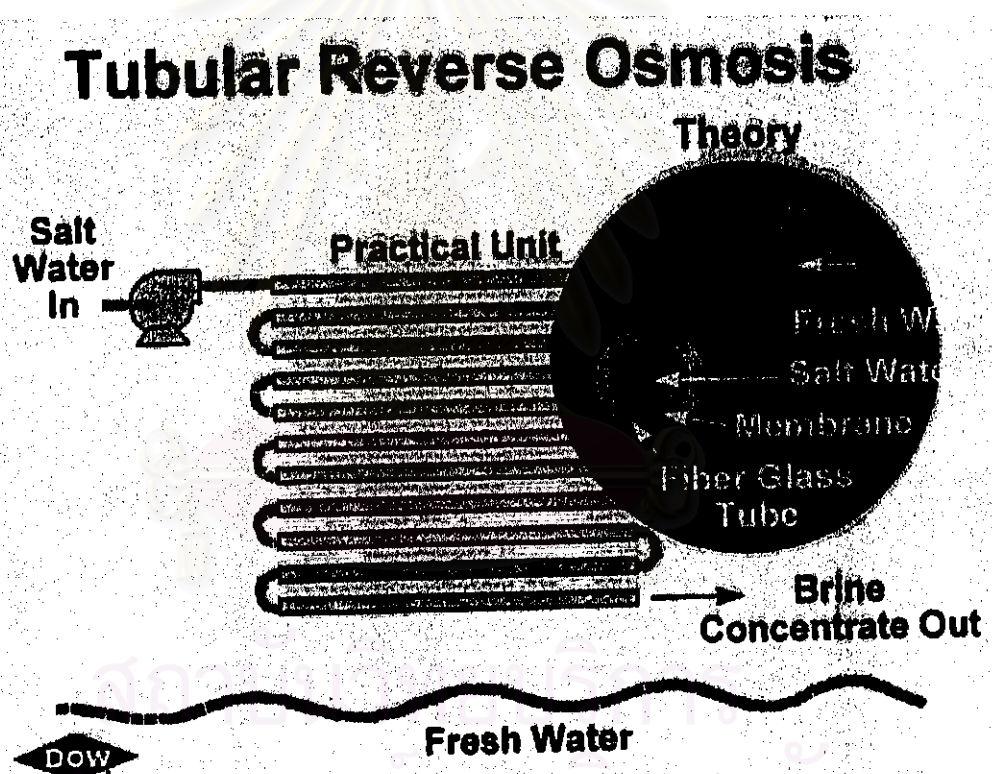


รูปที่ 2.8 แสดงโมดูลแบบแผ่น (Plate and Frame Module)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7.2 โมดุลแบบท่อ (Tubular Module)

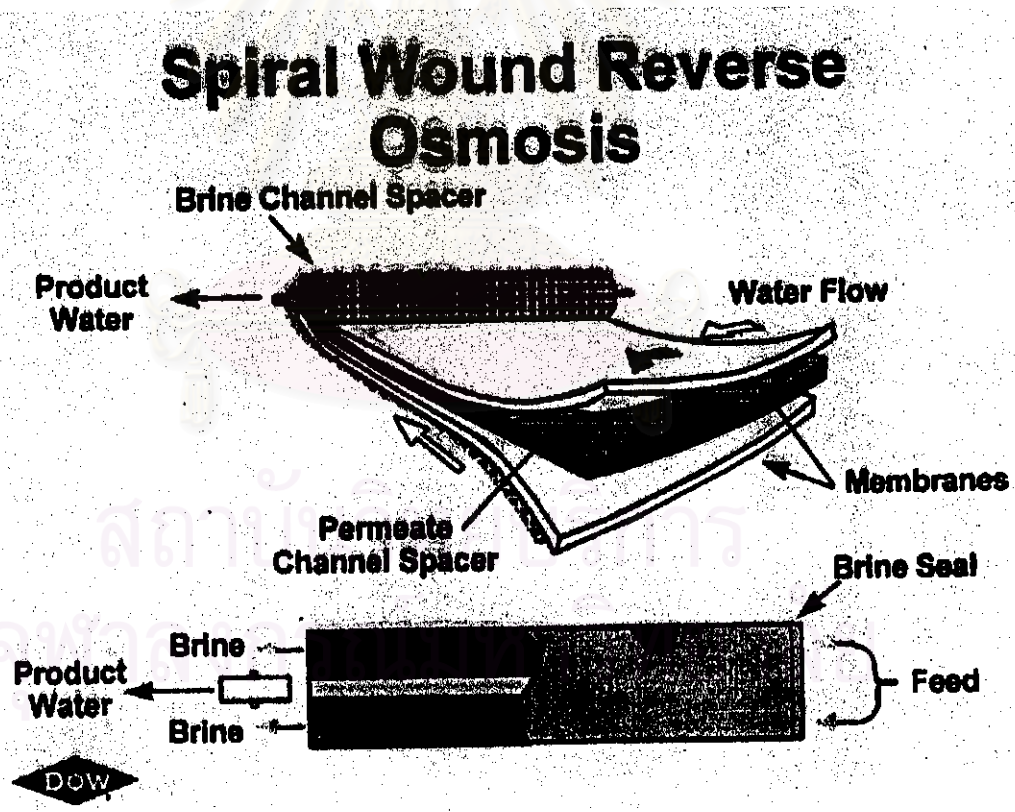
วิธีนี้เป็นการม้วนแผ่นเมมเบรน ให้เป็นหลอดหรือท่อขนาดเล็ก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 มม. และยึดติดไว้ภายในท่ออีกอันหนึ่ง ที่ทำด้วยกระดาษหรือทำด้วยใยสังเคราะห์ (ดูรูปที่ 2.9) และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับแผ่นเมมเบรนมิให้ฉีกขาดในระหว่างการใช้งาน และใช้เป็นทางออกของน้ำสะอาดอีกด้วย น้ำดิบที่มีความดันสูงจะถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อที่มีแผ่นเมมเบรนบุอยู่ภายใน แรงดันของน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถซึมผ่านแผ่นเมมเบรนและท่อรองรับ ออกสู่ภายนอก เทคนิคนี้ผลิตน้ำได้น้อยและทำความสะอาดได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้กับกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ต้องการแยกน้ำออกจากสารละลายต่างๆ



รูปที่2.9 แสดงโมดุลแบบท่อ (Tubular Module)

2.7.3 โมดูลแบบม้วน (Spiral Wound Module)

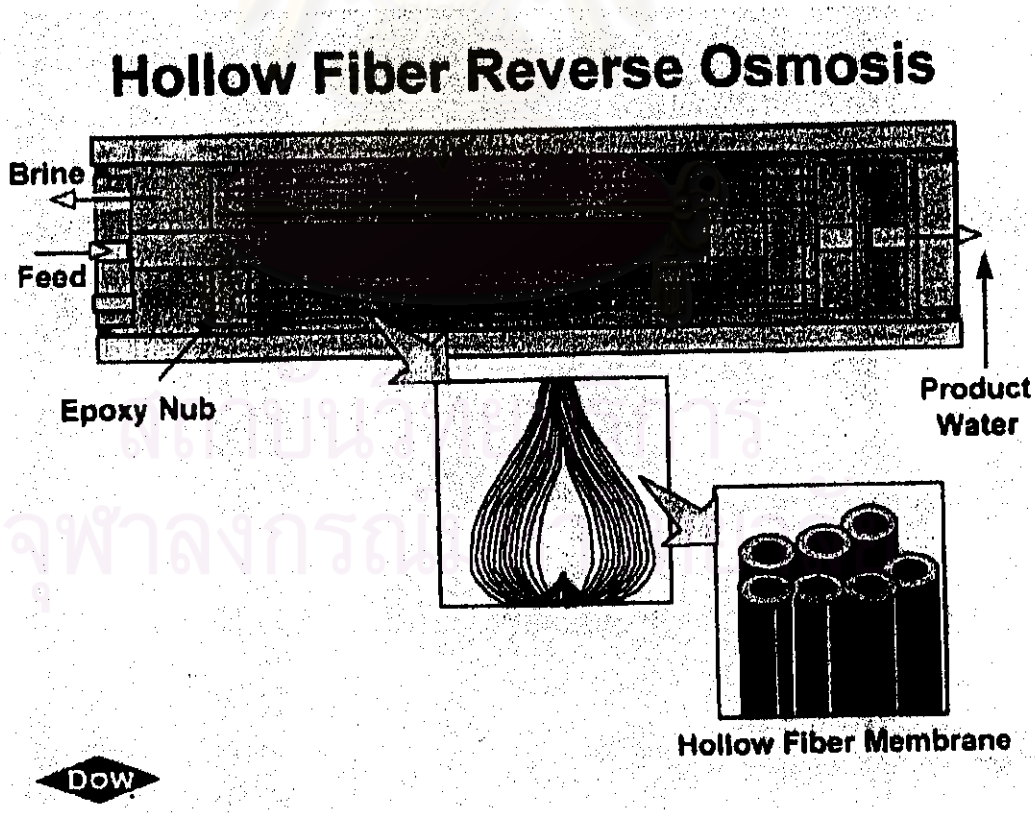
โมดูลแบบนี้ประกอบด้วยเมมเบรน 2 แผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่ตรงกลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นแบนทั้งสามรอบท่อเจาะรู โดยมีแผ่นตะแกรงทำด้วย Polypropyrene คลุมปิดอยู่ด้านนอก (ดูรูปที่ 2.10) ขอบของแผ่นเมมเบรนทั้งสามด้านถูกอุดไว้ด้วยกาวพิเศษ ขอบที่เหลือปล่อยให้เปิดตามปกติและยึดติดกับท่อเจาะรู ลักษณะเช่นนี้ทำให้น้ำถูกบังคับให้ไหลไปยังท่อเจาะรูเสมอ การม้วนเมมเบรน, แผ่นรองรับ, และตะแกรงพลาสติก ทำให้ได้โมดูลรูปทรงกระบอกที่สามารถบรรจุไว้ในท่อโลหะธรรมดาได้ โมดูลแบบนี้อาจมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5, 10, 20, หรือ 30 ซม. และมีความยาวต่างๆ กัน แต่มักไม่เกิน 1 เมตร น้ำดิบถูกบังคับให้ไหล (ในแนวแกนของโมดูล) เข้าไปตามแผ่นตะแกรง จากนั้นแรงอัดทำให้น้ำซึม ทะลุผ่านเมมเบรน (ตามแนวรัศมีของโมดูล) ลงไปถึงแผ่นรองรับซึ่งทำหน้าที่ส่งน้ำบริสุทธิ์ไปยังท่อเจาะรูเพื่อนำออกจากโมดูล



รูปที่ 2.10 แสดงโมดูลแบบม้วน (Spiral Wound Module)

2.7.4 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module)

แผ่นเมมเบรนที่ใช้ในโมดูลทั้งสามชนิดที่กล่าวมาแล้วล้วนทำมาจากเซลลูโลสอะเซเตต แต่โมดูลแบบเส้นใยกลวง หรือ Hollow Fiber Module นี้ มักใช้เมมเบรนที่ทำมาจากวัสดุไนลอนจำพวกโพลีเอไมด์ (Polyamide) ซึ่งสร้างโดย บริษัทดูปองต์ (Du Pont Co.) ต่อมาภายหลัง บริษัทดาวเคมี (Dow Chemical Co.,) ได้พัฒนาเมมเบรนที่ทำด้วยเซลลูโลสไตรอะเซเตต (Cellulose Triacetate) และสร้างเป็นเส้นใยกลวงได้ เส้นใยกลวงที่ทำจากโพลีเอไมด์ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกประมาณ 50-85 ไมครอน และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณครึ่งหนึ่งของภายนอก ส่วนเส้นใยกลวงที่ทำจากเซลลูโลสไตรอะเซเตตมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกประมาณ 200-300 ไมครอน วิธีนำเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมาใช้ประโยชน์กระทำได้โดยนำมารวมกันเป็นมัดๆ และงอพับเป็นรูปเกือกม้าหรือตัว U ปลายทั้งสองข้างของเส้นใยทั้งมัดถูกตรึงติดอยู่กับทางน้ำออก เส้นใยเมมเบรนทั้งหมดวางอยู่ในถังรูปทรงกระบอก (ดูรูปที่ 2.11) น้ำดิบเข้ามาทางท่อเจาะรูซึ่งวางอยู่ตรงกลางของถังทรงกระบอก และกระจายน้ำไปยังส่วนต่างๆ แรงดันทำให้น้ำซึมเข้าเส้นใยเมมเบรนและทะลุถึงภายใน น้ำบริสุทธิ์จะซึมไปตามรูกลวงของเส้นใยและไปรวมกันที่ทางออก



รูปที่ 2.11 Hollow Fiber Module

2.8 ความจำเป็นในการเตรียมน้ำก่อนเข้าระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO)

การเตรียมน้ำให้มีคุณสมบัติเหมาะสมก่อนเข้าเครื่องรีเวอร์สออสโมซีส (RO) เป็นความจำเป็นที่ไม่ควรหลีกเลี่ยง ทั้งนี้เพราะน้ำดิบอาจสร้างความเสียหายให้กับระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) ได้อย่างเร็วหรืออาจทำให้อายุการใช้งานลดน้อยลงได้ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักเนื่องมาจากการอุดตันของเครื่องหรือเมมเบรน และอาจจำแนกออกได้เป็น 5 แบบ [4] คือ

1. การเกิดตะกรันบนเมมเบรน
2. การตกผลึกของเหล็กและแมงกานีส
3. การอุดตันของเครื่องเนื่องจากสารแขวนลอย
4. การอุดตันของเมมเบรนเนื่องจากคอลลอยด์
5. การอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์ (Biological Fouling)

2.8.1 การเกิดตะกรันบนเมมเบรน

ลักษณะการทำงานของระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) ซึ่งยอมให้เฉพาะโมเลกุลของน้ำซึมผ่านเมมเบรนและกักโมเลกุลชนิดต่างๆ ไว้ ทำให้มีการสะสมตัวของโมเลกุลและไอออนต่างๆ อยู่ในด้านน้ำดิบของเมมเบรน โดยปกติระดับสารละลายในน้ำดิบจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นประมาณ 2-4 เท่า เมื่ออยู่ในระบบรีเวอร์สออสโมซีส สภาพเช่นนี้เอื้ออำนวยให้มีการตกผลึก $CaCO_3$ และ/หรือ $CaSO_4$ $CaCO_3$ มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำมาก จึงตกผลึกได้ง่ายกว่าสารประกอบอื่นๆ ที่อาจตกผลึกของหินปูน ควรรีบล้างด้วยสารละลายกรดเจือจางเพื่อละลายผลึกดังกล่าว แต่ถ้าเป็นผลึกของ $CaSO_4$ ควรใช้กรดซิตริก (Citric Acid) หรือ EDTA ล้างเพื่อละลายให้หมด

การป้องกันผลึกมิให้เกิดขึ้น อาจทำได้โดยการกำจัดต้นเหตุ เช่น Ca^{++}, $SO_4^{=}$ และ $CO_3^{=}$ เป็นต้น หรือใช้สารเคมีห้ามผลึกมิให้เกิดขึ้น แม้การกำจัดแคลเซียมหรือซัลเฟตจะเป็นไปได้แต่ก็ไม่นิยมทำในทางปฏิบัติ เนื่องจากต้องสิ้นเปลืองมากและสร้างของเสียทำให้เป็นปัญหาขึ้นอีก ในทางปฏิบัติมักกำจัดคาร์บอเนตโดยการใช้กรดเกลือเปลี่ยนคาร์บอเนตให้เป็นไบคาร์บอเนตและ/หรือ CO_2 ดังนั้นการเติมกรดจึงสามารถป้องกันการตกผลึกของ $CaCO_3$ ถ้าต้องการป้องกันการตกผลึกของ $CaSO_4$ ควรใช้สารห้ามตะกรัน เช่น Sodium Hexametaphosphate หรือ HMP ในปริมาณประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

นอกจากวิธีต่างๆ ดังกล่าวแล้ว การป้องกันผลึกมิให้เกิดขึ้นอาจกระทำได้โดยการควบ คุมความเข้มข้นของสารละลายในโมดูลมิให้ค่าสูงเกินกว่าความสามารถในการละลายน้ำ ของสารประกอบต่างๆ วิธีการคือควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้มข้นที่ปล่อยออกจากระบบ ให้มีปริมาณสูงพอเพียง เพื่อลดความเข้มข้นของสารละลายที่สะสมตัวอยู่ในโมดูล (วิธีการเช่นนี้เป็นการควบคุม Recovery มิให้สูงเกินไปนั่นเอง)

2.8.2 การตกผลึกของเหล็กและแมงกานีส

ภายใต้สภาวะทั่วไป เหล็กสามารถตกผลึกได้รวดเร็ว และง่ายกว่าแมงกานีสเป็นอย่างมาก ผลึกของเหล็กจึงพบในโมดูลรีเวอร์สออสโมซีส (RO) มากกว่า ของแมงกานีส ส่วนใหญ่มักเป็นผลึกออกไซด์ การตกผลึกของเหล็กเกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กเฟรัส (Fe^{+2}) ซึ่งละลายน้ำได้ ทำปฏิกริยากับออกซิเจนในน้ำ กลายเป็นเหล็กเฟริก ซึ่งตกผลึกได้ง่ายโดยปกติถ้าน้ำดิบมีออกซิเจนละลายน้ำน้อยหรือไม่มีเลยระบบรีเวอร์สออสโมซีส (RO) สามารถทนต่อน้ำที่มีเฟรัสได้ไม่เกิน 4 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้าน้ำดิบมีออกซิเจนประมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือมากกว่า จะต้องมีเหล็กเฟรัสไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร การกำจัดเหล็กและแมงกานีสออกจากน้ำดิบด้วยวิธี อาจเป็นวิธีที่ใช้ได้ในการป้องกันการตกผลึกของสารทั้งสอง

อันที่จริงแล้ว เหล็กจะไม่สร้างปัญหาให้กับระบบรีเวอร์สออสโมซีสเลย ถ้าสามารถควบคุมให้อยู่ในรูปของเฟรัสตลอดเวลา ดังนั้นจึงอาจแก้ปัญหาในเรื่องตกผลึกได้ โดยการเติมกรดเกลือเพื่อลดพีเอชซึ่งเป็นการลดอัตราออกซิเดชันของเหล็ก ในกรณีที่มีการตกผลึกของเหล็กเกิดขึ้นอยู่ก่อนแล้ว ควรล้างด้วยสารละลายกรดซิตริก (Citric Acid) แล้วปรับพีเอชให้ได้เท่ากับ 4 ด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

2.8.3 การอุดตันของเครื่องเนื่องจากสารแขวนลอย

น้ำที่เข้าเครื่องรีเวอร์สออสโมซีส (RO) ต้องปราศจากสารแขวนลอยเพื่อป้องกันมิให้มีการอุดตันท่อน้ำหรืออุปกรณ์อื่นๆ ปัญหาเรื่องนี้มีความรุนแรงแตกต่างกันไป ตามแต่ชนิดของโมดูล โมดูลแบบเส้นใยกลวงถูกอุดตันได้ง่ายมาก แต่โมดูลแบบท่อ สามารถทนได้ดีกว่า ด้วยเหตุนี้จึงควรกำจัดสารแขวนลอยต่างๆ ออกจากน้ำที่เข้าเครื่องรีเวอร์สออสโมซีส (RO) และควรติดตั้ง Cartridge Filter ไว้กรองน้ำก่อนเข้าโมดูลเสมอ

2.8.4 การอุดตันเมมเบรนเนื่องจากคอลลอยด์

ปัญหานี้เกิดขึ้นจากการสะสมตัวของคอลลอยด์ใกล้แผ่นเมมเบรน และมีโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เกิดขึ้น การสะสมตัวของสารละลายในโมดูล ทำให้มีระบบเกลือแร่สูงจนกระทั่ง Diffuse Layer ของคอลลอยด์ถูกบีบให้แคบลง และเกิดโคแอกกูเลชันได้ ผลที่เกิดขึ้นคือ มีการรวมตัวกันของคอลลอยด์จนเป็นกลุ่มก้อนและเกาะอยู่บนเมมเบรน ทำให้มีการอุดตันเมมเบรนเกิดขึ้น

การป้องกันคอลลอยด์มิให้อุดตันเมมเบรน จึงเป็นเสมือนกับการห้ามโคแอกกูเลชันมิให้เกิดนั่นเอง ซึ่งอาจกระทำได้โดยการลดปริมาณคอลลอยด์ และ/หรือ เพิ่มเสถียรภาพของคอลลอยด์ (ทำให้เกิดโคแอกกูเลชันได้ยาก) ในทางปฏิบัติ มักกำจัดคอลลอยด์ออกจากน้ำก่อนด้วยวิธีโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มตามด้วยการตกตะกอนและ/หรือ การกรอง การควบคุมระดับสารละลายในโมดูล เพื่อป้องกันการตกผลึกของสารต่างๆ มีส่วนช่วยทำให้โคแอกกูเลชันของคอลลอยด์ในโมดูลเกิดได้ยาก

การวัดเสถียรภาพและความเข้มข้นของคอลลอยด์ อาจกระทำได้โดยการวัดซีตาโพเทนเชียล (Zeta Potential) และ Silt Density Index (SDI) ตามลำดับ คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูง จะมีซีตาโพเทนเชียลสูง และเกิดโคแอกกูเลชันได้ยาก ในทางตรงกันข้าม คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพต่ำ จะมีซีตาโพเทนเชียลต่ำ และเกิดโคแอกกูเลชันได้ง่าย Silt Density Index (SDI) เป็นดรรชนีที่ใช้แสดงระดับความเข้มข้นของคอลลอยด์ น้ำบาดาลมักมี SDI ประมาณ 2-3 หรือน้อยกว่าและไม่ก่อปัญหาในเรื่องการอุดตันเมมเบรน น้ำผิวดินอาจมี SDI สูงตั้งแต่ 10 จนถึง 175 และมีคอลลอยด์เข้มข้นจนเกิดการอุดตันเมมเบรน

2.8.5 การอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์ (Biological Fouling)

ถ้าปล่อยให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้บนเมมเบรน (ด้านน้ำเข้มข้นหรือน้ำดิบ) ปัญหาด้านต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ มีดังนี้

- เมมเบรนถูกทำลาย ทั้งนี้เพราะเมมเบรนเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์สามารถใช้เป็นอาหารได้
- อุดตันเมมเบรน
- จุลินทรีย์อาจรั่วผ่านเมมเบรนและหลุดออกไปพร้อมกับน้ำสะอาดที่ผลิตได้ ทำให้น้ำอาจมีมลทิน

ในจำนวนโมดูลรีเวอร์สออสโมซิส (RO) ทั้ง 4 ชนิด มีชนิดเดียวเท่านั้นที่ทนทานต่อการทำลายของจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดีคือ โมดูลแบบเส้นใยกลวง ซึ่งใช้โพลีเอไมด์ทำเมมเบรน การใช้คลอรีนฆ่าจุลินทรีย์ต้องกระทำอย่างระมัดระวังทั้งนี้เนื่องจากคลอรีนมีปฏิกริยากับเมมเบรนส่วนใหญ่ ถ้าปล่อยให้สัมผัสกันนานเกินไปหรือคลอรีนเข้มข้นเกินไป เมมเบรนอาจถูกทำลายจนสูญเสียคุณภาพ วิธีรักษาเมมเบรนให้สามารถใช้ได้นานและมีคุณภาพดีตลอดเวลา อาจกระทำได้ โดยทำลายจุลินทรีย์ในน้ำดิบด้วยคลอรีนเสียก่อน จากนั้นจึงกำจัดคลอรีนตกค้างที่มากเกินไปก่อนส่งน้ำเข้าโมดูล ในกรณีที่ต้องปิดเครื่องรีเวอร์สออสโมซิสเป็นเวลานานๆ ควรล้างเมมเบรนด้วยสารละลายฟอร์แมลดีไฮด์ (Formaldehyde) เสียก่อนเพื่อป้องกันจุลินทรีย์มิให้เติบโตภายใต้สภาวะสงบนิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.9 การคำนวณหาแรงดันออสโมซิส

แรงดันออสโมซิส (π) เป็นคุณสมบัติของสารละลายที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ดังอาจแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$\pi = nCRT \qquad (2.1)$$

โดยที่ π = แรงดันออสโมซิส

n = จำนวนไอออนในสารประกอบ เช่น NaCl มี n = 2, Na_2SO_4 มี n = 3 เป็นต้น

C = ความเข้มข้นของสารละลาย (โมล/ลิตร)

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

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (°K) = 273 + °C

ตัวอย่าง 2.1 ถ้าสารละลายมีความเข้มข้น 100 กรัม/ลิตร จงคำนวณหาแรงดันออสโมซิส ที่อุณหภูมิ 300 K ตัวถูกละลายที่มีมวล.โมเลกุล 50, 500, 5,000 และ 50,000 กรัม/โมล

ตารางที่ 2.5 แรงดันออสโมซิสของสารประกอบบางชนิดที่ 25 °C

Compound	Concentration (mg/liter)	Concentration (moles/liter)	Osmotic Pressure (psi at 25 °C)
NaCl	35,000	0.6	398
NaCl	1,000	0.0171	11.4
$NaHCO_3$	1,000	0.0119	12.8
Na_2SO_4	1,000	0.00705	6
$MgSO_4$	1,000	0.00831	3.6
$MgCl_2$	1,000	0.0105	9.7
$CaCl_2$	1,000	0.009	8.3
Sucrose	1,000	0.00292	1.05
Dextrose	1,000	0.00555	2.0

* A useful rule of thumb for estimating the osmotic pressure of a natural water is 10 psi/1000 mg/liter (ppm.)

(ก) เมื่อ น้ำหนักโมเลกุล = 50

$$\pi = (100/50) \times 300 \times 0.082 = 49 \text{ atm.}$$

(ข) เมื่อน้ำหนักโมเลกุล = 500

$$\pi = (100/500) \times 300 \times 0.082 = 4.9 \text{ atm.}$$

(ค) เมื่อน้ำหนักโมเลกุล = 5,000

$$\pi = (100/5,000) \times 300 \times 0.082 = 0.49 \text{ atm.}$$

(ง) เมื่อน้ำหนักโมเลกุล = 50,000

$$\pi = (100/50,000) \times 300 \times 0.082 = 0.05 \text{ atm.}$$

ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อโมเลกุลยิ่งเล็กแรงดันออสโมซิสก็ยิ่งสูง ด้วยเหตุนี้แรงดันออสโมซิสจึงมีบทบาทสำคัญในระบบรีเวอร์สออสโมซิส ยิ่งกว่าในระบบ UF หรือการกรองแบบอื่นๆ และทำให้ RO ต้องใช้แรงดันสูงกว่ากระบวนการแยกแบบอื่น

ตัวอย่างที่ 2.2 จงคำนวณหาแรงดันออสโมซิสของสารละลายเกลือแกงที่มีความเข้มข้น 1000 และ 35,000 โมเลกุล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 25 °C (น้ำหนักโมเลกุลของ NaCl = 58.5)

(ก) เมื่อความเข้มข้น = 1,000 โมเลกุล/ลิตร

$$\pi = 2 \times (1/58.5) \times (273 + 25) \times 0.082 = 0.82 \text{ atm.}$$

(ข) เมื่อความเข้มข้น = 35,000 โมเลกุล/ลิตร

$$\pi = 2 \times (35/58.5) \times (273 + 25) \times 0.082 = 29.2 \text{ atm.}$$

ตัวอย่างที่ 2.3 ถ้าไอออนต่างๆ มีความเข้มข้น (โมล/ลิตร) ดังต่อไปนี้

Na^+	0.462	Mg^{++}	0.059
Ca^{++}	0.011	K^+	0.007
Cl^-	0.553	$SO_4^=$	0.028

จงคำนวณหาแรงดันออสโมซิสของสารละลายดังกล่าวที่อุณหภูมิ 25 °C

เนื่องจาก C = 0.462 + 0.059 +0.011 + 0.007 + 0.553 + 0.028

= 1.12 โมล/ลิตร

n = 1

T = 273 + 25 = 298 °K

จากสูตร π $= nCRT$

$= 1 \times 1.12 \times 298 \times 0.082$

$= 27.4$

2.10 การคำนวณออกแบบระบบรีเวอร์สออสโมซีส

2.10.1 พารามิเตอร์สำหรับออกแบบและควบคุม

2.10.1.1 Water Flux (F_W)

ในขณะที่การกรองน้ำแบบธรรมดามีอัตรากรอง (ม.^{3}/ม.^{2}-ชม.) เป็นพารามิเตอร์สำคัญ ระบบ RO ก็มี Water Flux เป็นตัวสำคัญ พารามิเตอร์ตัวนี้ หมายถึงอัตราเร็วของน้ำที่ซึมผ่านเมมเบรนซึ่งเท่ากับอัตราไหลของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ของเมมเบรน เช่น มล./ตร.ซม.-วินาที เป็นต้น

น้ำสามารถซึมผ่านเมมเบรนได้ในอัตราที่ขึ้นอยู่กับแรงดันของเครื่องสูบและแรงดันออสโมซิสที่ต้านไว้ ดังจะเห็นได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$F_W = A (\Delta P - \Delta \pi) \qquad (2.2)$$

โดยที่ F_W = Water Flux (มล./ซม.^{2}-วินาที)

A = สัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน (มล./ตร.ซม.-วินาที-บรรยากาศ) สำหรับเมมเบรนที่ทำจากเซลลูโลสอะเซเตด A อาจถือว่ามีค่าประมาณ 1.5×10^{-5} มล./ตร.ซม.-วินาที-บรรยากาศ)

ΔP = ความแตกต่างระหว่างแรงดันของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน (บรรยากาศ)

$\Delta \pi$ = ความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมซิสของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน (บรรยากาศ)

อัตราไหลที่แท้จริงของน้ำผ่านเมมเบรน สามารถคำนวณได้จากผลคูณของ Water Flux และ พื้นที่ของแผ่นเมมเบรน ในทางตรงข้าม ถ้ารู้ค่า Water Flux (บริษัทผลิตเมมเบรนมักกำหนดค่าของ Water Fluxภายใต้สภาวะทำงานต่างๆ) และรู้ปริมาณน้ำสะอาดที่ต้องการก็สามารถคำนวณพื้นที่ของเมมเบรนที่ต้องการใช้ได้

สมการที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าอัตราผลิตน้ำสะอาดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของผลต่างระหว่าง ΔPและ $\Delta \pi$ ซึ่งทำให้กล่าวได้ว่า อัตราผลิตน้ำสะอาดเพิ่มตามการเพิ่มของแรงดันของเครื่องสูบ ในตอนต่อไป จะเห็นอีกว่า การเพิ่มแรงดันของน้ำ ยังทำให้ได้น้ำสะอาดที่มีคุณภาพสูงขึ้นอีกด้วย

2.10.1.2 Salt Flux (F_s)

สำหรับในอุดมคติ เมมเบรนต้องไม่ยอมให้สารละลายไหลซึมผ่านได้เลย แต่ในความเป็นจริงแล้ว เมมเบรนไม่สามารถผลักโมเลกุลหรือไอออนได้หมดทุกตัวทำให้น้ำที่ผลิตได้ (Permeate) มีมลทินเสมอการรั่วของสารละลายผ่านเมมเบรน เรียกว่า Salt Flux (F_s) ระบบ RO ที่มี Salt Flux สูง จะผลิตน้ำที่มีคุณภาพต่ำ ดังนั้น ระบบ RO ที่ดี จึงควรมี Salt Flux ต่ำ และมี Water Flux สูง หน่วยของ F_s ที่ใช้คือ กรัม/ตร.ซม.-วินาที จะเห็นได้ว่า ทั้ง F_s และ F_w เป็นพารามิเตอร์ที่คิดต่อหน่วยพื้นที่เหมือนกัน Salt Flux ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำดิบ และไม่ขึ้นอยู่กับแรงดัน ดังจะเห็นได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$F_S = B(C_o - C_p) \qquad (2.3)$$

โดยที่ F_S = Salt Flux (กรัม/ตร.ซม.-วินาที)

B = สัมประสิทธิ์ของการไหลของสารละลายผ่านเมมเบรน (ซม./วินาที) สำหรับเมมเบรนเซลลูโลสอะเซเตด B มีค่าประมาณ 2×10^{-5} ซม./วินาที

C_o = ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำดิบ (กรัม/มล.)

C_p = ความเข้นข้นของสารละลายในน้ำสะอาด (กรัม/มล.)

สมการที่ 2.3 แสดงว่าน้ำเค็ม (TDS ประมาณ 30,000 มก./ล.) จะมีการรั่วของสารละลาย (F_s) สูงกว่าน้ำกร่อย (TDS 5,000 มก./ล. หรือน้อยกว่า) ดังนั้น ระบบ RO ที่ใช้กับน้ำเค็ม (หรือน้ำทะเล) จึงต้องใช้แรงดันสูงมาก เพื่อให้ได้ Water Flux สูงมาก สำหรับมาเจือจางสารละลายที่รั่วซึมผ่านเมมเบรน จึงจะสามารถผลิตน้ำสะอาดที่มีคุณภาพสูง สำหรับในกรณีของน้ำกร่อยแรงดันไม่จำเป็นต้องสูงมาก เนื่องจากมีการรั่วซึมของสารละลายน้อยกว่าจึงไม่ต้องการน้ำมาเจือจางมาก น้ำทะเลและน้ำกร่อยมีแรงดันออสโมซิสประมาณ 400 และ 50 psi ตามลำดับ ดังนั้นในการผลิตน้ำจืดที่ดื่มได้ ระบบ RO ต้องการแรงดันประมาณ 800-1500 และ 300-600 psi สำหรับน้ำทะเลและน้ำกร่อย ตามลำดับ

การสะสมของสารละลายในโมดูล ทำให้ Salt Flux มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการระบายน้ำเข้มข้น (Rejected Water) ออกจากโมดูลเพื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย

2.10.1.3 Rejection Factor หรือ % Rejection

Rejection เป็นคุณสมบัติซึ่งเมมเบรนจะต้องมี เมมเบรนที่ดีต้องไม่ยอมให้โมเลกุลหรือไอออนไหลผ่านได้มาก นั่นคือ ต้องมี Rejection Factor หรือ %Rejection สูง เมมเบรนในอุดมคติจะมี %Rejection เท่ากับ 100% คุณภาพของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จากระบบ RO เป็นเครื่องสะท้อนถึง Rejection ของเมมเบรน เช่น ระบบ RO ที่มี %Rejection ต่ำ จะมีค่า C_p สูง เป็นต้น ความหมายของ Rejection อาจแสดงให้เห็นได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\%\text{Rejection} = R_j = 100(C_o - C_p)/C_o$$

$$= 100(1 - C_p/C_o) \quad (2.4)$$

เนื่องจาก $C_p = F_S/F_W$ (2.5)

ดังนั้น $R_j = 100(1 - F_S/C_oF_W)$ (2.6)

เมมเบรน RO มีความสามารถในการผลักหรือ Reject สารละลายต่างๆ ไม่เท่ากัน (ดูตารางที่ 2.2) ทั้งนี้ด้วยเหตุผลที่กล่าวไปในตอนที่ 14.3 โดยทั่วไป %Rejection ของสารละลายอนินทรีย์และอินทรีย์จะมีค่าประมาณ 90-99% และ 95-99% ตามลำดับ ส่วน %Rejection ของคอลลอยด์ต่างๆ (เช่นแบคทีเรีย, ความขุ่น ฯลฯ) มักสูงถึง 100%

2.10.1.4 Recovery Factor หรือ %Recovery

คุณสมบัติของเมมเบรนที่คู่ไปกับ Rejection คือ Recovery ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรน้ำสะอาดที่ผลิตได้ ต่อปริมาตรของน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำสะอาด

$$\%\text{Recovery} = R = 100\ Q_p/Q_o \quad (2.7)$$

โดยที่ Q_p = อัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จากระบบ RO

Q_o = อัตราการไหลของน้ำดิบที่เข้าระบบ RO

ถ้าน้ำดิบทั้งหมดสามารถผลิตเป็นน้ำสะอาดได้ %Recovery จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 100% แต่โดยปกติ Recovery มักไม่ถึง 100% เนื่องจากต้องมีการทิ้งน้ำเข้มข้นออกจากระบบเสมอ บ่อยๆ ครั้งที่ต้องควบคุมให้

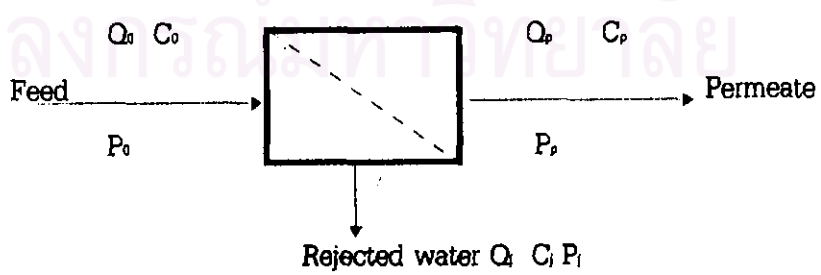
ระบบ RO มี %Recovery ประมาณ 50-70% เพราะต้องระบายน้ำเข้มข้นทิ้งในอัตราสูงเพื่อลดความเข้มข้นของสารละลายที่สะสมอยู่ในระบบ RO อย่างไรก็ตามในการคำนวณออกแบบระบบ RO มักเริ่มต้นด้วยการสมมติให้ R = 90%ตารางที่ 2.6 เป็นตารางรวบรวมค่าต่างๆ ของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมและออกแบบระบบ RO

ตารางที่ 2.6 ค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้กับระบบ RO

Parameter	Range	Typical
Pressure	400-1,000 psig	600 psig
Temperature	60°F-100°F	70°F
Packing Density	50-500 sq ft/cu ft	-
Flux	10-80 gpd/sq ft	12-35 gpd/sq ft
Recovery Factor	75-95%	80%
Rejection Factor	85-99.5%	95%
Membrane Life	-	2 years
PH	3-8	4.5-4.5
Turbidity	-	1 NTU
Feedwater Velocity	0.04-2.5 fps	-
Power Utilization	9-17 kwhr /1,000 gal	-

2.10.2 วิธีคำนวณและออกแบบ

ขอให้พิจารณารูปที่ 2.12



รูปที่2.12 สัญญลักษณ์ที่ใช้ในการออกแบบระบบ RO

กำหนดให้ C = ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำ

P = แรงดันของน้ำ

Q = อัตราไหลของน้ำ

o,p,j = น้ำดิบ, น้ำสะอาด, และน้ำเข้มข้น ตามลำดับ

A = พื้นที่ของเมมเบรน

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า $F_W = Q_p/A$

$$F_S = C_pQ_p/ C_oQ_o \quad (2.9)$$

และ $$R = 100\ Q_p/Q_o \quad (2.10)$$

สมการแสดงสมดุลของมวลของน้ำโดยรอบระบบ RO สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q_o = Q_p + Q_j \quad (2.11)$$

ในทำนองเดียวกัน สมการแสดงสมดุลของมวลของสารละลายอาจเขียนได้ดังนี้

$$Q_oC_o = Q_pC_p + Q_jC_j \quad (2.12)$$

เนื่องจาก $$F_S = B(C_o - C_p) \quad (2.3)$$

และ $$C_p = F_S/F_W \quad (2.5)$$

แทนค่า F_S ในสมการ 2.3 ลงในสมการ 2.5 จะได้

$$C_p = B(C_o - C_p)/F_W$$

หรือ $$C_p = BC_o/(B + F_W) \quad (2.13)$$

ในกรณีส่วนใหญ่ เรามักทราบค่า C_o และต้องกำหนดค่า F_W ซึ่งคิดว่าเหมาะสมที่สุด สมการ 2.13 อาจช่วยในการเลือกค่า F_W ที่ทำให้ระบบ RO สามารถผลิตน้ำสะอาดที่มีสารละลายเข้มข้นเท่ากับ C_p แต่ทั้งนี้จะต้องรู้ค่า B ก่อน

เนื่องจาก $$R_j = 1 - C_p/C_o \quad (2.6)$$

หรือ $$1 - R_j = C_p/C_o$$

แทนค่า $C_p/C_o = 1 - R_j$ ลงในสมการที่ 2.13 จะได้

$$B/(B + F_W) = 1 - R_j$$

หรือ $$F_W = [B/(1 - R_j) - B \quad (2.14)$$

นั่นคือ เมื่อกำหนด Rejection และ F_w จะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ 2.14 ในทางตรงกันข้าม เมื่อกำหนดค่า F_w แล้ว R_j จะถูกกำหนดไปโดยอัตโนมัติ เมื่อหาค่า F_w ได้แล้ว ΔP ก็สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.2 $\Delta \pi$ สามารถคำนวณได้จากส่วนประกอบและความเข้มข้นของน้ำดิบและน้ำเข้มข้น เนื่องจาก P_p มักมีค่าเท่ากับ 1 บรรยากาศเสมอ แรงดันของเครื่องสูบ (P_o) จึงมีค่าเท่ากับ $\Delta P + 1$ (หน่วยบรรยากาศ)

ตัวอย่างที่ 2.4 จงออกแบบระบบ RO เพื่อผลิตน้ำสะอาดที่มีสารละลาย 500 มก./ล. ให้ได้ในอัตรา 1,000 ลบ.เมตร/วัน จากน้ำกร่อยที่มีความเข้มข้นเกลือแกง 3,000 มก./ล. กำหนดให้ R_j = 95% ที่แรงดัน 45 บรรยากาศ A = 2.5×10^{-5} มล./ตร.ซม-วินาที-บรรยากาศ

กำหนดให้ C_o = 3,000 มก./ล. = 0.003 กรัม/มล.

C_p = 500 มก./ล. = 0.0005 กรัม/มล.

A = 2.5×10^{-5} มล./ตร.ซม-วินาที-บรรยากาศ

Q_p = 1,000/24 = 41.7 ลบ.ม./ชม.

R_j = 95%

ΔP = 45-1 = 44 บรรยากาศ

กำหนดให้ %Recovery = R = 90%

ดังนั้น Q_o = 1,000 x 100/90 = 1110 ลบ.ม./วัน

และ Q_j = 1,110 - 1000 = 110 ลบ.ม./วัน

จากสมการที่ 2.12

$1110 \times 3{,}000 = 1{,}000 \times 500 + 110\ C_j$

ดังนั้น C_j = (3,330 - 500)/0.11 = 25,730 มก./ล.

ฉะนั้น ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายในด้านที่มีแรงดันสูง

= (3,000 + 25,730)/2

= 14,365 ก./ล.

แรงดันออสโมติกของสารละลายในด้านที่มีแรงดันสูง (ที่ 25°C) = nCRT

= 2 x 14.365/58.5 x 298 x 0.082

= 12 บรรยากาศ

แรงดันออสโมติกของสารละลายในด้านที่มีแรงดันต่ำ

$= 2 \times 0.5/58.5 \times 298 \times 0.082$

$= 0.4$ บรรยากาศ

เพราะฉะนั้น $\Delta\pi = 12 - 0.4 = 11.6$ บรรยากาศ

จากสูตร $F_W = A(\Delta P - \Delta \pi)$

$= 2.5 \times 10^{-5} (44 - 11.6)$

$= 81 \times 10^{-5}$ มล./ตร.ซม.-วินาที

$= 81 \times 10^{-5} \times 100^2 \times 10^{-3} \times 60 \times 60 \times 24$

$= 7 \times 10^6 \times 10^{-5} \times 10^4 \times 10^{-3}$ ลิตร/ตร.ม.-วัน

$= 700$ ลิตร/ตร.ม.-วัน

$= 0.7$ ลบ.ม./ตร.ม.วัน

ฉะนั้น พื้นที่เมมเบรนที่ต้องใช้ $= 1,000/0.7 = 1429$ ตร.ม.

ตัวอย่างที่ 2.5 จงคำนวณหาพื้นที่ของเมมเบรนและแรงดันของเครื่องสูบในการผลิตน้ำสะอาด 340 ลบ.ม./วัน จากน้ำดิบที่มีเกลือแกงเข้มข้น 2,000 มก./ล. น้ำสะอาดที่ได้ต้องมีความเข้มข้นไม่เกิน 250 มก./ล. (กำหนดให้ $A = 1.5 \times 10^{-5}$ มล./ตร.ซม.-วินาที-บรรยากาศ, $B = 3 \times 10^{-5}$ ซม./วินาที)

จากสมการที่ 2.3 $C_p = BC_o/(B + F_W)$

เนื่องจาก $C_p = 250$ มก./ล.

$C_o = 2,000$ มก./ล.

$B = 3 \times 10^{-5}$ ซม./วินาที

ดังนั้น $250 = 3 \times 10^{-5} \times 2,000/(3 \times 10^{-5} + F_W)$

จะได้ $F_W = 2.1 \times 10^{-4}$ มล./ตร.ซม.-วินาที

$= 0.2$ ลบ.ม./ตร.ม.-วัน

ดังนั้น พื้นที่ของเมมเบรนที่ต้องใช้ $= 340/0.2 = 1,700$ ตร.ม.

สมมติให้ Recovery Factor $= 90\%$

ดังนั้น $Q_o = 340/0.9 = 378$ ลบ.ม./วัน

และ $Q_j = 378 - 340 = 38$ ลบ.ม./วัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการที่ 2.2 $Q_oC_o = Q_iC_i + Q_pC_p$

$(378 \times 2{,}000) = (38\ C_i) + (340 \times 250)$

ดังนั้น $C_i = 17{,}658$ มก./ล.

ฉะนั้น ความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำที่มีแรงดันสูง

$= (17{,}658 + 2{,}000) / 2$

$= 9{,}829$ มก./ล.

π ที่มีความเข้มข้น 9829 มก./ล. $= 2 \times (9.829/58.5) \times 298 \times 0.082$

$= 8.2$ บรรยากาศ

π ที่มีความเข้มข้น 250 มก./ล. $= 8.2 \times 250/9829$

$= 0.2$ บรรยากาศ

ดังนั้น $\Delta\pi = 8.2 - 0.2$

$= 8$ บรรยากาศ

จากสูตร $F_w = A(\Delta P - \Delta\pi)$

$2.1 \times 10^{-4} = 1.5 \times 10^{-6}(\Delta P - 8)$

จะได้ $\Delta P = 22$ บรรยากาศ

นั่นคือ เครื่องสูบน้ำจะต้องมีแรงดันไม่ต่ำกว่า = 22 +1 = 23 บรรยากาศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย