

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำ

องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้ให้นิยามของวัตถุประสงค์ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคไว้ 3 ประการ คือ

- คุณภาพน้ำที่ผลิตมีความสะอาดสำหรับอุปโภคได้โดยปลอดภัย
- ปริมาณน้ำที่ผลิตมีเพียงพอสำหรับความต้องการใช้น้ำ
- ต้นทุนในการผลิตต่ำและสามารถบริการจ่ายน้ำให้ผู้ต้องการได้ทั่วถึง

2.1.1 กระบวนการบำบัดน้ำ

การเลือกใช้กระบวนการสำหรับบำบัดน้ำขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบและน้ำประปาที่ต้องการ น้ำดิบจากแหล่งที่ต่างกันอาจใช้กระบวนการบำบัดต่างกันเนื่องจากคุณสมบัติของน้ำที่ไม่เหมือนกัน กระบวนการบำบัดน้ำเพื่อให้ได้น้ำประปาอาจแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

- กำจัดสารแขวนลอย ได้แก่ กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) กระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) และกระบวนการกรอง (Filtration)
- กำจัดสารละลาย ได้แก่ กระบวนการตกผลึก (Precipitation) กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) กระบวนการกรองด้วยเยื่อ (Membrane Process)
- ฆ่าเชื้อโรค ได้แก่ การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน

ระบบประปาส่วนใหญ่ต้องการกระบวนการเพื่อกำจัดสารแขวนลอย ดังนั้นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบมักได้แก่ ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า และถังกรอง น้ำที่ผ่านถังกรองแล้วจะมีความใสและสะอาด แต่ก่อนส่งน้ำเข้าระบบจ่ายน้ำบริการต้องมีการฆ่าเชื้อโรคก่อนโดยใช้สารเคมี เช่น คลอรีน

การเติมคลอรีนให้กับน้ำที่มีสารอินทรีย์ละลายอยู่อาจทำให้เกิดสารอินทรีย์เคมีได้ โดยพบว่าปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับกรดฮิวมิกซึ่งเกิดจากการย่อยสลายตามธรรมชาติของซากพืช ทำให้เกิดสารประกอบไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane) ซึ่งประกอบไปด้วย คลอโรฟอร์ม (Chloroform) โบรโมไดคลอโรมีเทน(BDCM) ไดโบรโมคลอโรมีเทน(DBCM) และ โบรโมฟอร์ม (Bromoform) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งอย่างหนึ่ง

เนื่องจากมนุษย์มีความต้องการใช้น้ำสำหรับการดำรงชีวิตประจำวัน จุดประสงค์ของการใช้น้ำมีแตกต่างกัน การใช้น้ำภายในครัวเรือน มีจุดประสงค์เพื่อ การดื่ม การประกอบอาหาร การอาบน้ำ การซักล้าง การทำความสะอาด การกำจัดสิ่งปฏิกูล ฯลฯ ความต้องการคุณภาพน้ำนั้นแตกต่างกันตามจุดประสงค์ของการใช้น้ำที่ต่างกัน เช่น

- การทำความสะอาด → ใช้น้ำจากแม่น้ำ ล้ำคลองได้
- การอาบน้ำ ซักล้าง → ใช้น้ำประปา
- การดื่ม การประกอบอาหาร → ใช้น้ำประปา หรือ น้ำที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น

น้ำประปาที่มาจากกระบวนการผลิตน้ำประปาสามารถบริโภคได้ แต่ในกระบวนการขนส่งน้ำตามท่ออาจเกิดการปนเปื้อนสิ่งสกปรก เนื่องจากรอยรั่วตามจุดต่างๆของท่อที่ไม่ได้รับการตรวจพบและแก้ไข อีกทั้งงานวิจัยใหม่ๆที่แสดงถึงอันตรายของสารเคมีอินทรีย์ที่เกิดจากการใช้คลอรีนในขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรค ทำให้คนนิยมที่จะซื้อน้ำดื่มบรรจุขวดเพื่อการบริโภค ทั้งที่มีราคาสูงกว่าน้ำประปามากกว่า 100 เท่า

2.2 มาตรฐานน้ำใช้เพื่อการบริโภค

ตารางที่ 2.1 เป็นมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก และตารางที่ 2.2 เป็นมาตรฐานน้ำดื่มของกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นเป้าหมายของโรงงานผลิตน้ำประปาเพื่อชุมชน

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (มันสิ้น ดัชนีทูลเวคม์, 2542)

Standard of Drinking Water (WHO) (Physical and Chemical)		
Toxic Substance	Maximum Allowable mg/l	
Lead (as Pb)		0.05
Selenium (as Se)		0.01
Arsenic (as As)		0.05
Chromium (as Cr hexavalent)		0.05
Cyanide (as CN)		0.2
Cadmium		0.01
Substances Affecting the Potability of Water		
Substance	Max. Acceptable	Max. Allowable
Total Solids	500 mg/l	1,500 mg/l
Color	5 Units	50 Units
Turbidity	5 Units	25 Units
Taste	Unobjectionable	-
Odor	Unobjectionable	-
Iron (Fe)	0.3 mg/l	1.0 mg/l
Manganese (Mn)	0.1 mg/l	0.5 mg/l
Copper (Cu)	1.0 mg/l	1.5 mg/l
Zinc (Zn)	5.0 mg/l	15 mg/l
Calcium (Ca)	75 mg/l	200 mg/l
Magnesium (Mg)	50 mg/l	150 mg/l
Sulfate (SO ₄)	200 mg/l	400 mg/l
Chloride (Cl)	200 mg/l	600 mg/l
pH range	7.0-8.5	
Magnesium + Sodium Sulfate	500 mg/l	1,000 mg/l
Phenolic Substances (as Phenol)	0.001 mg/l	0.002 mg/l
Carbon Chloroform Extract	0.2 mg/l	0.5 mg/l
Alkyl Benzyl Sulfonates	0.5 mg/l	1.0 mg/l
Standard of Bacteriological Quality		
90% of Samples in year negative for Coliforms i.e.		
90% of Samples MPN < 1.0		
No Samples MPN > 10		
MPN 8-10 not to occur in Consecutive Sample		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานน้ำดื่มของกระทรวงอุตสาหกรรม ประกาศเลขที่ 322 พ.ศ.2521

ลำดับที่	ชนิด	ความเข้มข้น (มก./ล)
1	สารที่เป็นพิษ ถ้ามีเกินกำหนดทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ คือ ตะกั่ว (Lead) เซลีนียม (Selenium) โครเมียม (Chromium) ไซยาไนด์ (Cyanide) อาร์เซนิก (Arsenic) ปรอท (Mercury) แบเรียม (Barium)	0.05 0.01 0.05 0.2 0.05 0.001 1.0
2	สารบางจำพวกที่เกี่ยวกับสุขภาพ ถ้ามีมากเกินไปจนเกินที่กำหนดอาจทำให้เกิดโรคได้ คือ ฟลูออไรด์ (Fluoride) ไนเตรต (Nitrate)	0.7 10 (as N)
3	สารบางจำพวกที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของน้ำดื่ม สารพวกนี้ถ้ามีมากเกินไปกำหนดทำให้น้ำไม่ดื่ม กลิ่นและรส (Odour and Taste) สี (Colour) ความขุ่น (Turbidity) ความเป็นกรดหรือด่าง (pH Value) สารทั้งหมด (Total Solids) แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม (Magnesium) เหล็กและแมงกานีส (Iron and Manganese) ทองแดง (Copper) สังกะสี (Zinc) ซัลเฟต (Sulphate) คลอไรด์ (Chloride) ฟีนอล (Phenol)	ไม่เป็นที่รังเกียจ 5 Units 5 Units 6.5 - 8.5 500 75 0.5 0.30 0.50 5 50 200 250
4	แบคทีเรียที่อาจทำให้เกิดโรคต่อมนุษย์ได้ ยอมรับดังนี้ Standard Plate Count ค่า MPN E. Coli	500 โคโลนี/มล. น้อยกว่า 2.2 ต่อ น้ำ 100 มล. ไม่มี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 ผลผลิตต่อเนื่องจากการใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

เกิดจากการรวมตัวของ NOM ในน้ำโดยทั่วไป คือ กรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก ที่มีปกติอยู่ในน้ำธรรมชาติกับคลอรีนหรือโบรมีนที่มาจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งปัจจุบันจัดว่าเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic Organic Substance) ในน้ำประปา

ในกระบวนการผลิตน้ำประปา คลอรีนที่เติมจะใช้ปริมาณน้อย โดยทั่วไปแล้วจะไม่เกิน 2 - 3 มิลลิกรัมต่อลิตร คลอรีนจะทำปฏิกิริยากับ NOM และสารที่มีอยู่ในน้ำ ปริมาณคลอรีนที่เติมไปนี้เรียกว่าความต้องการคลอรีน (Chlorine Demand) และเติมคลอรีนให้เกินปริมาณที่ต้องการเพื่อให้มีคลอรีนที่เหลืออยู่หรือคลอรีนอิสระ (Free Residual Chlorine) ใช้เป็นตัวฆ่าเชื้อโรคในน้ำต่อไป เมื่อน้ำประปาไหลไปในระบบท่อจ่ายน้ำ แต่การเติมคลอรีนในปริมาณที่น้อยนี้ทำให้เกิดผลผลิตต่อเนื่องที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ โดยชนิดที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนมากและเป็นที่น่าสนใจในปัจจุบัน คือ ไตรฮาโลมีเทน และฮาโลอะซีติกเอซิด

ในปี พ.ศ. 2527 ได้มีการสำรวจปริมาณของสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาของกรุงเทพมหานครโดย Onodera และคณะ (1984) พบว่ามีสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาที่ผลิตจากแหล่งน้ำผิวดิน โดยมีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 16.8 - 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย 68 ไมโครกรัมต่อลิตร

ในปัจจุบันได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของน้ำประปา หรือเรียกว่าค่าระดับความปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Contaminant Levels: MCLs) ของสารปนเปื้อนต่างๆในน้ำประปา โดยมาตรฐานของ U.S. Environmental Protecting Agency (USEPA) กำหนดมาตรฐานความเข้มข้นของสารไตรฮาโลมีเทนในระบบประปาไว้ไม่เกิน 80 ไมโครกรัมต่อลิตร

2.3.1 ผลของผลผลิตต่อเนื่องจากการใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่มีต่อสุขภาพอนามัย

รายงานความเสี่ยงต่อสุขภาพที่เกิดจากสารฮาโลฟอร์มในน้ำดื่มเกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1974 โดยมีข้อมูลว่า การดื่มน้ำที่มีสารฮาโลฟอร์มในระยะยาวอาจก่อให้เกิดมะเร็งได้ เนื่องจากมีอัตราการป่วยด้วยโรคมะเร็งลำไส้ (Gastrointestinal Tract) และระบบปัสสาวะ (Urinary Tract) เพิ่มขึ้น

อีกการศึกษาหนึ่งพบว่า การดื่ม น้ำ ที่มี Chloroform สูง จะก่อให้เกิดมะเร็งลำไส้ใหญ่ (Rectal-intestinal) และมะเร็งในไต (Bladder Cancer) จากการทดลองกับหนูพบว่า Chloroform ทำให้หนูเป็นเนื้องอกในตับและไตเมื่อทดลองให้หนูดื่ม น้ำ ที่มี Chloroform ซึ่งทำให้คาดคะเนว่า Chloroform ในน้ำดื่ม อาจมีผลต่อการเป็นมะเร็งในมนุษย์ได้

สารประกอบไตรฮาโลมีเทนอีก 2 ชนิด คือ Chlorodibromomethane กับ Bromodichloromethane มีรายงานว่า เป็นสารก่อมะเร็ง โดยสารแรกทำให้หนูป่วยด้วยอาการ Hepatic Adenofibrosis และ Neoplastic Nodules นอกจากนี้ยังทำให้เกิดเนื้องอกในอวัยวะหลายส่วน เช่น ลำไส้ และไต

สารประกอบคลอรีนกลุ่ม Acetic Acid อาทิ Dichloroacetic Acid ทำให้หนูเกิดอาการขาหลังเปลี่ยน ผิดปกติในสมองและอวัยวะ สถาบันวิจัยแห่งชาติของสหรัฐอเมริกาได้ระบุความเข้มข้นของ Dichloroacetic Acid ในน้ำประปาไม่เกิน 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร และ Trichloroacetic Acid ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่า สารประกอบทั้งสองนี้ก่ออาการเนื้องอกในตับด้วย แต่ยังไม่อาจสรุปได้ว่าสารทั้งสองนี้เป็นสารก่อมะเร็ง

2.4 กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน

เมมเบรน คือ เยื่อฟิล์มบางที่สังเคราะห์ขึ้นจากวัสดุอินทรีย์หรืออนินทรีย์ เช่น เซลลูโลสอะซิเตต และ โพลีเอไมด์ ตามลำดับ สามารถนำมาใช้สำหรับการเลือกกักแยกอนุภาคต่างๆ ออกจากของเหลวหรือก๊าซได้

กระบวนการเมมเบรน หมายถึง กระบวนการต่างๆ ที่อาศัยเมมเบรนในการแยกสารละลาย ออกจากน้ำหรือของเหลว โดยใช้แรงขับดันให้เกิดการเคลื่อนที่ของไหลผ่านเมมเบรนไป และกักสารต่างๆ ไม่ยอมให้ผ่านไปไว้ในรูปสารละลายเข้มข้น

กระบวนการเมมเบรนที่ใช้สำหรับการบำบัดน้ำและน้ำเสียที่สำคัญมี 4 แบบ คือ Reverse Osmosis (RO), Nanofiltration (NF), Ultrafiltration (UF) และ Microfiltration (MF)

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบกระบวนการเมมเบรนชนิดต่างๆ (Zeman and Zydney, 1996)

Process	Materials removed	Applications	Transmembrane pressures kPa (psi)
Microfiltration	Suspended solids and large colloids	Removal of bacteria, flocculated materials, and TSS	69-173 (10-25)
Ultrafiltration	Colloids, proteins, microbiological contaminants, and large organic molecules	Virus removal, removal of colloids and some organic molecules	103-690 (15-100)
Nanofiltration	Organic molecules with weights greater than 200 to 400, some TDS ^a reduction	Removal of color, TOC, ^b hardness, radon, and TDS reduction	345-1550 (50-225)
Reverse osmosis	Dissolved salts, inorganic molecules, organic molecules with molecular weights greater than 100	Desalination, wastewater reuse, food and beverage processing, industrial process water	1379-6895 (200-1000)

^a TDS = total dissolved solids.

