

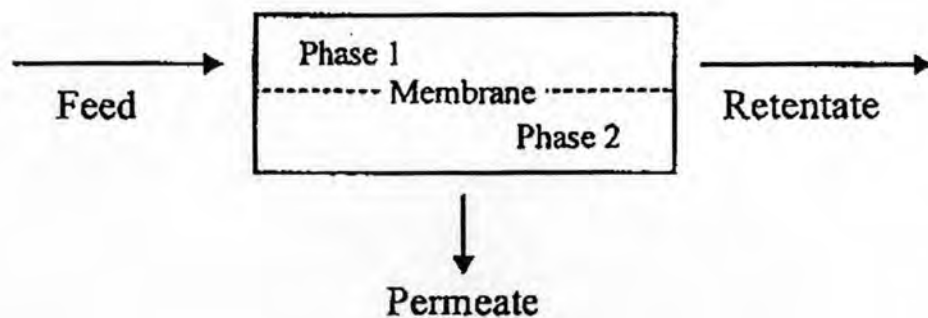


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการแยกสารของเมมเบรน (Membrane Process)

กระบวนการแยกสารของเมมเบรน หมายถึง กระบวนการต่างๆที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (semipermeable membrane) ความสามารถในการแยกสารขึ้นอยู่กับขนาดช่องว่าง (pore size) หรือ การคัดสรรด้วยน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight Cut-off : MWCO) ของเมมเบรน โดยอาศัยกลไก 2 ชนิด คือ การกรองติดค้าง (Sieve Effect) และการแพร่ผ่าน (Diffusion Effect) ซึ่งสามารถนำมาใช้เพิ่มความเข้มข้นหรือทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น หลักการสำคัญของกระบวนการเมมเบรน ก็คือ จะต้องมีความดันที่ทำให้สารละลายไหลผ่านและเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้น ผลต่างของความดัน แผ่นเยื่อเมมเบรนที่ใช้งานในปัจจุบันจะสังเคราะห์ขึ้นจากสารโพลีเมอร์และสารประกอบอื่นๆ เช่น เซลลูโลสอะซิเตต เซลลูโลสไนเตรท โพลีเอไมด์ เป็นต้น และในปัจจุบันได้มีการนำกระบวนการเมมเบรนเข้ามาใช้ในงานอุตสาหกรรมมากมาย รวมทั้งในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

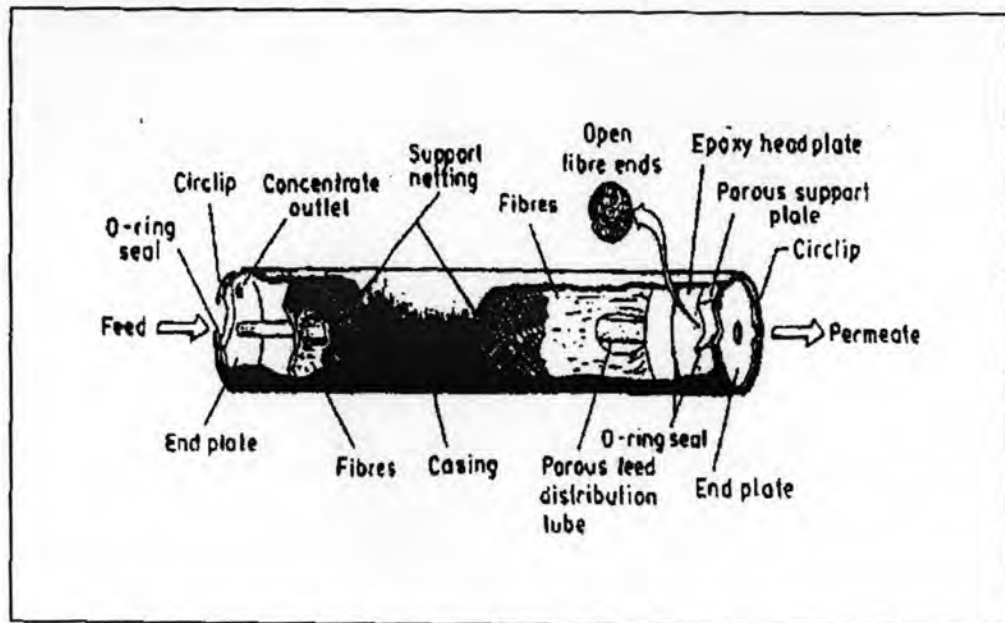


รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของกระบวนการเมมเบรน (Baker, 2004)

2.1.1 เยื่อเมมเบรน(semipermeable membrane)

เยื่อเมมเบรน คือ แผ่นฟิล์มบางๆ ที่สังเคราะห์ขึ้นจากสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ มีผลทำให้เกิดการแยกตัวอย่างละเอียดของอนุภาคในของไหล ซึ่งของไหลในที่นี้คือก๊าซและของเหลว เมมเบรนมีได้หลายรูปร่าง เช่น แผ่นเรียบ หลอด ซึ่งมีหลายขนาด และ Hollow fiber ซึ่งที่เส้นผ่าน

ศูนย์กลางภายในน้อยกว่าสิบเท่าของมิลลิเมตร โดยทั่วไปแล้ว เมมเบรนที่ทำจากสารอินทรีย์จะมีความต้านทานต่อความดันและสารเคมี โดยเฉพาะการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน แต่มีความยุ่งยากและราคาแพงกว่า เมมเบรนที่ทำจากสารอินทรีย์จะมีความยืดหยุ่นดีกว่า และสามารถใส่ไว้ในระบบที่มีเนื้อที่จำกัด ซึ่งจะได้พื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก ส่วนประกอบต่างๆ ของเมมเบรนแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 Module with Hollow Fiber Membrane (Baker, 2004)

2.1.2 ประเภทของเมมเบรน

ปัจจุบันได้มีการผลิตเมมเบรนขึ้นมาหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ โดยเราสามารถแบ่งประเภทของเมมเบรนได้ 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

2.1.2.1 Isotropic Membranes

เป็นเมมเบรนที่มีส่วนประกอบโครงสร้างสม่ำเสมอสามารถแบ่งได้อีก 3 ประเภท ได้แก่

1). Microporous Membranes เมมเบรนประเภทนี้จะมีรูพรุนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น แยกสารโดยอาศัยการกรองติดค้างเช่นเดียวกับการกรองด้วยทราย แต่รูพรุนมีขนาดเล็กกว่าถึงกรองทรายมากคือ จะอยู่ที่ 0.01 – 10 ไมครอน กลไกหลักในการทำงานคือ การกรองดัก

สารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของตัวเมมเบรน เมมเบรนชนิดนี้ได้แก่ ไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน และนาโนฟิลเตรชัน

2). Noporous Dense Membranes เป็นเมมเบรนที่เนื้อแน่นไม่มีรูพรุน แยกสารด้วยการแพร่ผ่าน กลไกหลักคือ จะอาศัยความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนของสารละลาย 2 ชนิดที่อยู่แต่ละด้านของเมมเบรน เมมเบรนประเภทนี้จะมีความแน่นสูง ได้แก่ กระบวนการออสโมซิสผันกลับ เมมเบรนสำหรับแยกก๊าซ และ pervaporation membrane

3). Electrically Charge Membranes เมมเบรนประเภทนี้อาจจะมีรูพรุนหรือไม่มีรูพรุนก็ได้ แต่โดยทั่วไปจะมีรูพรุนขนาดเล็กมาก โดยที่ผนังของรูพรุนจะมีอิออนที่มีประจุลบหรือบวกติดแน่นอยู่ เมมเบรนที่มีประจุบวกติดอยู่เรียกว่า Anion Exchange Membranes เพราะว่าอิออนลบในน้ำจะเข้ามาจับ ส่วนเมมเบรนที่มีประจุลบเรียกว่า Cation Exchange Membrane การแยกสารจะต้องอาศัยความแตกต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อน และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดประจุของอิออนที่อยู่ในน้ำเป็นหลัก โดยจะใช้ในการกำจัดอิออนเป็นหลัก เมมเบรนประเภทนี้ได้แก่ อิเล็กโตรไดอะไลซิส

2.1.2.2 Anisotropic Membranes

อัตราการถ่ายเทมวลสารต่างๆ ผ่านเมมเบรนนั้น จะแปรผกผันกับความหนาแน่นของเยื่อแผ่นเมมเบรน สำหรับการกรองน้ำเพื่อให้ได้น้ำที่ผลิตมีปริมาณมากพอสมควรนั้น ความหนาแน่นของชั้นเมมเบรนที่มีประสิทธิภาพไม่ควรเกิน 20 ไมครอน การพัฒนาระบบผลิต การประกอบเมมเบรนนั้นต่างๆ เข้าด้วยกันช่วยให้สามารถบรรลุเป้าหมายในการนำมาใช้งานจริงได้มากขึ้น โดยใช้เทคนิคของโครงสร้างแบบ Anisotropic ซึ่งวางแผ่นฟิล์มเมมเบรนขนาดที่บางมากบนแผ่นฟิล์มรองรับ ซึ่งมีรูพรุนและมีความหนามากกว่า ซึ่งเรียกว่า เยื่อบางประกอบ (Thin Film Composite, TFC) ซึ่งแผ่นฟิล์มทั้งสองชั้นทำมาจากวัสดุโพลีเมอร์คนละชนิดกัน โพลีเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้ผลิตเมมเบรนแสดงดังตารางที่ 3.1 ประโยชน์ที่ได้จากเมมเบรนประเภทนี้คือ ได้อัตราการกรองน้ำสูงขึ้น ซึ่งในเชิงธุรกิจมักจะผลิตเมมเบรนประเภทนี้

2.1.2.3 Ceramic Metal and liquid Membranes

โดยปกติแล้ววัสดุที่ใช้ผลิตเมมเบรนส่วนใหญ่จะเป็นโพลีเมอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ แต่ไม่นานมานี้ได้มีการผลิตเมมเบรนที่ใช้วัสดุอย่างอื่น เช่น เซรามิก โดยใช้เมมเบรนที่มีรูพรุน เช่น ไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อให้ทนทานต่อสารตัวทำละลาย และมีความเสถียรภาพต่อความร้อน เช่น พัลลาเดียม สามารถที่จะใช้ผลิตเมมเบรนเนื้อแน่นสำหรับแยกก๊าซไฮโดรเจนเพื่อทำให้บริสุทธิ์ได้ ฟิล์มชั้นของเหลวก็สามารถที่จะนำมาผลิตเป็นเมมเบรนเหลว (Liquid Membranes) ได้เช่นกัน

Isotropic membranes



Anisotropic membranes



รูปที่ 2.3 การแบ่งประเภทของเมมเบรนตามโครงสร้างของเมมเบรน (Baker, 2004)

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของโพลีเมอร์ที่ใช้ทำเมมเบรน (สนธยา สรหงษ์, 2546)

คุณสมบัติ	โพลีเมอร์			
	Celulose Acetate	Polysulfone	Aromatic Polyamide	Polyacrylonitile
MWCO	1,000 – 50,000	5,000 – 50,000	1,000 – 50,000	30,000 – 100,000
pH	3.5 – 7	0 – 14	2 – 12	2 – 12
อุณหภูมิ (°C)	35	100	80	50
ความทนทาน ต่อคลอรีน	ดี	ดี	ด้อย	ปานกลาง
ความทนทาน ต่อสารละลาย	ด้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
รูปแบบของ เมมเบรน	แผ่น, ท่อ	แผ่น, ท่อ, แคปิลลารี	แผ่น, ท่อ, แคปิลลารี	แผ่น, ท่อ, แคปิลลารี

2.1.3 ลักษณะการใช้งานของเมมเบรนแต่ละชนิด

2.1.3.1 ไมโครฟิลเตรชัน(Microfiltration)

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อแยกอนุภาคขนาดไมครอน หรือเล็กกว่าไมครอน เมมเบรนแบบนี้ สามารถกักอนุภาคแขวนลอยและจุลินทรีย์ได้ แต่ยอมให้สารละลายและน้ำผ่านกระบวนการตกตะกอนผ่านได้ มีขนาดช่องว่าง (pore size) ประมาณ 0.03 – 10 ไมครอน ค่า MWCO มากกว่า 100,000 ดาลตัน ใช้ความดันต่ำประมาณ 100 – 400 kPa (15 – 60 psi)

2.1.3.2 อัลตราฟิลเตรชัน(Ultrafiltration)

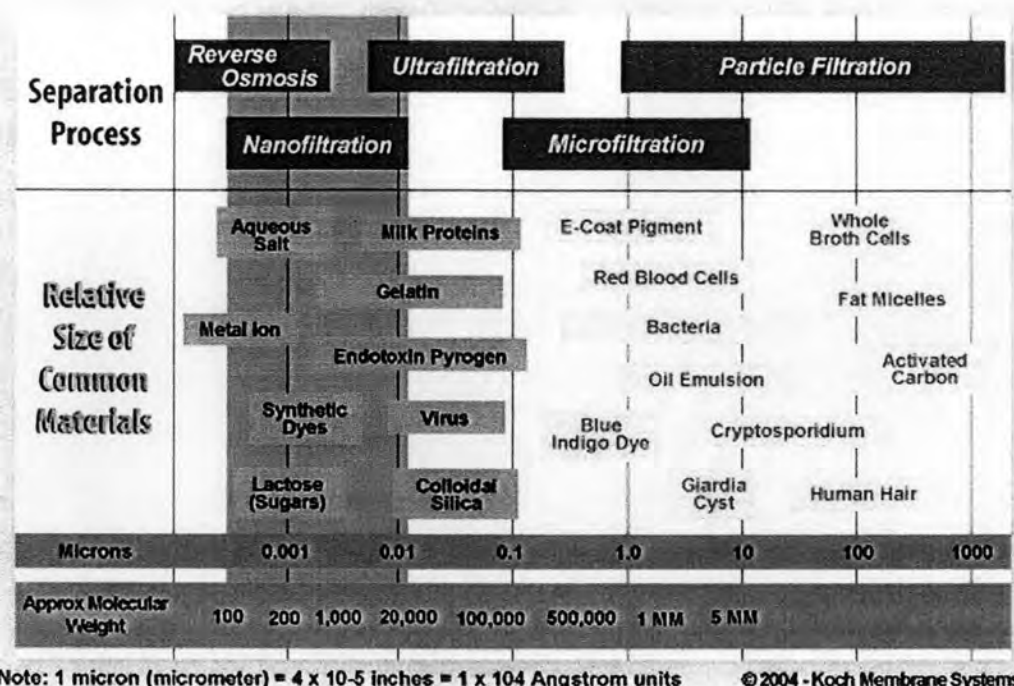
เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ประกอบด้วยคอลลอยด์ และสารน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยทั่วไปสารที่ไม่มีประจุจะถูกกั้นเอาไว้ และไอออนจะสามารถผ่านเมมเบรนไปได้โดยมีค่า MWCO อยู่ที่ 10,000-100,000 ดาลตัน การทำงานของอัลตราฟิลเตรชันใช้แผ่นเยื่อที่มีขนาดช่องว่าง (pore size) ประมาณ 0.002 – 0.1 ไมครอน ใช้ความดันประมาณ 200-700 kPa(30-100 psi) มักนิยมใช้ในการแยกสารแขวนลอย โปรตีนและใช้ในการผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงโดยใช้ควบคู่กับ ion exchanger เป็นต้น

2.1.3.3 นาโนฟิลเตรชัน(Nanofiltration)

เป็นกระบวนการที่อยู่ในช่วงระหว่างอัลตราฟิลเตรชัน และออสโมซิสผันทกลับ แต่เดิมถูกเรียกว่า ออสโมซิสผันทกลับแบบหลวม หรือออสโมซิสผันทกลับความดันต่ำ โดยจะยอมให้อนุภาคที่เล็กกว่า 1 นาโนเมตรผ่านไปได้ มีขนาดช่องว่าง(pore size) ประมาณ 0.001 ไมครอน โดยมีค่า MWCO อยู่ที่ 1,000-100,000 ดาลตัน ใช้ความดันประมาณ 600-1,000 kPa(90-150 psi) มักนิยมใช้กำจัดไอออนวาเลนซ์คู่ ในอัตราสูงกว่าไอออนวาเลนซ์เดี่ยว ทำให้มีความสามารถในการลดความกระด้าง อาจเรียกเมมเบรนชนิดนี้ว่า softening membrane

2.1.3.4 ออสโมซิสผันทกลับ(Reverse Osmosis)

ทำงานโดยอาศัยการไล่ความดันเข้าไปในสารละลายเข้มข้น ซึ่งความดันที่ไล่เข้าไปต้องมีค่ามากกว่าความดันออสโมซิสของสารละลายจากผลของความดันนี้ ทำให้น้ำบริสุทธิ์ถูกบังคับให้ไหลผ่านเมมเบรนชนิดที่ยอมให้โมเลกุลขนาดเล็กไหลผ่านได้ โดยจะทิ้งเกลือและสิ่งปนเปื้อนเอาไว้ หลักการของออสโมซิสผันทกลับจะตรงข้ามกับกระบวนการออสโมซิส โดยสารที่มีค่า MWCO อยู่ต่ำกว่า 100 ดาลตัน จะถูกกรองไว้บนเมมเบรน ใช้ความดันสูงประมาณ 1,380-6,890 kPa(200-1,000 psig) สามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำบริสุทธิ์สูง โดยใช้ควบคู่กับ ion exchanger ใช้ในการแยกโลหะ การทำให้น้ำตาลเข้มข้นสูงขึ้น การทำให้สีย้อมมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น เป็นต้น



ที่มา : <http://www.kochmembrane.com>

รูปที่ 2.4 ความสามารถในการกำจัดสารขนาดต่างๆของเมมเบรนแต่ละชนิด

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการเมมเบรน (Baker, 2004)

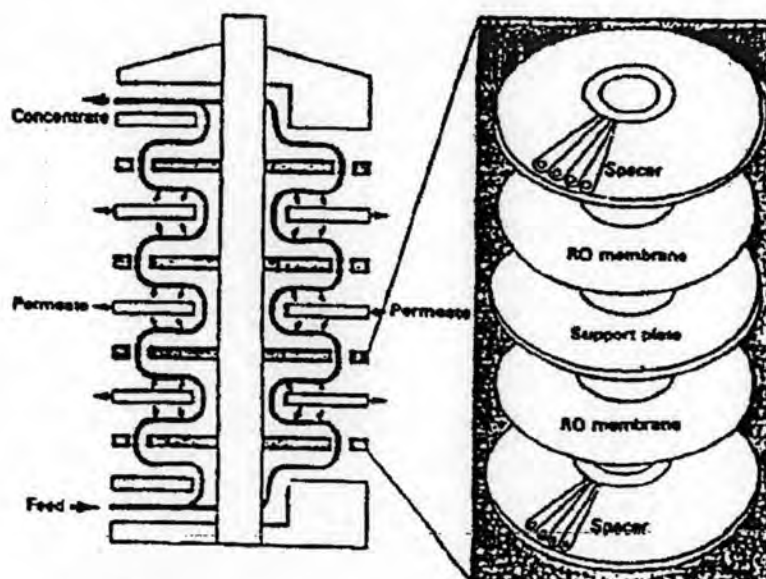
	Reverse Osmosis	Nanofiltration	Ultrafiltration	Micro filtration
Membrane	Asymmetrical	Asymmetrical	Asymmetrical	Symmetrical Asymmetrical
Thickness	150 μm 1 μm	150 μm 1 μm	150 - 250 μm 1 μm	10-150 μm
Pore size	<0.002 μm	<0.002 μm	0.2 - 0.02 μm	4 - 0.02 μm
Rejection of	HMWC, LMWC sodium chloride glucose amino acids	HMWC mono-, di- and oligosaccharides polyvalent neg. ions,	Macro molecules, proteins, polysaccharides vira	Particles, clay bacteria
Membrane material(s)	CA Thin film	CA Thin film	Ceramic PSO, PVDF, CA Thin film	Ceramic PP, PSO, PVDF
Membrane Module	Tubular, spiral wound, plate-and-frame	Tubular, spiral wound, plate-and-frame	Tubular, hollow fiber, spiral wound, plate-and-frame	Tubular, hollow fiber
Operating pressure	15-150 bar	5-35 bar	1-10 bar	<2 bar

2.1.4 โมดูลชนิดต่างๆของเมมเบรน

โมดูลในท้องตลาดแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 4 ประเภท คือ แบบแผ่น (Plate type) แบบท่อ (Tubular) แบบม้วน (Spiral wound) และแบบเส้นใยกลวง (Hollow fibres)

2.1.4.1 แบบแผ่น (Plate and Frame Module)

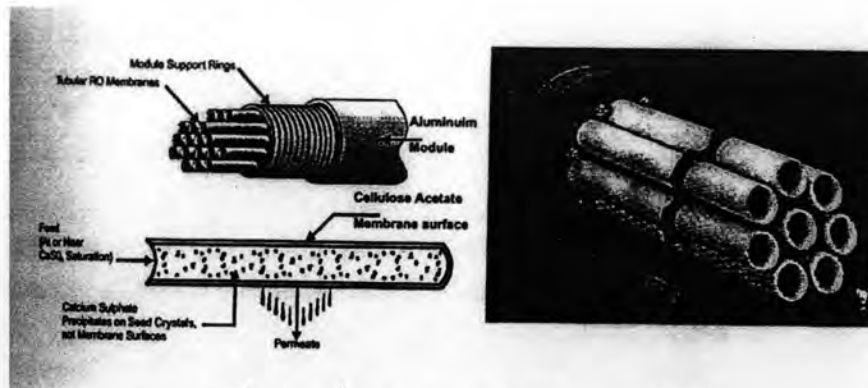
เทคนิคนี้เป็นการจัดแผ่นเมมเบรนที่ง่ายที่สุด โมดูลที่ใช้จะมีลักษณะทำงานคล้าย filter press ดังรูปที่ 2.5 แผ่นเมมเบรนวางอยู่บนแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน (Porous Plate) หรือ แผ่นรองรับที่มีร่องให้น้ำไหลออกได้ เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางซ้อนกันและสลับกัน น้ำถูกบังคับให้ซึมผ่านเมมเบรน และแผ่นรองรับแล้วจึงไหลออกจากโมดูล



รูปที่ 2.5 Plate and Frame Module (Osamu, 2001)

2.1.4.2 แบบท่อ (Tubular Module)

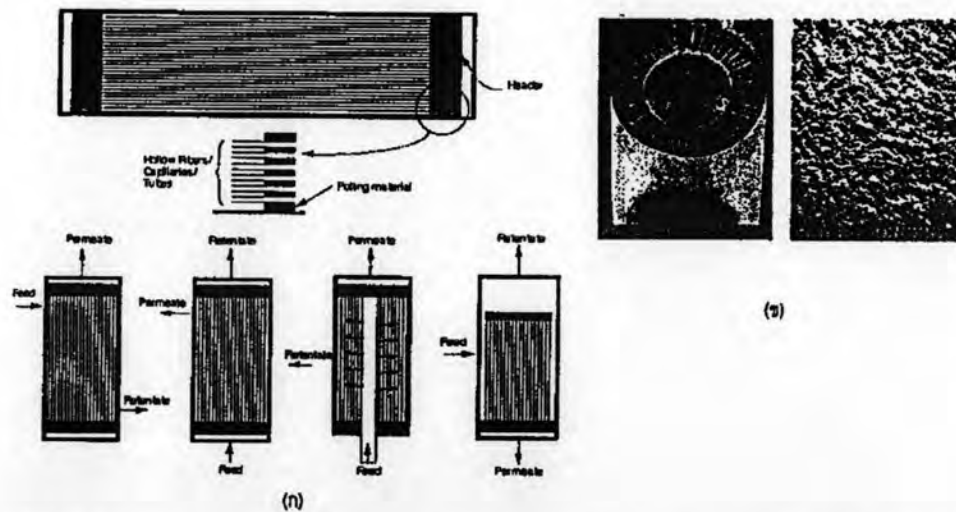
วิธีนี้เป็นการม้วนแผ่นเมมเบรน ให้เป็นหลอดหรือท่อขนาดเล็ก และยึดติดไว้ภายในท่ออีกอันหนึ่งที่ทำด้วยสแตนเลส หรือไฟเบอร์กลาส ดังรูปที่ 2.6 และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับแผ่นเมมเบรน มิให้ฉีกขาดในระหว่างการใช้งาน และใช้เป็นทางออกของน้ำสะอาดอีกด้วย น้ำดิบจะถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อด้วยความดัน แรงดันของน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถซึมผ่านเมมเบรนและท่อรองรับออกไปสู่ภายนอก เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถทำความสะอาดได้ง่าย จึงนิยมใช้ในกรณีที่มีการอุดตันเกิดขึ้นเร็ว



รูปที่ 2.6 Tubular Module (Osamu, 2001)

2.1.4.3 แบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module)

เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงจะมีผิวที่คล้ายฟองน้ำล้อมรอบผิวชั้นใน (ซึ่งมีความหนาเพียง 0.1 ไมครอน) ทำโดยการนำเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมามัดรวมกันเป็นมัดๆ และงอพับเป็นรูปเกือกม้า หรือตัวยู ปลายทั้งสองข้างของเส้นใยทั้งมัด ถูกตรึงติดอยู่กับด้านใดด้านหนึ่ง เมมเบรนชนิดนี้เหมาะกับน้ำดิบที่มีความสกปรก หรือของแข็งเจือปนสูง เพราะว่ามีช่องว่างขนาดใหญ่ ทำให้มีโอกาสอุดตันได้น้อย และยังสามารถจัดรูปแบบการวางโมดูลได้หลายลักษณะและป้อนน้ำเข้าได้หลายลักษณะ ดังรูปที่ 2.7

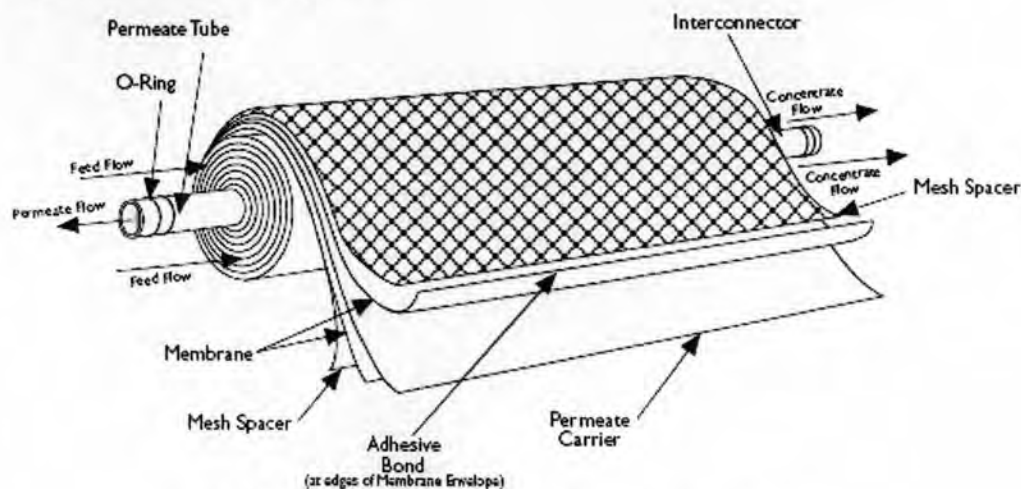


รูปที่ 2.7 (n) Hollow Fiber Module (ข) Hollow Fiber Membrane (Osamu, 2001)

2.1.4.4 แบบม้วน (Spiral Wound Module)

โมดูลแบบนี้ประกอบด้วยเมมเบรนสองแผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่ตรงกลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นแบนและแผ่นวัสดุทั้งสามรอบท่อเจาะรูดังรูปที่ 2.8 โดยมีแผ่นตะแกรงทำด้วย Polypropylene คลุมปิดด้านนอก ขอบของแผ่นเมมเบรนทั้ง

สามด้านถูกยึดไว้ด้วยกาวพิเศษ ขอบที่เหลือปล่อยให้เปิดตามปกติและจึงติดกับท่อเจาะรู ลักษณะเช่นนี้ ทำให้ถูกน้ำบังคับให้ไหลไปยังท่อเจาะรูเสมอ การม้วนเมมเบรน แผ่นรองรับ และตะแกรงพลาสติก ทำให้ได้โมดูลรูปทรงกระบอกที่สามารถบรรจุลงในท่อทรงกระบอกธรรมดาได้ โมดูลแบบนี้ อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 5, 10, 20 หรือ 30 เซนติเมตร และมีความยาวต่างๆกัน แต่ไม่เกิน 1 เมตร น้ำดิบจะถูกบังคับให้ไหลในแนวแกนของโมดูล เข้าไปตามแผ่นตะแกรง และจะถูกแรงดันอัดให้น้ำซึมผ่านเมมเบรนตามแนวรัศมีลงไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งจะส่งน้ำบริสุทธิ์ไปยังท่อเจาะรูเพื่อนำน้ำออกจากโมดูลต่อไป



รูปที่ 2.8 Spiral Wound Module (Osamu, 2001)

ตารางที่ 2.3 ข้อเปรียบเทียบของโมดูลชนิดต่างๆ (Baker, 2004)

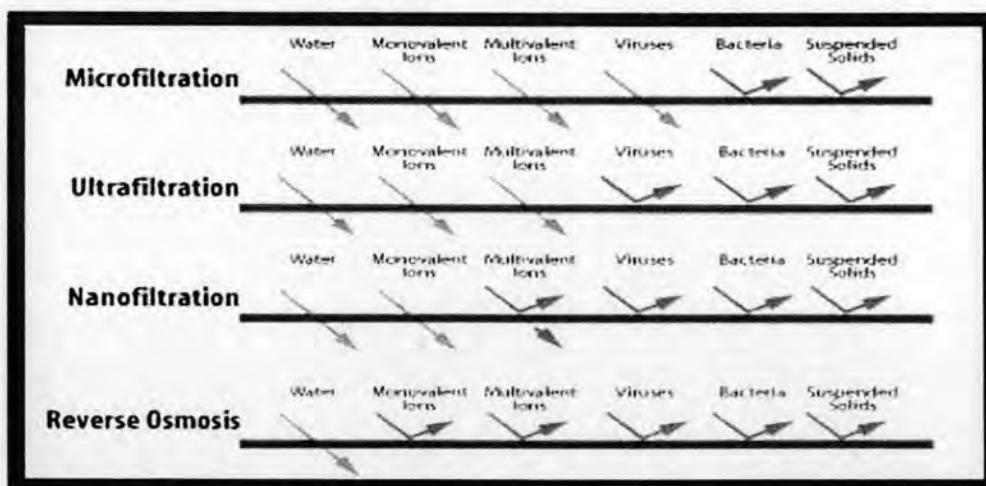
	Spiral wound element	Tubular high price	low price	Plate and frame system	Hollow wide fiber system	Hollow fine fiber	Ceramic
Membrane density [m ² /m ³]	high	low		average	average	very high	low
Plant investment	low	high	low	high	very high	medium	very high
Tendency to fouling	average	low		average	low	very high	medium
Cleanability	good	good		good	low	none	good
Variable costs	low	high	low	average	average	low	high
Change of membrane only, see note 1	no	yes	no	yes	no	no	yes
Flow demand	medium	high	medium	medium	high	low	very high
Pre-filter other demands (see also table 26)	≤ 50 μm. no fibers	sieve		≤ 100 μm. few fibers	≤ 100 μm. few fibers	≤ 5 μm extreme pretreatment	sieve

2.2 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน(Nanofiltration)

2.2.1 หลักการของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

เป็นกระบวนการที่มีค่าความดันของการเดินระบบอยู่ในช่วงของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ซึ่งมีหลักการเหมือนกับรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) ใช้สำหรับแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น เกลืออนินทรีย์ สารอินทรีย์ กรด อินทรีย์ เป็นต้น การพัฒนาเยื่อเมมเบรนแบบนาโนเกิดขึ้นหลังเยื่อรีเวอร์สออสโมซิสประมาณ 25 ปี คือประมาณ ค.ศ. 1988 เนื่องจากเยื่อรีเวอร์สออสโมซิสใช้สำหรับแยกเกลือแร่ต่างๆออกจากน้ำ กร่อยและน้ำทะเลเป็นหลัก มีความสามารถในการกำจัดเกลือในรูปของ NaCl ได้สูงเกิน 98% ดังนั้นดังนั้นถ้าต้องการใช้แยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า NaCl เมมเบรนรีเวอร์สออสโมซิสจึงไม่เหมาะสม เพราะมีโครงสร้างแน่นเกินไป ทำให้ค่าฟลักซ์ต่ำ จึงมีการพัฒนาเยื่อแผ่นกรองแบบนาโนขึ้นสำหรับการใช้งานที่ไม่ได้เน้นการแยกเกลือออกจากน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล ส่วนใหญ่เมมเบรนแบบนาโนเป็นเยื่อแผ่นเชิงประกอบที่มีขนาดรูพรุนของชั้นผิวประมาณ 2 นาโนเมตร และมีโครงสร้างที่เบากว่าเมมเบรนรีเวอร์สออสโมซิส อาจกล่าวได้ว่าการกรองแบบนาโน คือรีเวอร์สออสโมซิสแบบความดันต่ำ (Low Pressure Reverse Osmosis) เพราะมีช่วงความดันในการดำเนินการประมาณ 10-20 บาร์

กระบวนการนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ และไอออนที่มีหลายวาเลนซ์ (Multivalent Ions) ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่แรงดันขนาดปานกลางและสามารถกำจัดเกลือ ไตรฮาโลมีเทน โลหะหนัก สี ไวรัสทุกชนิด แบคทีเรีย และพาราสิต ออกจากน้ำและน้ำเสียได้ ดังนั้นกระบวนการนาโนฟิลเตรชันจึงสามารถใช้ได้อย่างได้ผลกับระบบบำบัดน้ำและน้ำเสีย



Membrane Process Characteristics

ที่มา : <http://www.kochmembrane.com>

รูปที่ 2.9 ความสามารถในการแยกของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน

2.2.2 ลักษณะสมบัติของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน

วัสดุที่ใช้ในการทำ NF เมมเบรนจะเป็นสารโพลีเมอร์อินทรีย์ ในอดีต NF เมมเบรนมักทำจากเซลลูโลส และโพลีเอไมด์ โดยจะมีรูปแบบเป็น Multiple Layer Thin Film Composite สามารถให้ค่าฟลักซ์ เปอร์เซ็นต์การกำจัด ตลอดจนความทนทานต่อแรงอัด และสารเคมีต่างๆ ได้ดีกว่า โดยลักษณะของเมมเบรนจะประกอบด้วยชั้นบางๆ ของเมมเบรน ซึ่งเรียกว่า Active Membrane Layer วางตัวอยู่บนชั้นรองรับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก โดยทั่วไป Active Membrane Layer จะประกอบด้วยหมู่สารเคมีที่เป็นประจุลบ และเชื่อว่าเมมเบรนมีรูพรุนซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2 nm.

2.2.3 กลไกในการทำงานของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

กลไกในการทำงานของกระบวนการ NF เหมือนกันกับการทำงานของ RO ต่างกันที่แรงขับที่ใช้ คือ NF จะใช้แรงดันที่ต่ำกว่ากระบวนการ RO ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายแตกต่างกัน ซึ่งการทำงานของเมมเบรนทั้งสองชนิดนี้เกี่ยวข้องกันโดยตรงกับกระบวนการออสโมซิส (Osmosis)

ออสโมซิส (Osmosis) หมายถึง การเคลื่อนที่ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติของน้ำผ่านเยื่อเมมเบรนบางๆ (Semi Permeable Membrane) จากสารละลายเจือจาง ไปยังสารละลายเข้มข้น (รูปที่ 2.10) เยื่อเมมเบรนในอุดมคติยอมให้น้ำไหลผ่านได้เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติ โมเลกุลหรือไอออนบาง ชนิดอาจไหลผ่านได้เช่นกัน ถ้าจัดระบบออสโมซิสให้มีการไหลเป็นแบบที่แสดงในรูปที่ 2.10 ก. เมื่อปล่อยให้มีการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนจนกระทั่งถึงจุดสมดุล (ไม่มีการไหลอีก) ระดับน้ำใน ด้านซ้ายซึ่งเป็นสารละลายเข้มข้นจะสูงกว่าระดับน้ำในด้านขวาซึ่งเป็นน้ำจืด ผลต่างของระดับน้ำนี้เรียกว่า แรงดันออสโมซิส (Osmotic Pressure) นักวิทยาศาสตร์ได้อธิบายถึงปรากฏการณ์ออสโมซิส ว่าอาจเกิดขึ้นเนื่องจากสารละลายเข้มข้นมี Vapor Pressure ต่ำกว่าสารละลายเจือจาง ระดับน้ำในทั้งสองด้านของเมมเบรนจึงมีการปรับตัว จนกระทั่งแรงดันบนผิวน้ำทั้งสองด้านมีค่า เท่ากัน ถ้ามีแรงดันที่มีค่าสูงกว่าแรงดันออสโมซิสมากกระทำต่อด้านที่มีสารละลายเข้มข้น น้ำจะไหลย้อนกลับ (รูปที่ 2.10 ข.) ซึ่งเป็นการต้านการไหลธรรมชาติ วิธีดังกล่าวนี้วิศวกรได้นำมาใช้เพื่อแยกน้ำออกจากสารละลายเข้มข้นต่างๆ และเรียกว่า Reverse Osmosis (RO) หรือออสโมซิสย้อนกลับ ดังนั้นกระบวนการ RO และ NF จึงอาศัยปัจจัยสำคัญ 2 อย่าง คือ แรงดันและเมมเบรน

แรงดันออสโมซิส (π) เป็นคุณสมบัติของสารละลายที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ดังอาจแสดงได้ด้วยสมการ ดังนี้

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

โดยที่ π = แรงดันออสโมซิส (atm.)

n = จำนวนอิออนในสารประกอบ เช่น NaCl มี $n = 2$, Na_2SO_4 มี $n = 3$ เป็นต้น

C = ความเข้มข้นของสารละลาย (โมล/ลิตร)

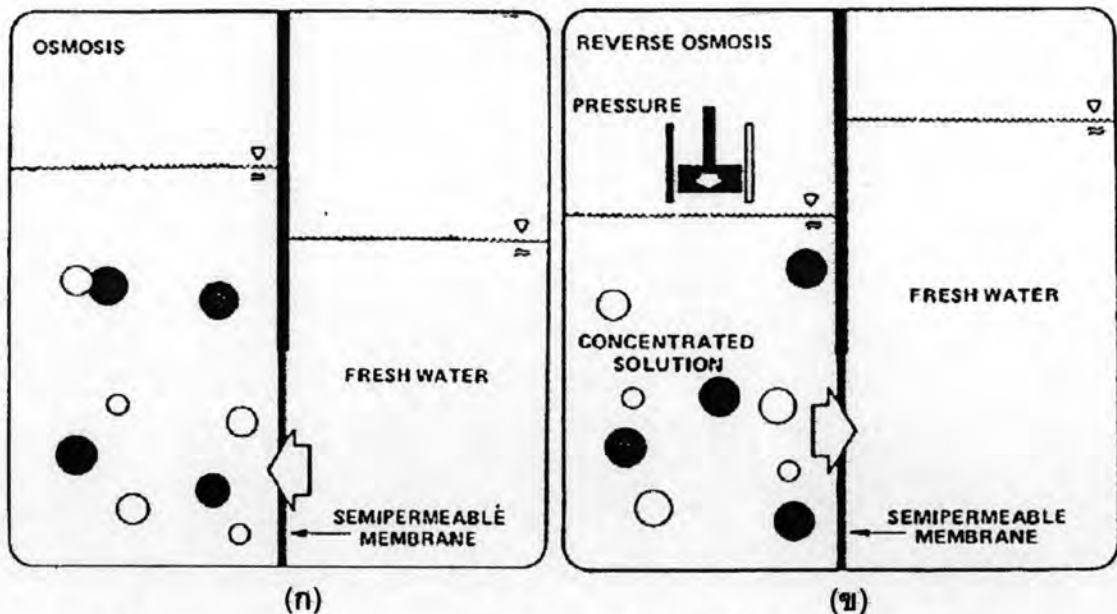
R = ค่าคงที่ของก๊าซ = 0.082 บรรยากาศ-ลิตร/โมล

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ ($^{\circ}\text{K}$) = $273 + ^{\circ}\text{C}$

NF เมมเบรนกำจัดเกลือและสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ด้วยกลไกที่แตกต่างจากกลไกของการแลกเปลี่ยนอิออน (Ion Exchange) หรือการดูดติดผิว (Adsorption) นักวิจัยเชื่อว่ากระบวนการ NF มีกลไก 2 กลไกในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำคือ

1). กลไกทางกายภาพ เนื่องจาก NF เมมเบรนมีขนาดรูพรุนที่เล็กมาก (ประมาณ 2 nm.) สารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 จะถูกกำจัดโดยวิธีกรองติดค้ำ (Sieve)

2). กลไกเนื่องจากแรงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Interaction) เนื่องจากโดยทั่วไป NF เมมเบรนจะมีประจุลบ กลไกการกำจัดเกลือจึงเกิดขึ้นโดยแรงผลักทางไฟฟ้าของประจุลบ อิออนลบยังมีประจุไฟฟ้ามากก็จะยิ่งถูกกำจัดได้มาก



รูปที่ 2.10 ออสโมซิส (ก) และ ออสโมซิสย้อนกลับ (ข) (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

2.2.4 ฟลักซ์และการต้านทานต่อการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน

เนื่องจาก NF เมมเบรนส่วนใหญ่จะมี Active Layer เป็น Hydrophilic และมีประจุลบอยู่บนตัวรองรับที่เป็น Hydrophobic UF เมมเบรน ซึ่งทำให้ NF เมมเบรนให้ค่าฟลักซ์ที่สูง ทั้งนี้เนื่องจากความเหมาะสมในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำของเมมเบรน และเนื่องจาก Active Layer ของ เมมเบรน จึงทำให้มีความต้านทานต่อการอุดตันมากขึ้นต่อ Hydrophobic Colloid น้ำมัน โปรตีน และ สารอินทรีย์อื่นๆ (Raman และคณะ, 1994)

2.2.5 โมเดลสำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำและสารละลายผ่าน NF เมมเบรน

2.2.5.1 Pore Model

โมเดลนี้ใช้ได้ทั้งกับ UF และ NF ซึ่งเป็นเมมเบรนที่มีรูพรุนมากกว่าที่จะใช้กับ RO เนื่องจากผลของความสามารถในการซึมผ่านได้สูงของเมมเบรน สมมติฐานของการไม่มีการไหลแบบ Coupling จึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ การไหลแบบ Coupling เป็นลักษณะการไหลแบบหนืด (Viscous Flow) สมมติให้รูของเมมเบรนเป็นรูปทรงกระบอกกลมที่มีรัศมีคงที่ตลอดเมมเบรน และโมเลกุลของตัวถูกละลายถูกแยกออกจากน้ำ เนื่องจากมีขนาดใหญ่กว่ารูของเมมเบรน หรือเนื่องจากแรงเสียดทานภายในรูของเมมเบรน

ค่าฟลักซ์ (Volumetric Water Flux) ของ Pore Model สามารถอธิบายได้โดย Poiseuille's Law โดยสมมติให้อยู่ในรูปของวัฏจักรของพาราโบลาไหลผ่านศูนย์กลาง ค่าความเร็วเฉลี่ยสามารถแสดงได้โดย

$$u = \frac{r^2}{8\nu} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (2.2)$$

โดยที่ u = ความเร็วเฉลี่ยของของเหลวในรูเมมเบรน

r = ค่ารัศมีเทียบเท่าของรูของเมมเบรน (Equivalent Cylindrical Pore Radius)

ν = ค่า Kinetic Viscosity ของของเหลว

$\frac{dP}{dx}$ = ค่า Gradient ของความดัน

ดังนั้น ค่าฟลักซ์ (Volumetric Water Flux) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$F_w = \frac{er^2}{8\nu} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (2.3)$$

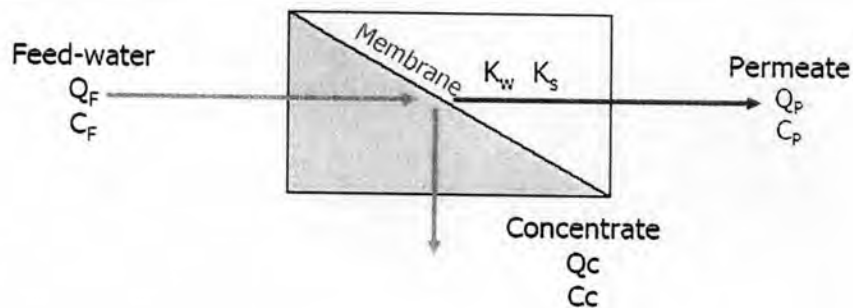
โดยที่ F_w = ค่า Volumetric Water Flux

e = สัดส่วนของพื้นที่เปิดของเมมเบรน (ความพรุน)

2.2.5.2 Solution-Diffusion Model

สมการที่ 2.4-2.9 อธิบายเมมเบรนที่มีการแพร่ (Diffusion) เกิดขึ้นเป็นตัวควบคุมการทำงานของเมมเบรน และแสดงการทำสมมูลมวลของน้ำ สารละลายต่างๆ Recovery พลั๊กซ์ของน้ำ และพลั๊กซ์ของสารละลายต่างๆ ตามลำดับ สมการที่ 2.4 - 2.12 แสดงวิธีการคำนวณหาค่า Mass Transfer Coefficient (MTCs) และ Concentration Gradients ซึ่งสามารถนำมาใช้หาค่า C_p ตามสมการที่ 2.13 โมเดลนี้ไม่พิจารณาถึงผลของ Concentration Polarization และการไหลแบบ Coupling ผ่านเมมเบรน ถึงแม้ว่าปรากฏการณ์นี้เป็นที่รู้กันว่าจะเกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของมวลในระบบการเมมเบรน โมเดลที่พิจารณาทั้ง Concentration Polarization หรือ Ion Coupling และ System Recovery ยังไม่มีการทำวิจัยในขณะนี้

อย่างไรก็ตาม โมเดลนี้จะพิจารณาผลของความดัน เปรอร์เซ็นต์ Recovery ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ และค่า MTCs ของทั้งตัวทำละลาย และตัวถูกละลาย เพื่อทำนายความเข้มข้นของน้ำ Permeate วิธีนี้มีข้อดีมากกว่าการใช้ เปรอร์เซ็นต์การกำจัดในการทำนายความเข้มข้นของน้ำ Permeate และใช้กันอย่างแพร่หลายในการบวนการผลิตน้ำที่ใช้เมมเบรน



$$Q_f = Q_p + Q_c \quad (2.4)$$

โดย Q_f = อัตราการไหลของน้ำ Influent (มล./วินาที)
 Q_p = อัตราการไหลของน้ำ Permeate (มล./วินาที)
 Q_c = อัตราการไหลของ Concentrate (มล./วินาที)

$$Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c \quad (2.5)$$

โดยที่ C_f = ความเข้มข้นของน้ำ Influent (กรัม/มล.)
 C_p = ความเข้มข้นของน้ำ Permeate (กรัม/มล.)
 C_c = ความเข้มข้นของ Concentrate (กรัม/มล.)

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (2.6)$$

โดยที่ R = Recovery

$$F_w = K_w [\Delta P - \Delta \pi] = \frac{Q}{A} \quad (2.7)$$

โดยที่ F_w = ค่าฟลักซ์ของน้ำ Permeate (มล./ตร.ซม.-วินาที)

K_w = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (มล./ตร.ซม.-วินาที-บรรยากาศ)

ΔP = ความแตกต่างระหว่างแรงดันของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน

$\Delta \pi$ = ความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมซิสของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน

$$F_s = K_s [C_m - C_p] \quad (2.8)$$

$$F_s = K_s \left[\left(\frac{C_f + C_c}{2} \right) - C_p \right] = \frac{Q_p \cdot C_p}{A} \quad (2.9)$$

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

K_s = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวถูกละลาย (ซม./วินาที)

C_m = ความเข้มข้นของสารละลายที่ผิวของเมมเบรน (กรัม/มล.)

A = พื้นที่ผิวของเมมเบรน (ตร.ซม.)

$$K_w = \frac{Q_p}{A \cdot \Delta P} \quad (2.10)$$

$$K_s = \frac{Q_p \cdot C_p}{A \cdot \Delta P} \quad (2.11)$$

$$\Delta C = [C_m - C_p] \quad (2.12)$$

$$= \left[\left(\frac{C_f + C_c}{2} \right) - C_p \right]$$

$$C_p = \frac{K_s \cdot C_f}{K_w (\Delta P - \Delta \pi) \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + K_s} \quad (2.13)$$

โมเดลถ่ายเทมวลที่พัฒนาเฉพาะมีการรวมการปรับปรุง Non-linear ของความดัน และความเข้มข้นที่แตกต่างระหว่างและผ่านเมมเบรน เช่นเดียวกับผลรวมของ recovery และการรวม Film theory ในโมเดลทำนายความเข้มข้นของน้ำ permeate

Film theory model สามารถใช้อธิบายการถ่ายเทมวลผ่านเมมเบรนโดยใช้ฟิล์มบนด้านน้ำเข้าและด้านน้ำ permeate ของเมมเบรน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของตัวละลายมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำเข้า ซึ่งเรียกว่า Concentration polarization ซึ่ง HSDM ในสภาวะคงที่และปรับปรุงด้วย film theory (HSDM-FT) แสดงดังสมการที่ 2.14

$$C_p = \frac{C_f \cdot K_s \cdot e^{F_w / k_b}}{K_w (\Delta P - \Delta \pi) \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + K_s \cdot e^{F_w / k_b}} \quad (2.14)$$

ค่า Solute mass transfer coefficient ถูกสมมุติเป็นค่าคงที่ทั้งในสมการ HSDM สมการที่ 2.13 และ HSDM-FT สมการที่ 2.14 อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปในสมการเชิงเส้นและใน film theory models ค่า Solute mass transfer coefficient ถูกสมมุติเป็นค่าคงที่และไม่เปลี่ยนค่าระหว่างการอินทิเกรต

การประมาณค่าเชิงเส้นของข้อมูลความเข้มข้นที่ไม่ใช่สมการเชิงเส้นของกระแส น้ำเข้าเมมเบรนนั้น จะรวมกับค่าคลาดเคลื่อนที่รู้ค่าไปในสมการ HSDM และ HSDM-FT ต่อมา ได้พัฒนา Integrated HSDM (IHSDM) โดยพัฒนาการอินทิเกรตและรวมกับสมการดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกระแสน้ำเข้า ไปในสมการ HSDM และ HSDM-FT ซึ่งสมการ IHSDM และ IHSDM-FT แสดงดังสมการที่ 2.15 และ 2.16

$$C_p = \frac{C_f \cdot K_s}{-RF_w} \ln \left(1 - \frac{RF_w}{F_w + K_s} \right) \quad (2.15)$$

$$C_p = \frac{C_f \cdot K_s}{-RF_w \cdot e^{F_w / k_b}} \ln \left(1 - \frac{RF_w}{F_w + K_s \cdot e^{F_w / k_b}} \right) \quad (2.16)$$

HSDM และ HSDM-FT ไม่ได้ชดเชยสำหรับการแปรผันในความดัน แรงดันออสโมติกหรือฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรน ปัจจุบันมีการพัฒนา Incremental diffusion model (IDM) และ Integrated osmotic pressure model (IOPM) ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในฟลักซ์ ความดันและแรงดันออสโมติกที่ผ่านเมมเบรน โมเดลที่มีและไม่มีการรวม Film theory แสดงดังสมการที่ 2.13-2.16 IDM และ IOPM แสดงดังสมการที่ 2.17 และ 2.18 และ IDM-FT และ IOPM-FT แสดงดังสมการที่ 2.19 และ 2.20

$$C_p = \frac{C_{f0}}{R} [(1 - R)^{Ks / (Fw + Ks)}] \quad (2.17)$$

$$C_p = \frac{C_f}{R} \left\{ 1 - \left[\left(\frac{\Delta P - \Delta \Pi_{out}}{\Delta P - \Delta \Pi_{in}} \right) \cdot (1 - R) \right]^{Ks / (Kw \Delta P + Ks)} \right\} \quad (2.18)$$

$$C_p = \frac{C_{f0}}{R} \left[1 - (1 - R)^{[Fw (1 - e^{Fw / kb}) + Ks] / (Fw + Ks)} \right] \quad (2.19)$$

$$C_p = \frac{C_f}{R} \left\{ 1 - \left(\frac{\Delta P - \Delta \Pi_{out}}{\Delta P - \Delta \Pi_{in}} \right)^{Ks / (Kw \Delta P + Ks)} \right. \\ \left. \times (1 - R)^{[e^{Fw / kb} Kw \Delta P] / Kw \Delta P + Ks} \right\} \quad (2.20)$$

โดยที่ C_{f0} = feed stream solute concentration at membrane inlet

C_{cf} = feed solute concentration

k_b = back diffusion mass transfer coefficient from the surface to the bulk

P_{in} = static pressure at inlet

P_{out} = static pressure at outlet

P_p = static pressure in permeate stream

r = recycle rate

$\Delta \pi_{in}$ = bulk osmotic pressure difference at membrane inlet

$\Delta \pi_{out}$ = bulk osmotic pressure difference at membrane outlet

2.2.5.3 Donnan Exclusion Model

NF เมมเบรนส่วนใหญ่มีประจุลบ เมื่อใช้เมมเบรนที่มีประจุ (Charged Membrane) กับสารละลายเกลือจะเกิดสภาวะ Dynamic Equilibrium ขึ้น อีออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของเมมเบรน (Counter Ion) จะมีความเข้มข้นสูงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ในขณะที่อีออนที่มีประจุเดียวกับประจุของเมมเบรน (Co-ion) จะมีความเข้มข้นต่ำ เมื่อเทียบกับสารละลายบริเวณนอก Membrane Phase (Bulk Solution) ทำให้เกิด "Donnan Potential" ปรากฏการณ์นี้จะทำให้ไม่มีการแพร่ (Diffusion) ของ Counter Ion จาก Membrane Phase ไปยัง Bulk Solution และเช่นเดียวกัน คือ ทำให้ไม่มีการแพร่ของ Co-ion จาก Bulk Solution ไปยัง Membrane Phase ซึ่ง Donnan Potential จะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้แรงดันในการขับเคลื่อนน้ำผ่านเมมเบรน โดยผลของ Donnan Potential จะทำให้เกิดการผลักออกของ Co-ion จากเมมเบรน และ

เนื่องจากความต้องการความเป็นกลางทางไฟฟ้า (Electroneutrality) จึงทำให้ Counter Ion ถูกกำจัดออกไปด้วย

สำหรับเกลือ $M_{Z_y}Y_{Z_m}$ ซึ่งแตกตัวเป็นไอออน M^{Z_m+} และ Y^{Z_y-} ที่สภาวะสมดุลค่า Salt Distribution Coefficient (K^*) แสดงได้ดังนี้

$$K = \left[\frac{C_{y(m)}}{C_y} \right] = \left[Z_y^{Z_y} \left(\frac{C_y}{C_m} \right)^{Z_y} \left(\frac{\gamma}{\gamma_m} \right)^{Z_y + Z_m} \right]^{\frac{1}{Z_m}}$$

โดยที่ Z_y แสดงประจุลบของไอออน C_y และ $C_{y(m)}$ คือ ความเข้มข้นของ Co-ion y ใน Bulk Solution และ Membrane Phase ตามลำดับ γ และ γ_m คือ Activity Coefficient และ C_m^* คือ Charge Capacity ของเมมเบรน ดังนั้น Rejection สามารถประมาณได้เป็น

$$\text{Rejection (R)} = 1 - K^*$$

โมเดลนี้สามารถทำนาย Rejection ในรูปฟังก์ชันของ Membrane Charge Capacity , ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบและประจุของไอออน ซึ่งอธิบายถึงการกำจัดสารละลาย แต่ไม่พิจารณาถึงผลของ Diffusive และ Convective Flux ซึ่งมีความสำคัญเช่นเดียวกันสำหรับเมมเบรนที่มีประจุอย่าง NF เมมเบรน

2.2.5.4 Extended Nernst-Planck Model

โมเดลนี้ให้ค่าฟลักซ์ของไอออนผ่านเมมเบรนที่มีประจุโดยสมการ

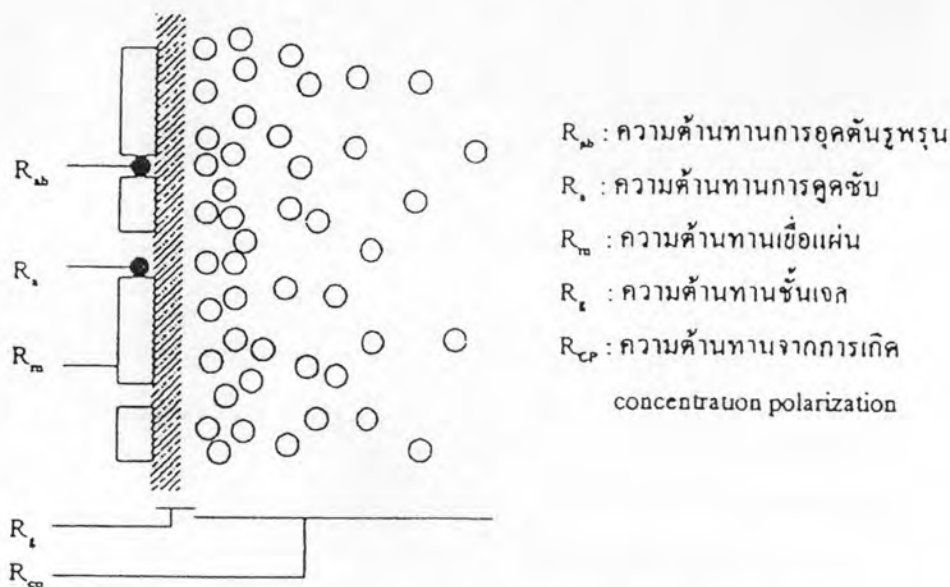
$$J_j = J_{wc_{j(m)}} + Z_j C_{j(m)} \frac{FE}{R_g T} - D_{j(m)} \frac{dC_{j(m)}}{dx} - C_{j(m)} D_{j(m)} d \left(\frac{\ln \gamma_{j(m)}}{dx} \right) \quad (2.21)$$

โดยที่ J_j , $C_{j(m)}$, $D_{j(m)}$, Z_j , $\gamma_{j(m)}$ คือฟลักซ์, ความเข้มข้น, Diffusivity, ประจุ และ Activity Coefficient ของไอออน j ตามลำดับ m แสดงถึง Membrane Phase, E คือ Donnan Potential และ F คือ Faraday's Constant จากสมการเทอมแรกแสดงถึง Solute Flux เนื่องจาก Convection เทอมที่สองแสดงถึงค่าฟลักซ์เนื่องจาก Donnan Potential และสองเทอมสุดท้ายอธิบายถึง Salt Flux เนื่องจาก Diffusion โมเดลนี้ใช้ทำนายการกำจัดตัวถูกละลาย ในรูปฟังก์ชันของความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ และประจุของไอออน เหมือนกับ

Donnan Equilibrium Model แต่สมการของ Nernst-Planck รวมผลของ Convective และ Diffusion Fluxs ซึ่งมีความสำคัญสำหรับ NF เมมเบรนด้วย

2.2.5.5 Resistance in series model

แบบจำลองอนุกรมความต้านทานอธิบายการลดลงของอัตราการผลิตน้ำว่าเกิดขึ้น เนื่องจากความต้านทานในการไหลเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความต้านทานต่างๆตามแบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (มันสิน ตัญกุลเวศม์, 2538)

R_t คือความต้านทานรวมในการไหลซึ่งเป็นผลบวกของความต้านทานเมมเบรน (R_m) และความต้านทานที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ความต้านทานที่เพิ่มขึ้นจาก 1) ความต้านทานจากการเกิดโพลาไรเซชัน (R_p) ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานเนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (R_{cp}) และเจล (R_g) 2) ความต้านทานเนื่องจากการเกิดการอุดตัน (Fouling) (R_f) ซึ่งได้แก่ ความต้านทานเนื่องจากการคูดจับ (R_a) และ ความต้านทานเนื่องจากการอุดตันรูพรุนของตัวถูกละลาย R_{pb} เป็นต้น ดังนั้น

$$R_t = R_m + (R_{cp} + R_g) + (R_a + R_{pb} + \dots) \quad (2.22)$$

$$R_t = R_m + R_p + R_f \quad (2.23)$$

ดังนั้นความต้านทานรวมจึงเป็นผลบวกของความต้านทานย่อย

โพลาริเซชันเป็นกระบวนการที่ผันกลับหรือสามารถล้างออกด้วยน้ำกลั่น ไม่ว่าจะใช้สภาวะใด ซึ่งเมื่อใช้น้ำทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน จะสามารถกำจัดเฉพาะชั้นโพลาริเซชันออกไปเท่านั้น แต่ไม่อาจทำลายชั้นที่อุดตัน (Fouling) ได้ ดังนั้น ความต้านทานการไหลของน้ำสำหรับแผ่นเมมเบรนที่ใช้แล้วหลังจากล้างด้วยน้ำกลั่น คือ ความต้านทานของเยื่อแผ่น R_m และ R_f

อัตราการผลิตน้ำและค่าการกักกันเป็นค่าที่แสดงสมรรถนะของกระบวนการ เช่นเดียวกับการออกซิเจนผันกลับ สมการของอัตราการผลิตน้ำเขียนในรูปของแรงขับเคลื่อนและความต้านทานต่อการไหล เป็นดังนี้

$$J_v = (\Delta P - \Delta \pi) / \mu_v R_t \quad (2.24)$$

เมื่อ J_v = อัตราการผลิตน้ำของการละลายผ่านแผ่นเมมเบรน (ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร.วินาที)

ΔP = ผลต่างความดันที่ใช้ให้กับสารละลาย (ปาสคาล)

$\Delta \pi$ = ผลต่างความดันออสโมติกของสารละลาย (ปาสคาล)

μ_v = ความหนืดของสารละลายที่ผ่านแผ่นเมมเบรน (ปาสคาล.วินาที)

R_t = ความต้านทานรวมต่อการไหลผ่าน (ต่อเมตร)

สำหรับสารละลายของสารโมเลกุลใหญ่ค่า $\Delta P \gg \Delta \pi$ จึงอาจตัดเทอมของ $\Delta \pi$ ที่สมการ 2.24 ลดรูปเป็น

$$J_v = \Delta P / \mu_v R_t \quad (2.25)$$

หลังการล้างแผ่นเมมเบรนที่ใช้แล้วด้วยน้ำสะอาด

$$J'_w = \Delta P / \mu_w (R_m + R_f) \quad (2.26)$$

เมื่อ J'_w คือ อัตราการผลิตน้ำของน้ำหลังการล้างแผ่นเมมเบรนที่ใช้แล้วด้วยน้ำ

μ_w คือ ความหนืดของน้ำที่ผ่านแผ่นเมมเบรน

R_m คำนวณจากสมการ 2.25 เมื่อสารละลายเป็นน้ำสะอาด

$$J'_w = \Delta P / \mu_w R_m \quad (2.27)$$

สมการ (2.22 – 2.27) แสดงขั้นตอนการคำนวณความต้านทานต่าง ๆ จากผลการทดลอง เมื่อล้างแผ่นเมมเบรนด้วยสารทำความสะอาด และด้วยขั้นตอนที่เหมาะสม จะสามารถกำจัด R_f โดยทดสอบค่าอัตราการผลิตน้ำของน้ำสะอาดว่าใกล้เคียงกับแผ่นเมมเบรนที่ยังไม่ได้ใช้งานหรือไม่

แบบจำลองอนุกรมความต้านทานเป็นแบบจำลองที่ง่าย เมื่อนำไปอธิบายผลการทดลองและคำนวณค่าความต้านทานหลัก ๆ ออกมา (ได้แก่ R_m , R_p และ R_f) จะทำให้เข้าใจกลไกหรือการลดลงของอัตราการผลิตน้ำได้ชัดเจนขึ้นว่า ขึ้นอยู่กับตัวแปรอะไรบ้าง ปกติ R_m มีค่าต่ำ คือไม่เกิน 10% ของความต้านทานรวม ส่วน R_p และ R_f นั้นขึ้นอยู่กับสภาวะการดำเนินงาน (เช่น ความดัน ความเร็วที่ป้อนสารละลายผ่านแผ่นเมมเบรน) และชนิดของสารละลายนั้นว่ามีส่วนประกอบอย่างไร จากขั้นตอนการคำนวณความต้านทานที่อธิบายมาแล้วขั้นต้น จะเห็นได้ว่าเราอาจสามารถแยก R_{cp} ออกจาก R_p เพราะคาดว่าชั้นของตัวถูกละลายที่สะสมเป็นเจล สามารถละลายน้ำได้ R_f ก็เช่นเดียวกัน เกิดจากกลไกที่ซับซ้อน

การวิเคราะห์ความต้านทานต่าง ๆ เป็นฟังก์ชันกับตัวแปรในการดำเนินงานทำให้ทราบว่าความต้านทานใด มีผลต่อการลดลงของอัตราการผลิตน้ำมากกว่ากัน และควรปรับเปลี่ยนสภาวะการทดลองอย่างไร เพื่อให้ได้ค่าอัตราการผลิตน้ำสูงสุด การเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีน น้ำนมด้วยแผ่นเมมเบรนเส้นใยกลวง (โพลีซินโฟล) และพบว่า R_p แปรผันตรงกับความดัน ส่วน R_f ไม่ขึ้นกับสภาวะการทำงาน และเป็นความต้านทานหลักที่มีผลต่ออัตราการผลิตน้ำ

การเกิดการอุดตัน (Fouling) ในการกรองน้ำเสาวรสโดยวิเคราะห์ความต้านทานต่าง ๆ และพบว่า R_p และ R_f เพิ่มขึ้นกับความดัน เพราะที่ความดันสูงเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization) มาก และโมเลกุลถูกพาไปสะสมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น และในรูปพูนมากขึ้น การเพิ่มอัตราไหลช่วยลดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization) จึงลดความต้านทานทั้ง R_p และ R_f ความเข้มข้นที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยความต้านทานเนื่องจากชั้นโพลาไรซ์เป็นความต้านทานหลักที่ทำให้อัตราการผลิตน้ำลดลง

2.2.5.6 Gabra Model

แบบจำลองนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Gabra และคณะ(1999) ซึ่งสามารถทำนายผลของความดันที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด โดยแบบจำลองนี้เกิดจากการรวมกันของสมการ Extended Nernst-Planck และ Film Theory ดังสมการ

$$(1 - R) = \frac{-1}{K_{effi}} J_v + \ln \Phi$$

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_{fi}}$$

โดยค่า J_v คือ ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด

K_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

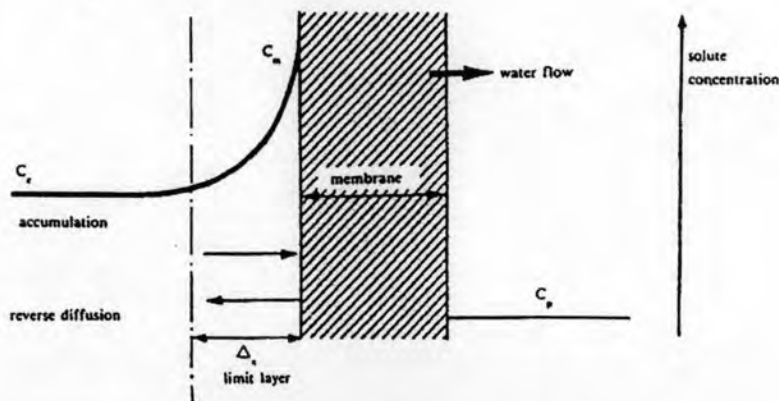
Φ คือ ค่า Transmittance

ซึ่งค่า K_{eff} และ Φ สามารถ plot กราฟระหว่างค่า $\ln(1 - R)$ และ J_v

2.2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการ NF

2.2.6.1 Concentration Polarization

ในระบบไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic) โดยรวมทั้งระบบ NF จะมีชั้นน้ำที่เรียกว่า Boundary Layer อยู่ติดกับผิวหน้าของเมมเบรน ชั้นน้ำดังกล่าวนี้จะอยู่เป็นอิสระโดยไม่ผสม กับน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ภายนอก ความหนาของ Boundary Layer แปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำ และความปั่นป่วน น้ำสะอาดถูกบังคับให้ออกจากชั้นนี้และกระจายซึมผ่านเมมเบรนออกไปภายนอก ทำให้มีการสะสมตัวของสารละลายต่าง ๆ เกิดขึ้นภายใน Boundary Layer จนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำดิบหลายเท่า ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิด Concentration Polarization ระดับของการเกิด Concentration Polarization อาจแสดงได้ด้วยอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นสูงสุด (ที่ผิวของเมมเบรน) ของสารละลายใน Boundary Layer และความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำดิบ หรือ $\frac{C_m}{C_c}$ ในรูปที่ 2.12



$$\text{The polarization concentration} = \frac{C_m}{C_c}$$

รูปที่ 2.12 Concentration Polarization ที่เกิดขึ้นในระบบ NF (มันลิน ดันจุลเวคม์,2538)

สมรรถนะในการกำจัดสารละลายของเมมเบรนขึ้นอยู่กับ Concentration Polarization เป็นอย่างมาก เนื่องจากการสะสมตัวของเกลือแร่ใน Boundary Layer ทำให้เกิดผลเสียต่าง ๆ ต่อระบบ NF ที่กำลังทำงานอยู่ดังต่อไปนี้

- 1). ทำให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้นเป็นผลให้อัตราการผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) ลดลง

2). ทำให้มีการรั่วไหลของสารละลายผ่านเมมเบรน (Salt Flux) เพิ่มขึ้น เป็นผลให้น้ำที่ผลิตได้มีมลทินมากขึ้น

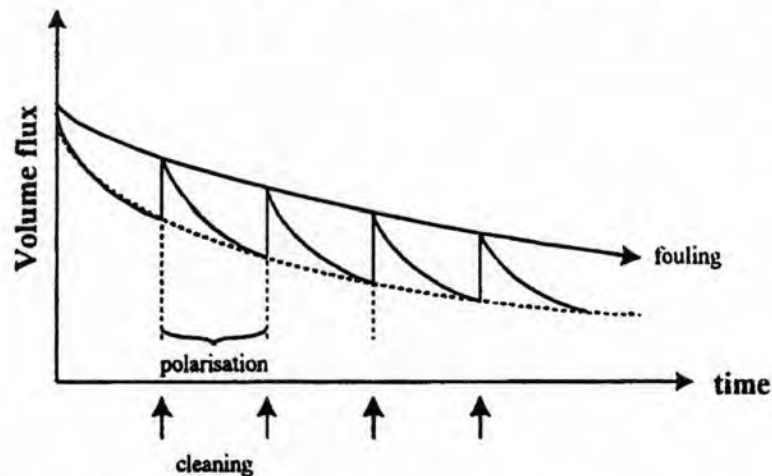
3). แรงเมมเบรนให้เสื่อมสภาพเร็วขึ้น

4). ทำให้มีการตกผลึกของ CaCO_3 และ/หรือ CaSO_4 หรือสารประกอบ

อื่น ๆ

2.2.6.2 การเกิดฟาวลิง (Fouling)

ฟาวลิงจะใช้สำหรับอธิบายการสูญเสียสภาพการกรองแบบ Irreversible ซึ่งไม่สามารถแก้ไขสภาพให้เหมือนเดิมได้โดยใช้แรงดันของน้ำหรือสารเคมี ซึ่งจะแตกต่างจากการเกิด Concentration Polarization ที่สามารถแก้ไขได้ด้วยการล้างย้อนหรือการทำความสะอาด ฟลักซ์ที่ลดลงเนื่องจาก เกิด Concentration Polarization จะเกิดขึ้นค่อนข้างเร็วและเมื่อทำการล้างย้อนหรือทำความสะอาดเมมเบรนแล้วฟลักซ์ก็จะเพิ่มกลับมาได้อีก แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ฟลักซ์ที่กลับคืนมาได้จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จึงทำให้ค่าฟลักซ์โดยรวมมีค่าลดลง



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของฟลักซ์กับระยะเวลาเดินระบบ (มันลิน ตันจุลเวศม์, 2538)

ฟาวลิงที่เกิดบนเมมเบรนส่วนใหญ่ เป็นผลมาจากการติดเกาะของสารอินทรีย์ในรูปพูนของเมมเบรน ทำให้ลดอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน และไม่สามารถทำให้กลับมาใช้งานได้ดีเหมือนเดิม ซึ่งอาจจะเกิดได้จากการอุดตันของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

1). การอุดตันบนด้านนอก (External Surface/ Cake Formation Fouling) ซึ่งจะเกิดจากการก่อตัวของชั้น cake หรือ gel บนผิวหน้าของเมมเบรนด้านน้ำดิบ ซึ่งการอุดตันใน ลักษณะนี้คือการเกิด Concentration Polarization

2). การอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรน (Pore Blocking/Pore Blockage Fouling) เป็นการอุดตันที่เกิดจากอนุภาคเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนของตัวเมมเบรน ซึ่งการอุดตันแบบนี้ยังสามารถแบ่งได้อีก 3 กรณีคือ

- การอุดตันอย่างสมบูรณ์ (Complete Pore Blocking) เกิดจากอนุภาคขนาดเท่า กับรูพรุนลงไปอุดตัน และไม่สามารถหลุดออกมาได้อีก และน้ำผ่านได้น้อย มาก
- การอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ (Intermediate Pore Blocking) อนุภาคที่อุดตันมีขนาดใกล้เคียงกับรูพรุน แต่น้ำยังสามารถผ่านไปได้พอสมควร
- การอุดตันแบบธรรมดา (Standard Pore Blocking) เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กกว่ารูพรุนเข้าไปติดค้างอัดตัวอยู่ในรูพรุนของเมมเบรน

การอุดตันในแบบ Pore Blocking/Pore Blockage แต่ละชนิดนั้นจะไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยการเปลี่ยนลักษณะการไหลของของเหลวเช่น การล้างย้อน หรือการทำความสะอาด และการอุดตันลักษณะนี้จะทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลงตั้งแต่ 5-20 เปอร์เซ็นต์ จนกระทั่ง 80-95 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของเมมเบรนและชนิดของสารละลาย

โมเดลของการเกิดฟาวลิงนั้นไม่สามารถหาได้ง่ายนัก ซึ่งแสดงได้ 3 รูปแบบโมเดล โดยรูปแบบที่ใช้ที่แสดงการเกิดฟาวลิง ประเภทต่าง มีดังนี้

$$J = J_0 / (1 + J_0 \cdot K_m \cdot t) \quad (\text{membrane limited})$$

$$J = J_0^2 / (1 + J_0^2 \cdot K_c \cdot t) \quad (\text{cake formation})$$

$$J = J_0 \cdot \exp(-K_p \cdot t) \quad (\text{pore blockage})$$

สมการทำนายการเกิดฟาวลิง ถือว่ามีความสำคัญมากในการออกแบบระบบเมมเบรนอย่างมากเพื่อที่จะให้เกิดฟาวลิง กับระบบน้อยที่สุดและยืดอายุการใช้งานของระบบเมมเบรนอีกด้วย

2.2.6.3 ลักษณะสมบัติของเมมเบรน

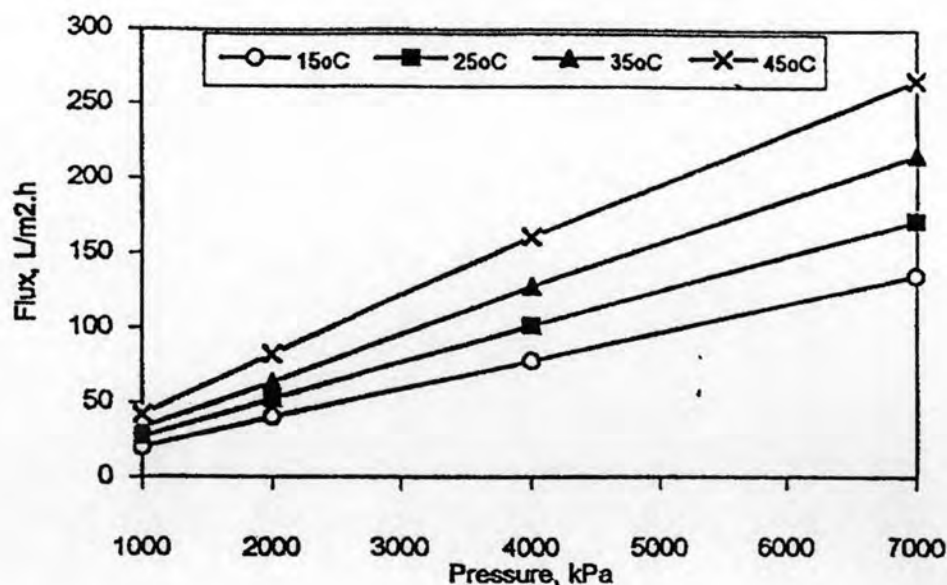
ลักษณะสมบัติของเมมเบรนมีบทบาทสำคัญต่อค่า เปอร์เซ็นต์การกำจัด และฟลักซ์ โดยลักษณะสมบัติของเมมเบรนประกอบไปด้วย วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน ขนาดรูของเมมเบรนซึ่งวัดโดย MWCO สภาพะในการดำเนินระบบ (ความดันสูงสุดที่ใช้ ช่วงของพีเอช และอุณหภูมิ) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะแตกต่างกันสำหรับแต่ละบริษัทผู้ผลิตเมมเบรน

NF เมมเบรนจะยอมให้น้ำและไอออนของสารอนินทรีย์ที่มีวาเลนซ์เดียว (Monovalent Inorganic Ions) ไหลผ่านได้ แต่ไม่ยอมให้สารอนินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ และ ไอออนของสารอนินทรีย์ที่มีหลายวาเลนซ์ (Multivalent Inorganic Ions) ไหลผ่าน เปอร์เซ็นต์การกำจัดโซเดียมคลอไรด์โดยทั่วไปประมาณ 0-20 เปอร์เซ็นต์ สามารถกำจัดกรดอินทรีย์ได้ 80-100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุล ไอออนของสารอนินทรีย์ที่มีสองวาเลนซ์จะถูกกำจัดในช่วง 30-90 เปอร์เซ็นต์

สำหรับเมมเบรนที่มีความสามารถในการซึมผ่านได้ที่สูงและมีประจุ เช่น เมมเบรนสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ การกำจัดสารอินทรีย์จะมีค่าสูงหรือไม่ขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ สารอินทรีย์ที่มีประจุจะถูกกำจัดมากกว่าสารอินทรีย์ที่ไม่มีประจุ ดังนั้นค่า MWCO จึงไม่ใช่ค่าที่ดีในการบอกว่าสารอินทรีย์ขนาดเท่าใดที่จะถูกกำจัดโดยเมมเบรน เพราะเหตุนี้บริษัทผู้ผลิต จึงไม่ให้ค่า MWCO สำหรับเมมเบรนที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์

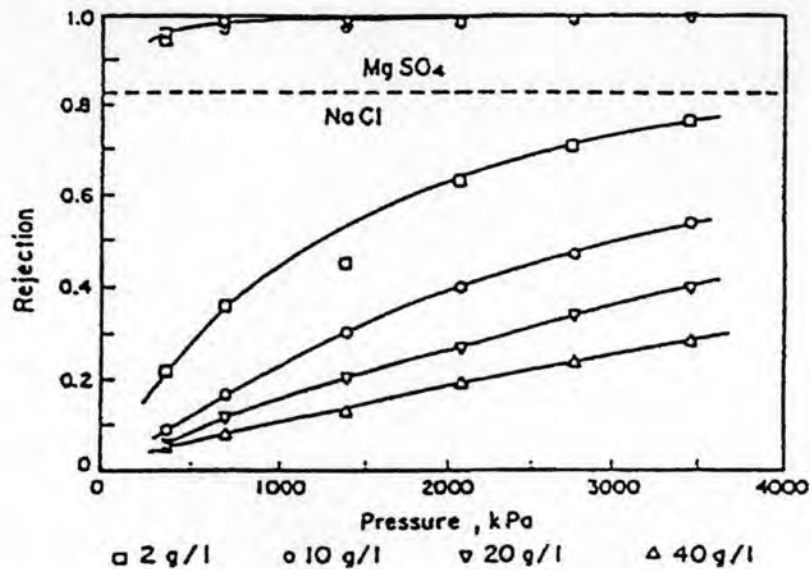
2.2.6.4 ความดันที่ใช้

ความดันที่ใช้มีผลกระทบที่สำคัญต่อค่าฟลักซ์ และ เปอร์เซ็นต์การกำจัด สำหรับ NF เมมเบรน จากสมการของ Solution-Diffusion Model และ Pore Model Duranceau ได้แสดงให้เห็นว่าที่ความดันสูง การเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์จะมีค่ามากกว่าที่ความดันต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ผลของแรงดันต่อค่าฟลักซ์ สำหรับเมมเบรนชนิด DS5 (Baker, 2004)

เปอร์เซ็นต์การกำจัด โดย NF เมมเบรน มีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันที่ใช้ (รูปที่ 2.15) ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.13 ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความดันสูงก็จะสามารถผลิตน้ำ Permeate ที่มีความเข้มข้นต่ำหรือมีค่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดสูง หรือสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อใช้ความดันสูงก็จะทำให้ได้อัตราการไหลของน้ำ Permeate สูง ในขณะที่สารละลายไม่สามารถไหลผ่านเมมเบรนด้วยอัตราที่สูงเท่าความเข้มข้นของน้ำ Permeate จึงมีค่าต่ำลง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Dilution Effect



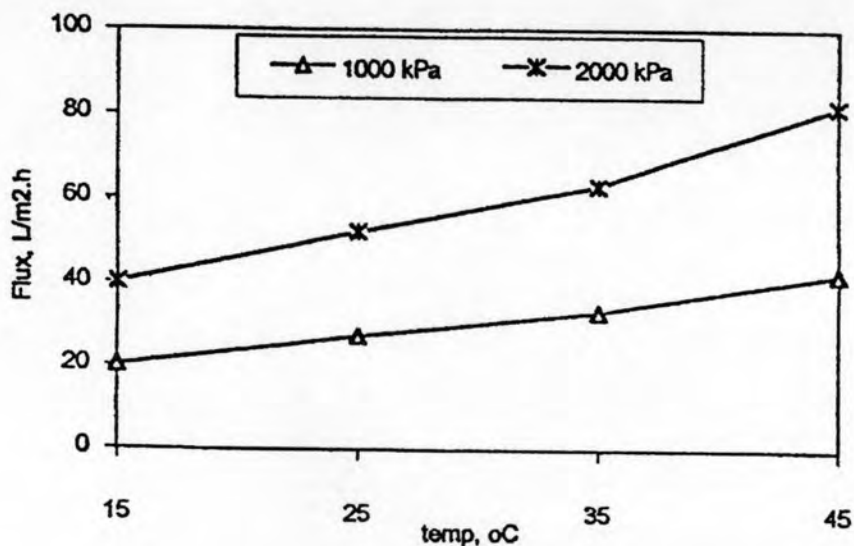
รูปที่ 2.15 ผลของแรงดันที่ใช้และความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบกับเปอร์เซ็นต์การกำจัด โดย NF เมมเบรน (Baker, 2004)

* 2.2.6.5 ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ

ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบมีผลกับ ฟลักซ์ของสารละลาย และ เปอร์เซ็นต์การกำจัด Duranceau และคณะ (1992) ได้รายงานผลการทดลองโดยใช้เมมเบรนแบบ NF70 ในการกำจัด Dibromochloropropane (DBCP) และได้ผลว่าค่าฟลักซ์ของสารละลาย เพิ่มขึ้นตาม Concentration Gradient การกำจัดโซเดียมคลอไรด์มีค่าลดลงตามการเพิ่มของความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ จะเห็นได้ว่าที่แรงดัน 2000 kPa เปอร์เซ็นต์การกำจัดโซเดียมคลอไรด์ลดลงจาก 60 เปอร์เซ็นต์ เป็น 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 2 g/l เป็น 40 g/l ปัจจัยที่มีผลเล็กน้อยกับการลดลงของเปอร์เซ็นต์การกำจัด คือการลดลงของค่าฟลักซ์แต่ปัจจัยที่มีผลมากเกิดขึ้นเนื่องจากความสามารถในการซึมผ่านเมมเบรนที่มากขึ้นของสารละลาย

2.2.6.6 อุณหภูมิ

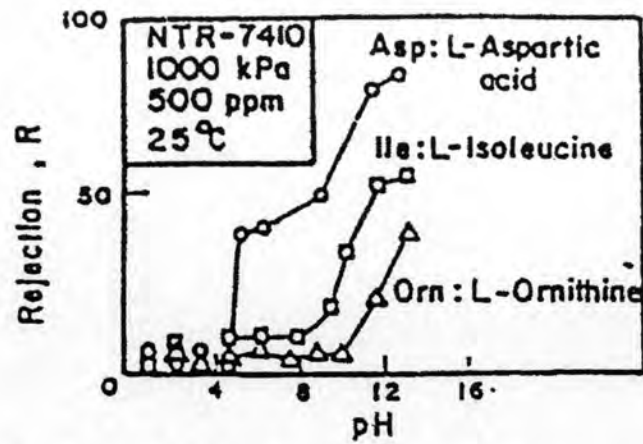
การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารละลายที่เข้าสู่ระบบจะเพิ่มความสามารถในการซึมผ่าน เมมเบรนของน้ำมาก ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การกำจัดมีค่าคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การทดลองกับเมมเบรนแบบ DDS และได้ผลว่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเหตุผลที่เป็นไปได้สำหรับกรณีนี้ก็คือ ที่อุณหภูมิสูง ความหนืดของน้ำจะมีค่าลดลง ทำให้มันสามารถซึมผ่าน เมมเบรนได้ง่ายขึ้น รูปที่ 2.16 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าฟลักซ์



รูปที่ 2.16 ผลของอุณหภูมิต่อค่าฟลักซ์ (Baker, 2004)

2.2.6.7 พีเอช

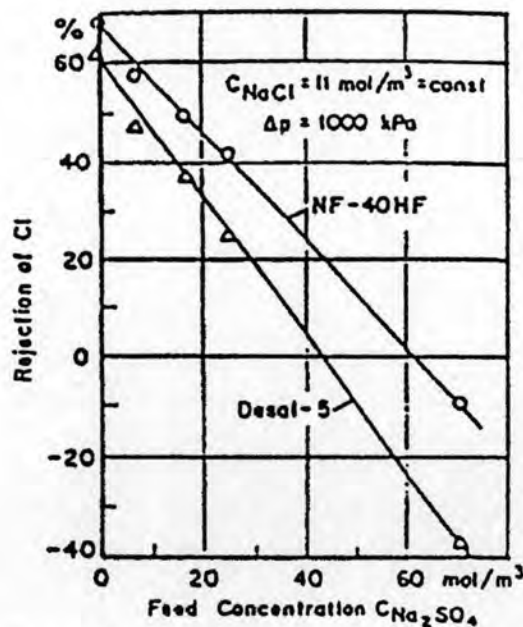
พีเอชของสารละลายมีอิทธิพลอย่างมากในการทำงานของ NF เมมเบรน โดยที่ค่าพีเอชต่ำๆ เปอร์เซ็นต์การกำจัดจะมีค่าต่ำ และที่ค่าพีเอชสูงๆ เปอร์เซ็นต์การกำจัดจะมีค่าสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือที่พีเอชที่มีค่าต่ำกว่า Isoelectric Point (คือ ค่าพีเอชที่ประจุทั้งหมดเปลี่ยนจากบวกเป็นลบ หรือจากลบเป็นบวก) กรดอะมิโนจะเปลี่ยนเป็นประจุบวกและสามารถผ่านเมมเบรนได้ง่าย ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัด มีค่าต่ำ ในขณะที่ เมื่อค่าพีเอชสูงกว่า Isoelectric Point ซึ่งก็คือที่ค่าพีเอชสูงๆ กรดอะมิโนจะมีประจุลบ และจะถูกขับออกโดยประจุลบของผิวเมมเบรน



รูปที่ 2.17 ผลของพีเอชกับ เปอร์เซ็นต์การกำจัดของกรดอะมิโน โดย NF เมมเบรน (Baker, 2004)

2.2.6.8 สารอื่นๆ ในน้ำ

เปอร์เซ็นต์การกำจัดโดย NF เมมเบรน จะมีค่าลดลง ถ้ามีสารอื่นๆ อยู่ในน้ำ (รูปที่ 2.18) จากรูปจะเห็นได้ว่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดของอิออนคลอไรด์มีค่าลดลงตามการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตในการละลาย เนื่องจากซัลเฟตมีประจุมากกว่าคลอไรด์ เมมเบรนจึงสามารถกำจัดซัลเฟตได้ดีกว่าคลอไรด์ ส่วนโซเดียมมีประจุบวก ทำให้สามารถผ่านเมมเบรนได้ง่าย ดังนั้นจึงเกิดความไม่สมดุลทางไฟฟ้าขึ้นทั้งสองด้านของเมมเบรน

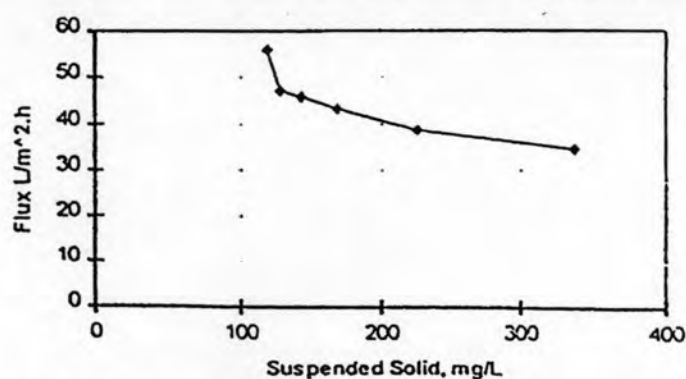


รูปที่ 2.18 ผลของสารอื่นๆ ในน้ำต่อ เปอร์เซ็นต์การกำจัด โดย NF เมมเบรน (Baker, 2004)

2.2.6.9 สารแขวนลอย

ขนาดของอนุภาคของสารแขวนลอยมีบทบาทต่อการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน เนื่องจากขนาดของอนุภาคจะเป็นตัวตัดสินว่าสารแขวนลอยนั้นจะผ่านเข้าสู่รูของเมมเบรน หรือติดขวางอยู่ที่ทางเข้ารูของเมมเบรน ซึ่งในกรณีหลังจะมีผลกระทบต่ออัตราการอุดตันของเมมเบรน เช่นเดียวกับกรณีของคอลลอยด์ ขนาดและรูปร่างของโมเลกุลสารอินทรีย์ก็มีบทบาทสำคัญต่อการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนเช่นเดียวกัน

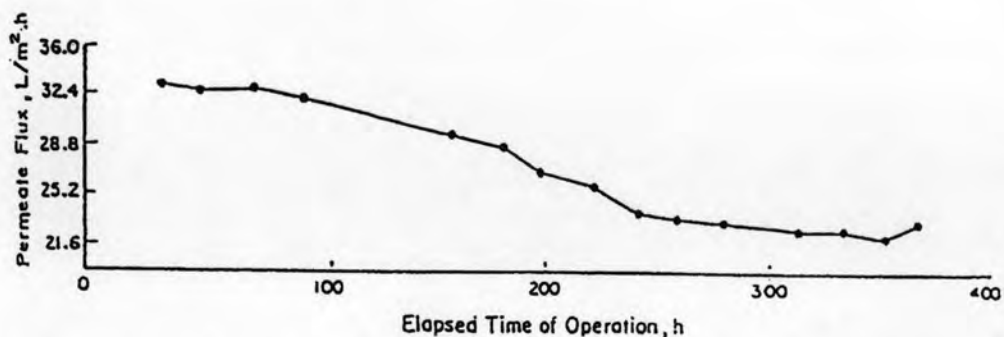
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารแขวนลอยกับอัตราการไหลของน้ำ Permeate ผ่านเมมเบรนแบบ T2A ผลในรูปที่ 2.19 แสดงให้เห็นว่าฟลักซ์มีค่าลดลง กับการเพิ่มความเข้มข้นของสารแขวนลอย การลดลงของฟลักซ์เนื่องมาจากการอุดตันของเมมเบรน



รูปที่ 2.19 ผลของสารแขวนลอยต่อค่าฟลักซ์ในการกำจัดกรดฮิวมิก แรงดันที่ใช้ 20 บาร์ MWCO 6000 (Baker, 2004)

2.2.6.10 ระยะเวลาในการดำเนินระบบ

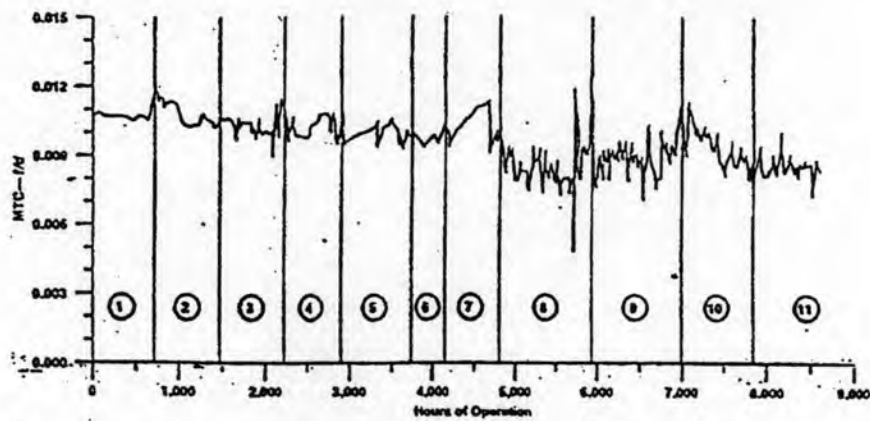
การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ กับเวลาในการดำเนินระบบสำหรับ NF เมมเบรน ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำหรือน้ำเสียที่ใช้



รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบของ NF (Baker, 2004)

การลดลงของค่าฟลักซ์เกิดขึ้นเนื่องจากการอุดตันของสารอินทรีย์หรือการเติบโตของจุลชีพภายในเมมเบรน เพราะในน้ำผิวดินประกอบไปด้วยสารอินทรีย์และการเติบโตของจุลชีพถูกเร่งให้เกิดขึ้นในช่วงที่ไม่มีการทำงานของเมมเบรนเป็นเวลา 18 ชม. ระหว่างการทำงานในแต่ละวัน

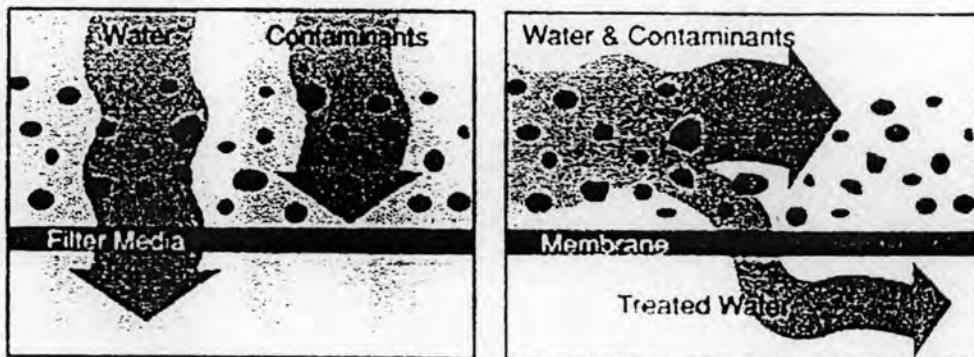
สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (K_w) ที่ลดลงตามเวลาเป็นผลมาจากการอุดตันและการเสื่อมสภาพของเมมเบรน (รูปที่ 2.21) จากรูปจะเห็นได้ว่าการลดลงของค่า K_w จะมีค่าคงที่ในช่วงเวลา 0-4750 ชม. จากชั่วโมงที่ 4750-5750 ค่า K_w จะลดลงอย่างมากและรวดเร็ว แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มการอุดตันของเมมเบรน หลังจากนั้น ค่า K_w จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำความสะอาดเมมเบรน



รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงของค่า K_w กับเวลาในการดำเนินระบบ (Baker, 2004)

2.2.6.11 Crossflow Velocity

กระบวนการกรองที่ใช้กับกระบวนการ NF เป็นกระบวนการที่เรียกว่า Crossflow Filtration ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการกรองตามปกติที่ใช้ เช่น การกรองผ่านชั้นทราย ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 รูปแสดงการกรองตามปกติ (ซ้าย) และ Crossflow Filtration (ขวา)

โดยใช้ Crossflow Filtration สารที่ถูกกำจัดออกโดยเมมเบรนจะไหลออกจากผิวหน้าของเมมเบรนอย่างต่อเนื่อง ทำให้ไม่เกิดการสะสมตัวของสารเหล่านั้น ลดปัญหาของ Concentration Polarization และทำให้ผิวหน้าของเมมเบรนพร้อมที่จะกำจัดสารต่างๆ ที่ไหลเข้ามาอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่ายังมีความต้องการ การทำความสะอาดเมมเบรนอีกเป็นระยะๆ แต่การทำทำความสะอาดด้วยตัวเอง Crossflow Filtration ก็ทำให้อายุการใช้งานของเมมเบรนนานขึ้น ซึ่งเป็นผลดีทางด้านเศรษฐกิจ

ตัวแปรสำคัญที่จะทำให้ Crossflow Filtration ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ คือ Crossflow Velocity โดยจะต้องมีค่ามากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมของสารต่างๆ ที่ถูกกำจัดโดยเมมเบรนนอกจากนี้ ค่า Crossflow Velocity ที่เหมาะสมยังจำเป็นเพื่อให้เมมเบรนมีประสิทธิภาพในการแยกสารที่ไม่ต้องการออกอย่างเต็มที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารละลาย โดยค่า Crossflow Velocity ที่เหมาะสมนี้จะทำให้เกิดการผสมของสารละลายที่ Boundary Layer อย่างเพียงพอ และป้องกันการเกิดขึ้นของ Concentration Polarization

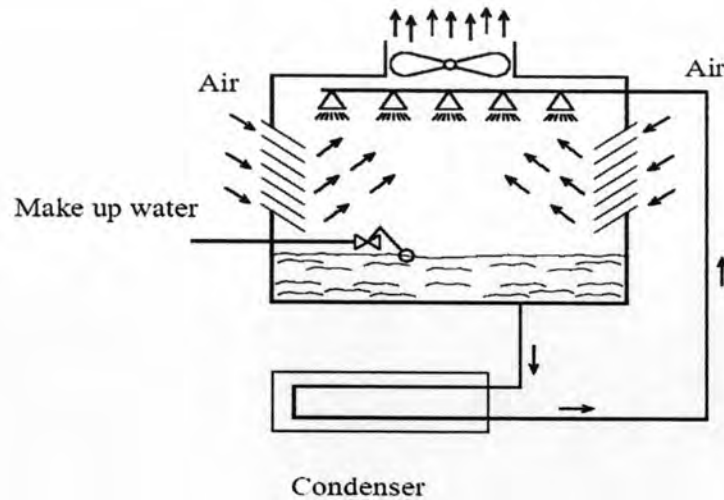
2.2.6.12 เปอร์เซนต์ Recovery

เปอร์เซนต์ Recovery หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาตรน้ำสะอาดที่ผลิตได้ ต่อปริมาตรน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำสะอาด

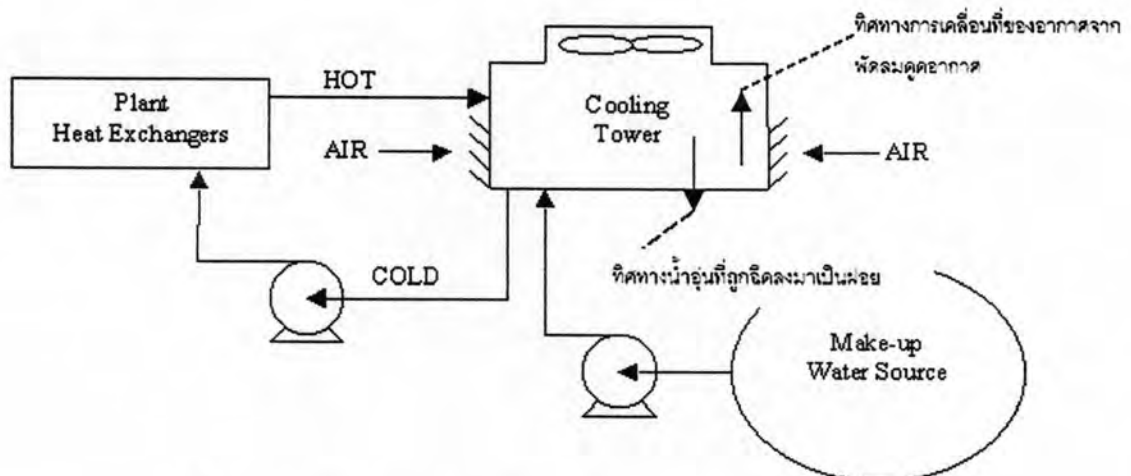
เป้าหมายที่สำคัญของกระบวนการเมมเบรนทุกชนิดคือ ประสิทธิภาพที่สูงในการกำจัดสารที่ไม่ต้องการออก โดยมีปริมาณการผลิตน้ำ Permeate ที่มากที่สุด ซึ่งวิธีหนึ่งที่สามารถทำให้ผลิตน้ำ Permeate ได้มากคือ การใช้ค่า เปอร์เซนต์ Recovery ในการดำเนินระบบที่สูง

2.3 หอทำน้ำเย็น (Water Cooling Tower)

หอทำน้ำเย็น เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทหนึ่ง เหมาะสำหรับการลดอุณหภูมิ น้ำปริมาณมาก ๆ โดยป้อนให้น้ำและอากาศไหลสวนทางกัน หรือไหลตัดกัน น้ำจะพ่นกระจายทั่ว พื้นที่หน้าตัดของหอ (tower) จากด้านบนแล้วให้ไหลผ่านชั้นวัสดุ (stack packing or fill) ภายในหอจะออกแบบให้น้ำและอากาศสัมผัสกันได้ดีในระหว่างที่ไหลผ่าน เพื่อระเหยน้ำออกส่วนหนึ่ง พร้อมกับนำความร้อนแฝงไปด้วย การระบายความร้อนออกจากน้ำในรูปของความร้อนแฝงของไอ น้ำที่ไปเพิ่มความชื้นให้กับอากาศ คือหลักการทำงานของหอหล่อเย็นนั่นเอง



ที่มา : www.thaienergetic.com/train_cooling.ppt
รูปที่ 2.23 หลักการทำงานของหอทำน้ำเย็น(Cooling Tower)



ที่มา : www.innovationidea.com/Application/Cooling%20Tower.pdf

รูปที่ 2.24 ไดอะแกรมการทำงานของระบบหอทำน้ำเย็นโดยทั่วไป

2.3.1 หลักการของระบบหอทำน้ำเย็น

จากรูปที่ 2.24 การทำงานของระบบหอทำน้ำเย็น เริ่มจากการดึงน้ำเย็นจากหอทำน้ำเย็น มาผ่าน Plant Heat Exchangers เพื่อให้น้ำเย็นได้แลกเปลี่ยนความร้อนกับอุปกรณ์ระบาย ความร้อน ต่าง ๆ ของเครื่องจักรจากนั้น น้ำเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นกลายเป็นน้ำอุ่น น้ำอุ่นจะถูกส่งกลับมายัง หอทำน้ำเย็นอีกทีหนึ่งเพื่อฉีดออกมาเป็นฝอย ในทิศทางสวนทางกับการเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนของ อากาศจากพัดลมดูดอากาศ (ดังรูปประกอบ) เป็นผลให้น้ำอุ่นถ่ายเทความร้อนให้กับ อากาศและมี อุณหภูมิเย็นลงกลายเป็นน้ำเย็นและส่งเข้าไปยัง Plant Heat Exchangers อีกครั้ง หนึ่ง

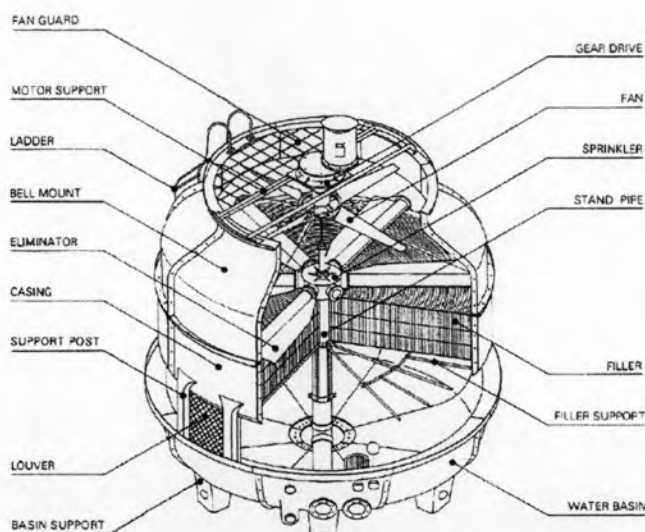
ในระหว่างที่น้ำอุ่นถูกฉีดลงมาเป็นฝอยจะมีการสูญเสียของน้ำไปจากระบบฉีดน้ำเป็นฝอย (Drift Losses) และจากการระเหยของน้ำ (Evaporation Losses) เมื่อน้ำในระบบหอทำน้ำเย็นสูญเสียไปมากๆ ความเข้มข้นของแร่ธาตุในน้ำจะสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของหอทำน้ำเย็นต่ำลง จำเป็นต้องปล่อยน้ำในระบบทิ้ง (Blow down or Bleed-off water) และเติมน้ำ (Make-up water) เข้ามาใหม่เพื่อให้ความเข้มข้นของแร่ธาตุในน้ำต่ำลงและการระบาย ความ ร้อนของหอทำน้ำเย็นดีขึ้น โดยต้องเติมน้ำเข้ามาใหม่ตามสูตรข้างล่างนี้

$$\text{Make up water} = \text{Drift Losses} + \text{Evaporation Losses} + \text{Blow down water}$$

2.3.2 ชนิดของหอทำน้ำเย็น

2.3.2.1 แบ่งตามลักษณะการไหลของอากาศ

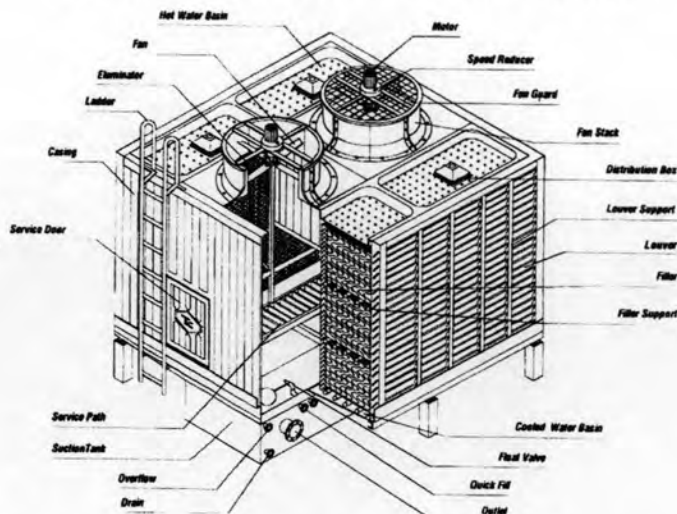
1). ชนิดอากาศไหลสวนทางกับน้ำ (counter flow)



ที่มา : www.thaienergetic.com/train_cooling.ppt

รูปที่ 2.25 หอทำน้ำเย็นชนิดอากาศไหลสวนทางกับน้ำ

2). ชนิดอากาศไหลขวางทางกับน้ำ (cross flow)



ที่มา : http://www.thairefrig.or.th/download/thairefrig_or_th/cooling%20tower.pdf

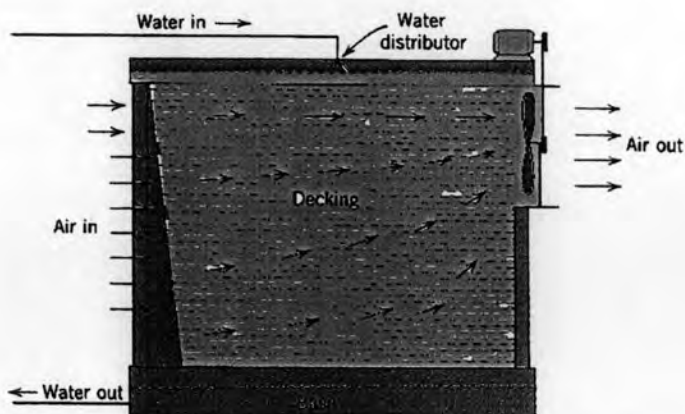
รูปที่ 2.26 หอทำน้ำเย็นชนิดอากาศไหลขวางทางกับน้ำ

ชนิดอากาศไหลสวนทางกับน้ำ ได้เปรียบทางด้านราคา สมรรถนะสูง ส่วนชนิดอากาศไหลขวางทางกับน้ำ ได้เปรียบทางด้านแรงต้านการไหลของอากาศต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่อากาศไหลเข้ามากกว่า สิ่งสกปรกที่อุดตันมีผลต่อการทำงานน้อยกว่าและการสูญเสียของน้ำเนื่องจากการ กระเซ็น (drift loss) ต่ำ

2.3.2.2 แบ่งตามลักษณะการทำงานของพัดลม

1). ชนิดพัดลมดูดอากาศไหลผ่านได้ระบายความร้อน (induced draft)

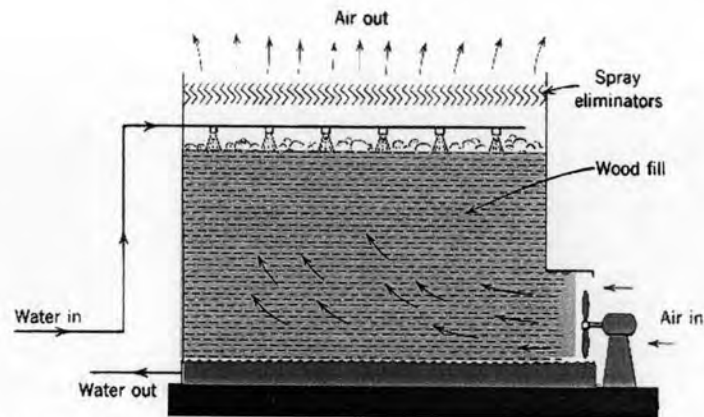
ชนิดนี้ส่วนใหญ่จะออกแบบให้อากาศขึ้นไหลผ่านพัดลม ชุดขับเคลื่อนพัดลม ผลทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นมีอายุการใช้งานสั้นลง



ที่มา : http://mte.kmutt.ac.th/mte_learning/Air%20Conditioning/uples7.3.htm

รูปที่ 2.27 หอทำน้ำเย็นชนิดพัดลมดูดอากาศไหลผ่านได้ระบายความร้อน

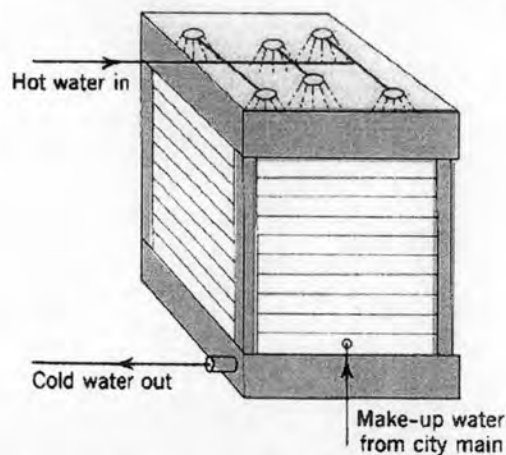
2). ชนิดพัดลมเป่าอากาศไหลผ่านได้ระบายความร้อน (forced draft) ชนิดนี้อากาศขึ้นไม่ไหลผ่านชุดพัดลม และระบบขับเคลื่อนอายุการใช้งานของอุปกรณ์เหล่านี้จึงยาวกว่า ขณะทำงานอากาศไหลผ่านได้ระบายความร้อนไม่สม่ำเสมอ ทำให้สมรรถนะต่ำ



ที่มา : http://mte.kmutt.ac.th/mte_learning/Air%20Conditioning/uples7.3.htm

รูปที่ 2.28 หอทำน้ำเย็นชนิดพัดลมเป่าอากาศไหลผ่านได้ระบายความร้อน

3). ชนิดอากาศไหลตามธรรมชาติ (Natural draft) ชนิดนี้ใช้หลักการอากาศร้อนลอยตัวขึ้น อากาศเย็นไหลเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดการไหลของอากาศ จึงไม่ต้องใช้พลังงานขับเคลื่อนอากาศ ข้อเสียเปรียบคือ ความสามารถต่ำ ตัวใหญ่ ราคาแพง



ที่มา : http://mte.kmutt.ac.th/mte_learning/Air%20Conditioning/uples7.3.htm

รูปที่ 2.29 หอทำน้ำเย็นชนิดอากาศไหลตามธรรมชาติ

2.3.2.3 แบ่งตามชนิดของได้ระบายความร้อน

1). ชนิดเป็นแผ่นฟิล์ม (film type) ได้ระบายความร้อนชนิดนี้ทำจากพลาสติกแผ่นบาง รีดเป็นลอนให้มีพื้นที่มาก น้ำที่ไหลผ่านถูกกระจายออกเป็นแผ่นบางและไหลเกาะติดไปกับได้ระบายความร้อน เมื่อน้ำหลุดลอยไปกับอากาศ (drift loss) น้อย ข้อเสียมีช่องทางอากาศและน้ำไหลเล็กจึงอุดตันได้ง่าย

2). ชนิดน้ำตกกระแทก (splash type) ชนิดนี้ น้ำตกกระแทกได้ระบายความร้อน น้ำจะแตกกระจายเป็นเม็ดเล็ก ๆ เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวระบายความร้อนวิธีหนึ่ง เม็ดน้ำจะ ลอยอยู่ในกระแสการไหลของอากาศ การสูญเสียน้ำเนื่องจากกระเซ็นจึงสูง ข้อดีคือช่องทางอากาศไหลใหญ่ อุดตันยาก

2.3.2.4 แบ่งตามระบบน้ำ

1). ระบบเปิด (open type) น้ำระบายความร้อน สัมผัสกับอากาศโดยตรง น้ำระเหยตัวเพื่อระบายความร้อน สิ่งสกปรกที่ปนมากับน้ำและอากาศ ถูกสะสมในหอทำน้ำเย็น จึงต้องควบคุมคุณภาพน้ำโดยการถ่ายทิ้ง เติมสารเคมี หรือใช้ไฟฟ้าสลายตะกอน ฯลฯ

2). ระบบปิด (closed type) ความร้อนของน้ำในระบบถ่ายเทผ่านผนังของ ระบบไปสู่น้ำและอากาศที่อยู่ภายนอก น้ำในระบบไม่ระเหยตัว ไม่สัมผัสกับอากาศ น้ำจึงสะอาดอยู่ ตลอดเวลา ไม่สร้างปัญหาการอุดตันในระบบ ข้อเสียของระบบนี้ มีขนาดใหญ่ ราคาแพง การทำงานซับซ้อน

2.3.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบหอทำน้ำเย็น

1). ตะกรัน คือ กลุ่มหินปูนจำพวกเกลือแคลเซียมและแมกนีเซียมหรือซิลิกา ตามปกติจะพบมากในกลุ่มเกลือแคลเซียม และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3 และ MgCO_3) ซึ่งเกิดบริเวณพื้นผิวถ่ายเทความร้อน เช่น คอนเดนเซอร์หรือชุดแลกเปลี่ยนความร้อน(Heat Exchanger) ลักษณะเป็นของแข็งคล้ายหิน

สาเหตุของการเกิดตะกรัน คือ

- คุณภาพน้ำที่เติมเข้าระบบ Cooling Tower ไม่ดีพอ เช่นมีค่า TDS, ความกระด้าง(Hardness) สูงเกินไปทำให้มีโอกาสเกิดตะกรันได้ง่าย ปกติตะกรันจะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อน้ำมีความ กระด้าง มากกว่า 180 mg/l

- การใช้สารเคมีในการป้องกันตะกรันและตะไคร่น้ำ เนื่องจากสารเคมีตกค้างทำให้สิ่งปนเปื้อนในน้ำมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดตะกรันได้

- อัตราหมุนเวียนของน้ำในระบบสูง ทำให้อัตราการระเหยของน้ำสูงจึงเกิดตะกรัน

- ตะไคร่น้ำและสาหร่ายต่างๆ ทำให้เกิดตะกรันได้

- ขาดการบำรุงรักษาอย่างถูกวิธี เช่นไม่ถ่ายน้ำ ปล่อยให้ Cooling Tower สกปรก ก็เป็นสาเหตุของการเกิดตะกรันได้

2). ตะไคร่น้ำ คือ กลุ่มของสาหร่ายเซลล์เดียวหรือสาหร่ายชนิดอื่นๆ ที่อยู่ในน้ำ เมื่อมีจำนวนมากจะก่อให้เกิดความสกปรกและสร้างเส้นใย เกิดการอุดตันในเส้นท่อหรือ Heat Exchanger /Condenser ได้

สาเหตุของการเกิดตะไคร่น้ำ คือ

- Cooling Tower ตั้งอยู่ในจุดที่ได้รับแสงแดด ทำให้กลุ่มตะไคร่น้ำสังเคราะห์แสงและเจริญเติบโตได้

- อุณหภูมิพอเหมาะต่อการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำ

- ไม่มีสารเคมีที่ออกฤทธิ์ในการยับยั้งหรือทำลายตะไคร่น้ำ

ผลของตะไคร่น้ำกับระบบระบายความร้อน

- สร้างความสกปรกบริเวณ Cooling Tower ซึ่งอาจจะเป็นส่วนหนึ่งทำให้การไหลของน้ำใน Cooling Tower ผิดปกติ และทำให้การถ่ายเทความร้อนยากขึ้น

- ซากหรือสวมนิดส่วนหนึ่งของตะไคร่น้ำที่หลุดเข้าสู่เครื่อง และ Condenser ทำให้เกิดการอุดตัน

- ซากของตะไคร่น้ำสร้างความสกปรกบริเวณ Basin ทำให้ต้องล้าง Cooling Tower และถ่ายน้ำบ่อยขึ้น

- สร้าง Biofilm ซึ่งเป็นสาเหตุของตะกรันและการกัดกร่อน

3). ปัญหาการเจริญเติบโตของเชื้อโรค โดยเชื้อโรคที่พบได้บ่อยในระบบ Cooling Tower ได้แก่ เชื้อแบคทีเรีย *Legionella pneumophila* ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของโรค Legionnaire's Disease เมื่อคนได้รับเชื้อโรคนี้เข้าไป เชื้อโรคจะไปเพาะพักอยู่ในปอดและทำลายปอด ซึ่งอาจจะทำอันตรายถึงชีวิตได้

4). ปัญหาสนิมและการกัดกร่อน สนิมและการกัดกร่อนมีกระบวนการเกิดที่ค่อนข้างซับซ้อนแต่พอสรุปได้ว่า สนิมจะเกิดขึ้นได้ดีที่ PH ต่ำและสูงมากเกินไป ปกติสนิมและการกัดกร่อนจะไม่เกิดหรือเกิดน้อยมากในช่วง PH ตั้งแต่ 8.5 ถึง 12.7

สนิมสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในน้ำมีคลอรีน (Cl_2) เกลือคโลไรด์และก๊าซไฮโดรเจน (H_2S)ผสมอยู่เนื่องจากเหล็กจะสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่าย สนิมและการกัดกร่อนเมื่อเกิดขึ้นมากๆ อาจจะต้องหยุดระบบแล้วเปลี่ยนท่อน้ำใหม่ ซึ่งทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก

2.3.4 น้ำหล่อเย็น (Cooling Water)

น้ำหล่อเย็นเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง มีวิธีการลดอุณหภูมิของน้ำ ด้วยการระเหยกลายเป็นไอของน้ำตัวกลาง ซึ่งในองค์ประกอบในน้ำหล่อเย็นส่วนใหญ่ มักจะประกอบไปด้วยสารเคมีในการบำบัดน้ำหล่อเย็นเพื่อป้องกันการเกิดตะกรัน แต่ คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบหอทำน้ำเย็นอาจเปลี่ยนแปลงได้บ้างขึ้น ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำที่นำมาใช้และประเภทของอุตสาหกรรมนั้นๆ

ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบของน้ำที่ออกจากระบบหล่อเย็นในอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ย

ที่มา : (Kaliappan, 2005)

Parameter	Value
pH	7
Conductivity (ms/cm)	3350
Total hardness (mg/l)	351
Calcium hardness (mg/l)	256
Total dissolved solids (mg/l)	2500
Total suspended solids (mg/l)	50
Chloride (mg/l)	713
Sodium (mg/l)	678
Potassium (mg/l)	54
Sulphate (mg/l)	233

ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบของน้ำที่ออกจากระบบหล่อเย็นในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า
ที่มา : (Zhang, 2008)

Parameter	Mean value	Range
pH	8.55	8.2–8.75
Temperature (°C)	18	5.0–21.0
Turbidity (NTU)	7	5.0–23
Total dissolved solid (mg/L)	1342	1200–1400
Suspended solid (mg/L)	10	7.0–22
Conductivity (µs/cm)	1500	1300–2000
Dissolved oxygen (mg/L)	9.4	8–10
COD (mg/L)	3.5	3–4.8
Total Fe (mg/L)	150	50–280
Silica as SiO ₂ (colloidal) (mg/L)	140	50–200
Remaining chlorine (mg/L)	0.03	0.02–0.05
Alkalinity (CaCO ₃) (mg/L)	356	350–370
Inorganic nitrogen (mg/L)	0.424	0.3–0.5

2.4 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation, UV)

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นช่วงแสงที่ตาของมนุษย์จะมองเห็นได้ แต่ถึงอย่างไรก็ตามรังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้ก็มีคุณสมบัติเหมือนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ คือ มีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสงและเป็นที่ยอมรับแล้วว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้มีอยู่ในแสงอาทิตย์ซึ่งมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคด้วยเช่นกัน แต่รังสีต่างๆซึ่งมีต้นกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์นี้ส่วนใหญ่มักถูกดูดกลืน, หักเหหรือสะท้อนออกไปโดยชั้นบรรยากาศซึ่งห่อหุ้มโลกอยู่ (บรรยากาศชั้นเทอร์โมสเฟียร์ และชั้นบนของเมโซเฟส) ก่อนที่จะผ่านลงมาถึงพื้นผิวโลกได้ ทำให้รังสีที่สามารถผ่านลงมาถึงพื้นผิวโลกได้มีเพียงร้อยละ 49 ของรังสีทั้งหมดเท่านั้น และรังสีที่ผ่านลงมาได้ส่วนใหญ่เป็นรังสีอินฟราเรด (infrared) ถึงร้อยละ 46 และรังสีที่มองเห็นได้ (Visible light) อีกร้อยละ 45 คงเหลือเป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ตเพียงร้อยละ 9

มนุษย์สามารถสร้างรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้โดยอาศัยหลอดไฟชนิดพิเศษซึ่งภายในบรรจุไอระเหยของสารปรอท ซึ่งลักษณะของหลอดจะคล้ายกับหลอดไฟ fluorescent เพียงแต่มงภายในของหลอดไม่ได้ฉาบสาร phosphorescent (ที่ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีอัลตราไวโอเล็ตให้เป็นแสงสี

ชาวที่สายตามนุษย์สามารถมองเห็นได้) หลอดไฟยูวีที่สร้างขึ้นมาขายเพื่อใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำมักให้กำเนิดคลื่นที่มีความยาวคลื่นประมาณ 253.7 นาโนเมตร โดยแก้วที่ใช้ทำหลอดต้องเป็นแก้วพิเศษที่ยอมให้แสงยูวีส่องผ่านได้ตลอด เช่น Quartz หรือแก้วที่มีเนื้อซิลิกาสูงมาก ๆ เป็นต้น โดยธรรมชาติตาของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้แต่รังสีนี้อาจทำให้วัสดุสีขาวมีความจ้ำจื้นได้

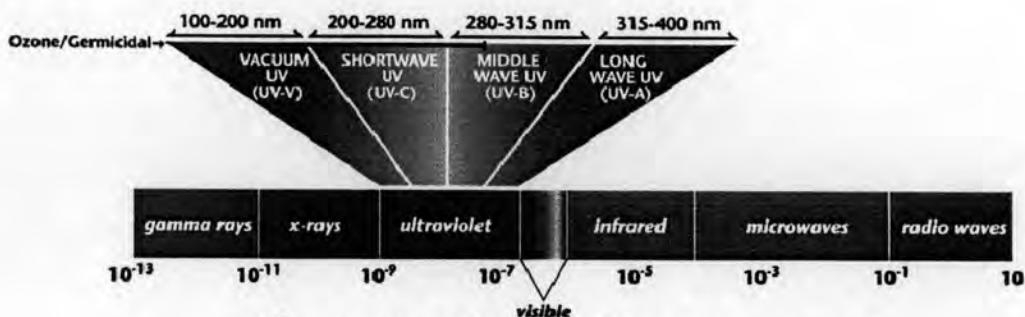
คลื่นแสงยูวีมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,000 – 3,900 แองสตรอม (Angstrom หรือ A ° โดยที่ 1 เซ็นติเมตร หรือประมาณ 0.4 นิ้ว มีค่าเท่ากับ 100,000,000 angstrom) ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ตออกได้ 4 ช่วงตามความยาวคลื่น ดังนี้คือ

- ช่วงคลื่นยาว หรือ UV-A (ตั้งแต่ 3,200 – 3,900 A °) รังสีในช่วงนี้ไม่ทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสามารถพบได้ในแสงแดดที่ส่องผ่านชั้นบรรยากาศลงมาถึงพื้นผิวโลก เนื่องจากก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ซึ่งห่อหุ้มโลกอยู่สามารถดูดกลืนได้น้อยมาก มีอำนาจในการฆ่าเชื้อโรคได้ต่ำ

- ช่วงคลื่นปานกลาง หรือ UV-B (ตั้งแต่ 2,800 – 3,200 A °) รังสีในช่วงนี้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหลายประเภท และรังสีช่วงนี้สามารถพบได้ในแสงแดดซึ่งส่องลงมาถึงผิวโลก เนื่องจากก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศสามารถดูดกลืนไว้ได้เป็นเพียงบางส่วนเท่านั้น ซึ่งถือได้ว่ามีอำนาจฆ่าเชื้อโรคได้ถ้ามีเวลาสัมผัสพอเพียงและเป็นแสงสำหรับอาบแดดเพื่อให้ผิวคล้ำ

- ช่วงคลื่นสั้น หรือ UV-C (ตั้งแต่ 2,000 – 2,800 A °) รังสีในช่วงนี้เป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อสิ่งมีชีวิต จึงถือได้ว่ามีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ดีที่สุด แต่ตามปกติจะไม่พบ ในแสงแดดซึ่งส่องลงมาถึงผิวโลก เนื่องจากเมื่อรังสีนี้เข้ามาถึงชั้นบรรยากาศของโลกก็จะถูกก๊าซโอโซนในชั้นสตราโทสเฟียร์ดูดกลืนไว้ทั้งหมด

- ช่วงคลื่นที่เรียกว่า Vacuum UV (ตั้งแต่ 1,000 – 2,000 A °) รังสีในช่วงนี้ไม่ค่อยมีการศึกษามากนักเนื่องจากไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

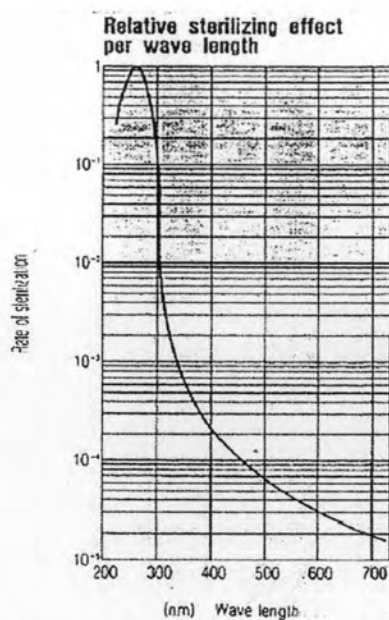


รูปที่ 2.30 สเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Chiyoda, 1996)

แต่อย่างไรก็ตามมนุษย์เพิ่งจะเริ่มนำรังสีอัลตราไวโอเล็ตมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1919 หลังจากที่ก่อนหน้านี้หลายปีมาแล้วที่มนุษย์ทราบว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้มีความสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ โดยในระยะเริ่มแรกนั้นมีการนำรังสีอัลตราไวโอเล็ตมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในระบบผลิตน้ำที่ต้องการคุณภาพสูง การฆ่าเชื้อโรคโดยรังสีนี้จะเกิดขึ้นเพียงชั้นบางๆตามความสามารถที่รังสีจะผ่านไปถึงได้ แต่ในกรณีน้ำที่มีความสกปรก, ของแข็งแขวนลอยหรือสารละลายต่างๆผสมอยู่ รังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้จะมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้ต่ำมากเพียงไม่กี่มิลลิเมตรนับจากผิวน้ำลงไป ความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้ต่ำนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากความสามารถในการดูดกลืนรังสีของน้ำและสารต่างๆในน้ำรวมถึงการบังแสงของของแข็ง จึงได้มีความพยายามในการแก้ปัญหาโดยการพยายามกำหนดให้น้ำเสียซึ่งไหลผ่านหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบไม่มีความปั่นป่วนและมีความลึกน้อยมากๆ แต่อย่างไรก็ตามปัญหาอีกอย่างหนึ่งของการฆ่าเชื้อโรคโดยวิธีนี้ก็คือการจะตรวจสอบว่าน้ำเสียนั้นสัมผัสกับรังสีได้อย่างทั่วถึงหรือไม่ ซึ่งวิธีนี้จึงยังคงเป็นปัญหาและปรับปรุงต่อไป

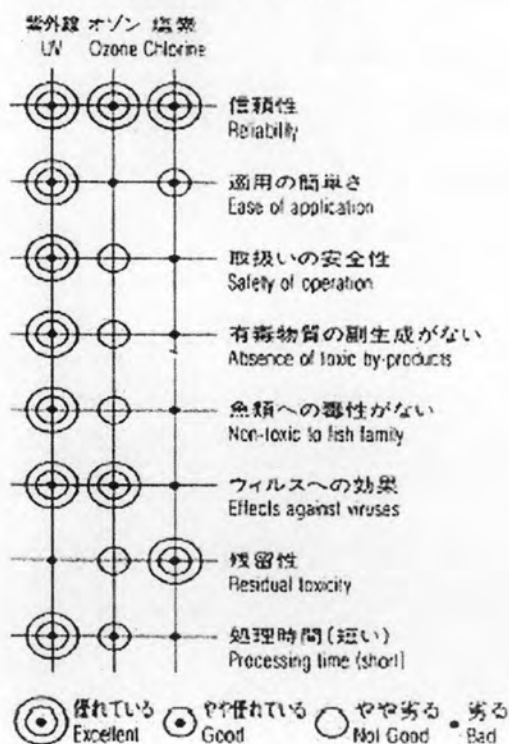
โดยการที่รังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ก็เนื่องมาจากความสามารถในการดูดกลืนพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตขององค์ประกอบต่างๆที่รวมกันเป็นเซลล์ โดยพลังงานจะกระจายไปยังส่วนต่างๆ ในลักษณะการกระตุ้นทางไฟฟ้าและเข้าไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าของสารต่างๆภายในเซลล์ โดยเฉพาะสารประกอบพวก Purine , Pyridimine Bases Thymine ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ Nucleoproteins , Cytosine และ Uracile

โดยสรุปจากการศึกษาที่ผ่านมาทั้งหมดพบว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 2,500 - 2,600 \AA เป็นช่วงความยาวคลื่นที่มีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีที่สุด และความสามารถนี้จะลดลงอย่างมากเมื่อความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 2,900 - 3,000 \AA และจะยังคงลดลงเรื่อยๆจนถึงความยาวคลื่นของแสงขาว (Visible Light) ซึ่งมีความยาวคลื่นที่ 5,000 \AA ดังแสดงในรูปที่ 3.31 และรูปที่ 3.32



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Chiyoda, 1996)

Comparison with other sterilizers



รูปที่ 2.32 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตกับโอโซนและคลอรีน (Chiyoda, 1996)

2.4.1 หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

หลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ

2.4.1.1 หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันสูง (High – pressure lamp)

โดยหลอดความดันสูงนี้ภายในหลอดจะบรรจุด้วย argon หรือไฮปรอทและหลอดขั้วแบบ epoxidated electrodes (wolfram wires coated with strontium and barium carbonates) ตัวหลอดทำจากวัสดุท่อควอทซ์ (quartz pipe) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 15 จนถึง 30 มิลลิเมตรและมีขั้วหลอดปิดอยู่ปลายทั้งสอง หลอดควอทซ์ซึ่งบรรจุปรอทที่ความดันสูง (ประมาณ 1-10 atm) เมื่อทำงานจะมีความร้อนเกิดขึ้นจนถึง 300 องศาเซลเซียส โดยหลอดชนิดนี้จะกำเนิดแสงขาว (visible light) , รังสีอินฟราเรด (infrared ray) และรังสีอัลตราไวโอเล็ตซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 365.0 – 366.3 นาโนเมตร

2.4.1.2 หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันต่ำ (Low – pressure lamp)

หลอดชนิดนี้สร้างขึ้นจากท่อแก้ว uviol รังสีที่เกิดขึ้นมาจากไฮปรอทซึ่งบรรจุอยู่ภายในหลอดแก้วมีความดันประมาณ 0.001 atm โดยปกติหลอดชนิดนี้จะมีขนาด 15 – 60 W. ความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อทำงานประมาณ 40 องศาเซลเซียส หลอดความดันต่ำนี้จะมีรังสีอัลตราไวโอเล็ตอยู่ประมาณ 70% ของรังสีที่เกิดขึ้นทั้งหมดและ 60% ของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เกิดขึ้นจะมีความยาวคลื่น 253.7 nm. ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเชื้อโรคต่างๆ

2.4.2 หน่วยที่ใช้ในการวัดปริมาณ(Dosage)ของแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ให้กับน้ำ

ในขณะที่ปริมาณการใช้สารเคมีต่างๆ (Chemical Dosage) วัดหรือแสดงได้ด้วยน้ำหนัก เช่น ต้องใช้สารส้ม 50 มก./ล. หรือ 230 กก./วัน เป็นต้น แต่ปริมาณการให้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV Dosage) จะวัดได้ด้วยหน่วย ไมโครวัตต์ - วินาที/ตร.ซม. ซึ่งเกิดจากผลคูณระหว่างความเข้มข้นของแสงใน 1 หน่วยพื้นที่ (หน่วยไมโครวัตต์/ตร.ซม.) กับเวลาสัมผัสระหว่างแสงและน้ำ (หน่วยวินาที) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Ultrad ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 ไมโครวัตต์-วินาที/ตร.ซม. ก็ได้

จากการที่เชื้อโรคต่างๆมีความต้านทานต่อแสงยูวีได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นความต้องการแสงยูวีเพื่อฆ่าเชื้อโรคควรมีค่าอยู่ในช่วง 3,400 – 8,000 ไมโครวัตต์-วินาที/ตร.ซม. อย่างไรก็ตามเพื่อให้มีความแน่ใจในการฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงยูวีจึงควรใช้ปริมาณแสงยูวีไม่น้อยกว่า 20,000

ไมโครวัตต์-วินาที /ตร.ซม. ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ในกรณีเช่นนี้หลอดไฟยูวีควรให้ปริมาณแสง ไม่ต่ำกว่า 30,000 ไมโครวัตต์-วินาที/ตร.ซม. ที่ความยาวคลื่น 2537 Å ทั้งนี้เพราะมักมีการสูญเสีย แสงยูวีบางส่วนเกิดขึ้นเสมอ

2.4.3 ขีดจำกัดและข้อดีของการใช้รังสียูวีในการฆ่าเชื้อโรค

จากการที่รังสียูวีจะสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ก็ต่อเมื่อเชื้อมันสัมผัสกับรังสี ทำให้ในน้ำที่ทำการฆ่าเชื้อโรคด้วยวิธีนี้จะต้องปราศจากความขุ่นหรือสี มิเช่นนั้นจะทำให้แสงยูวีไม่สามารถส่องผ่านได้ตลอดความลึกของน้ำ สาเหตุอีกอย่างหนึ่งในอดีตที่ทำให้การฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีไม่ได้ ได้รับความนิยมก็คือไม่สามารถบอกถึงสาเหตุของความล้มเหลวของรังสียูวี ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากหลอดเสียหรือมีความสกปรกมาจากการส่องผ่านของรังสียูวี แต่ในปัจจุบันเราสามารถวัดระดับความเข้มของแสงได้ ทำให้สามารถทราบถึงสาเหตุของความผิดปกติของแสงยูวี และแก้ไขจุดบกพร่องได้

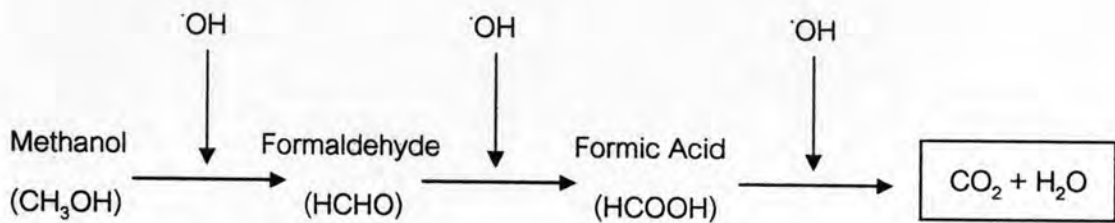
ตารางที่ 2.6 แสดงค่าพลังงานในแต่ละชนิดของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลต่างๆ

ที่มา : Chiyoda (1996)

BOND	Bond Energy(cal/mol)	BOND	Bond Energy(cal/mol)
O-O	33.2	H-Cl	103
N-N	38.4	H-H	104
C-Si	69.3	C-F	105
C-N	69.7	O-H	111
C-Cl	78.5	O=O	117
C-C	83.1	H-F	135
C-O	84.0	C=C	145
N-H	93.4	C=O	173
C-H	98.8	C≡C	198

จากตารางเปรียบเทียบ แสดงความยาวคลื่นแสงสัมพันธ์กับพลังที่เกิดขึ้นต่อความยาวคลื่นและจากตารางแสดงให้เห็นถึงสารประกอบอินทรีย์ที่ซึ่งมีอะตอมประกอบรวมกัน โดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวล ซึ่งมีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง 50 – 150 cal/mol ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่อยู่ในช่วงของคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งสามารถทำลายแรงยึดเหนี่ยวได้

จากหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแบบความดันต่ำที่ใช้ในระบบฆ่าเชื้อโรค นอกจากจะให้กำเนิดรังสีความยาวคลื่นขนาด 253.7 nm. แล้วยังให้กำเนิดรังสีขนาดความยาวคลื่นอื่นๆอีก รวมถึงความยาวคลื่นขนาด 184.9 nm. ซึ่งความยาวคลื่นในช่วงนี้ง่ายต่อการถูกดูดกลืนในน้ำและทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxidation) และให้กำเนิด สารประกอบไฮดรอกซี (Hydroxy radical, OH) โดยสารประกอบนี้มีความสามารถในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ได้ รวมถึงสามารถย่อยสลายได้โดยตรงจากรังสีขนาดความยาวคลื่น 253.7 และ 184.9 nm. โดยตัวอย่างแผนภูมิการย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้



2.5 งานวิจัยที่ผ่านมา

Yung และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาของก๊าซ perchloroethylene(PCE), 1,1-dichloroethylene(DCE), trichloroethylene(TCE) ในกระแสอากาศเมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตและ UV/O₃ พบว่า

- 1). เมื่อมีการเพิ่มก๊าซไอโซนในระบบการ UV/O₃ จะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด TCE แต่หากเพิ่มในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง
- 2). ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลาย TCE พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้อัตราการเพิ่มประสิทธิภาพสูงกว่าการเพิ่มไอโซน
- 3). ปัจจัยของจำนวนคลอรีนอะตอมใน C=C bond ในสารประกอบคลอรีนมีผลโดยตรงกับการย่อยสลายสารประกอบคลอรีนจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต

รัฐพล ทาทอง (2000) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจ ออกจากน้ำดิบด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันต่ำ ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือระยะเวลาที่น้ำดิบสัมผัสรังสีและประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจ

จากการทดลองพบว่า เมื่อรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีระยะเวลาที่สัมผัสกับน้ำดิบมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจในน้ำดิบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามไปด้วยโดยความสัมพันธ์

ของประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจ หรือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณโคลิฟาจที่เวลานั้นๆ ต่อ ปริมาณโคลิฟาจที่เวลาเริ่มต้นกับระยะเวลาที่สัมผัสรังสี ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจสูง ถึง 97%, 99.9% และ 99.999% เมื่อระยะเวลาที่น้ำดิบสัมผัสรังสีมีค่าเท่ากับ 0.17, 1.66 และ 19.9 นาทีตามลำดับ

Radier และคณะ (2001) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ระบบการกรองแบบนาโนฟิลเตรชันในการนำน้ำหล่อเย็นที่มีน้ำทะเลผสมอยู่กลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เยื่อเมมเบรน 2 ชนิดคือ Desal 5 DL และ DOW/Filmtec NF45 โดยมีค่าสัมพัทธ์ผิวหน้าเมมเบรน(crossflow) 1000 l/hr , อุณหภูมิในการทดลอง 20°C และอัตราการผลิตน้ำสะอาดที่ 20% ในการศึกษาประสิทธิภาพของเยื่อเมมเบรน จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของเยื่อเมมเบรนชนิด Desal 5 DL และ DOW/Filmtec มีความสามารถในการกำจัดโครเมต 99%และ 98% ตามลำดับ ,คลอไรด์ 78% และ 50% ตามลำดับ ,ซัลเฟต 99% เท่ากัน ในการศึกษาผลของฟลักซ์ permeate ต่อ ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมตและคลอไรด์ พบว่าถ้าเพิ่มค่าฟลักซ์ permeate ให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมตและคลอไรด์ก็จะเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย ในการศึกษาปัญหาการอุดตันในเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน พบว่า หลังจากความสะอาดเมมเบรนไปหลายครั้ง ค่าฟลักซ์ของน้ำจะมีค่าลดลง

สนธยา สรหงษ์ (2003) ได้ศึกษาและหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการเดินระบบนาโนฟิลเตรชัน เพื่อนำน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต

จากการทดลองพบว่า อัตราการผลิตน้ำสะอาดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความดันในการเดินระบบ และค่าความเร็วสัมพัทธ์ผิวหน้าเมมเบรน (cross-flow velocity) ในขณะที่การเพิ่มอัตราการผลิตน้ำสะอาด (% recovery) ที่สูงกว่า 50% ส่งผลให้น้ำสะอาดที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งเจือปนลดลง ซึ่งพบว่าการใช้ระบบไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบบำบัดขั้นต้น ช่วยให้อัตราการผลิตน้ำสะอาดที่สูงกว่าการใช้เติมกรดเป็นระบบบำบัดเบื้องต้น และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินระบบอยู่ที่ ความดัน 6 บาร์ ความเร็วสัมพัทธ์ผิวหน้าเมมเบรน 0.5 เมตรต่อวินาที อัตราการผลิตน้ำสะอาดที่ 40% และใช้วิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยระบบไมโครฟิลเตอร์ ในการเดินระบบระยะยาวพบว่า อัตราการผลิตน้ำสะอาดค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง 424 ชั่วโมง ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดความนำไฟฟ้าอยู่ที่ 90%-99% ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายอยู่ที่ 80%-100% ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและแคลเซียมทั้งหมด ประสิทธิภาพการกำจัดความเป็นต่างอยู่ที่ 80%-95% ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์อยู่ที่ 82%-97% และสามารถกำจัดสีและความขุ่นได้ 98%-100%

Song และคณะ (2004) ได้ทำการทดลองโดยการใช้อัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นการบำบัดขั้นต้นของระบบนาโนฟิลเตรชันในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ธรรมชาติเพื่อศึกษาการลดลงของเกิดฟาวลิง พบว่า อัลตราไวโอเลตที่มีความเข้มแสง 1.8×10^6 einstein/L ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมล เป็นเวลา 30 นาที สามารถกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ถึง 99.8% และสารประกอบแอลกอฮอล์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมง พบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวมีค่ามากกว่าค่าฟลักซ์ของน้ำดิบที่ไม่มีการบำบัด ทำให้การทำความสะอาดเมมเบรนของน้ำที่ผ่านกระบวนการ ดังกล่าวน้อยกว่าน้ำดิบธรรมดาถึง 2 เท่า

Kaliappan และคณะ (2005) ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการนำน้ำหล่อเย็นที่มีเกลือเข้มข้นสูงผลมอยู่กลับมาใช้ในระบบหล่อเย็นใหม่โดยใช้กระบวนการออสโมซิสผันกลับ ปัจจัยที่พิจารณาได้แก่ (1) วิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยระบบไมโครฟิลเตรชันขนาด $5,1 \mu\text{m}$ และคาร์บอนฟิลเตอร์ (2) ความดันที่ 275, 310, 344, 379 และ 413 kPa (3) อัตราการผลิตน้ำสะอาด (% recovery) ที่ร้อยละ 40.0, 43.0, 50, 53.3 และ 56

จากการทดลองพบว่า วิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยระบบไมโครฟิลเตรชันขนาด 5 และ $1 \mu\text{m}$ เป็นการกำจัดของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่มีความเข้มข้น 50 และ 2500 mg/l และคาร์บอนฟิลเตอร์เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นผลทำให้การอุดตันของเมมเบรนลดลง เมื่อเพิ่มค่าความดันในการเดินระบบเท่ากับ 275, 310, 344, 379 และ 413 kPa ประสิทธิภาพในการกำจัดเกลือต่างๆในน้ำหล่อเย็นสูงขึ้นเท่ากับ 87.8, 88.2, 89.0, 89.1 และ 89.2% ตามลำดับ ในขณะที่มีอัตราการผลิตน้ำสะอาดที่ร้อยละ 40.0, 43.0, 50, 53.3 และ 56% ตามลำดับ โดยสรุปกล่าวได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการออสโมซิสผันกลับในงานวิจัยนี้คือ ความดัน 413 kPa และอัตราการผลิตน้ำสะอาดที่ร้อยละ 56

Zhao และคณะ (2005) ได้ศึกษาการทำนายและเปรียบเทียบคุณภาพน้ำโดยใช้โมเดลของ Solution diffusion model จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในโมเดล (K_w, K_s) สามารถหาได้จากการใช้วิธี non-linear regression และการทำนายคุณภาพน้ำโดยใช้โมเดลนี้ พบว่า ค่าความเข้มข้นของค่าการละลายของแข็งทั้งหมดที่ทำนายได้มีค่าสูงกว่าปกติ ในสภาวะที่มีค่าความเข้มข้นของค่าการละลายของแข็งทั้งหมดต่ำ แต่ค่าความเข้มข้นของค่าการละลายของแข็ง ทั้งหมดที่ทำนายได้มีค่าต่ำกว่าปกติ ในสภาวะที่มีค่าความเข้มข้นของค่าการละลายของแข็งทั้งหมดสูง

Wang และคณะ (2006) ได้ศึกษาผลของค่าฟลักซ์และค่าการซึมผ่านของน้ำต่อระยะเวลาในการเดินระบบโดยใช้ระบบไมโครฟิลเตรชัน, อัลตราฟิลเตรชัน, ออสโมซิสผันกลับในการนำน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่ สภาพะในการทดลองระบบ คือ อุณหภูมิในการทดลอง 20°C และอัตราการผลิตน้ำ 50%

สภาพะในการทดลองระบบไมโครฟิลเตรชัน คือ ความดันในการทดลอง 0.06 MPa, เวลาในการผลิตน้ำ 45 นาที และเวลาล้างย้อน 50 วินาที จากการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาผ่านไป 100 ชั่วโมง ค่าฟลักซ์และค่าการซึมผ่านของน้ำมีค่าลดลงเนื่องจากการอุดตันแต่จะเพิ่มขึ้นหลังมีการล้าง ย้อน แต่ที่ระยะเวลาผ่านไป 580 ชั่วโมง ค่าฟลักซ์และค่าการซึมผ่านของน้ำมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง และไม่สามารถป้องกัน การอุดตันจากการล้างย้อนธรรมดาได้

สภาพะในการทดลองระบบอัลตราฟิลเตรชัน คือ ความดันในการทดลอง 0.135 MPa, เวลาในการผลิตน้ำ 50 นาที, เวลาล้างย้อน 90 วินาที และเวลาล้าง 1 นาที จากการทดลองพบว่าในช่วงแรกค่าฟลักซ์และค่าการซึมผ่านของน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้นและค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น

สภาพะในการทดลองระบบออสโมซิสผันกลับ คือ ความดันในการทดลอง 0.8 MPa จากการทดลองพบว่าในค่าฟลักซ์และค่าการซึมผ่านของน้ำมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาเนื่องจากมีบำบัดเบื้องต้นด้วยระบบไมโครฟิลเตรชันและระบบอัลตราฟิลเตรชัน ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดเกลือได้มากกว่า 99%

Zhang และคณะ (2007) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำหล่อเย็นเบื้องต้นโดยใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน สำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบหล่อเย็นของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า จากการทดลองพบว่า ระบบทั้งสองสามารถลดความขุ่นจาก 9.87 NTU ให้ลดลงเหลืออยู่ในช่วง 0.1-0.3 NTU ส่วนประสิทธิภาพของระบบไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดเหล็กได้ถึง 69.8% และ 70% ตามลำดับ การกำจัดซิลิกาคอลลอยต์ได้ถึง 45.3% และ 65.3% ตามลำดับ การกำจัดค่าซีโอดีได้ถึง 37.5% และ 40.8% การกำจัดฟอสเฟตได้ถึง 56.5% และ 55.4% ส่วนทั้งสองระบบสามารถกำจัดทองแดงได้ต่ำกว่า 17%

ในการศึกษาผลของค่าความดันที่มีต่อค่าฟลักซ์ พบว่าค่าความดันของทั้งระบบไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันที่สูงขึ้น มีผลทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นตามด้วย แต่ถ้าเปรียบเทียบจากทั้งสองระบบพบว่าที่ความดันเท่ากัน ค่าฟลักซ์ของ UF มากกว่า MF เมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลาหนึ่งกลับพบว่าค่าฟลักซ์ลดลงเนื่องจากการอุดตันของเมมเบรน

วลัยรัตน์ (2007) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาและหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเดินระบบนาโนฟิลเตรชัน เพื่อนำน้ำทิ้งจากโรงงานผักตบชวาสำเร็จรูปกลับมาใช้ใหม่ ปัจจัยที่พิจารณาได้แก่ ชุด feed dilution 20:80, 50:50, 60:40, 80:20 และ feed 100% ความดันที่ใช้ในการทดลอง คือ 4, 5, 6 และ 7 บาร์

จากการทดลองพบว่า อัตราการผลิตน้ำสะอาดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดันในการเดินระบบ โดยชุดการทดลอง 100% ที่ความดัน 7 บาร์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ ซึ่งให้อัตราการผลิตน้ำสะอาดที่ 0.26×10^{-6} m/s โดยน้ำสะอาดที่ได้จากระบบมีค่า pH ระหว่าง 6.98-7.26 สามารถกำจัดบีโอดี สี และของแข็งแขวนลอยได้เกือบทั้งหมด ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งอยู่ที่ร้อยละ 82-88 ความนำไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 74-82 ความเค็มอยู่ที่ร้อยละ 73-81 และคลอไรด์อยู่ที่ร้อยละ 69-78

Zhang และคณะ (2008) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการนำน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ระบบอัลตราฟิลเตรชันเป็นระบบบำบัดเบื้องต้นในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ปัจจัยที่พิจารณาคือลักษณะของเมมเบรน ได้แก่ Outside-in hollow fiber (ไมดูลเอ) และ Inside-in hollow fiber (ไมดูลบี) จากการทดลองพบว่า ไมดูลเอมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กและทองแดงสูงกว่าในทางตรงข้ามกันไมดูลบีมีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกา คอลลอยด์ และฟอสเฟตสูงกว่าเล็กน้อย ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของทั้งสองไมดูลมีค่าใกล้เคียงกัน ไมดูลทั้งสองสามารถลดความขุ่นให้ลดลงเหลืออยู่ในช่วง 0.15-0.3 NTU