^b TOC = total organic carbon.

ประโยชน์ของกระบวนการเมมเบรนเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการบำบัดน้ำแบบธรรมดา (Anselme และคณะ, 1993) มีดังนี้คือ

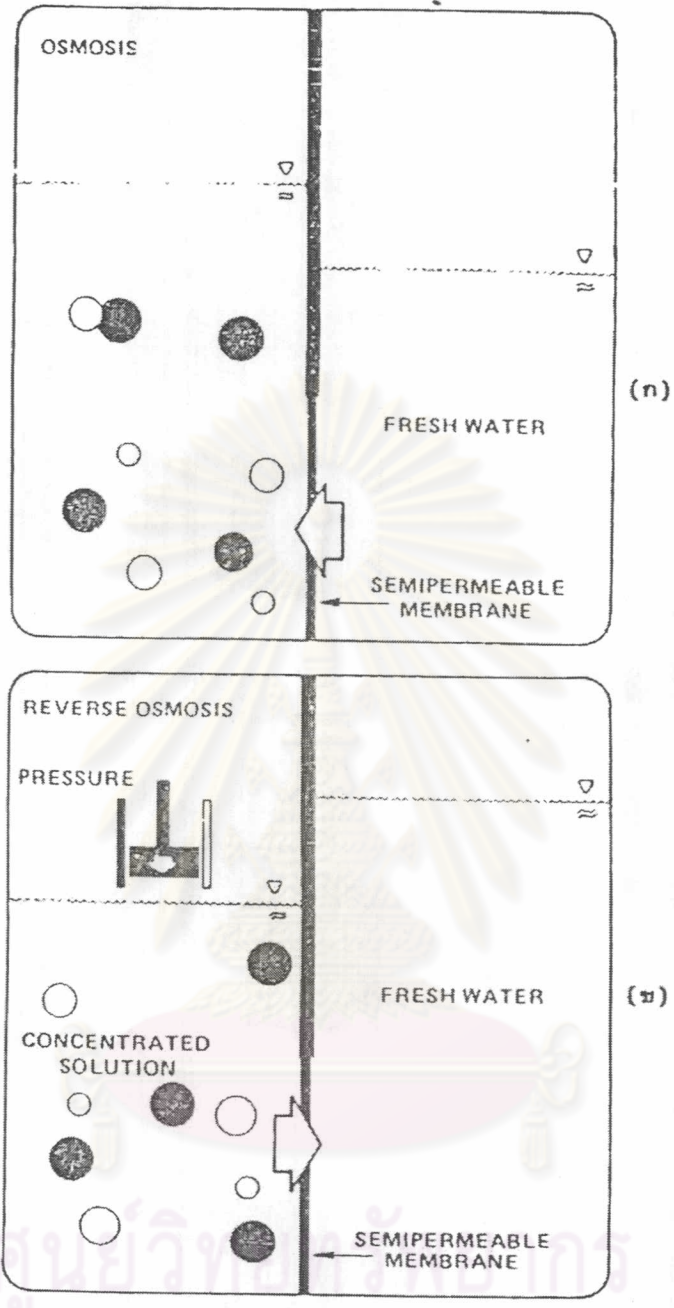
- เป็นการกรองที่แยกออกอย่างสมบูรณ์ ตรงกันข้ามกับการกรองแบบติดค้างที่ชั้นกรอง
- การแยกของแข็งออกจากของเหลวและการฆ่าเชื้อโรคโดยไม่มีการเติมสารเคมีเพิ่ม
- ไม่พบสารโคแอกกูเลชัน และ สารฆ่าเชื้อโรค เหลือตกค้างในน้ำออก
- ขนาดกระทัดรัด และ ช่วยลดต้นทุนในการเดินระบบและบำรุงรักษา
- การใช้เครื่องจักรทำงานแทนมนุษย์
- คุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองคงที่และมีคุณภาพสูงแม้ว่าคุณภาพแหล่งน้ำเปลี่ยน

ในปัจจุบันความจำเป็นที่ต้องใช้น้ำสะอาดที่มีปริมาณสารละลายต่ำ ทำให้กระบวนการเมมเบรนต่างๆมีความสำคัญเพิ่มขึ้นและกลายเป็นระบบที่จำเป็นในหลายกรณี เนื่องจากระบบรีเวอร์สออสโมซิสมีขีดความสามารถกว้างขวางกว่ากระบวนการเมมเบรนแบบอื่นๆ ดังนั้นจึงมีการนำรีเวอร์สออสโมซิสไปใช้ในการทำความสะอาดน้ำดื่มมากกว่ากระบวนการเมมเบรนแบบอื่นๆ

2.5 กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

ออสโมซิส (Osmosis) หมายถึง การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติของน้ำผ่านเมมเบรนบางๆ (Semi Permeable Membrane) จากสารละลายเจือจางไปยังสารละลายเข้มข้น (ดูรูปที่ 2.1) เมมเบรนในอุดมคติยอมให้น้ำไหลผ่านได้เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติ โมเลกุลหรือไอออนบางชนิดอาจไหลผ่านได้เช่นกัน ถ้าจัดให้ระบบออสโมซิสมีการไหลเป็นแบบในรูปที่ 2.1 (ก) เมื่อปล่อยให้การไหลของน้ำผ่านเมมเบรนจนถึงจุดสมดุล (ไม่มีการไหลอีก) ระดับน้ำด้านที่มีความเข้มข้นสูงกว่าจะสูงกว่าระดับน้ำด้านที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า ผลต่างของระดับนี้เรียกว่า แรงดันออสโมติก (Osmotic Pressure) นักวิทยาศาสตร์ได้อธิบายปรากฏการณ์ออสโมซิสไว้ว่า อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสารละลายเข้มข้นมีความดันไอ (Vapor pressure) ต่ำกว่าสารละลายเจือจาง ระดับน้ำในทั้งสองด้านของเมมเบรนจึงมีการปรับตัวจนกระทั่งแรงดันบนผิวน้ำทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน ถ้ามีแรงดันที่มีค่าสูงกว่าแรงดันออสโมซิสมากจะทำต่อด้านที่มีสารละลายเข้มข้น น้ำจะไหลย้อนกลับ (ดูรูปที่ 2.1(ข)) ซึ่งเป็นการต้านการไหลตามธรรมชาติ วิธีการดังกล่าวนี้ วิศวกรนำมาใช้เพื่อแยกน้ำออกจากสารละลายเข้มข้นต่างๆ และเรียกว่า รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) ดังนั้นกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสจึงอาศัยปัจจัยสำคัญ 2 อย่างคือ แรงดัน และ เมมเบรน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ออสโมซิส (ก) และรีเวอร์สออสโมซิส (ข) (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542)

2.5.1 ความสามารถของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

เหตุผลที่ทำให้ รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) ได้รับความสนใจและเป็นที่ยอมรับ เนื่องจากความสามารถในการกำจัดสารละลายและคอลลอยด์ ดังต่อไปนี้

- ลดปริมาณสารละลายน้ำ
- ลดปริมาณความกระด้าง
- ลดปริมาณฟลูออไรด์
- ลดหรือกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ
- ลดหรือกำจัดโลหะหนักที่เป็นพิษและสร้างความรำคาญ
- ลดหรือกำจัดจุลินทรีย์ต่างๆรวมทั้งไวรัส

น้ำที่ผ่านรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) จะมีความใสมาก ทำให้สะดวกต่อการฆ่าเชื้อโรค สารอินทรีย์ที่สามารถผ่านเมมเบรนได้โดยไม่ถูกกำจัดมักเป็นประเภทที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 200 ละลายน้ำได้ และเป็นแบบไม่มีขั้ว (Nonpolar) แต่รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำบางประเภท เช่น กรดอ่อน และ เอมีน (Amine) ได้

รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) มักไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก และเป็นพิษที่อยู่ในน้ำประปา เช่น ฟีนอล (Phenol), (Chlorinated Hydrocarbon), ยาฆ่าแมลง และแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นต้นเหตุของสีในน้ำ เช่น กรดฮิวมิก (Humic Acid), กรดฟัลวิก (Fulvic Acid) เป็นต้น

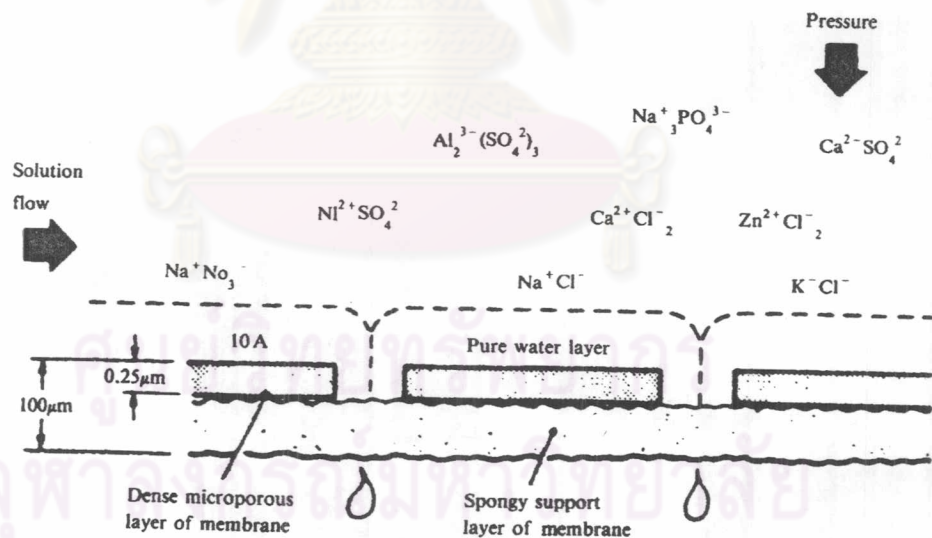
แม้ว่ารีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) จะมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดจุลินทรีย์ต่างๆ แต่ไม่มีรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เครื่องใดสามารถรับประกันได้ 100% ว่าสามารถผลิตน้ำที่ปราศจากจุลินทรีย์ได้ตลอดเวลา เพราะเมมเบรนไม่สามารถกำจัดจุลินทรีย์ได้ทั้งหมด และการรั่วของน้ำดิบผ่านทางรอยต่อเล็กๆอาจเกิดขึ้นได้เสมอ นอกจากนี้ถ้าเมมเบรนเกิดชำรุดฉีกขาดหรือรั่ว น้ำดิบจะไหลผ่านออกไปได้พร้อมกับน้ำสะอาดที่ผลิตได้ ดังนั้นการใช้ระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) ในการผลิตน้ำบริสุทธิ์ต้องมีกระบวนการฆ่าเชื้อโรคต่อท้าย

2.5.2 กลไกการทำงานของรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) กำจัดเกลือและสารต่างๆโดยใช้กลไกที่แตกต่างจากกลไกของการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) หรือการดูดติดผิว (Adsorption) นักวิจัยเชื่อว่ามีกลไก 2 กลไกที่ใช้ในการกำจัดเกลือต่างๆและสารอินทรีย์

2.5.2.1 กลไกในการกำจัดเกลือต่างๆ

รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) กำจัดเกลือ ด้วยกลไกอธิบายดังรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นรูปตัดขวางของเมมเบรนซึ่งมี 2 ชั้น และหนาประมาณ 100 ไมครอน ชั้นบนที่ติดอยู่กับน้ำดิบเป็นส่วนที่มีเนื้อแน่น แต่บางมาก ชั้นนี้หนาเพียง 0.25 ไมครอน และมีรูขนาดประมาณ 0.2 ไมครอน กระจายอยู่ทั่วไป เมมเบรนชั้นบนทำหน้าที่กำจัดแร่ธาตุและสารอินทรีย์ ชั้นล่างมีเนื้อพรุนและหนามาก ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับ และขนส่งน้ำบริสุทธิ์จากชั้นบนไปภายนอก การไหลของน้ำเป็นแบบปั่นป่วนเพื่อรักษาความสะอาดของเมมเบรน น้ำบริสุทธิ์ถูกบีบให้ซึมผ่านเมมเบรนและไหลออกไปข้างนอก สารละลายต่างๆที่ไหลผ่านเมมเบรนไม่ได้จะสะสมกันจนมีความเข้มข้นสูงและถูกระบายออกจากระบบ



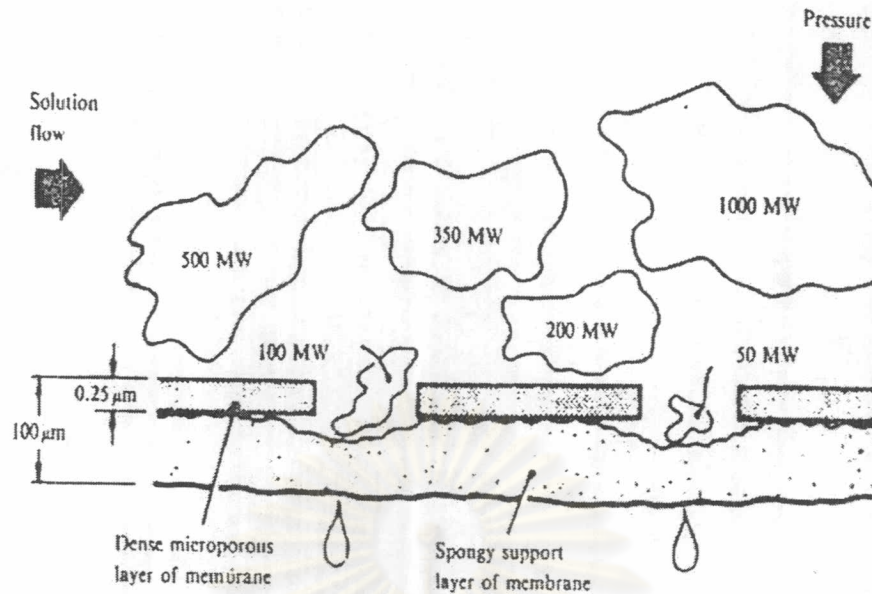
รูปที่ 2.2 กลไกการกำจัดเกลือต่างๆของระบบรีเวอร์สออสโมซิส (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

กลไกในการกำจัดเกลือแร่เรียกว่า Salt Rejection มีความสามารถกำจัดได้ขึ้นอยู่กับจำนวนวาเลนซ์ (Valance) ของไอออนต่างๆ ไอออนที่มีวาเลนซ์สูงจะถูกเมมเบรนผลักได้ไกลกว่า ไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ แรงผลักนี้เชื่อว่าเกิดขึ้นเนื่องจากมี Dielectric Interaction ไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 1 จะถูกผลักให้ห่างจากเมมเบรนประมาณ 1 ไมครอน ซึ่งห่างเท่ากับน้ำ 2 โมเลกุลต่อกัน แรงผลักกันระหว่างเกลือกับเมมเบรนทำให้เกิดชั้นน้ำบริสุทธิ์ปกคลุมผิวหน้าเมมเบรนและเข้าไปถึงช่องว่างของเมมเบรนด้วย นักวิจัยเชื่อว่า น้ำไหลผ่านเมมเบรนที่ละโมเลกุล โดยซึมเข้าไปในช่องว่างของโครงสร้างสามมิติของสารอินทรีย์ที่ใช้ทำเมมเบรน เมมเบรนที่ผลิตได้ในปัจจุบันยังไม่สมบูรณ์ถึงขั้นอุดมคติ จึงมีการรั่วของไอออนต่างๆ เช่น Na^+ , Cl^- , K^+ , NO_3^- เป็นต้น เพราะว่าการผลักเป็นระยะทางน้อยที่สุด ไอออนเหล่านี้จึงรั่วผ่านเมมเบรนได้ดีกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์สูง

ด้วยเหตุนี้ สารประกอบที่มี Na^+ จะรั่วจากระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) ได้ง่ายกว่าสารประกอบที่มี Ca^{2+} PO_4^{2-} จึงถูกกำจัดได้ดีกว่า SO_4^{2-} หรือ Cl^- สารอินทรีย์ที่ไม่มีประจุไฟฟ้าเช่นก๊าซต่างๆจะไม่ถูกผลักจากเมมเบรน ดังนั้นระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) จึงไม่สามารถกำจัดก๊าซดังต่อไปนี้เช่น CO_2 , O_2 , Cl_2 , H_2S และ SO_2

2.5.2.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์

ระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) กำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำโดยวิธีการกรองติดค้าง (Sieve) โมเลกุลขนาดใหญ่ถูกกำจัดออกจากน้ำเพราะไม่สามารถลอดผ่านรูเมมเบรน (ดูรูปที่ 2.3) แต่โมเลกุลขนาดเล็กสามารถลอดรูและทะลุออกจากเมมเบรนได้ ระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) มีเมมเบรนที่สามารถกำจัดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 200 ได้เกือบทั้งหมด ส่วนสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 200 จะทะลุผ่านเมมเบรนไปได้มากน้อยขึ้นอยู่กับรูปร่าง และขนาดของโมเลกุล ยกตัวอย่างเช่น ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 30 สามารถทะลุผ่านเมมเบรนได้โดยตลอด ส่วนน้ำตาลไม่สามารถผ่านได้เลยเพราะมีน้ำหนักโมเลกุล 342 แบคทีเรีย, ไวรัส และสารที่ผลิตโดยจุลินทรีย์หรือไพโรเจน (Pyrogen) ล้วนมีขนาดใหญ่เกินไปจนไม่สามารถทะลุผ่านเมมเบรนของระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) ได้



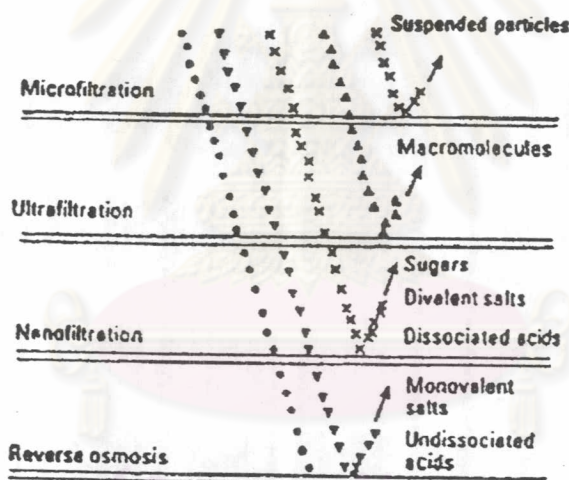
รูปที่ 2.3 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบรีเวอร์สออสโมซิส (มันลิน ตันทูลเวศม์, 2542)

2.6 กระบวนการกรองแบบนาโน (Nanofiltration)

เป็นกระบวนการที่มีหลักการเหมือนรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) ใช้สำหรับแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น เกลืออนินทรีย์ สารอินทรีย์ กรดอินทรีย์ เป็นต้น การพัฒนาเยื่อแผ่นการกรองนาโนเกิดขึ้นหลังเยื่อแผ่นรีเวอร์สออสโมซิสประมาณ 25 ปี คือประมาณ ค.ศ. 1988 เนื่องจากเยื่อแผ่นรีเวอร์สออสโมซิสใช้สำหรับแยกเกลือต่างๆออกจากน้ำกร่อยและน้ำทะเลเป็นหลัก และมีความสามารถในการกำจัดเกลือในรูปของ NaCl ได้สูงเกิน 98% ดังนั้นถ้าต้องการใช้แยกตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่กว่า NaCl แต่น้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 500 เมมเบรนแบบรีเวอร์สออสโมซิสจึงไม่เหมาะสม เพราะมีโครงสร้างแน่นเกินไปทำให้ฟลักซ์ต่ำ จึงมีการพัฒนาเยื่อแผ่นการกรองนาโนขึ้นสำหรับการใช้งานที่ไม่ได้เน้นการแยกเกลือออกจากน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล เมมเบรนแบบนาโนส่วนใหญ่เป็นเยื่อแผ่นเชิงประกอบที่มีขนาดรูพรุนของชั้นผิวประมาณ 2 นาโนเมตร และมีโครงสร้างที่เบากว่าเมมเบรนแบบรีเวอร์สออสโมซิส อาจกล่าวได้ว่าการกรองนาโน คือ รีเวอร์สออสโมซิสแบบความดันต่ำ (Low Pressure Reverse Osmosis) เพราะช่วงความดันในการดำเนินการประมาณ 10 - 20 bar ซึ่งต่ำกว่าของรีเวอร์สออสโมซิสมาก

2.6.1 ความสามารถของกระบวนการการกรองนาโน

กระบวนการการกรองนาโน เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นโดยให้มีช่วงความดันในการดำเนินการอยู่ระหว่างรีเวอร์สออสโมซิส และ อัลตราฟิลเตรชัน โดยกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส จะให้ค่าฟลักซ์ที่ต่ำกว่า ในขณะที่ใช้แรงดันสูงกว่า และจะใช้ในกระบวนการทำให้ปราศจากแร่ธาตุ (Demineralization) หรือการกำจัดของแข็งละลายทั้งหมดออกจากน้ำ ในขณะที่กระบวนการ อัลตราฟิลเตรชัน จะให้ค่าฟลักซ์ที่สูงกว่า โดยใช้แรงดันที่ต่ำกว่า และสามารถกำจัดสารอินทรีย์ โมเลกุลใหญ่ เช่น กรดฮิวมิก กรดฟัลวิก เป็นต้น แต่ไม่สามารถกำจัดเกลือ กรด น้ำตาล ในขณะที่กระบวนการการกรองนาโนรวมความสามารถของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส และกระบวนการ อัลตราฟิลเตรชัน โดยสามารถกำจัดสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ และไอออนที่มีหลายวาเลนซ์ (ดูรูปที่ 2.4) ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ความดันขนาดปานกลาง (10 - 20 bar) และสามารถกำจัดเกลือ Trihalomethane Formation Potential (THMFP) โลหะหนัก สี ไวรัสทุกชนิด แบคทีเรีย และ พาราสิต ออกจากน้ำและน้ำเสียได้ (Cluff, 1992) ดังนั้นกระบวนการการกรองนาโนจึงสามารถใช้ อย่างได้ผลกับระบบบำบัดน้ำและน้ำเสีย



รูปที่ 2.4 ความสามารถในการแยกของเมมเบรน (Raman และคณะ, 1994)

2.6.2 กลไกการทำงานของกระบวนการการกรองนาโน

กลไกการทำงานของกระบวนการการกรองนาโนเหมือนกับกลไกการทำงานของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส แต่ต่างกันที่แรงขับดันที่ใช้ คือ การกรองนาโนใช้ความดันต่ำกว่า

กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายแตกต่างกัน ซึ่งการทำงานของเมมเบรนทั้งสองชนิดนี้เกี่ยวข้องกันโดยตรงกับกระบวนการออสโมซิส (Osmosis)

2.6.2.1 กลไกการกำจัดเกลือต่างๆ

อาศัยกลไกเนื่องจากแรงปฏิกริยาทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Interaction) เนื่องจากโดยทั่วไปเยื่อแผ่นการกรองนาโนจะมีประจุลบ กลไกการกำจัดเกลือจึงเกิดขึ้นโดยแรงผลัทางไฟฟ้าของประจุลบ ไอออนลบยังมีประจุไฟฟ้ามากยิ่งถูกกำจัดได้มาก

2.6.2.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์

เนื่องจากเยื่อแผ่นการกรองนาโนมีขนาดรูพรุนที่เล็กมาก (ประมาณ 2 นาโนเมตร) สารอินทรีย์ต่างๆที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 จะถูกกำจัดโดยวิธีการกรองติดค้ำ (Sieve)

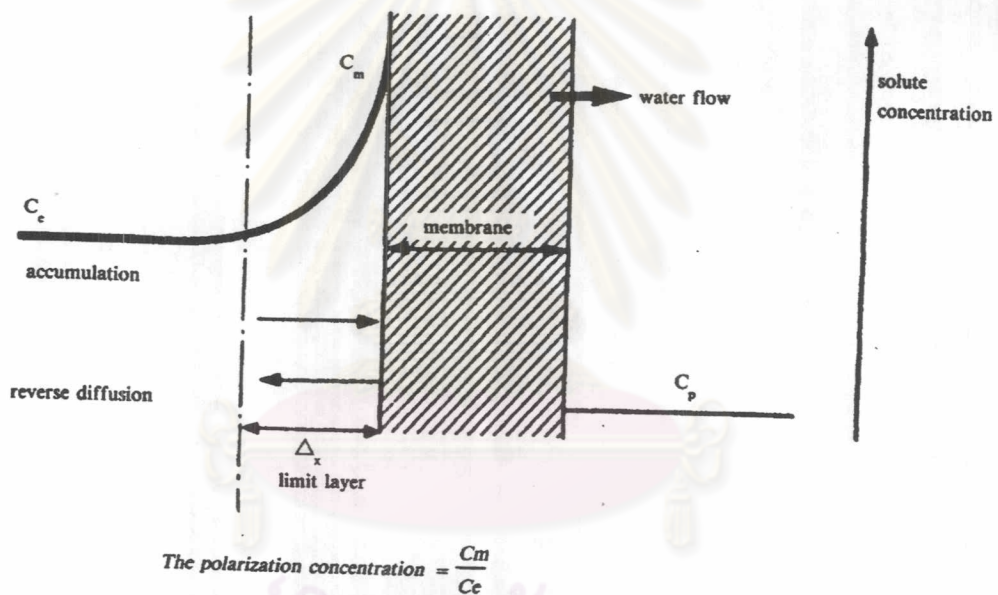
2.7 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน

2.7.1 Concentration Polarization

ในระบบไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic) ไต รวมทั้งระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน จะมีชั้นน้ำที่เรียกว่า Boundary Layer อยู่ติดกับผิวหน้าของเมมเบรน ชั้นน้ำดังกล่าวนี้จะอยู่เป็นอิสระโดยไม่ผสมกับน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ภายนอก ความหนาของ Boundary Layer แปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำและความปั่นป่วน น้ำสะอาดถูกบังคับให้ออกจากชั้นนี้และกระจายซึมผ่านเมมเบรนออกไปภายนอก ทำให้มีการสะสมตัวของสารละลายต่างๆเกิดขึ้นภายใน Boundary Layer (ดูรูปที่ 3.5) จนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำดิบหลายเท่า ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิด Concentration Polarization ระดับการเกิดอาจแสดงได้ด้วยอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นสูงสุด (ที่ผิวเมมเบรน) ของสารละลายใน Boundary Layer และความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำดิบ หรือ C_m/C_e ในรูปที่ 2.5

สมรรถนะในการกำจัดสารละลายของเมมเบรนขึ้นอยู่กับ Concentration Polarization เป็นอย่างมาก เนื่องจากการสะสมเกลือแร่ใน Boundary Layer ก่อให้เกิดผลเสียต่างๆต่อระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการร่อนนาโนที่กำลังทำงานอยู่ ดังต่อไปนี้

- ทำให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้น เป็นผลให้อัตราการผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) ลดลง
- ทำให้มีการรั่วไหลของสารละลายผ่านเมมเบรน (Salt Flux) เพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้น้ำที่ผลิตได้มีมลทินเพิ่มขึ้น
- เร่งเมมเบรนให้เสื่อมสภาพเร็วขึ้น
- ทำให้มีการตกผลึกของ CaCO_3 และ/หรือ CaSO_4 หรือสารประกอบอื่นๆ

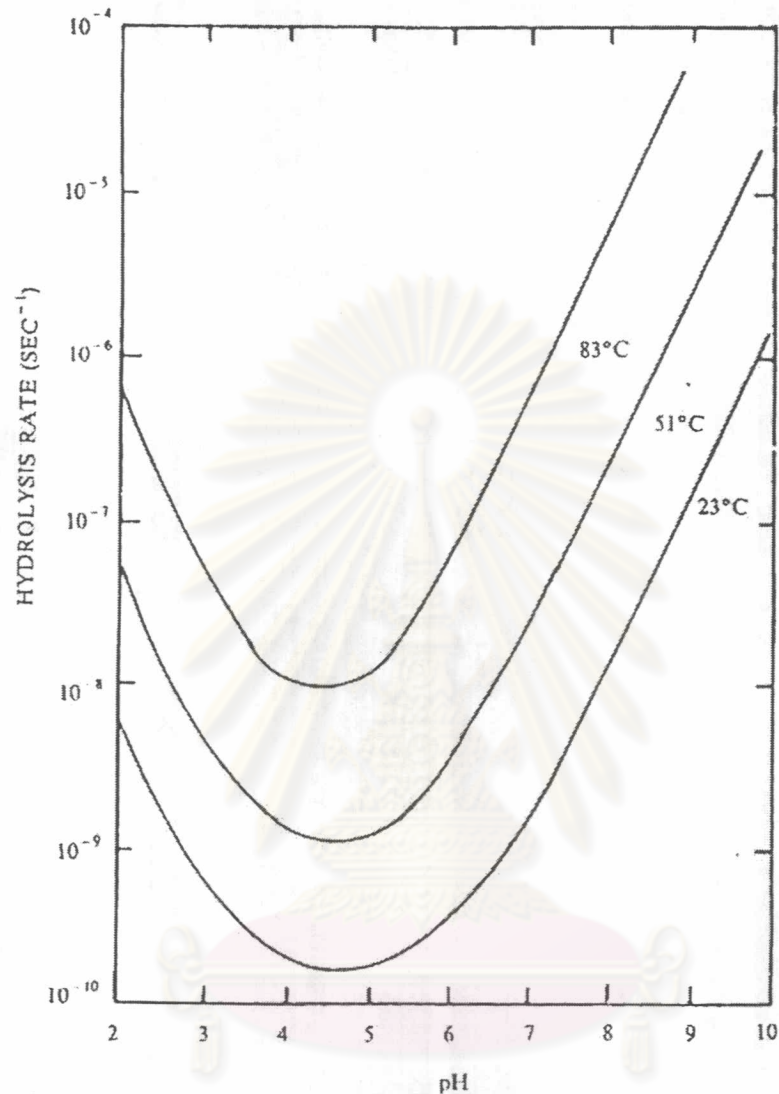


รูปที่ 2.5 Concentration Polarization ที่เกิดขึ้นในระบบเยื่อกรอง (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542)

2.7.2 อุณหภูมิและพีเอช

การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแต่ละองศาในช่วง 15 - 30 องศาเซลเซียส ช่วยให้อัตราของ Water Flux เพิ่มตามไปด้วยประมาณ 3 - 5% แต่ไม่เพิ่ม Salt Flux การที่เมมเบรนเป็นสารอินทรีย์เอสเตอ์ (Organic Ester) ซึ่งสามารถสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) อุณหภูมิและพีเอชจึงมีบทบาทสำคัญดังแสดงในรูปที่ 2.6 จะเป็นได้ว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาแปรตามอุณหภูมิ

ของน้ำ และช้าที่สุดเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 4 - 5 ด้วยเหตุนี้ ถ้าต้องการให้เมมเบรนมีอายุยืนนาน ควรรักษาระดับพีเอชให้อยู่ในช่วง 3 - 7 และอย่าใช้กับน้ำที่มีอุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.6 อิทธิพลของพีเอช และอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเมมเบรน (มันสัน ตันทูลเวศม์, 2542)

2.7.3 แรงดัน

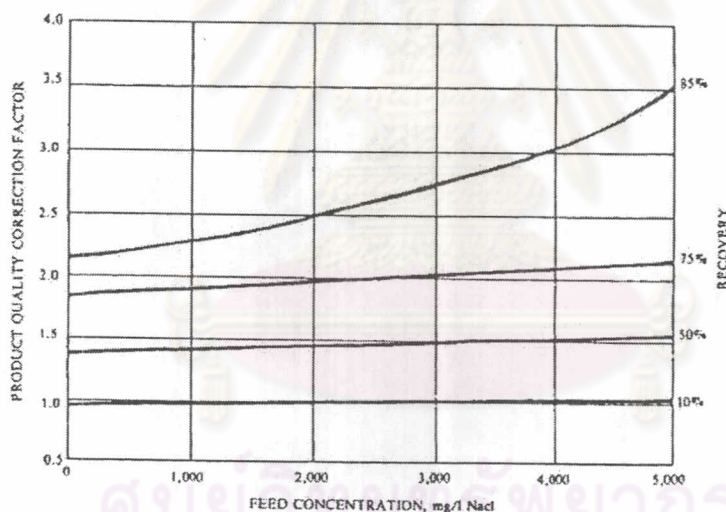
แรงดันมีผลโดยตรงต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) ของระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโนเป็นอย่างมาก แต่แทบไม่มีผลกระทบต่ออัตราการรั่วของสารละลาย (Salt Flux) ด้วยเหตุนี้การเพิ่มแรงดันจึงมีผลทำให้ระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโนสามารถผลิตน้ำสะอาดได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามแรงดันสูงสามารถทำความเสียหายได้เช่นกัน เพราะแรงดันส่งผลให้โครงสร้างของเมมเบรนเกิดการอัดตัวแน่น (Compaction) จนกระทั่งน้ำไหลผ่านไม่สะดวก

ผลเสียอันนี้ถือว่าเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราการผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) มีค่าลดลงเรื่อยๆ ในระหว่างการใช้งาน

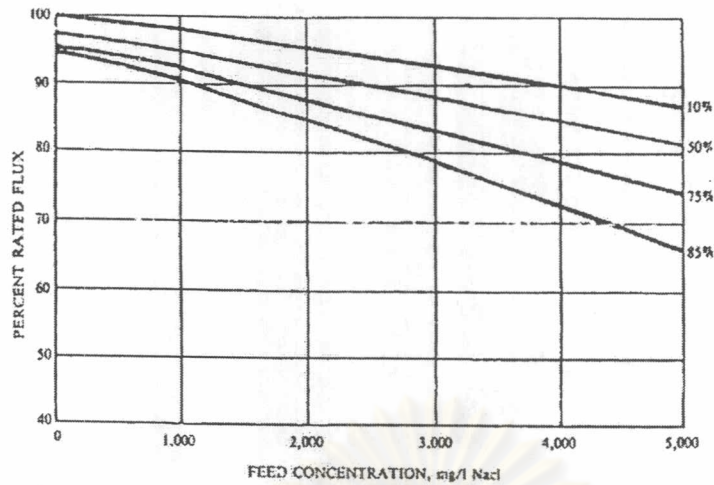
2.7.4 ความเข้มข้นของน้ำดิบ

รูปที่ 2.7 และ 2.8 แสดงให้เห็นอิทธิพลของสารละลายในน้ำดิบที่มีต่อสมรรถนะของระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโนที่มี %Recovery 4 ระดับ อัตราการผลิตน้ำ (Water Flux) มีค่าลดลงตามการเพิ่มของความเข้มข้นของสารละลาย และของ %Recovery

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย และของ %Recovery ทำให้สมรรถนะของระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโนลดลง เนื่องจาก Salt Flux มีอัตราเพิ่มขึ้น และแรงดันออสโมติกมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.7 อิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำดิบ และ Recovery ที่มีต่อคุณภาพของน้ำที่ผลิต (มันลิน ตันจุลเวศม์, 2542)



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำดิบ และ Recovery ที่มีต่ออัตราผลิตน้ำ (มันลิน ดัณฑุลเวศม์, 2542)

2.7.5 ระบบควบคุมอัตราไหลของน้ำเข้มข้นที่ต้องระบายทิ้ง

การควบคุมอัตราการผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) ทำได้โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้มข้น (Concentration) หรือ Reject water ด้วยวาล์วธรรมดา น้ำสะอาดที่ถูกบีบออกจากโมดูลจะมีการไหลเป็นแบบอิสระเสมอ ทั้งนี้เพื่อให้ น้ำมีแรงดัน 1 บรรยากาศตลอดเวลา ถ้ามีการตีวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำสะอาด อัตราผลิตน้ำสะอาดจะลดลง (Water Flux) จะลดลง เนื่องจากมีแรงดันสะสมในท่อน้ำสะอาด โดยปกติ น้ำเข้มข้นจะมีแรงดันต่ำกว่าของน้ำดิบประมาณ 0.3 - 1.3 บาร์

2.8 เมมเบรนสำหรับใช้กับระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน

ในปัจจุบัน แผ่นเมมเบรนสำหรับใช้กับระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโนมักทำจากโพลีเมอร์ 2 ประเภท คือ เซลลูโลส (Cellulose) และ โพลีเอไมด์ (Polyamide) เซลลูโลสที่ใช้ผลิตเมมเบรนมี 2 ชนิด คือ เซลลูโลสอะซิเตด (Cellulose Acetate) และ เซลลูโลส ไตรอะซิเตด (Cellulose Triacetate) สารประกอบเหล่านี้ไม่สามารถทนกรด หรือด่าง หรืออุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส เพราะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เมมเบรนเสื่อมสภาพ เมมเบรนที่ทำจากโพลีเอไมด์มีความทนทานต่อพีเอชและอุณหภูมิได้ดีกว่าชนิดแรก แต่อย่างไรก็ตาม เมมเบรนเซลลูโลสสามารถทนคลอรีนเข้มข้นไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้เป็นเวลานานๆ และ

สามารถทนคลอรีนเข้มข้น 10 - 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้เป็นระยะเวลาสั้นๆและเป็นครั้งคราว แต่เมมเบรนโพลีเอไมด์ทนคลอรีนได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมมเบรนที่นิยมใช้กันมากทำมาจากเซลลูโลสอะซิเตด ซึ่งปกติจะหนาประมาณ 100 ไมครอน และมี 2 ชั้น ชั้นที่ใช้งานจริงมีความหนาประมาณ 0.2 ไมครอน และทำหน้าที่ขัดขวางหรือกักสารละลายต่างๆไม่ให้ซึมผ่านเมมเบรนออกไปพร้อมกับน้ำ ชั้นที่หนากว่าทำหน้าที่เป็นพื้นรองรับและมีรูพรุนเต็มไปหมดสำหรับให้น้ำไหลผ่านได้ ชั้นบางไม่ได้มีรูพรุนเหมือนชั้นหนา รูที่ยอมให้โมเลกุลของน้ำไหลผ่านไปได้เป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลของโพลีเมอร์ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเมมเบรนเป็นการแพร่กระจายของน้ำผ่านช่องว่างดังกล่าวที่ละโมเลกุล

2.9 โมดูลชนิดต่างๆของระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน

ปัญหาอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการใช้เมมเบรนสำหรับแยกสารจากน้ำคือ จะสามารถนำเมมเบรนมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไร ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงปัจจัยดังต่อไปนี้

- เนื่องจากเมมเบรนมีความหนาน้อยมาก เปราะ แต่ต้องรับแรงดันสูง จึงต้องหาอุปกรณ์รองรับที่สามารถป้องกันไม่ให้เมมเบรนแตกหักได้ง่าย แต่ในขณะเดียวกันต้องมีทางให้น้ำไหลทะลุผ่านเมมเบรนได้ด้วย
- ภาชนะบรรจุเมมเบรนหรือโมดูล (Module) ต้องออกแบบให้กระชับรัดและสามารถผลิตน้ำสะอาดได้มาก (คิดต่อหน่วยปริมาตรของถัง) หรืออาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าต้องออกแบบโมดูลให้สามารถบรรจุเมมเบรนได้มากที่สุด
- Concentration Polarization ต้องเกิดขึ้นน้อย
- การอุดตันเนื่องจากสาเหตุต่างๆต้องเกิดขึ้นน้อยที่สุด และทำความสะอาดง่าย
- ต้องไม่มีรอยรั่วเกิดขึ้นตามรอยต่อต่างๆของระบบ

ปัจจุบันมีการสร้างโมดูลแบบต่างๆ 4 แบบ คือ แบบแผ่น (Plate and Frame) แบบท่อ (Tubular) แบบม้วน (Spiral) และแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber) ข้อแตกต่างกันของทั้ง 4 แบบ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติต่างๆของโมดูลทั้ง 4 แบบ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

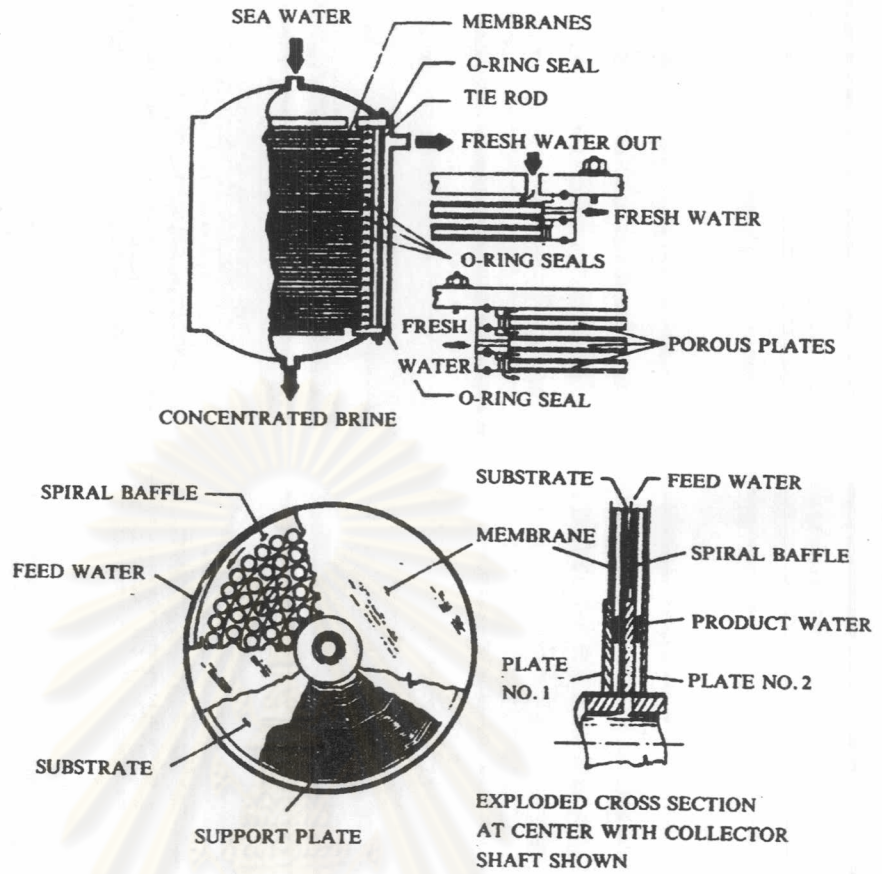
ชนิดของโมดูล	ชนิดของเมมเบรน	Packing Density* (m ² /m ³)	pH	ความสะอาดในการล้าง	Salt Rejection
แบบแผ่น	เซลลูโลสอะซเตด	150	2-8	ดีมาก	ดีมาก
แบบท่อ	เซลลูโลสอะซเตด	450	2-8	ดีมาก	ดีมาก
แบบม้วน	เซลลูโลสอะซเตด	750	2-8	ดี	ดีมาก
แบบเส้นใยกลวง	โพลีเอไมด์	7,500-15,000	4-11	พอใช้	ดี

* พื้นที่เมมเบรนต่อปริมาตรของโมดูล

2.9.1 โมดูลแบบแผ่น (Plate and Frame Module)

เทคนิคนี้เป็นการจัดเมมเบรนที่ง่ายที่สุด (ดูรูปที่ 2.9) โมดูลที่ใช้เทคนิคนี้มีลักษณะการทำงานคล้าย Filter Press เมมเบรนวางอยู่บนแผ่นรองรับที่มีรูพรุน (Porous Plate) หรือแผ่นรองรับที่มีร่องให้น้ำไหลออกมาได้ เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางซ้อนและสลับกัน น้ำถูกบังคับให้ไหลซึมผ่านเมมเบรนและแผ่นรองรับและไหลออกจากโมดูล โมดูลแบบนี้ต้องเสียเงินค่าติดตั้ง และดูแลรักษาแพงมาก

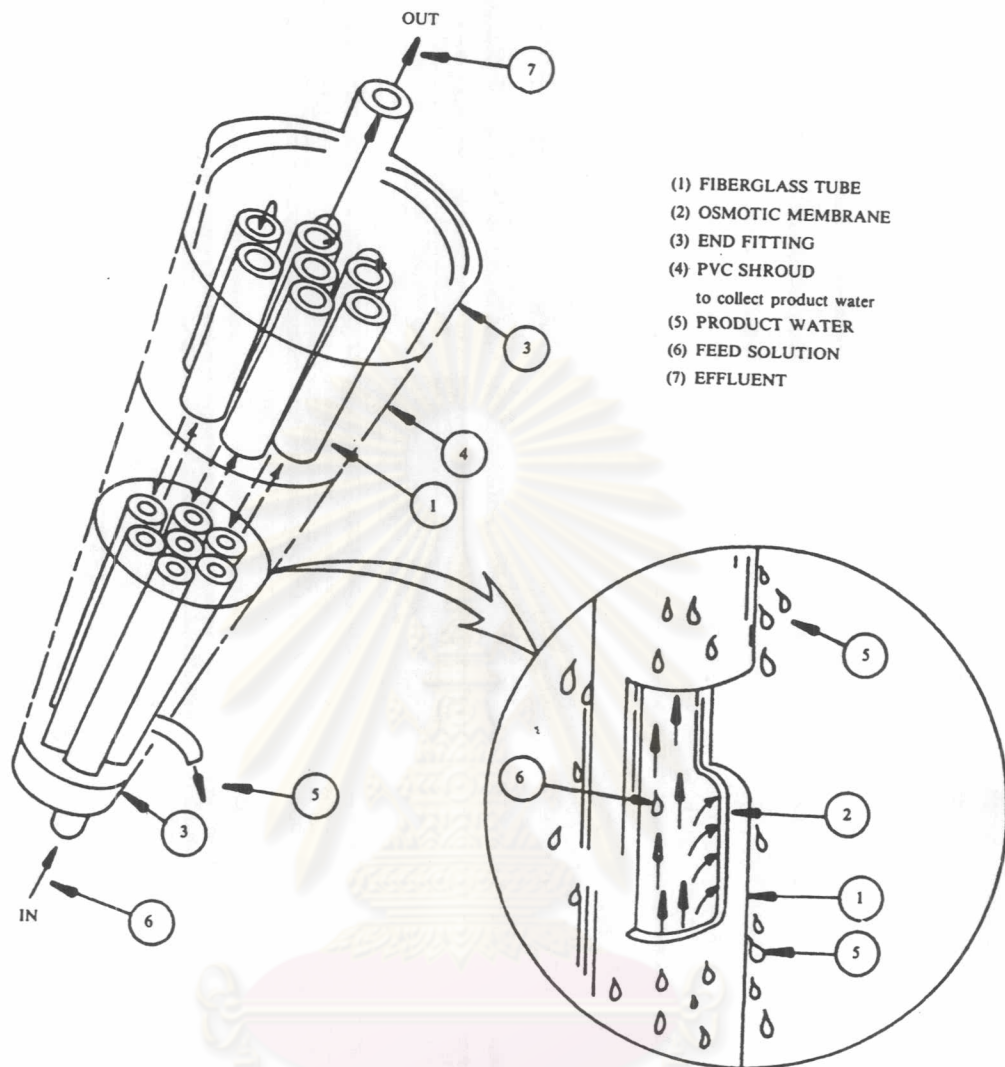
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 โมดูลแบบแผ่น (มันสิน ดัณฑุลเวศม์, 2542)

2.9.2 โมดูลแบบท่อ (Tubular Module)

วิธีนี้เป็นการม้วนเมมเบรนให้เป็นหลอด หรือท่อขนาดเล็ก มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 มิลลิเมตร และยึดติดไว้ในท่ออีกอันหนึ่งที่ทำด้วยกระดาษ หรือทำด้วยใยสังเคราะห์ (ดูรูปที่ 2.10) และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับเมมเบรนไม่ให้ฉีกขาดระหว่างการใช้งาน และใช้เป็นทางออกของน้ำสะอาดอีกด้วย น้ำดิบที่มีความดันสูงจะถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อที่มีเมมเบรนอยู่ภายใน แรงดันของน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำซึมผ่านเมมเบรนและท่อรองรับออกสู่ภายนอก เทคนิคนี้ผลิตน้ำได้น้อยแต่ทำความสะอาดได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้กับกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ต้องการแยกน้ำออกจากสารละลายต่างๆ

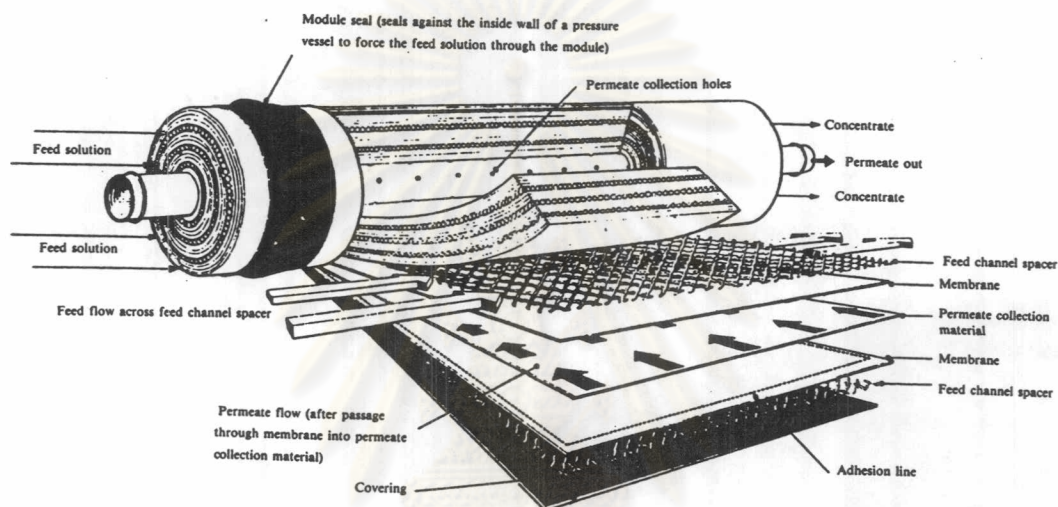


รูปที่ 2.10 โมดูลแบบท่อ (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542)

2.9.3 โมดูลแบบม้วน (Spiral Wound Module)

โมดูลแบบนี้ประกอบด้วยเมมเบรน 2 แผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่ตรงกลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นแบนทั้งสามรอบท่อเจาะรู โดยมีแผ่นตะแกรงทำด้วยโพลีพรอบพีรินคลุมปิดอยู่ด้านนอก (ดูรูปที่ 2.11) ขอบของเมมเบรนทั้งสามด้านถูกอุดไว้ด้วยกาวพิเศษ ขอบที่เหลือถูกปล่อยให้เปิดตามปกติและยึดติดกับท่อเจาะรู ลักษณะนี้ทำให้น้ำถูกบังคับให้

ไหลไปยังท่อเจาะรูเสมอ การม้วนเมมเบรน แผ่นรองรับ และตะแกรงพลาสติก ทำให้โมดูลรูปทรงกระบอกสามารถบรรจุไว้ในท่อโลหะธรรมดาได้ โมดูลแบบนี้อาจมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 10 20 หรือ 30 เซนติเมตร และมีความยาวต่างกัน แต่มักไม่เกิน 1 เมตร น้ำดิบถูกบังคับให้ไหลในแนวแกนของโมดูลเข้าไปตามแผ่นตะแกรง จากนั้นถูกอัดให้น้ำซึมทะลุผ่านเมมเบรนตามแนวรัศมีของโมดูลลงไปถึงแผ่นรองรับซึ่งทำหน้าที่ส่งน้ำบริสุทธิ์ไปยังท่อเจาะรูเพื่อนำออกจากโมดูล

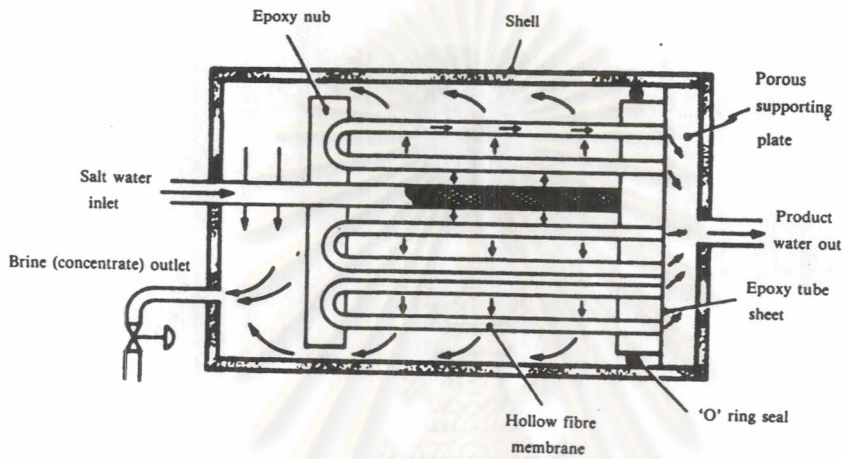


รูปที่ 2.11 โมดูลแบบม้วน (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

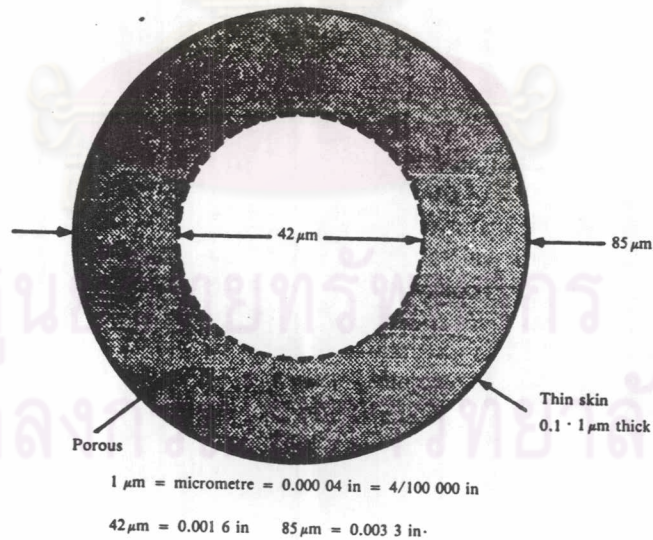
2.9.4 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module)

เมมเบรนที่ใช้ในโมดูลทั้งสามชนิดที่กล่าวมาแล้วล้วนทำจากเซลลูโลสอะซิเตต แต่โมดูลแบบเส้นใยกลวงนี้มักใช้เมมเบรนที่ทำมาจากวัสดุไนลอนจำพวกโพลีเอไมด์ (Polyamide) ซึ่งสร้างโดย บริษัทดูปองต์ (Du Pont Co.) ต่อมาภายหลัง บริษัทดาวเคมีคอล (Dow Chemical Co.) ได้พัฒนาเมมเบรนที่ทำด้วยเซลลูโลสไตรอะซิเตต (Cellulose Triacetate) และสร้างเป็นเส้นใยกลวงได้ เส้นใยกลวงที่ทำจากโพลีเอไมด์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 50 - 85 ไมครอน และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณครึ่งหนึ่งของภายนอก ส่วนเส้นใยที่ทำจากเซลลูโลสไตรอะซิเตต

มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 200 - 300 ไมครอน วิธีนำเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมาใช้ประโยชน์กระทำได้นำนามารวมกันเป็นมัดๆ และขดเป็นรูปเกือกม้าหรือตัว U ปลายทั้งสองข้างของเส้นใยทั้งมัดถูกตรึงติดกับท่อน้ำออก เส้นใยทั้งหมดถูกวางอยู่ในถังรูปทรงกระบอก (ดูรูป 2.12) น้ำดิบเข้ามาทางท่อเจาะรูซึ่งวางอยู่ตรงกลางของถังทรงกระบอก และกระจายน้ำไปยังส่วนต่างๆ แรงดันทำให้น้ำซึมผ่านเข้าเส้นใยเมมเบรนและทะลุถึงภายใน น้ำบริสุทธิ์จะซึมไปตามรูกลวงของเส้นใย (ดูรูป 2.13) และไปรวมกันที่ทางออก



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของโมดูลแบบเส้นใยกลวง (มันสิน ตันฑุลเวศม์,2542)



รูปที่ 2.13 ภาพตัดโมดูลแบบเส้นใยกลวง (มันสิน ตันฑุลเวศม์,2542)

2.10 ความจำเป็นในการเตรียมน้ำก่อนเข้าระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน

การเตรียมน้ำให้มีคุณสมบัติเหมาะสมก่อนเข้าระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน เป็นความจำเป็นไม่ควรหลีกเลี่ยง ทั้งนี้เพราะน้ำดิบอาจสร้างความเสียหายให้กับระบบได้อย่างรวดเร็ว หรืออาจทำให้อายุการใช้งานลดน้อยลง ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอุดตันของระบบอาจจำแนกได้เป็น 5 แบบ คือ

- การเกิดตะกอนบนเมมเบรน
- การตกผลึกของเกลือและแมงกานีส
- การอุดตันของเครื่องเนื่องจากสารแขวนลอย
- การอุดตันของเมมเบรนเนื่องจากคอลลอยด์
- การอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์

2.10.1 การเกิดตะกอนบนเมมเบรน

ลักษณะการทำงานของระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน ซึ่งยอมให้เฉพาะโมเลกุลของน้ำซึมผ่านเมมเบรนและกักโมเลกุลชนิดต่างๆไว้ ทำให้มีการสะสมตัวของโมเลกุลและไอออนต่างๆที่อยู่ในด้านน้ำดิบของเมมเบรน โดยปกติระดับสารละลายในน้ำดิบจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นประมาณ 2 - 4 เท่า เมื่ออยู่ในระบบ สภาพเช่นนี้เอื้ออำนวยให้เกิดการตกผลึก CaCO_3 และ/หรือ CaSO_4 CaCO_3 มีความสามารถในการละลายต่ำมาก จึงตกผลึกได้ง่ายกว่าสารประกอบอื่นๆ ที่อาจตกผลึกของหินปูนควรรีบล้างด้วยสารละลายกรดเจือจางเพื่อละลายผลึกดังกล่าว แต่ถ้าเป็นผลึกของ CaSO_4 ควรใช้กรดซิตริก (Citric Acid) หรือ EDTA ล้างเพื่อละลายให้หมด

การป้องกันไม่ให้เกิดผลึกขึ้น อาจทำได้โดยการกำจัดต้นเหตุ เช่น Ca^{2+} SO_4^{2-} และ CO_3^{2-} เป็นต้น หรือใช้สารเคมีห้ามผลึกไม่ให้เกิดขึ้น แม้การกำจัดแคลเซียมหรือซัลเฟตจะเป็นไปได้ แต่ไม่นิยมทำกันในทางปฏิบัติ เนื่องจากต้องสิ้นเปลืองมากและสร้างของเสียทำให้เกิดปัญหาขึ้นอีก ในทางปฏิบัติมักกำจัดคาร์บอนเนตโดยการใช้อกรดเกลือเปลี่ยนคาร์บอนเนตให้เป็นไบคาร์บอนเนต และ/หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นการเติมกรดจึงสามารถป้องกันการตกผลึกของ CaCO_3 ถ้าต้องการป้องกันตะกอนของ CaSO_4 ควรใช้สารห้ามตะกอน เช่น Sodium Hexametaphosphate หรือ HMP ในปริมาณประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

นอกจากวิธีการดังกล่าวแล้ว การป้องกันไม่ให้เกิดกลิ่นดังกล่าวเกิดขึ้นอาจทำได้โดยการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายในโมดูลไม่ให้สูงเกินกว่า ความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบต่างๆ วิธีการคือควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้มข้นที่ถูกปล่อยออกจากระบบให้มีปริมาณสูงเพียงพอ เพื่อลดความเข้มข้นของสารละลายที่สะสมตัวอยู่ในโมดูล (วิธีการเช่นนี้เป็นการควบคุม Recovery ไม่ให้สูงเกินไปนั่นเอง)

2.10.2 การตกผลึกของเหล็กและแมงกานีส

ภายใต้สภาวะทั่วไป เหล็กสามารถตกผลึกได้อย่างรวดเร็วและง่ายกว่าแมงกานีสเป็นอย่างมาก ผลึกของเหล็กจึงพบในโมดูลของระบบมากกว่าแมงกานีส ผลึกที่พบส่วนใหญ่มีผลึกออกไซด์ การตกผลึกของเหล็กมักเกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ที่ละลายน้ำได้ ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ กลายเป็นเหล็กเฟอร์ริก ซึ่งตกผลึกได้ง่าย การกำจัดเหล็กและแมงกานีสออกจากน้ำดิบก่อนเข้าระบบเป็นวิธีที่ใช้ในการป้องกันการตกผลึกของสารทั้งสอง

ปัญหาการตกผลึกของเหล็กและแมงกานีส อาจแก้ไขได้โดยการเติมกรดเกลือเพื่อลดพีเอช ซึ่งเป็นการลดอัตราออกซิเดชันของเหล็ก ในกรณีที่มีการตกผลึกของเหล็กเกิดขึ้นอยู่ก่อนแล้ว ควรล้างด้วยสารละลายกรดซิตริก แล้วปรับพีเอชให้เท่ากับ 4 ด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

2.10.3 การอุดตันของเครื่องเนื่องจากสารแขวนลอย

น้ำที่เข้าเครื่องระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโนต้องปราศจากสารแขวนลอยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอุดตันท่อและอุปกรณ์อื่นๆ ปัญหาเรื่องนี้มีความรุนแรงแตกต่างกันออกไปตามแต่นชนิดของโมดูล โมดูลแบบเส้นใยกลวงถูกอุดตันได้ง่ายมาก แต่โมดูลแบบท่อสามารถทนได้ดีกว่า ด้วยเหตุนี้จึงควรกำจัดสารแขวนลอยต่างๆ ออกจากน้ำที่เข้าเครื่องรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน และควรติดตั้ง Cartridge Filter ไว้กรองน้ำก่อนเข้าโมดูลเสมอ

2.10.4 การอุดตันเมมเบรนเนื่องจากคอลลอยด์

ปัญหานี้เกิดขึ้นเมื่อเกิดการสะสมตัวของคอลลอยด์ใกล้เมมเบรน และมีโคแอกกูเลชันเกิดขึ้น การสะสมตัวของสารละลายในโมดูลทำให้ระบบมีเกลือแร่สูงจนกระทั่ง Diffuse Layer ของคอลลอยด์ถูกบีบให้แคบลง และเกิดโคแอกกูเลชันได้ ผลที่เกิดขึ้นคือ มีการรวมตัวกันของคอลลอยด์จนเป็นกลุ่มก้อนและเกาะอยู่บนเมมเบรน ทำให้มีการอุดตันเมมเบรนเกิดขึ้น

การป้องกันไม่ให้คอลลอยด์อุดตันเมมเบรน เป็นเหมือนกับการห้ามโคแอกกูเลชันไม่ให้เกิดนั่นเอง ซึ่งอาจกระทำได้โดยการลดปริมาณคอลลอยด์ และ/หรือ เพิ่มเสถียรภาพของคอลลอยด์ ในทางปฏิบัติการกำจัดคอลลอยด์ออกจากร้าน้ำก่อนด้วยวิธีโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม ตามด้วยการตกตะกอน และ/หรือการกรอง การควบคุมระดับสารละลายในโมดูลเพื่อป้องกันการตกผลึกของสารต่างๆมีส่วนช่วยให้โคแอกกูเลชันของคอลลอยด์ในโมดูลเกิดได้ยาก

2.10.5 การอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์ (Biological Fouling)

ถ้าปล่อยให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้บนเมมเบรน (ด้านน้ำดิบ) อาจก่อให้เกิดปัญหาดังต่อไปนี้

- เมมเบรนถูกทำลาย เพราะจุลินทรีย์ใช้เมมเบรนที่เป็นสารอินทรีย์เป็นอาหาร
- อุดตันเมมเบรน
- จุลินทรีย์อาจรั่วผ่านเมมเบรนและหลุดออกไปพร้อมกับน้ำสะอาดที่ผลิตได้

ในจำนวนโมดูลทั้ง 4 ชนิด มีชนิดเดียวเท่านั้นที่สามารถทนทานต่อการทำลายของจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี คือ โมดูลแบบเส้นใยกลวง ซึ่งใช้โพลีเอไมด์ทำเมมเบรน การใช้คลอรีนฆ่าจุลินทรีย์ต้องกระทำอย่างระมัดระวังเนื่องจากคลอรีนมีปฏิกิริยากับเมมเบรนส่วนใหญ่ ถ้าปล่อยให้สัมผัสกันนานเกินไปหรือคลอรีนเข้มข้นเกินไป เมมเบรนอาจถูกทำลายจนสูญเสียคุณภาพ ในกรณีนี้ต้องปิดเครื่องเป็นเวลานานๆ ควรล้างเมมเบรนด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) เสียก่อนเพื่อป้องกันจุลินทรีย์ไม่ให้เติบโตภายใต้สภาวะน้ำนิ่ง

2.11 กระบวนการบำบัดน้ำดิบก่อนเข้าระบบเมมเบรน

เมมเบรนที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำดื่มนี้ทำหน้าที่กำจัดเกลือต่างๆ และสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นผลผลิตจากการใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรคเป็นหลัก เป็นวัสดุที่มีความบอบบางและมีราคาสูง ดังนั้นต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อนเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายและยืดอายุการใช้งานของเมมเบรน อุปกรณ์ประกอบสำหรับการบำบัดขั้นต้นก่อนน้ำดิบเข้าสู่เมมเบรนทำหน้าที่

- เพื่อป้องกันสารแขวนลอยและคอลลอยด์อุดตันเมมเบรน
- เพื่อกำจัดคลอรีนที่ไปทำลายเมมเบรน
- เพื่อป้องกันการอุดตันของเมมเบรนเนื่องจากจุลินทรีย์

2.11.1 การป้องกันสารแขวนลอยและคอลลอยด์

เพื่อเป็นการลดภาระการทำงานและป้องกันความเสียหายของเมมเบรนที่เป็นวัสดุที่บอบบางและมีราคาสูงจากสารแขวนลอยและคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำดิบ การกำจัดออกก่อนด้วยอุปกรณ์ที่เหมาะสมกว่า เช่น ใต้กรองใยสังเคราะห์ หรือใต้กรองเซรามิกจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพราะใต้กรองเหล่านี้มีราคาถูกกว่าและออกแบบมาเพื่อกำจัดสารแขวนลอยและคอลลอยด์โดยเฉพาะ โดยอาศัยหลักการกรองติดค้างที่ผิว วัสดุที่ใช้ผลิตมีความทนทานต่อมวลสารต่างๆที่อยู่ในน้ำ และสามารถทำความสะอาดได้ง่าย

2.11.2 การป้องกันการทำลายเมมเบรนเนื่องจากคลอรีน

เมมเบรนผลิตมาจากโพลีเมอร์ที่ไม่สามารถทนต่อคลอรีนได้ ดังนั้นการใช้น้ำประปาที่มีการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดคลอรีนในน้ำดิบก่อนเข้าระบบการกรองด้วยแผ่นเยื่อ วิธีการกำจัดคลอรีนในน้ำสามารถทำได้หลายวิธีทั้งวิธีการเติมสารเคมี เช่น โซลเฟอร์ไดออกไซด์ โซเดียมซัลไฟท์ ฯลฯ เพื่อไปทำปฏิกิริยากับคลอรีนในน้ำ หรือใช้กระบวนการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ สำหรับน้ำดิบที่ต้องการนำไปผลิตน้ำดื่มจำเป็นต้องมีความปลอดภัยสูงดังนั้นวิธีที่เหมาะสมที่สุดจึงเป็นการกำจัดด้วยถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น เซลลูโลสที่มาจากพืช ถ่านหิน กระจุกสัตว์ เป็นต้น มาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ (โดยใช้ความร้อน) จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติดูดซับสูง

การนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์ในการกำจัดคลอรีนในน้ำจะอาศัยกระบวนการดูดติดผิว (Carbon Adsorption) สามารถกำจัดด้วยกลไกที่เกิดขึ้นต่อไปนี้



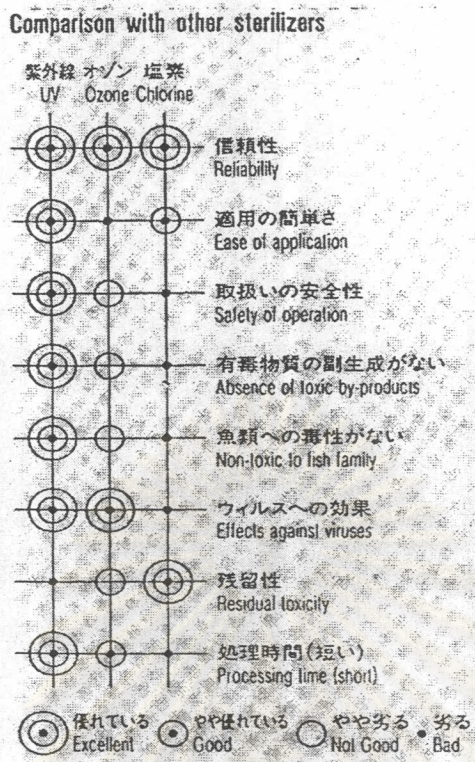
โดยคลอรีนอิสระจะเกิดปฏิกิริยาภายในโพรงของรูพรุนเกิดเป็นผิวหน้าออกไซด์ภายในรูพรุนด้วยกระบวนการดูดติดผิว และปล่อยคลอไรด์ออกมา

2.11.3 การป้องกันการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำดิบสามารถเจริญเติบโตแล้วรวมตัวสะสมได้ในทุกส่วนของระบบที่มีสภาวะเหมาะสม เช่น บริเวณที่น้ำไหลช้า หรือนิ่งเป็นเวลานาน วัสดุที่มีโอกาสได้รับความเสียหายจากการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์มากที่สุดคือเมมเบรน เนื่องจากขณะทำการเดินระบบน้ำจะไหลผ่านเมมเบรนในอัตราการไหลต่อพื้นที่ที่น้อยมาก และเมื่อหยุดการเดินระบบน้ำจะนิ่งอยู่ภายในไม่ดูแลตลอดเวลา ดังนั้นต้องมีการกำจัดหรือลดปริมาณจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำดิบก่อนเข้าระบบการกรองผ่านแผ่นเยื่อ วิธีการกำจัดหรือลดทำได้หลายวิธี เช่น การใช้คลอรีน การใช้โอโซน และ

การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคด้วยวิธีต่าง ๆ นั้นแตกต่างกัน (ดูรูป 2.14) ซึ่งการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบผลิตน้ำดื่มนี้เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำที่มีความใสได้สูง ไม่เปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำ การติดตั้งอุปกรณ์และการใช้งานทำได้ง่าย

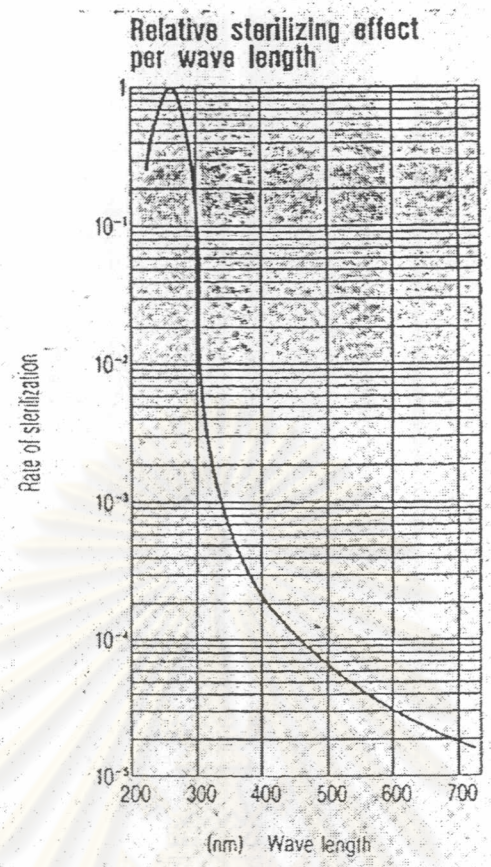
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต กับโอโซนและคลอรีน (Chiyoda, 1996)

การฆ่าเชื้อโรคด้วยอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Disinfection) อาศัยหลักการที่องค์ประกอบต่างๆที่รวมกันเป็นเซลล์ของจุลินทรีย์มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยพลังงานจะกระจายไปยังส่วนต่างๆในลักษณะการกระตุ้นทางไฟฟ้าและเข้าไปทำลายกรยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าของสารต่างๆภายในเซลล์ โดยเฉพาะสารประกอบพวก Purine, Pyridimine Bases Thymine ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ Nucleoproteins, Cytosine และ Uracile

การศึกษาที่ผ่านมาพบว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 250 - 260 นาโนเมตร เป็นช่วงความยาวคลื่นที่มีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคดีที่สุด และความสามารถนี้จะลดลงอย่างมากเมื่อความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 290 - 300 นาโนเมตร และจะลดลงเรื่อยๆจนถึงความยาวคลื่นของแสงขาว (Visible Light) ซึ่งมีความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Chiyoda, 1996)

มนุษย์สามารถสร้างรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้โดยอาศัยหลอดไฟชนิดพิเศษซึ่งภายในบรรจุไอระเหยของสารปรอท (Geo., 1978) ลักษณะของหลอดจะคล้ายหลอดไฟ fluorescent แต่ผนังภายในของหลอดไม่ได้ฉาบสาร phosphorescent ที่ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีอัลตราไวโอเล็ตให้เป็นแสงสีขาวที่สายตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ (Jay H. Lehr และคณะ, 1980) หลอดไฟยูวีที่ทำขึ้นมาขายเพื่อใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำมักให้กำเนิดคลื่นที่มีความยาวคลื่นประมาณ 253.7 นาโนเมตร โดยแก้วที่ใช้ทำหลอดต้องเป็นแก้วชนิดพิเศษที่ยอมให้แสงยูวีส่องผ่านได้ตลอด เช่น Quartz หรือแก้วที่มีเนื้อซิลิกาสูงมาก ๆ เป็นต้น โดยธรรมชาติตาของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้แต่รังสีนี้อาจทำให้วัสดุสีขาวมีความจำจ้ำได้ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2527)

2.12 กระบวนการบำบัดน้ำหลังจากผ่านเมมเบรน

เนื่องจากผลผลิตสุดท้ายของระบบผลิตน้ำมีจุดประสงค์เพื่อให้ได้น้ำสำหรับการบริโภคที่ปลอดภัย ถึงแม้ว่าน้ำจะผ่านการกรองด้วยเมมเบรนเพื่อกำจัดเกลือ และสารอินทรีย์ต่างๆแล้ว แต่ยังมีเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่รอดและเติบโตขณะที่ระบบหยุดการผลิตหรือหลุดรอดออกมาจากเมมเบรนที่ชำรุดได้ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการฆ่าเชื้อโรคอีกครั้งก่อนจะส่งน้ำให้ระบบจ่ายน้ำ

การฆ่าเชื้อโรคด้วยอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Disinfection) เป็นการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ผลิตได้ก่อนจ่ายเป็นน้ำสำหรับบริโภคที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคในน้ำที่มีความใสได้สูง ไม่เปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำ การติดตั้งอุปกรณ์และการใช้งานทำได้ง่าย

2.13 พารามิเตอร์สำหรับออกแบบและควบคุม

2.13.1 Water Flux (F_w)

ในขณะที่การกรองน้ำแบบธรรมดาใช้อัตรากรอง ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{-ชม.}$) เป็นพารามิเตอร์สำคัญ ระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน มี Water Flux เป็นตัวสำคัญ พารามิเตอร์ตัวนี้หมายถึงอัตราเร็วของน้ำที่ซึมผ่านเมมเบรน ซึ่งเท่ากับอัตราไหลของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ของเมมเบรน เช่น มล./ตร.ซม.-วินาที เป็นต้น

น้ำสามารถซึมผ่านเมมเบรนได้ในอัตราที่ขึ้นอยู่กับแรงดันของเครื่องสูบน้ำ และแรงดันออสโมติกที่ต้านไว้ ดังสมการต่อไปนี้

$$FW = A(\Delta P - \Delta \pi) \quad (2.1)$$

โดยที่ FW = Water Flux (มล./ตร.ซม.-วินาที)

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

ΔP = ความแตกต่างระหว่างแรงดันของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน

$\Delta \pi$ = ความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมติกของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน

อัตราไหลของน้ำที่แท้จริงผ่านเมมเบรนสามารถคำนวณได้จากผลคูณของ Water Flux และพื้นที่ของเมมเบรน ในทางตรงกันข้าม ถ้ารู้ค่า Water Flux (บริษัทผู้ผลิตเมมเบรนมักกำหนดค่าของ Water Flux ภายใต้ภาวะการทำงานต่างๆ) และรู้ปริมาณน้ำสะอาดที่ต้องการ สามารถคำนวณพื้นที่ของเมมเบรนที่ต้องการใช้ได้

สมการที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่า อัตราผลิตน้ำสะอาดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของผลต่างระหว่าง ΔP และ $\Delta \pi$ ซึ่งทำให้กล่าวได้ว่า อัตราการผลิตน้ำสะอาดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันของเครื่องสูบ

2.13.2 Salt Flux (F_s)

การรั่วของสารละลายผ่านเมมเบรน เรียกว่า Salt Flux (F_s) มีหน่วยเป็น กรัม/ตร.ซม.-วินาที จะเห็นได้ว่า ทั้ง F_w และ F_s เป็นพารามิเตอร์ที่คิดต่อหน่วยพื้นที่เหมือนกัน Salt flux ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำดิบ และไม่ขึ้นอยู่กับแรงดัน ดังจะเห็นได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$F_s = K_s (C_m - C_p) \quad (2.2)$$

$$F_s = K_s [((C_f + C_c) / 2) - C_p] \quad (2.3)$$

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

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

C_m = ความเข้มข้นของสารละลายที่ผิวเมมเบรน (กรัม/มล.)

C_f = ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำดิบ (กรัม/มล.)

C_c = ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำทิ้งเข้มข้น (กรัม/มล.)

C_p = ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำสะอาด (กรัม/มล.)

การสะสมของสารละลายในโมดูลทำให้ Salt Flux มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการระบายน้ำเข้มข้น (Rejected Water) ออกจากโมดูลเพื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย

2.13.3 Rejection Factor หรือ % Rejection

Rejection เป็นคุณสมบัติที่เมมเบรนจะต้องมี เมมเบรนที่ไม่ยอมให้โมเลกุลหรือไอออนไหลผ่านได้มาก นั่นคือมี Rejection Factor หรือ % Rejection สูง คุณภาพของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จากระบบ เป็นเครื่องแสดงถึง Rejection ของเมมเบรน เช่น ระบบที่มี % Rejection ต่ำ จะมี C_p สูง เป็นต้น แสดงให้เห็นด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \% \text{ Rejection} &= R_J = 100(C_f - C_p) / C_f \\ &= 100(1 - C_p / C_f) \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\text{เนื่องจาก} \quad C_p = F_s / F_w \quad (2.5)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad R_J = 100(1 - F_s / (C_f F_w)) \quad (2.6)$$

เมมเบรนมีความสามารถในการผลักหรือ Reject สารละลายต่างๆไม่เท่ากัน โดยทั่วไป % Rejection ของระบบรีเวอร์สออสโมซิสสำหรับสารละลายอนินทรีย์และอินทรีย์จะมีค่าประมาณ 90 - 99 % และ 95 - 99 % ตามลำดับ ส่วน % Rejection ของคอลลอยด์ต่างๆมักสูงถึง 100 %

2.13.4 Recovery Factor หรือ % Recovery

คุณสมบัติของเมมเบรนที่คู่ไปกับ Rejection คือ Recovery ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่าง ปริมาณน้ำสะอาดที่ผลิตได้ ต่อปริมาณน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำสะอาด

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

โดยที่ Q_p = อัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จากระบบ

Q_f = อัตราการไหลของน้ำดิบที่เข้าระบบ

โดยปกติ Recovery มักไม่ถึง 100 % เนื่องจากต้องมีการนำเข้มข้นออกจากระบบเสมอ อย่างเช่นในระบบรีเวอร์ออสโมซิสมี % Recovery ประมาณ 50 – 70 % เพราะต้องระบายน้ำเข้มข้นทิ้งในอัตราสูงเพื่อลดความเข้มข้นของสารละลายที่สะสมอยู่ในระบบ

2.14 งานวิจัยที่ผ่านมา

Morawski และคณะ (2000) ศึกษาความสามารถและวิธีการผลิต Carbon Sphere ที่ทำมาจากฟีนอลเรซินเพื่อใช้ในการกำจัด THMs ในน้ำ พบว่าการนำฟีนอลเรซินไปผ่านกระบวนการทำให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศคาร์บอนไดออกไซด์ ตามด้วยการออกซิเดชันด้วยการต้มในกรดไนตริก และอบด้วยอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง สามารถทำให้ Carbon Sphere มีประสิทธิภาพในการเกาะติดผิวเพื่อใช้ในการกำจัดคลอโรฟอร์ม (CHCl_3) ซึ่งมีขนาดโมเลกุลเล็กที่สุดในบรรดารูปแบบต่างๆของ THMs ที่ในน้ำได้ 18.4 $\mu\text{mol/g}$ โดยความสามารถในการเกาะติดผิวกับ THMs เรียงลำดับจากมากไปน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลจากใหญ่ไปเล็กคือ โบรโมฟอร์ม (CHBr_3), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (CHBr_2Cl), โบรโมไดคลอโรมีเทน (CHBrCl_2) และ คลอโรฟอร์ม (CHCl_3)

Karakulski และคณะ (2001) ศึกษาการใช้กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสในโมดูลที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ แบบแผ่นม้วน และ แบบท่อ ในระดับ Pilot-scale สำหรับกำจัดคลอโรฟอร์ม (CHCl_3) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของ THMs พบว่าโมดูลแบบแผ่นม้วนสามารถกำจัดคลอโรฟอร์มในน้ำประปาและน้ำกร่อยได้มากกว่าร้อยละ 99.5 ในทุกช่วงแรงดันที่ใช้ทดสอบ (10, 15, 20, 25 และ 30 บาร์) ในขณะที่โมดูลแบบท่อสามารถกำจัดคลอโรฟอร์มได้เกือบทั้งหมดเมื่อใช้แรงดัน 10 บาร์ แต่เมื่อเพิ่มแรงดันสูงขึ้น ความสามารถในการกำจัดลดลงเหลือเพียงร้อยละ 80 และในการทดสอบโมดูลทั้งสองกับน้ำกลั่นที่ผสมคลอโรฟอร์มพบว่าความเข้มข้นของสารละลายในน้ำดิบไม่มีผลอย่างเห็นได้ชัดกับความสามารถในการกำจัดคลอโรฟอร์มในน้ำ

Bodzek และคณะ (2002) ศึกษาความสามารถของเมมเบรนแบบรีเวอร์สออสโมซิส เมมเบรนแบบนาโน และเมมเบรนแบบอัลตรา ในการกำจัดคลอโรฟอร์ม (CHCl_3) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของ THMs ในน้ำ และการลดลงของปริมาณน้ำที่ผลิตได้เมื่อเมมเบรนถูกใช้งาน พบว่าความสามารถในการกำจัดคลอโรฟอร์ม (CHCl_3) เมมเบรนแบบรีเวอร์สออสโมซิส เมมเบรนแบบนาโน และเมมเบรนแบบอัลตรา มีค่าเท่ากับร้อยละ 81.1, 75.0 และ 93 ตามลำดับ และปริมาณน้ำที่ผลิตได้เท่ากับ 3.16×10^6 , 3.27×10^6 และ 0.43×10^6 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$ ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตเมมเบรนแบบอัลตราที่ใช้แบบ Hydrophobic ซึ่งมีความไวต่อการเกิด Fouling ส่งผลให้ค่าปริมาณน้ำที่ผลิตได้มีค่าต่ำ แต่ชั้นของสารอินทรีย์ที่สะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรนช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดคลอโรฟอร์มในน้ำ

Liikanen และคณะ (2003) ศึกษาความสามารถของผลิตภัณฑ์เมมเบรนนาโนที่จำหน่ายในปัจจุบันจำนวน 6 ชนิด (NF70, NF225, NTR-7450, NTR-7410, Desal-5 และ TFC-S) ในการบำบัดน้ำผิวดินที่ผ่านการบำบัดข้างต้นด้วยวิธีเคมี ในระดับ Pilot-scale พบว่า

1. เมมเบรนนาโน NF225 มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำได้ดีที่สุดเมื่อพิจารณาในด้านคุณภาพของน้ำที่ผลิตได้และความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ในขณะที่เมมเบรนนาโน NTR-7450 ที่แม้ว่าจะสามารถผลิตน้ำได้ปริมาณสูงสุดแต่มีปัญหาด้านคุณภาพของน้ำที่ผลิตได้ และการเกิด Fouling
2. เมมเบรนนาโนต่างชนิดกันมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ต่างกันอย่างชัดเจน

3. แม้ว่าน้ำที่ผ่านเมมเบรนจะมีปริมาณอาหารสำหรับจุลชีพเหลืออยู่น้อยมาก แต่จุลชีพยังคงสามารถเติบโตได้ ดังนั้นน้ำที่ผ่านเมมเบรนแล้วยังคงต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนอีกครั้งเพื่อป้องกันการเติบโตของจุลชีพในระบบท่อจ่ายน้ำ
4. เมมเบรนต่างชนิดกันมีประสิทธิภาพภายหลังจากการทำความสะอาดแผ่นเยื่อแล้วไม่เท่ากัน และเหมาะสมกับสารเคมีที่ใช้ล้างไม่เหมือนกัน เช่น NF225 สามารถผลิตน้ำได้มากขึ้นร้อยละ 20 หลังจากการล้าง ในขณะที่ NF70 ความสามารถในการผลิตน้ำลดลงร้อยละ 5 หลังจากการล้าง

Agenson และคณะ (2003) ศึกษาความสัมพันธ์ของรูปร่างโมเลกุลสารประกอบอินทรีย์ที่มีต่อความสามารถในการกำจัดได้ของเมมเบรนนาโนและรีเวอร์สออสโมซิส พบว่า

1. การวัดการกำจัดด้วยขนาดของรูปร่างโมเลกุลหรือ Functional group ของสารประกอบอินทรีย์เหมาะสมสำหรับอธิบายกลไกการติดค้างบนเมมเบรนมากกว่าการพิจารณาจากน้ำหนักโมเลกุลเพียงอย่างเดียว
2. เมมเบรนที่ผิวมีความแน่นมากกว่าสามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ได้มากกว่า
3. ค่าการซึมผ่านสูงขึ้นตามแรงดันที่สูงขึ้น แต่การกำจัดสารประกอบอินทรีย์จะสูงขึ้นจะถึงจุดหนึ่งที่คงที่ เรียกจุดนี้ว่า Reflection coefficient

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย