

บทที่ 2

ปรัทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะของแหล่งน้ำผิวดิน (Characteristic of Surface Water)

น้ำผิวดินหมายถึงน้ำจากแม่น้ำลำคลอง ทะเลสาบและในพื้นที่ชุ่มน้ำที่เป็นน้ำจืด ปกติ น้ำผิวดินจะได้รับการเติมจากฝนหรือหิมะ และจะหายไปตามธรรมชาติด้วยการระเหย การไหลออกสู่ทะเลและการซึมลงไปได้ดิน น้ำผิวดินอาจมีแร่ธาตุ แก๊ส หรือสารอื่น ๆ ที่มีอยู่ในบรรยากาศเจือปนอยู่ด้วย เมื่อน้ำฝนตกลงสู่พื้นดิน น้ำฝนจะได้รับความสกปรกเนื่องจากแร่ธาตุของอินทรีย์ จุลินทรีย์ ตลอดจนสิ่งสกปรกอื่น ๆ เพิ่มขึ้นอีก เมื่อไหลผ่านพื้นดินก็จะมีอนุภาคของดินติดไปด้วยทำให้เกิดความขุ่นในน้ำ นอกจากนี้ความสกปรกของน้ำเกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การปล่อยน้ำเสียลงแม่น้ำลำคลอง การทิ้งสิ่งของเหลือใช้และซากสัตว์ลงไปเพิ่มความสกปรก เมื่อน้ำผิวดินซึมผ่านลงไปในดินผ่านชั้นต่าง ๆ อนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำก็จะถูกกรองเอาไว้โดยการกรองตามธรรมชาติ ซึ่งสามารถจัดแบคทีเรียและอนุภาค อย่างไรก็ดีคุณสมบัติทางเคมีอาจจะเปลี่ยนแปลงตามชั้นดินและแร่ธาตุที่น้ำซึมลงไป ซึ่งอาจมีสารที่เป็นพิษหรือยาฆ่าแมลงปนอยู่ด้วย

จากการศึกษาการปนเปื้อนของแหล่งน้ำผิวดินถึงปริมาณสารมลพิษ (Pollutants) สามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ (1) แหล่งกำเนิดมลพิษที่แน่นอน (Point Source) และ (2) แหล่งกำเนิดมลพิษที่ไม่แน่นอน (Non-point Source) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับแหล่งกำเนิดมลพิษที่แน่นอนจะมาจากน้ำเสียชุมชน (อาคารบ้านเรือน ที่พักอาศัย สำนักงาน อาคารพาณิชย์ สถานศึกษา) และน้ำเสียอุตสาหกรรม ซึ่งจะถูกปล่อยออกจากระบบท่อระบายน้ำเสีย รางระบายน้ำเสียโดยตรงลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ส่วนมลพิษที่ไม่มีแหล่งกำเนิด (Non-point Source) จะมาจากน้ำที่ชะล้าง (Runoff) จากพื้นที่การเกษตร และพื้นที่ในเขตชุมชน เทศบาล (Davis and Cornwell, 1998) ซึ่งปัจจุบันมีการตกค้างของสารเคมี สารพิษ ปุ๋ย แบคทีเรีย ในหน้าดินหรือชั้นดินสูงชันมาก เมื่อเกิดการไหลจะถูกชะล้างจากหลายพื้นที่ที่จะลงไปยังแหล่งน้ำที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ก่อให้เกิดปัญหาคุณภาพน้ำตามมา แหล่งกำเนิดมลพิษที่ไม่แน่นอน (Non-point Source) และถือเป็นปัญหาใหญ่ที่สร้างมลพิษต่อแหล่งน้ำผิวดิน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วของเสียที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำทำให้สาหร่ายและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำนำไปใช้ประโยชน์ได้ ก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำ ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเจริญเติบโตของสาหร่ายและพืชอย่างรวดเร็วซึ่งเรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากในน้ำเสียมีปริมาณธาตุไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสมากเกินไปจนความสามารถในการฟื้นฟูสภาพน้ำด้วยกลไกทางธรรมชาติผลกระทบที่เกิดขึ้นจึงเป็นปัญหาสำคัญที่วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมจะต้องให้ความสำคัญต่อการแก้ไขปัญหาดังกล่าว

ของสาหร่าย พืชน้ำที่เกิดจากการปล่อยสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และธาตุประกอบอื่น ๆ (Metcalf and Eddy, 1991)

ตารางที่ 2.1 ประเภทของสิ่งปนเปื้อนในน้ำและแหล่งกำเนิดมลพิษ

สิ่งปนเปื้อนในน้ำ	แหล่งกำเนิดมลพิษที่แน่นอน (Point Source)		แหล่งกำเนิดมลพิษที่ไม่แน่นอน (Non-point Source)	
	น้ำเสียชุมชน	น้ำเสียอุตสาหกรรม	น้ำเสียชุมชน	น้ำเสียอุตสาหกรรม
ความต้องการออกซิเจน (Oxygen Demand Material)	x	x	x	x
สารอาหาร (Nutrients)	x	x	x	x
จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค (Pathogens)	x	x	x	x
สารแขวนลอย (Suspended Solid/Sediment)	x	x	x	x
ความเค็ม (Salts)		x	x	x
ความเป็นพิษของโลหะ (Toxic Metals)		x		x
ความเป็นพิษจากสารเคมีอินทรีย์ (Toxic Organic Chemicals)		x	x	
ความร้อน (Heat)		x		

ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ จึงมีความจำเป็นต้องกำหนดให้มีการบำบัดน้ำเสียนั้นให้มีคุณภาพเพียงพอที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำและสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้

2.2 ลักษณะของน้ำที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย

ในการบำบัดน้ำเสียให้เป็นน้ำที่สะอาดก่อนปล่อยทิ้ง เป็นวิธีการหนึ่งในการแก้ไขปัญหามลพิษน้ำเสีย โดยอาศัยกรรมวิธีต่าง ๆ เพื่อลดหรือทำลายความสกปรกที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ได้แก่ ไขมัน น้ำมัน สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ สารพิษ รวมทั้งเชื้อโรคต่าง ๆ ให้หมดไปหรือให้เหลือน้อยที่สุดเมื่อปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะทำให้แหล่งน้ำนั้นไม่เน่าเสีย หรือแม้กระทั่งให้มีคุณภาพดีขึ้นจนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำกลับไปใช้ในกิจกรรมอื่น ๆ ได้อีก เนื่องจากน้ำเสียมีแหล่งที่มาแตกต่างกันจึงทำให้มีปริมาณและความสกปรกของน้ำเสียแตกต่างกันไปด้วยในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียจำเป็นต้องเลือกวิธีการที่เหมาะสมสำหรับกรรมวิธีในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียมีหลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนในการบำบัดออกได้ดังนี้ (1) หน่วยบำบัดขั้นเตรียมการ (Pretreatment) เป็นการกำจัดของแข็งขนาดใหญ่ที่ไม่ละลายน้ำออกด้วยตะแกรงเพื่อไม่ให้เป็นอุปสรรคในการบำบัดขั้นต่อไป (2) หน่วยบำบัดขั้นต้น (Primary Treatment) เพื่อลดมลสารที่อยู่ในรูปของสารแขวนลอยและมลสารที่เกิดการลอยอยู่ที่ผิวน้ำ ซึ่งสามารถลดปริมาณของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำไปได้เพียงบางส่วน แต่มลสารที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปมาก คือ มลสารที่อยู่ในรูปของสารแขวนลอยด้วยกระบวนการตกตะกอน (Precipitation) หรือกระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation-Flocculation) (3) หน่วยบำบัดขั้นที่สอง (Secondary Treatment) เป็นกระบวนการปรับสภาพของน้ำดิบหรือน้ำเสีย เพื่อลดสารแขวนลอยที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำหน่วยบำบัดแบบนี้มักเป็นหน่วยบำบัดทางชีวภาพ โดยอาศัยจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ และจะทำให้น้ำที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยต่ำ เช่น การเติมอากาศเพื่อให้จุลินทรีย์เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำและ (4) หน่วยบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary Treatment) หรือเรียกว่าการบำบัดขั้นสูง (Advance Treatment) เป็นหน่วยบำบัดที่ต้องการนำเอาน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีคุณภาพที่ดีขึ้นอีก เช่น น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วยังคงมีสี และความขุ่น หรือสารอาหารบางอย่างตกค้างอยู่ จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดเพิ่มเติมเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำที่ดีขึ้น (สันศักดิ์ ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549) โดยส่วนใหญ่จะเป็นการตกตะกอนสารแขวนลอย (Coagulation) หรือการตกตะกอนของแข็งที่ละลายในน้ำ (Precipitation) การดูดซับสารปนเปื้อน สี กลิ่น ด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) การแลกเปลี่ยนประจุในน้ำเสีย การกรองสิ่งปนเปื้อนขนาดเล็กด้วยการกรองขั้นสูง เช่น อัลตราฟิลเตรชัน ไมโครฟิลเตรชัน และการรีเวิร์สออสโมซิสแบบผันกลับ การกำจัดสารอาหาร (Nutrient Removal Process) การฆ่าเชื้อโรคและการเติมโอโซน (Chlorination and Ozonation) โดยวิธีการบำบัดมลสารต่าง ๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 หน่วยบำบัดที่ใช้ในการกำจัดมลสารต่าง ๆ (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2540)

สารที่ไม่ต้องการ ในน้ำเสีย หน่วยบำบัด	Suspended Solids (สารแขวนลอย)	Biodegradable Organic (สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ สามารถย่อยสลายได้)	Pathogen (พวกเชื้อโรคต่างๆ)	Nitrogen	Phosphorus	Refractory Organic (สารอินทรีย์ที่ยากแก่การ บำบัดโดยทางชีววิทยา)	Heavy Metals	Dissolved Inorganic Solids
Activated Sludge	-	✓	-	-	-	-	-	-
Ammonia Stripping	-	-	-	✓	-	-	-	-
Biological-chemical Phosphorus Removal	-	-	-	-	✓	-	-	-
Carbon Adsorption	-	-	-	-	-	✓	-	-
Chemical Precipitation	✓	-	-	-	-	-	✓	-
Chemical-polymer	✓	-	-	-	-	-	-	-
Chlorination	-	-	✓	✓	-	-	-	-
Coagulation - Sedimentation	-	-	-	-	-	-	-	-
Electro Dialysis	-	-	-	-	-	-	-	✓
Filtration	✓	-	-	-	-	-	-	-
Flotation	✓	-	-	-	-	-	-	-
Fixed Film: Nitrification and Denitrification	-	-	-	✓	-	-	-	-
Fixed Film: Rotating Biological Contactors (RBC)	-	✓	-	-	-	-	-	-
Fixed Film: Trickling Filters	-	✓	-	-	-	-	-	-
Hypochlorination	-	-	✓	-	-	-	-	-
Ion Exchange	-	-	-	✓	-	-	✓	✓

ตารางที่ 2.2 หน่วยบำบัดที่ใช้ในการกำจัดมลสารต่าง ๆ (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2540) (ต่อ)

สารที่ไม่ต้องการ ในน้ำเสีย หน่วยบำบัด	Suspended Solids (สารแขวนลอย)	Biodegradable Organic (สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ สามารถย่อยสลายได้)	Pathogen (พวกเชื้อโรคต่างๆ)	Nitrogen	Phosphorus	Refractory Organic (สารอินทรีย์ที่ยากแก่การ บำบัดโดยทางชีววิทยา)	Heavy Metals	Dissolved Inorganic Solids
Lagoon	-	✓	-	-	-	-	-	-
Land Treatment	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Lime Coagulation Sedimentation	-	-	-	-	✓	-	-	-
Metal-salt	-	-	-	-	✓	-	-	-
Ozonation	-	-	✓	-	-	-	-	-
Physical-Chemical	-	✓	-	-	-	-	-	-
Reverse Osmosis	-	-	-	-	-	-	-	✓
Sand Filtration	-	✓	-	-	-	-	-	-
Screening and Comminuting	✓	-	-	-	-	-	-	-
Sedimentation	✓	-	-	-	-	-	-	-
Suspended-growth Nitrification and Denitrification	-	-	-	✓	-	-	-	-
Tertiary Ozonation	-	-	-	-	-	✓	-	-

คุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ต้องการจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าควรเลือกขั้นตอนและชนิดของการบำบัดด้วยวิธีใด (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2540) ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำเสียที่บำบัดแล้ว (น้ำทิ้ง) ที่กระทรวงอุตสาหกรรมอนุญาตให้ปล่อยสู่ธรรมชาติ ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำเสียเพียงกระบวนการเดียวอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามที่กำหนดไว้ โดยคุณลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วเมื่อพิจารณาพารามิเตอร์หลัก สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดและการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Asano, 1998)

พารามิเตอร์	ความสำคัญของน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว	ค่าประมาณในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว	คุณภาพน้ำที่ต้องการ
ตัวชี้วัดด้านปริมาณสารอินทรีย์			
• BOD ₅	จุลินทรีย์ที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์	10-30 mg/L	< 1-10 mg/L
• TOC	การตรวจวัดปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในสารอินทรีย์	1-20 mg/L	< 1-10 mg/L
การวัดอนุภาคของสาร			
• TSS	ของแข็งแขวนลอยจะมีความสัมพันธ์กับการปนเปื้อนของจุลินทรีย์และความขุ่นซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค	<1 to 30 mg/L	< 1-10 NTU
• ความขุ่น	การตรวจอนุภาคในน้ำเสียจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ TSS	1-30 NTU	0.1-10 NTU
จุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค	การตรวจวัดจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์	เชื้อโคลิฟอร์ม: < 1-104/100 mL	< 1-2,000/mL
สารอาหาร			
• ไนโตรเจน	เป็นแหล่งสารอาหารที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์	10-30 mg/L	< 1-30 mg/L
• ฟอสฟอรัส	เป็นแหล่งสารอาหารที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์	0.1-30 mg/L	< 1-20 mg/L

2.3 การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่

กระบวนการบำบัดทางชีวภาพและกระบวนการบำบัดทางเคมี ไม่สามารถบำบัดมลพิษออกได้หมด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำเทคโนโลยีขั้นสูงมาประยุกต์ใช้เพื่อให้ น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.4 โดยกระบวนการทำน้ำให้สะอาดหรือการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำ และหลายประเทศเริ่มให้ความสนใจในการที่จะหาวิธีและกระบวนการต่าง ๆ มาใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว เพื่อให้ น้ำที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้เพื่อการอุปโภคและบริโภค ตลอดจนการนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.4 คุณภาพน้ำที่ต้องการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Asano, 1998)

ประเภท	กระบวนการบำบัด	คุณภาพน้ำ ที่ผ่านกระบวนการบำบัด	ตัวอย่าง การนำไปประยุกต์ใช้
ชุมชนเมือง			
แหล่งน้ำที่ไม่ถูกควบคุม (Unrestricted)	กระบวนการบำบัดขั้นที่สอง การกรอง และการฆ่าเชื้อโรค	$BOD_5: \leq 10 \text{ mg/L}$; Turbidity: $\leq 2 \text{ NTU}$; Fecal coliform: No detect/100 mL; Cl_2 residual: 1 mg/L; pH 6 to 9	- ใช้เพื่อการชลประทาน เช่น สวนสาธารณะ - การใช้ในอาคาร เช่น น้ำชักโครก - น้ำเพื่อป้องกันอัคคีภัย
แหล่งน้ำที่ถูกควบคุม (Restricted Access Irrigation)	กระบวนการบำบัดขั้นที่สองและการฆ่าเชื้อโรค	$BOD_5: \leq 30 \text{ mg/L}$; TSS: $\leq 30 \text{ mg/L}$; Fecal coliform: $\leq 200/100 \text{ mL}$; Cl_2 residual: 1 mg/L; pH 6 to 9	- ใช้เพื่อการชลประทาน - สนามกอล์ฟ - ที่อยู่อาศัย
การชลประทานเพื่อเกษตรกรรม			
พืชอาหาร	กระบวนการบำบัดขั้นที่สอง การกรอง และการฆ่าเชื้อโรค	$BOD_5: \leq 10 \text{ mg/L}$; Turbidity: $\leq 2 \text{ NTU}$; Fecal coliform: No detect/100 mL; Cl_2 residual: 1 mg/L; pH 6 to 9	ใช้เพื่อรดน้ำพืชผลทางการเกษตร
พืชที่ไม่ใช้เป็นอาหารและพืชอาหารที่ผ่านกระบวนการผลิต	กระบวนการบำบัดขั้นที่สองและการฆ่าเชื้อโรค	$BOD_5: \leq 30 \text{ mg/L}$; TSS: $\leq 30 \text{ mg/L}$; Fecal coliform: $\leq 200/100 \text{ mL}$; Cl_2 residual: 1 mg/L; pH 6 to 9	- ใช้เพื่อรดน้ำพืชผลทางการเกษตร เช่น พืชที่เป็นอาหารสัตว์ หญ้า - การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตารางที่ 2.4 คุณภาพน้ำที่ต้องการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Asano, 1998) (ต่อ)

ประเภท	กระบวนการบำบัด	คุณภาพน้ำ ที่ผ่านกระบวนการบำบัด	ตัวอย่าง การนำไปประยุกต์ใช้
<u>เพื่อการพักผ่อนหย่อนใจ</u> - แหล่งน้ำที่ไม่ถูกควบคุม (Unrestricted) - แหล่งน้ำที่ถูกควบคุม (Restricted Access Irrigation)	การบำบัดขั้นที่สอง การกรอง และการฆ่าเชื้อโรค	BOD ₅ : ≤ 10 mg/L; Turbidity: ≤ 2 NTU; Fecal coliform: No detect/100 mL; Cl ₂ residual: 1 mg/L; pH 6 to 9	การใช้เพื่อสันทนาการ เช่น ว่ายน้ำและน้ำในทะเลสาบ
	การบำบัดขั้นที่สอง และการฆ่าเชื้อโรค	BOD ₅ : ≤ 30 mg/L; TSS: ≤ 30 mg/L; Fecal coliform: ≤ 200/100 mL; Cl ₂ residual: 1 mg/L; pH 6 to 9	น้ำจากแหล่งน้ำที่ใช้ตกปลา พายเรือ และอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กิจกรรมสันทนาการ
การส่งเสริมสิ่งแวดล้อม (Environmental Enhancement)	กระบวนการบำบัดขั้นที่สอง การกรอง และการฆ่าเชื้อโรค	BOD ₅ : ≤ 10 mg/L; Turbidity: ≤ 2 NTU; Fecal coliform: No detect/100 mL; Cl ₂ residual: 1 mg/L; pH 6 to 9	- การใช้ประโยชน์จากน้ำเสียเพื่อสร้างพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม - เพิ่มพื้นที่ธรรมชาติและรักษาทิศทางไหลของน้ำ
การเติมน้ำใต้ดิน (Groundwater Recharge)	-	Site-specific	- การเติมน้ำส่งสู่ใต้ดิน - การควบคุมระดับน้ำเค็มในน้ำ - การเติมน้ำเพื่อป้องกันการทรุดตัวของดิน
การใช้ในอุตสาหกรรม (Industrial Reuse)	กระบวนการบำบัดขั้นที่สองและการฆ่าเชื้อโรค	BOD ₅ : ≤ 30 mg/L; TSS: ≤ 30 mg/L; Fecal coliform: ≤ 200/100 mL	- ใช้ในระบบหล่อเย็น - กระบวนการหมักดอง ไอน้ำ หรือใช้เป็นน้ำล้างทำความสะอาด
สำหรับนำมาใช้ในการผลิตน้ำดื่ม (Potable Reuse)	-	ต้องการความปลอดภัยสำหรับน้ำดื่ม	นำมาใช้ในการผลิตน้ำประปา

การแยกเป็นกระบวนการหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ในการนำน้ำกลับมาใช้ เพื่อแยกองค์ประกอบหรือสารแขวนลอยให้อยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสม (Fractionation) และการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) โดยมีหลายกระบวนการ เช่น การระเหย (Evaporation) การตกตะกอน (Sedimentation) การหมุนเหวี่ยง (Centrifugation) การกรองแบบดั้งเดิม (Conventional Filtration) และกระบวนการเมมเบรน (Membrane Process) เป็นต้น การเลือกใช้กรรมวิธีการแยกวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น คุณสมบัติของวัตถุดิบ ความเป็นไปได้ทางเทคนิค ชนิดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) วิธีการทั่วไปในการเอาน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ได้แก่ การกรองด้วยสารกรองหลายชั้นในขังดิน

2.4 การกรองด้วยเยื่อกรองเมมเบรน (Membrane Filtration)

การกรองผ่านเยื่อกรอง (Membrane Filtration) เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อกรองเพื่อแยกสาร ทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น กระบวนการนี้ถูกค้นพบมานานกว่า 30 ปี และได้พัฒนาขึ้นตามลำดับสำหรับประเทศไทยในปัจจุบันยังมีการประยุกต์ใช้กระบวนการเยื่อกรองไม่มากนัก ส่วนมากเป็นกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) ในการผลิตน้ำสะอาดจากน้ำบาดาลเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น สำหรับหม้อไอน้ำ และในกระบวนการผลิตบางอย่างที่ต้องใช้น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง และเริ่มมีการใช้งานสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งตลอดจนมีการใช้กระบวนการบำบัดควบคู่กับเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane) และเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Membrane) (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) ในอนาคตกระบวนการกรองผ่านเยื่อกรองจะมีบทบาทที่สำคัญในด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น เพราะนอกจากจะสามารถใช้บำบัดน้ำเสียเพื่อลดมลพิษแล้ว ยังมีศักยภาพสำหรับการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ซึ่งเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

สำหรับกระบวนการที่ใช้เยื่อกรองเพื่อแยกสารหรือเพิ่มความเข้มข้นหรือทำสารให้บริสุทธิ์ขึ้น หลักการของกระบวนการนี้จะต้องมีแรงดันที่ทำให้ของผสมหรือสารละลายไหลผ่านเยื่อกรอง (Pressure Fluid) โดยเยื่อกรองจะมีคุณสมบัติในการเลือกผ่านของสารหนึ่งมากกว่าอีกสารหนึ่ง (Semi-permeable/Perm Selective) เยื่อกรองมีทั้งที่ผลิตจากสารอินทรีย์ โดยส่วนใหญ่เป็นโพลีเมอร์และสารอนินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเซรามิก กระบวนการเยื่อกรองแบ่งได้เป็น 4 กระบวนการ โดยอาศัยหลักการแยกด้วยแรงขับเคลื่อน (Drive Pressure) ในการแยกโมเลกุลขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ เรียงตามลำดับ คือ (1) ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) (2) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) (3) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) และ (4) ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) (Cheremissnodd, 1995)



วันที่.....1.1 ต.ค. 2555.....
เลขทะเบียน.....248927.....
เลขเรียกหนังสือ.....

2.4.1 ชนิดของเยื่อกรอง (Type of Membrane Filtration)

ในการประยุกต์ใช้เยื่อกรองสำหรับแยกอนุภาคและโมเลกุลนั้น จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมและตรงตามคุณสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 โดยแสดงขนาดของรูพรุน (Pore Size) ของเยื่อกรองประเภทต่าง ๆ สามารถแยกได้ดังนี้

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบชนิดของเยื่อกรองเมมเบรน (Ehara, 1998; Korbutowicz, 2008)

กระบวนการ	ขนาดรูพรุน (nm)	ขนาดน้ำหนัก โมเลกุล (Da)	แรงดัน (Unit × 100 kPa)	ความสามารถ ในการกำจัด
ไมโครฟิลเตรชัน	50-5,000	> 300,000	Suction Pressure > 0.6 Press Pressure < 2	- แบคทีเรีย - คอลลอยด์ - โปรโตซัว
อัลตราฟิลเตรชัน	5-100	1,000-300,000	Suction Pressure > 0.6 Press Pressure < 3	- แบคทีเรีย - ไวรัส - สารที่ละลายน้ำ ขนาด 10-500 kDa
นาโนฟิลเตรชัน	~ 1	100-1,000	Press Pressure 2-15	- สารที่มีขนาด 200-300 Da - เกลือประจุบวกสอง
ออสโมซิสผกกลับ	< 1	10-100	Press Pressure > 15	- ไอออนละลายน้ำ

ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration: MF) เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อกรองที่มีแผ่นรูพรุนค่อนข้างใหญ่ขนาด 50-1000 nm สำหรับแยกโมเลกุลใหญ่ ๆ เช่น สารแขวนลอย หรืออนุภาคเล็ก ๆ ออกจากของเหลว แรงขับเคลื่อนที่ใช้อยู่ระหว่าง 100-500 kPa หรือ 1-5 atm ใช้สำหรับการกำจัดสารแขวนลอยที่เป็นสาเหตุความขุ่นของน้ำ แบคทีเรียทั่วไป ชนิดของเยื่อกรองที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่น Cellulose acetate Polysulfone และ Polystyrene เป็นต้น การใช้งานเหมาะสำหรับใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม และเทคโนโลยีชีวภาพอาจรวมกับการะบวนการหมักเพื่อแยกเซลล์จากผลิตภัณฑ์

อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration: UF) เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อกรองขนาดรูพรุนขนาดเล็ก (Micro Porous) มีขนาดรูพรุนประมาณ 2-20 nm (20-200 Å) แรงขับเคลื่อนที่ใช้อยู่ระหว่าง 100-800 kPa หรือ 1-8 atm ใช้สำหรับแยกอนุภาคคอลลอยด์ แบคทีเรีย ไวรัส ออกจากน้ำและสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน ชนิดของเยื่อกรองที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่น

Cellulose acetate Polyacrylonitrile และ Polyester เป็นต้น การใช้งานเหมาะสำหรับการแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นโปรตีน การกำจัดคอลลอยด์ การบำบัดน้ำทิ้ง ทำน้ำให้บริสุทธิ์ การทำน้ำผลไม้ให้ใส เป็นต้น

นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration: NF) เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อกรองขนาดรูพรุน 2-5 nm ซึ่งใกล้เคียงกับออสโมซิสผันกลับมาก โดยมีผลต่างของความดันเป็นแรงขับเคลื่อนในการแยกตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 1,000 คาร์ตัน ออกจากสารละลายตัวอย่าง เช่น น้ำตาล สารอินทรีย์น้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยความดันที่ใช้ในการป้อนสารละลาย อยู่ระหว่าง 1-2 MPa หรือ 10-20 atm มีความสามารถในการแยกไอออนบางชนิด และสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ (Natural Organic Matter: NOM) ชนิดของเยื่อกรองที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่น Polymer Organic Compounds Aromatic Polyimide และ Polyvinyl Alcohol เป็นต้น เยื่อกรองนาโนฟิลเตรชันส่วนมากเป็นเยื่อกรองเชิงประกอบ ซึ่งประกอบด้วยชั้นผิวที่มีโครงสร้างแน่นอยู่บนชั้นรองรับที่มีรูพรุนใหญ่กว่า ความสามารถในการกักกันเกลือประจุเดี่ยว (เช่น NaCl) ต่ำกว่าเยื่อแผ่นออสโมซิสผันกลับ คือ อยู่ระหว่าง 40-80%

ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis: RO) กระบวนการนี้เรียกว่า Hyper Filtration เป็นการแยกสารละลายโดยผลต่างความดันระหว่างเยื่อแผ่นเป็นแรงขับเคลื่อน เยื่อกรองออสโมซิสผันกลับมีความสามารถในการกักกันโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น เกลือ น้ำตาล (น้ำหนักโมเลกุล < 500 คาร์ตัน หรือมีขนาดประมาณ 0.1-1 nm) แต่ยอมให้น้ำผ่านได้ และเป็นเยื่อแผ่นที่มีโครงสร้างแน่นหรือไม่มีรูพรุน การผ่านเยื่อแผ่นของสารเกิดจากความสามารถในการละลายและการแพร่ (Solution-diffusion) ในเยื่อแผ่น ความดันที่ใช้ในการป้อนสารละลายอยู่ระหว่าง 1-10 MPa หรือ 10-100 atm การใช้งานที่สำคัญของกระบวนการนี้ คือ การแยกเกลือจากน้ำกร่อย น้ำทะเล เพื่อผลิตน้ำจืด การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้ การผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง ตลอดจนการบำบัดน้ำทิ้งที่มีโลหะเจือปน เช่น อุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ

คุณสมบัติของเยื่อกรองเมมเบรนแต่ละประเภทเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทราบ เนื่องจากต้องเลือกเยื่อกรองเมมเบรนให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน การเลือกเยื่อกรองเมมเบรนให้เหมาะสมกับคุณลักษณะของน้ำและสถานะในการเดินระบบเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้การใช้เทคโนโลยีเมมเบรนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งขนาดของรูพรุนและความสามารถในการกักกันเป็นคุณสมบัติของเยื่อกรองเมมเบรนอย่างแรกที่ต้องทราบ ยกตัวอย่างเช่น ความสามารถในการกักกันเกลือใช้บอกคุณลักษณะของเยื่อกรองเมมเบรนชนิดออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis: RO) และนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration: NF) คุณสมบัติอื่น ๆ ของเมมเบรนที่มีความสำคัญต่อการเลือกและการใช้งาน โดยทั่วไปขนาดของรูพรุนใช้บอกคุณลักษณะของเมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration: MF) แต่สำหรับเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration: UF) บอกขนาดรูพรุน

ในรูปของค่า Molecular Weight Cut Off (MWCO) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการกักกันสารตามมวลโมเลกุลของสารขนาดรูพรุน และ MWCO ของเยื่อกรองเมมเบรนที่มีช่วงกว้าง

2.4.2 โมดูลเมมเบรน

โมดูลเมมเบรน (Membrane Module) คือเยื่อกรองที่ผลิตขึ้นมาสำหรับใช้ในกระบวนการกรองอาจมีรูปร่างต่างกัน เช่น เป็นเยื่อกรองแบบแผ่นเรียบหรือเป็นแบบท่อ ในการใช้ต้องบรรจุหรือประกอบเยื่อกรองให้มีพื้นที่เยื่อกรองตามความต้องการ ซึ่งเรียกว่า (Module) ได้มีการออกแบบโมดูลที่มีรูปร่าง ๆ ต่างกัน โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ (Scott, 1990) คือ (1) โมดูลแบบแผ่นและแบบกรอบ (Plate and Frame) (2) โมดูลแบบท่อ (Tubular Module) (3) โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module) และ (4) โมดูลแบบท่อม้วน (Spiral Wound Module) หลักในการออกแบบต้องคำนึงถึงการใช้งานคือ ต้องมีอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นกะทัดรัด มีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรของโมดูลสูง โดยทั่วไปความเหมาะสมของการออกแบบโมดูลที่ใช้ในการแยกสามารถแบ่งได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความเหมาะสมของโมดูลแต่ละชนิด (Scott, 1990)

โมดูลเมมเบรน	ชนิดของโมดูล					
โมดูลแบบแผ่นและแบบกรอบ	RO	PV	-	UF	ED	-
โมดูลแบบเส้นใยกลวง	RO	PV	GP	UF	-	-
โมดูลแบบท่อม้วน	RO	PV	GP	UF	-	-
โมดูลแบบท่อ	RO	-	-	UF	-	MF

หมายเหตุ : RO: Reverse Osmosis UF: Ultrafiltration MF: Microfiltration

ED: Electro dialysis GP: Gas Permeation PV: Pervaporation

1. โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module) โมดูลชนิดนี้ประกอบไปด้วยเยื่อเมมเบรนแบบบางที่บรรจุอยู่ใน Housing ส่วนนอกของเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 80-200 ไมครอน และมีความหนาแน่นน้อยกว่า 20 ไมครอน ความดันที่ใช้สูงถึง 80 บาร์ สารที่ป้อนจะเข้าทางด้านนอกซึมผ่านเข้าไปภายในเส้นใย สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของของโมดูลแบบเส้นใยกลวง คือ สารที่ป้อนเข้าไบนั้นควรสะอาด เพื่อป้องกันการเกิดการอุดตันที่เป็นสาเหตุทำให้เกิด Fouling ค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูเยื่อเมมเบรนสูง และสารที่ป้อน (ผ่านการบำบัดขั้นต้น) จำเป็นจะต้องทำการตกตะกอนของเกลือมาก่อน มีพื้นที่เยื่อแผ่นต่อหน่วยสูงถึง $30,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ เป็นต้น

2. โมดูลแบบท่อม้วน (Spiral Wound Module) ประกอบด้วยเมมเบรนแบบแผ่นวางซ้อนกันม้วนรอบแกนที่เป็นท่อเพอมีเอท แผ่นกั้นของสารป้อนที่อยู่ระหว่างแผ่นเมมเบรนจะทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดความกว้างของช่องสารป้อน ซึ่งจะมีขนาดหนา 1.0 mm และความเร็วที่ไหลแบบ Cross Flow มีพื้นที่ต่อปริมาตรทั่วไป $300-1,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ แผ่นเมมเบรนสองชั้นหรือหลายชั้นต้องมีความเหมาะสมและสามารถรองรับความดันที่เกิดขึ้นภายใน Housing ที่มีการป้อนสารเข้าไปภายในและยอมให้น้ำรีเทนเทท (Retentate) ออกมาได้

3. โมดูลแบบท่อ (Tubular Module) จะมีส่วนประกอบของท่อที่มีชั้นของเยื่อกรองเมมเบรนหุ้มอยู่รอบท่อ สารที่ป้อนเข้าจะเข้าทางด้านในแล้วซึ่งผ่านออกมาทางเยื่อกรองเมมเบรนออกสู่ด้านนอกของชั้นเยื่อกรองเมมเบรน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ระหว่าง 1.2-2.4 m จะบรรจุอยู่ในตัวบรรจุ (Housing) ซึ่งประกอบด้วยเมมเบรนหลาย ๆ ท่อ หลักการในการประยุกต์ใช้เยื่อกรองเมมเบรนแบบท่อ คือสารที่ป้อนเข้าไปนั้นไม่จำเป็นต้องเป็นสารที่ผ่านการบำบัดมาก่อน เนื่องจากการทำความสะอาดเยื่อกรองสามารถใช้กลไกในการทำทำความสะอาดได้ การไหลแบบ Cross Flow ทั่วไปจะถูกนำมาใช้กับโมดูลแบบท่อ ดังนั้นในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Permeate) จึงเป็นที่นิยม ความเร็วสูง ๆ จะทำให้เกิดความดันสูญเสีย (Pressure Loss) มากกว่า 4 บาร์ โมดูลแบบท่อม้วนมีพื้นที่เมมเบรนต่อปริมาตรน้อยกว่า $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ซึ่งจัดว่าน้อยกว่าโมดูลแบบท่อม้วน และมีความสามารถในการผลิตต่ำอยู่ที่ $100 \text{ m}^3/\text{dm}^2$ โมดูลชนิดนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) และไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุอินทรีย์ แต่วัสดุชนิดนี้มีราคาสูง

4. โมดูลแบบแผ่นและแบบกรอบ (Plate and Frame) มีลักษณะเป็นแผ่นมาประกบกันพื้นที่ต่อปริมาตรทั่วไป $100-400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม คือใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน กับกระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิส ด้วยผลต่างของแรงขับเคลื่อนที่ใช้ในกระบวนการแยกโดยการออกแบบค่อนข้างจะแตกต่างกันและความสามารถในการแยกแตกต่างกัน

5. โมดูลแบบเส้น (Capillary Module) จะมีลักษณะคล้ายโมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module) แต่จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า โดยส่วนใหญ่จะนำมาใช้กับกระบวนการ UF เนื่องจากใช้แรงดันที่ต่ำกว่าและมีความเป็นไปได้ในการรักษาความดันบรรยากาศภายในเส้นใย ดังนั้นสารที่ป้อนเข้าไปจะมีผลต่อชั้นเยื่อกรอง แล้วช่วยให้สามารถควบคุม Concentration Polarization ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้กรอบโมดูลชนิดนี้มีขนาด 0.8-1.0 m และมีความยาวประมาณ 1.0 m และมีพื้นที่กรองต่อปริมาตรต่ำกว่ากระบวนการ RO และแรงดันที่ใช้ในการส่งผ่านเยื่อกรองเมมเบรนอยู่ที่ 2-3 บาร์ เส้นใยที่ใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ส่วนใหญ่ผลิตจากพอลิเมอร์ เช่น Polysulfone Polyacrylonitrile และ Chlorinated Polyolefin ในการออกแบบเส้นใยกลวงแบบคาปิลลารีของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน มีลักษณะคล้ายกับการออกแบบเส้นใยใน

กระบวนการออสโมซิส ผันกลับ (Reverse Osmosis) ทำหน้าที่ในการแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมครอน ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดฟาวลิง (Fouling) อย่างไรก็ตาม การเกิดฟาวลิงสามารถทำความสะอาดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพที่เรียกว่าการล้างย้อน

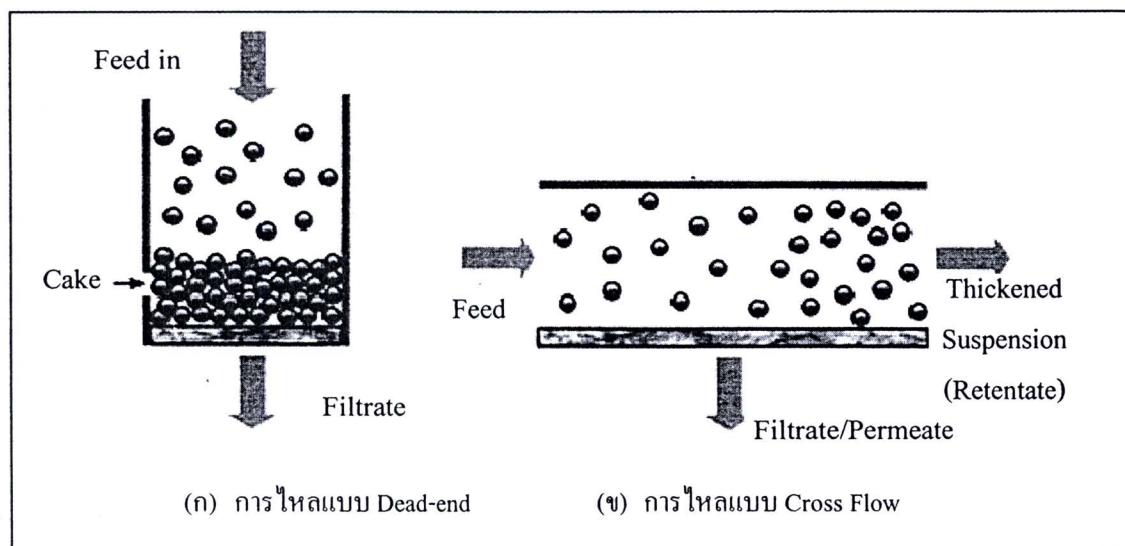
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของเยื่อกรองเมมเบรนแต่ละชนิด (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

คุณสมบัติ	วัสดุพอลิเมอร์				
	Polyvinylidene fluoride (PVDF)	Celulose Acetate	Polysulfone (PSU)	Aromatic Polyamide	Poly acrylonitrile
MWCO (kDa)	100	1-50	3-60	1-50	30-10
pH	1-12	3.5-7.0	0-14	2-12	2-12
อุณหภูมิ (°C)	80	35	100	80	50
ความทนทานต่อคลอรีน	ปานกลาง	ดี	ดี	ด้อย	ปานกลาง
ความทนทานต่อสารละลาย	สูง	ด้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
รูปแบบของเมมเบรน	- แบบท่อ - แบบท่อม้วน - แบบเส้นใย กลวง	- แบบแผ่น - แบบท่อ	- แบบแผ่น - แบบท่อ - แบบท่อม้วน - แบบเส้นใย กลวง	- แบบแผ่น - แบบท่อ - แบบเส้นใย กลวง	- แบบแผ่น - แบบท่อ - แบบเส้นใย กลวง

2.4.3 ระบบการกรองของเยื่อกรองเมมเบรน

การกรองแบบปิดตาย (Dead-end Filtration) เป็นการป้อนสารเข้าในทิศทางที่ ตั้งฉากกับแผ่นกรองหรือเมมเบรน ตัวถูกละลายที่ไม่ผ่านเมมเบรนจะถูกสะสมบนผิวหน้าของ เมมเบรนทั้งหมดมีเพียงส่วนของเพอมีเอท (Permeate) เท่านั้นที่ไหลออกจากระบบ การสะสมของตัวถูกละลาย ซึ่งจะเกิดเป็นชั้นเจลหรือเค้กที่หนาทำให้ความต้านทานการไหลของเพอมีเอทเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราการไหลของเพอมีเอทลดลงอย่างรวดเร็วและอาจทำให้ความสามารถในการเก็บกักสารเปลี่ยนแปลงการกรองแบบนี้มักใช้ในระดับการทดลอง สำหรับการกรองแบบไหลขวาง (Cross Flow Filtration) การกรองแบบนี้สารป้อนจะไหลในทิศทางขนานกับแผ่นกรอง สารป้อนจะถูกแยกออกเป็น 2 เฟส ได้แก่ (1) เฟสที่ผ่านเมมเบรน คือ เพอมีเอท (Permeate) และ (2) เฟสที่ไม่ผ่านเมมเบรน คือ รีเทนเนท

(Retentate) การกรองแบบไหลขวางจะสามารถลดการอุดตัน เนื่องจากอัตราการไหลเป็นแบบไหลเฉือนผิวหน้าเยื่อกรองและทำให้อนุภาคที่เกาะอยู่บางส่วนสามารถหลุดออกไปได้ (Smith et al., 2006)



รูปที่ 2.1 รูปแบบการไหลของสารป้อนเข้า

2.4.4 ประเภทของฟาวลิง

การอุดตันของเยื่อกรองเมมเบรนมักเกิดกับเยื่อกรองเมมเบรนที่มีรูพรุนแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ป้อนเข้า (Schafer, 2001) ซึ่งสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท คือ

1. Organic Fouling ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสารอินทรีย์ จากงานวิจัยของ DiGiano et al. (1994) พบว่าโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่า 30 กิโลดาร์ตัน จะทำให้เกิดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชัน สำหรับโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 กิโลดาร์ตัน จะทำให้เกิดการอุดตันของไมโครฟิลเตรชัน ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลง สารอินทรีย์ธรรมชาติยังเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการอุดตันที่เกิดจากการสะสมที่ผิวหน้าและช่องว่างของเยื่อกรอง (Amy and Cho, 1999) โดยสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ทำให้เกิดการอุดตันนั้นเกิดจากสารอินทรีย์ ซึ่งประกอบไปด้วย Proteins Amino Sugars Polysaccharides และ Polyhydroxyaromatics (Wiesner et al., 1992)

2. Inorganic Fouling การอุดตันที่เกิดจากสารอนินทรีย์ เกิดจากการสะสมของสารอนินทรีย์ที่ผิวเยื่อกรองเมมเบรน เช่น สารประกอบโลหะและทำให้ผิวหน้าของเมมเบรนหนาขึ้นหรือช่องว่างภายในรูพรุนลดลง ตะกอนถูกรวมตัวกันเมื่อสารเคมีมีความเข้มข้นเกินจุดอิ่มตัว สำหรับการอุดตันเป็นสิ่งสำคัญสำหรับกระบวนการออสโมซิสผันกลับและนาโนฟิลเตรชัน ซึ่งประเภทของสารอนินทรีย์เหล่านั้นจะสร้างชั้นที่มีความเข้มข้นบนผิวเยื่อกรองที่เรียกว่าการสะสมของชั้นเค้ก สำหรับ

ไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันการอุดตันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นเค้กแต่สามารถอยู่ได้เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างอออนและการอุดตันอื่น ๆ ของวัสดุ (เช่น โพลีเมอร์อินทรีย์) โดยพันธะทางเคมี กระบวนการบำบัดขั้นต้นสำหรับการกรองผ่านเยื่อกรอง ได้แก่ โคแอกกูเลชันและออกซิเดชัน อาจเพิ่มสารประกอบออกไซด์ของโลหะบนผิวหน้าของเยื่อกรองหรือรูพรุนภายใน การอุดตันเป็นปัญหาสำคัญซึ่งสามารถทำให้สะอาดได้ด้วยสารเคมี สารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการอุดตันได้แก่ แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม (Magnesium) คาร์บอเนต (Carbonate) ซัลเฟต (Sulfate) และเหล็ก (Iron) เป็นต้น

3. Colloid/Particle Fouling ในที่นี้หมายถึงอนุภาคที่มีขนาด 1 nm ถึง 1 μm (Potts et al., 1981) โดยอนุภาคดังกล่าวอาจประกอบไปด้วยสารประกอบอินทรีย์ คอลลอยด์ อินทรีย์ก็ได้ สำหรับสาหร่าย แบคทีเรีย และสารอินทรีย์ธรรมชาติถูกจัดอยู่ในกลุ่มของคอลลอยด์ อย่างไรก็ตามยังมีความแตกต่างจากอนุภาคที่มีความเฉื่อย เช่น โคลนและดินเหนียว เพื่อเป็นการแยกข้อแตกต่างของการอุดตันระหว่างอนุภาคและคอลลอยด์สามารถอ้างอิงถึงลักษณะทางชีวภาพของสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ ในหลายกรณีอนุภาคและคอลลอยด์ไม่ได้เกิดการอุดตันอย่างแท้จริงเนื่องจากการลดลงของอัตราการไหลซึ่งมีสาเหตุมาจากการสะสมบนผิวหน้าของเยื่อกรอง โดยส่วนมากสามารถล้างย้อนได้ด้วยการล้างย้อนและขัดถูด้วยอากาศ น้อยมากที่เกิดกรณีการไม่คืนสภาพเดิมด้วยอนุภาคและคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างของเยื่อกรอง ดังนั้นอนุภาคและคอลลอยด์สามารถเข้าและติดอยู่ในเยื่อกรองและไม่ง่ายที่จะทำความสะอาดได้ด้วยพลังน้ำ

4. Microbial Fouling การอุดตันจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก การอุดตันของจุลินทรีย์เป็นผลมาจากการรวมตัวกันของสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ บนผิวหน้าของเยื่อกรอง เมื่อแบคทีเรียสัมผัสกับเยื่อกรองนานขึ้นจะก่อให้เกิด EPS หรือ Extracellular Polymetric Substance ซึ่งมีลักษณะชั้นเป็นโคลนเหมือนเจล ลักษณะของ EPS ประกอบด้วยกลุ่มคาร์โบไฮเดรตและความหนาแน่นของประจุ ซึ่งลักษณะของเจลจะช่วยป้องกันเซลล์ของแบคทีเรียจากแรงเฉือนของน้ำและสารเคมี เช่น คลอรีน

2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองเมมเบรน

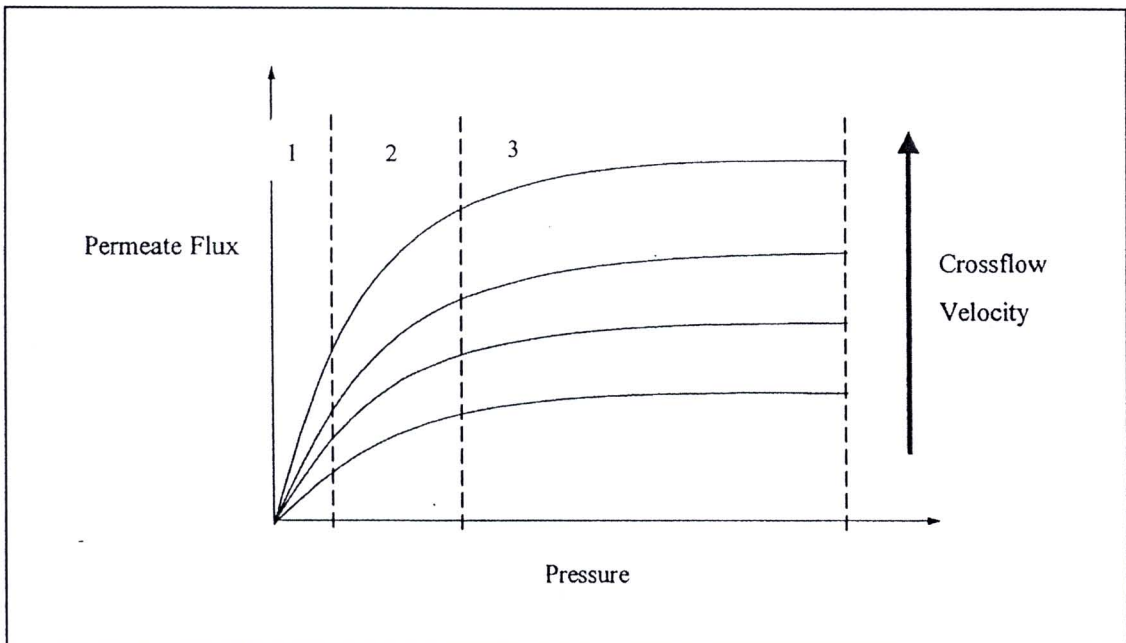
การเกิด Concentration Polarization (CP) เกิดจากการสะสมของโมเลกุล/อนุภาคของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ เป็นปรากฏการณ์ที่พบอยู่ทั่วไปในกระบวนการกรองโดยใช้เยื่อกรอง ตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเยื่อกรองจะสะสมอยู่ผิวหน้าเยื่อแผ่น ทำให้ความเข้มข้นบริเวณนั้นสูงกว่าในสารละลาย ทำให้ตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ การเกิด CP ซึ่งจะนำไปสู่การอุดตันของเยื่อกรอง ทำให้สมรรถภาพของเยื่อแผ่นลดลง

การเกิด Fouling เป็นการสะสม/อุดตัน ของตัวถูกละลายทั้งบนผิวหน้าเยื่อแผ่นและภายในรูพรุน ซึ่งทำให้ฟลักซ์ลดลง และการกักกันโมเลกุลเปลี่ยนไป สิ่งสะสมและอุดตันจะไม่

สามารถล้างออกได้ด้วยน้ำต้องทำความสะอาดด้วยสารเคมีที่เหมาะสม การเกิดการอุดตันมีผลกระทบต่อกระบวนการกรอง

การเกิดฟลักซ์ (Flux) เป็นค่าที่แสดงถึงสมรรถนะของกระบวนการซึ่งจะอยู่ในรูปของแรงขับเคลื่อนและความต้านทานต่อการไหล จะมีผลต่อการบดบังของรูพรุนและทำให้เกิดการเสียดทานภายในรูพรุนของเยื่อกรอง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

Transmembrane Pressure สำหรับการเดินระบบด้วยการไหลแบบ Cross Flow พบว่าอัตราการไหลผ่านเยื่อกรอง (Flux) ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อความดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเยื่อกรอง จากรูปที่ 2.2 เมื่อทำการเดินระบบในช่วงที่หนึ่ง (เริ่มต้น) อัตราการไหลผ่านเยื่อกรอง (Flux) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กราฟที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ในช่วงที่สองอัตราการไหลผ่านเยื่อกรองเป็นแบบเอกโพเนนเชียลและในช่วงที่สามพบว่าการไหลผ่านเยื่อกรองเริ่มคงที่ค่าความดันสูง ๆ สำหรับความเข้มข้นต่ำและค่าความดันการเดินระบบที่พอดี อัตราการไหลผ่านเยื่อกรองและความดันจะมีความสัมพันธ์กันในลักษณะแปรผันตรง ที่ความดันในการเดินระบบที่สูง ๆ การลดลงของอัตราการไหลผ่านเยื่อกรองเริ่มต้นจะคงที่และในที่สุดก็สม่ำเสมอ (Metcalf and Eddy, 1991)



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันต่อเพอมีเอทฟลักซ์ (Herath, 1984)



2.4.6 การตรวจสอบเยื่อกรองเมมเบรน

เป็นการวิเคราะห์การอุดตันเยื่อกรองเมมเบรน เนื่องจากทำให้ฟลักซ์ลดลงโดยพิจารณาจากค่าแรงดันที่ผ่านเยื่อกรอง เรียกว่า Transmembrane Pressure (TMP) ดังนั้นจึงทำให้ต้องทราบค่าต่าง ๆ ดังนี้

1. เปอร์เซ็นต์กักกัน หมายถึง จำนวนเปอร์เซ็นต์ที่เยื่อเมมเบรนสามารถกักกักตัวถูกละลายเอาไว้ไม่ให้ผ่านเมมเบรน ดังสมการ (2.1)

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (2.1)$$

เมื่อ	R	คือ อัตราการกักกันตัวถูกละลายออกจากน้ำ
	C_p	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่มีอยู่ในน้ำเพอมีเอท
	C_f	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่มีอยู่ในน้ำป้อนเมมเบรน

2. เพอมีเอทฟลักซ์ หมายถึง อัตราการไหลของน้ำเพอมีเอทผ่านพื้นที่ผิวเมมเบรน มีหน่วยเป็นปริมาตรต่อพื้นที่ผิวเมมเบรนต่อเวลา มีความสัมพันธ์กับแรงขับเคลื่อน และสภาพการซึมผ่านเมมเบรนของตัวทำละลาย คำนวณได้จากสมการ (2.2)

$$J = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{\mu R} \quad (2.2)$$

เมื่อ	J	คือ ฟลักซ์ของสารละลายผ่านเมมเบรน ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$)
	ΔP	คือ ผลต่างของความดันที่ใช้กับสารละลาย (Pascal)
	$\Delta \pi$	คือ ผลต่างความดันออสโมติกของสารละลาย (Pascal)
	μ	คือ ความหนืดของสารละลาย (Pascal/sec)
	R	คือ ความต้านทานต่อการไหลผ่าน (Per meter)

สำหรับน้ำบริสุทธิ์ และสารละลายของสาร โมเลกุลใหญ่ค่า $\Delta\pi$ มีค่าเท่ากับศูนย์ และน้อยกว่า ΔP มาก ๆ ดังนั้นสามารถตัด $\Delta\pi$ ทิ้งได้ (รัตนจิระรัตนานนท์, 2543) ดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R} \quad (2.3)$$

$$\Delta P = J \times \mu \times R_t \quad (2.4)$$

การต้านทานของเยื่อกรองที่ได้ผ่านการใช้งานสามารถสังเกตได้ เมื่อฟลักซ์ลดลง ซึ่งแสดงว่าเกิดความต้านทานการไหลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความต้านทานในการไหล (R_f) ของเยื่อกรองที่ผ่านการใช้นั้นรวมความต้านทานจากหลายส่วน คือ ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง (R_f) ความต้านทานจากการเกิดโพลาไรซ์ (R_p) ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานเนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (R_{cp}) และจากชั้นเค้ก (R_g) และความต้านทานเนื่องจากการอุดตันรูพรุนของตัวถกละลาย (R_{pb})

3. เปอร์เซนต์แยกกลับ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาตรน้ำสะอาดที่ผลิตได้ต่อปริมาตรของน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำสะอาด คำนวณตามสมการ (2.5)

$$\%R = 100 \times \frac{Q_p}{Q_f} \quad (2.5)$$

เมื่อ	R	คือ เปอร์เซนต์แยกกลับ (% Reject)
	Q_p	คือ อัตราการไหลของน้ำเพอมีเอท
	Q_f	คือ อัตราการไหลของน้ำดิบที่เข้าระบบ

2.4.7 การทำความสะอาดเยื่อกรองเมมเบรน

เมื่อทำการเดินระบบเป็นระยะเวลาหนึ่งจะเกิดค่าฟลักซ์ที่ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการที่เยื่อกรองเมมเบรนเกิดการอุดตัน (Fouling) ของตัวถูกละลายทั้งบนผิวหน้าเยื่อกรองและภายในรูพรุนเยื่อกรอง จึงจำเป็นต้องทำความสะอาดเยื่อกรองเมมเบรนเพื่อให้ เพื่อให้เยื่อกรองมีสภาพที่ใกล้เคียงกับเยื่อกรองใหม่มากที่สุด และเพื่อยืดอายุการใช้งานด้วยวิธีที่เหมาะสม โดยการทำทำความสะอาดเยื่อกรองเมมเบรนนั้น แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก คือ (1) วิธีทางกายภาพ (Physical Method) เป็นการทำทำความสะอาดที่ใช้การเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน เช่น การเพิ่มอัตราการไหล การขูดชั้นสะสมออกจากหน้าผิวด้วยฟองน้ำ การล้างกลับ (Back Washing) เป็นต้น (2) วิธีทางเคมี (Chemical Method) เป็นการใช้สารเคมีทำความสะอาดเยื่อกรองเช่น กรด ค่าง เอ็มไซม์ เป็นต้นวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

1. วิธีทางกายภาพ ใช้หลักการในการล้างกลับทางหรือล้างย้อน (Backwash) เพื่อให้สารที่อยู่บนผิวหน้าของเยื่อกรองเมมเบรนหลุดออกไป เช่น การเพิ่มอัตราการไหล ซึ่งจะเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น แต่จะลดการสะสมและการอุดตันได้ระดับหนึ่งเท่านั้น การล้างย้อนอาจทำระหว่างการกรองหรืออาจทำเมื่อเสร็จสิ้นการกรองได้ แต่ไม่สามารถกำจัดสารที่สะสมอยู่ในเยื่อกรองเมมเบรนได้หมด จึงจำเป็นต้องทำความสะอาดด้วยวิธีทางเคมีต่อไป

2. วิธีทางเคมี สารเคมีอาจช่วยให้มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยอาจทำให้สารอุดตันพองตัว หดตัว ละลาย เกิดการหลุดออก (Desorption) หรือสารเคมีที่ใช้อาจทำปฏิกิริยากับสารอุดตัน เช่น การเกิดไฮโดรไลซิส การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นต้น ซึ่งสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ กรด ค่าง เอ็มไซม์ สารลดแรงตึงผิว สารฆ่าเชื้อ เป็นต้น การจะเลือกสารเคมีใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อกรองเมมเบรนว่ามีความสามารถในการทนต่อสารเคมีนั้นได้มากน้อยเพียงใด สารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดเมมเบรน สามารถจำแนกเป็น กรด ค่าง สารลดแรงตึงผิว สารจับโลหะ และเอ็มไซม์

สารทำความสะอาดที่เป็นกรด ใช้ได้ทั้งกรดอินทรีย์และอนินทรีย์ ส่วนใหญ่มีหน้าที่กำจัดตะกอนที่เกิดจากเกลือต่างๆ เช่น เกลือของสารประกอบแคลเซียม และโลหะออกไซด์ โดยกรดเข้าไปทำการสลายตะกอนให้อยู่ในรูปของสารละลายเกลือ เช่น การเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมคลอไรด์ และคาร์บอนไดออกไซด์

- กรดไฮโดรคลอริกและซัลฟูริก เป็นกรดที่มีราคาถูก แต่ถ้าใช้ในระดัความเข้มข้นสูง อาจทำลายเมมเบรนและองค์ประกอบอื่น ๆ ของระบบกรองได้

- กรดไนตริก เป็นสารเคมีที่ทำให้เกิดการออกซิไดส์อย่างรุนแรง และสามารถทำให้เกิดการรวมตัวของไนตริกกับสารอินทรีย์บางตัวได้ จึงสามารถใช้กำจัดการอุดตันที่เป็นสารอินทรีย์หรือสารชีวภาพได้ แต่มีข้อเสียที่อาจทำลายเมมเบรนบางชนิดได้

- กรดฟอสฟอริก มีฤทธิ์ในการทำลายเมมเบรนได้น้อยกว่ากรดเกลือ ซัลฟูริก และไนตริก เป็นตัวจับโลหะที่ดีและเพิ่มประสิทธิภาพ การกำจัดเหล็กออกไซด์สามารถใช้กับสารละลายบัพเฟอร์เพื่อควบคุมพีเอชในระหว่างกระบวนการทำความสะอาดได้ ข้อเสียของกรดฟอสฟอริกคือมีราคาแพง

- กรดซิตริก มีความสามารถในการจับโลหะ จึงเหมาะสมกับการกำจัดตะกอนแคลเซียม แต่จะก่อตัวเป็นองค์ประกอบที่ซับซ้อนของเฟอร์รัส (Ferrous Iron) ทำให้มีการละลายที่จำกัด สามารถแก้ปัญหาได้โดยการเติมแอมโมเนีย ในสารทำความสะอาด เพื่อให้โลหะเกิดปฏิกิริยารวมตัวเป็น Ferrous Ammonium Salt ซึ่งละลายได้สูง

สารทำความสะอาดที่เป็นด่าง ใช้ในการกำจัดฟาวลิงจำพวกสารอินทรีย์ คอลลอยด์ ซิลิกา สารอนินทรีย์ และยังใช้เป็นสาร Sanitizer ได้ด้วย สารที่นิยมใช้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไตรฟอสเฟต โซเดียมไฮโปคลอไรด์ เป็นต้น

สารลดแรงตึงผิว เป็นสารสังเคราะห์ที่มีหัวและไม่มีหัว ส่วนที่มีหัวจะจับกับน้ำหรือสารละลายที่มีหัว ส่วนที่ไม่มีหัวจับกับไขมันและน้ำมัน สารลดแรงตึงผิวมีผล ในการทำความสะอาดเมมเบรนโดยกำจัดการอุดตันออกจากผิวหน้าเมมเบรน ทำให้ไขมันและน้ำมันเป็นอิมัลชัน รวมตัวกับสารอุดตันที่มีคุณสมบัติ ไม่ชอบน้ำ ทำให้เกิดเป็นไมเซลล์โดยส่วนที่ชอบน้ำจะหันทางที่มีหัวให้กับน้ำ ทำให้เกิดไมเซลล์ทรงกลมที่มีน้ำล้อมรอบสารลดแรงตึงผิว ที่ใช้ล้างเมมเบรนมีโครงสร้างทางเคมีหลากหลาย เช่น เป็นกลาง ประจุลบ ประจุบวก เป็นต้น ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิว เช่น คาร์บอกซีเลต ซัลโฟเนต ซัลเฟต ฟอสเฟต สารประกอบแอมโมเนีย เป็นต้น

เอนไซม์ เป็นสารทำความสะอาดที่มีราคาแพง ใช้สำหรับทำความสะอาดสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน โดยทำให้เกิดการแตกตัว ประสิทธิภาพของเอนไซม์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หรือมีความเป็นกรดค่าที่ไม่เหมาะสม ตัวอย่างเอนไซม์ที่ใช้ทำความสะอาดเมมเบรน เช่น ถ้าสารอุดตันเป็นโปรตีน ควรใช้เอนไซม์โปรติเอส (Protease)

สารจับโลหะ เป็นสารจับโลหะประกอบด้วยตัวรับ อิเล็กตรอน 2 อะตอมหรือมากกว่า ซึ่งจะไปร่วมสร้างพันธะกับอะตอมเดี่ยว สารจับโลหะที่นิยมใช้ คือ อีดีทีเอ (Ethylenediamine tetra Acetic Acid: EDTA) และซิเตรท เป็นต้น

สารฆ่าเชื้อ เป็นสารสำหรับฆ่าเชื้อเมมเบรน โดยเฉพาะกับเมมเบรนที่ไม่ทนความร้อน ซึ่งไม่สามารถฆ่าเชื้อด้วยน้ำร้อนหรือไอน้ำ สารที่นิยมใช้กันมาก คือ ไฮเปอร์คลอไรท์ แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถใช้ได้กับสารที่ผลิตจากพอลิเอไมด์ และสารพวก Peracetic Acid และ Hydrogen Peroxide

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างสารทำความสะอาดที่ใช้ในการกำจัดสารที่อุดตัน (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

สารทำความสะอาด	สารอุดตัน		
	ตะกรันเกลือ ออกไซด์ของ โลหะ	คอลลอยด์/ อนุภาค	จุลินทรีย์
กรดเกลือเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	✓	-	-
กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ผสมกับแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (พีเอช 4)	✓	-	-
กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	✓	-	-
โซเดียมไฮดรอกไซด์ พีเอช 11-12	-	✓	✓
ไตรโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ผสม กับเกลือโซเดียมไฮดรอกไซด์ของอัตราที่เอเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ พีเอช 11-12	-	✓	✓
โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	✓	-	-
กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักผสม แอมโมเนียมไบฟลูออไรด์เข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก	✓	✓	-

2.5 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter: NOM)

ปัญหาใหญ่ของน้ำเสียมักเกิดจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำ ทำให้ต้องมีการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเกิดขึ้น เนื่องจากสารอินทรีย์มักย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงมีความต้องการออกซิเจนเพื่อให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ออกซิเจนในการหายใจได้ ปริมาณสารอินทรีย์ที่มีมากเกินไปทำให้ออกซิเจนละลายน้ำในธรรมชาติมีไม่พอเพียง เกิดสภาวะขาดอากาศซึ่งมีผลทำให้เกิดการเน่าเหม็นของแหล่งน้ำ และการเสียชีวิตของสัตว์น้ำต่างๆ ที่ขาดออกซิเจน โดยพบว่าสิ่งปนเปื้อนในน้ำ ยังเกิดจากสิ่งสกปรกที่แขวนลอยในน้ำ (Suspended Impurities) ได้แก่ อนุภาคของดินขนาดต่าง ๆ แร่ธาตุ (Mineral Matter) สารอินทรีย์ (Organic Matter) สาหร่าย (Algae) โปรโตซัว (Protozoa) และแบคทีเรีย (Bacteria) ซึ่งรวมทั้งชนิดที่ทำให้เกิดโรคและชนิดที่ไม่ทำให้เกิดโรค (Pathogenic and Non-pathogenic Bacteria) สารเหล่านี้จะให้น้ำมีสี กลิ่นและความขุ่น สิ่งสกปรกที่ละลายน้ำ (Dissolved Impurities) ได้แก่ แก๊สต่าง ๆ เช่น ออกซิเจน (Oxygen) ไนโตรเจน (Nitrogen) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) แอมโมเนีย (Ammonia) คาร์บอนไดออกไซด์

(Carbon Dioxide) มีเทน (Methane) คลอไรด์ (Chloride) ไนไตรท์ (Nitrite) ไนเตรท (Nitrate) เป็นต้น ส่วนสารคอลลอยด์ในน้ำ (Colloidal Impurities) ได้แก่ อนุภาคที่เล็กที่สุดของซิลิกาและดินอินทรีย์วัตถุที่เน่าเปื่อย (Organic Matter) ซึ่งอยู่ในรูปของคอลลอยด์ที่ไม่ตกตะกอน (Colloidal or Pseudo Solution)

2.5.1 แหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

สารอินทรีย์ในน้ำมีบทบาทสำคัญในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (มันสิน ตันทุล เชมม์, 2547) โดยทั่วไปสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. สารอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายของอินทรีย์สาร ชากพืชซากสัตว์ในน้ำธรรมชาติที่เรียกว่า Natural Organic Matter (NOM) เกิดเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจนสามารถละลายน้ำได้ เช่น สารกลุ่มฮิวมิก (Humic Acid) และฟุลวิก (Fulvic Acid) ซึ่งสารทั้งสองนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดสีในน้ำ (สีน้ำตาลอ่อนหรือสีชา)
2. สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นด้วยจุลินทรีย์ ประกอบด้วยโปรโตซัว แบคทีเรีย เชื้อรา และสาหร่ายเซลล์เดียว สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นนี้อาจละลายปนเปื้อนมากับน้ำโดยตรงหรือเกิดจากซากจุลินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ภายในเซลล์ละลายปนมา กับน้ำ ตัวอย่าง เช่น สารกลุ่มไมโครซีสทิน (Microcystin) ที่เกิดจากสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว Microcystin Aeruginose ซึ่งสารกลุ่มนี้บางตัวเป็นสารพิษ สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวชื่อโอซิเลลาโตเรียลิโมสา (Oscillatoria Limosa) จะผลิตสารกลุ่มที่เกิดจากการเผาผลาญในเซลล์ของสาร Methylisorneol ซึ่งเป็นสารที่ทำให้น้ำมีกลิ่นไม่พึงประสงค์เป็นต้น
3. สารอินทรีย์ที่เกิดจากน้ำเสียชุมชน กิจกรรมทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ตลอดจนการขับถ่าย ขี้ระเลี้ยงร่างกายของมนุษย์มีส่วนทำให้มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนไปกับน้ำได้ รวมทั้งสารเคมี ยาฆ่าแมลงและปุ๋ย เป็นต้น
4. สารอินทรีย์ที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียและระบบปรับสภาพน้ำ เช่น สารเร่งการตกตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ซึ่งมักจะมีสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ไม่อาจย่อยสลายได้ ตลอดจนซากจุลินทรีย์หลงเหลือปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านระบบบำบัด เมื่อผ่านระบบการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนอาจทำให้สารเหล่านี้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษเพิ่มมากขึ้นได้ เช่น ทำให้เกิดสารในกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes: THMs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง

นอกจากนี้ยังต้องทราบถึงชนิดและขนาดของอนุภาคที่มีอยู่ในน้ำเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุในการกรองให้เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 2.9



ตารางที่ 2.9 ขนาดของอนุภาคที่มีอยู่ในน้ำ (Mulder et al., 1996)

อนุภาค/โมเลกุล	ขนาด (นาโนเมตร)
ยีสต์ รา	1,000-10,000
แบคทีเรีย	300-10,000
อิมัลชัน น้ำมัน	100-10,000
คอลลอยด์	100-1,000
ไวรัส	30-300
โปรตีน/โพลีแซคคาไรด์ (MWCO 10,000-1,000,000 คาร์ตัน)	2-10
เอ็มไซม์ (MWCO 10,000-100,000 คาร์ตัน)	2-5
สารปฏิชีวนะ (MWCO 300-1,000 คาร์ตัน)	0.6-1.2
สารอินทรีย์ (MWCO 30-500 คาร์ตัน)	0.3-0.8
อออนอนินทรีย์ (MWCO 10-100 คาร์ตัน)	0.2-0.4
ไฮโดรเจน	0.289
ออกซิเจน	0.346
ไนโตรเจน	0.346
น้ำ	0.2

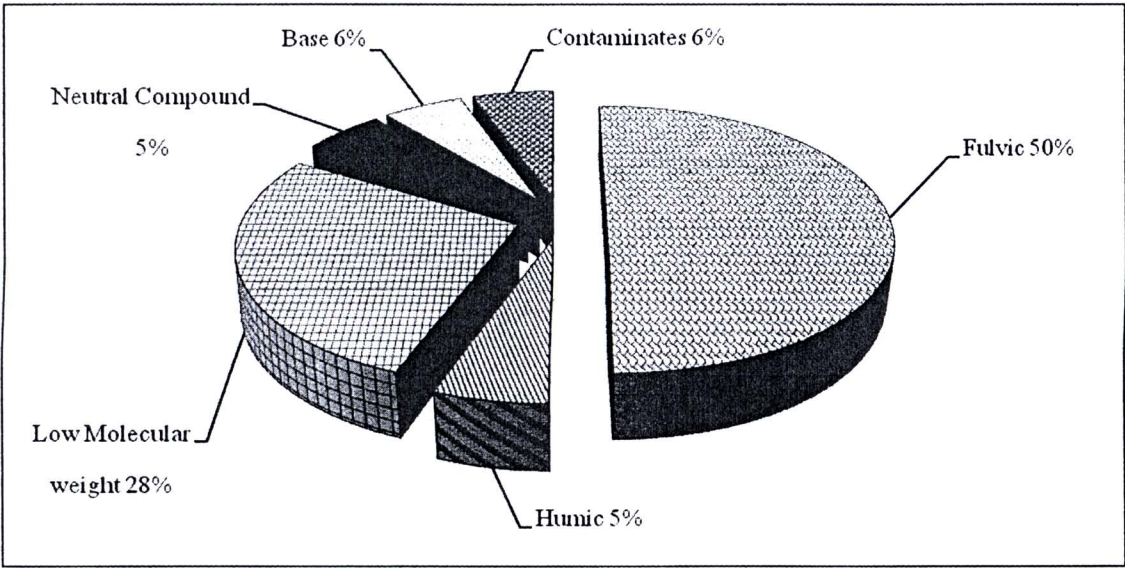
2.5.2 องค์ประกอบของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

สารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำทั่วไปจะประกอบไปด้วยไฮโดรโฟบิกและไฮโดรฟิลิก ขึ้นอยู่กับขนาดและคุณลักษณะของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำ (Marthaba et al., 2003) โดยกลุ่มไฮโดรโฟบิกซึ่งเป็นสารประกอบชีวโมเลกุล ได้แก่ กรดไขมันและกรดฟลูวิก ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าในแหล่งน้ำธรรมชาติสารกลุ่มไฮโดรโฟบิกมากกว่า 50% เป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolve Organic Carbon: DOC) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของซากพืชหรือสัตว์ ถ้าในน้ำมีปริมาณความเข้มข้นของ DOC สูงกว่า 5 mg/L น้ำในแหล่งน้ำนั้นจะมีสี โดยองค์ประกอบของสารอินทรีย์ธรรมชาติสามารถแบ่งออกมาได้เป็น 6 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 องค์ประกอบของสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำทั่วไป (Swietlik et al., 2005)

ตัวอย่าง	พารามิเตอร์	
	UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	DOC (mg/L)
Humic Acids (HA)	0.231	5.81
Hydrophobic Acids (HOA)	0.162	4.81
Hydrophobic Neutrals (HON)	0.170	5.54
Hydrophilic Acids (HIA)	0.154	4.98
Hydrophilic Bases (HIB)	0.166	5.02
Hydrophilic Neutrals (HIN)	0.114	4.84

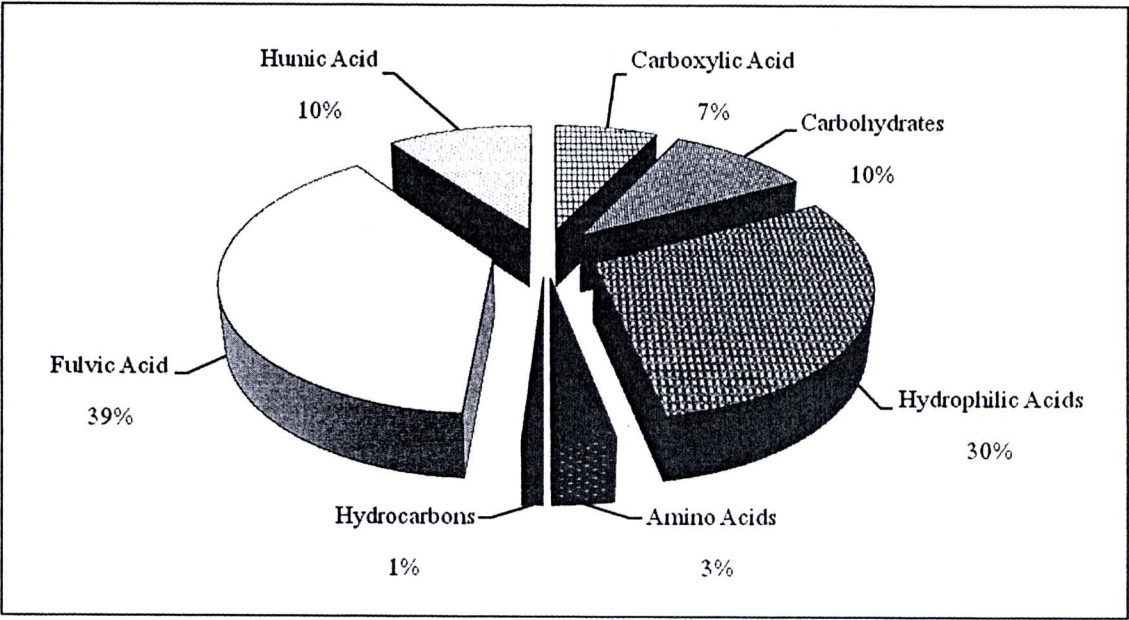
สำหรับสารอินทรีย์ละลายน้ำในแหล่งน้ำผิวดินจะส่วนประกอบของสารอินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในขณะที่กลุ่มไฮโดรฟิลิกจะมีขนาด MWCO 300 ถึง 3,000 คาร์ตัน ประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และกรดอะมิโน เป็นต้น



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำผิวดิน

ส่วนประกอบของสารอินทรีย์ละลายน้ำในทั่วไป พบว่ากรดไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic acid) ประมาณ 30% จะถูกเรียกว่า “Hydrophilic Humic Substance” ซึ่งสารประกอบฮิวมิก (Humic Substance) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ (1) กรดฮิวมิก (Humic Acid) ไม่ละลายน้ำที่พีเอช เท่ากับ 1 มี MWCO อยู่ระหว่าง 10-300 กิโลดาร์ตัน (2) กรดฟุลวิก (Fulvic Acid)

ละลายน้ำทุก ๆ พีเอชมี MWCO อยู่ระหว่าง 3-100 กิโลดาร์ตัน และ (3) ฮิวมิน (Humin) ไม่ละลายน้ำ (Swift, 1985) ซึ่งกรดฮิวมิกและฟูลวิกสามารถกำจัดได้ด้วยกระบวนการแยก ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไป สารอินทรีย์ธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (Thurman, 1985)



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของสารอินทรีย์ทั่วไปที่มี DOC 5 mg/L

จากการศึกษาที่ผ่านพบว่าในแหล่งน้ำดิบทั่วไปในแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำที่มาศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 คุณลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แหล่งน้ำดิบ	พารามิเตอร์		อ้างอิง
	UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	DOC (mg/L)	
Aung-Keaw Reservoir, Thailand	0.110-0.274	0.36-1.67	Wattabachai, S., et al. (2004)
Mae-Hia Reservoir, Thailand	0.110-0.206	0.18-0.65	
Nakdong River, Korea	0.049	1.93	Jung, C.W., et al. (2008)
Hoedong Reservoir, Korea	0.028	1.79	
Bangkhen WTP, Thailand	0.131	-	วรพจน์ กนกกันหาพงษ์ บุญฤทธิ์ ปัญญาภิญ โยผล และ สุรพงษ์ วัฒนะจิระ (2550)
Samsen Canal, Thailand	0.3-0.6	-	ศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน และ ขวลิขิต รัตนธรรมสกุล (2552)

2.5.3 การแบ่งประเภทของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

ในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ เป็นสิ่งสำคัญที่เราต้องทราบถึงคุณสมบัติของสารที่มีอยู่ในน้ำ เพื่อแยกสารที่เป็นเนื้อเดียวกันออกได้อย่างถูกต้อง

- อนุภาคและอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ (Particulate/Dissolve Organic Carbon Separation) ในการแยกอนุภาคออกจากสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ สามารถแยกได้ด้วยกระดาษกรองที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน แต่การกรองด้วยกระดาษกรองที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน ไม่สามารถกำจัดอนุภาคของคอลลอยด์ขนาดเล็กที่ละลายอยู่หรือสารอินทรีย์ที่มีอนุภาคเล็กกว่า 450 นาโนเมตร
- กรดฟลูวิกและกรดฮิวมิก (FA/HA Separation) กรดฮิวมิกสามารถตกตะกอนได้ที่พีเอชต่ำกว่า 1.0 ในขณะที่กรดฟลูวิกยังคงเหลืออยู่ในน้ำได้ทุกพีเอช (Bourboniere and Halderen, 1989) กรดฟลูวิกที่ละลายอยู่ในน้ำจะพบได้มากกว่ากรดฮิวมิก (Rasyid et al., 1992)
- ขนาดและน้ำหนักโมเลกุล (Size/MW Fractional) ขนาดและน้ำหนักของอนุภาคมีความสำคัญต่อลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัด กล่าวคือมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่และการเคลื่อนที่ของอนุภาค จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า 50-60% ของฟลูวิกจะมีขนาดใหญ่กว่า 10 kDa (Legube et al., 1990) และน้ำหนักโมเลกุลของฟลูวิกอยู่ระหว่าง 650-950 คาร์ตัน ส่วนน้ำหนักโมเลกุลของฮิวมิกอยู่ระหว่าง 2,000-3,000 คาร์ตัน
- ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic/Hydrophobic Fractionation) สำหรับไฮโดรฟิลิกเป็นสารที่ละลายอยู่ในน้ำ (Cotsaris et al., 1988) พบว่าสารอินทรีย์ประมาณ 58-74% เป็นสารที่ละลายอยู่ในน้ำในขณะที่สารกลุ่มไฮโดรโฟบิกหรือกรดฮิวมิกเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ

2.5.4 การตรวจวัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ

ลักษณะของสารอินทรีย์ในน้ำมีความสำคัญต่อการเลือกระบบบำบัดหรือทราบถึงแหล่งที่มาของน้ำนั้นได้ นอกจากนี้ยังสามารถดูได้จากน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) และประจุ (Charge) เป็นต้น ในการวัดหาปริมาณของสารอินทรีย์ว่าละลายอยู่ในน้ำมากหรือน้อยเพียงใดจะเป็นจำนวนคาร์บอนที่มีทั้งหมดในน้ำหรือเรียกว่า Total Organic Carbon (TOC) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร หรือสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolve Organic Carbon: DOC) โดยไม่นับรวมคาร์บอนของสารประกอบอนินทรีย์หรือในรูปคาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนต แต่ถ้าสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของธาตุในหมู่ 7 ในตารางธาตุหรือธาตุในกลุ่มเดียวกับคลอรีน ได้แก่ ฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน ไอโอดีน แอสเตติน ซึ่งเรียกว่ากลุ่มธาตุเฮโลเจน (Halogen) จะวัดในรูปของ TOX (Total Organic Halogen) สารในกลุ่ม TOX มักจะมีความเป็นพิษอยู่หลายชนิด ถ้าเป็นน้ำที่มีปริมาณ NOM TOC หรือ TOX สูง ๆ จะมีความเสี่ยงในการเกิดสารอนุพันธ์ที่เป็นพิษได้มาก

การตรวจวัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำและคุณภาพน้ำที่ได้หลังผ่านกระบวนการบำบัด เช่น มีความสำคัญต่อสารที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน และเป็นปัญหาที่ทำให้เกิดการอุดตันในระบบเมมเบรน และยังพบว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มี NOM หลงเหลืออยู่นั้น เมื่อทำการเติมคลอรีนลงไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารก่อมะเร็งที่เรียกว่า Disinfection by Product ซึ่งจะเปลี่ยนรูปไปเป็นไตรฮาโลมีเทน (THMs) โดยสารอินทรีย์ธรรมชาติไม่สามารถวัดได้โดยตรง ซึ่งสามารถวิเคราะห์สารอินทรีย์ธรรมชาติได้หลายวิธีดังตารางที่ 2.12 แต่วิธีที่สะดวกและนิยมใช้ในการวิเคราะห์ คือการวัดในรูปของสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) สารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) และการดูดซับที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร สำหรับการวัดที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรเป็นตัววัดดัชนีของสารที่มีอยู่ในน้ำจะมีความสัมพันธ์ต่อการวัดสารอินทรีย์ละลายน้ำและเป็นตัวแทนสำหรับการหาค่าสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์ต่อการเกิดสารตั้งต้น DBPs ซึ่งก่อให้เกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน แม้ว่าแนวโน้มส่วนใหญ่ในน้ำจะมีสารประกอบมากมายที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง UV_{254} และ DOC จะสามารถบอกถึงคุณภาพของน้ำได้ โดยน้ำที่มี UV_{254} สูงก็จะมีค่า DOC สูงด้วย (Haffman et al., 1985; Edzwald and Benschoten 1990; Chow et al., 2004)

ตารางที่ 2.12 เครื่องมือในการตรวจวิเคราะห์สารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ

พารามิเตอร์	เครื่องมือในการวิเคราะห์
Color	Visible Spectrophotometer
	Visual Comparators
Aromaticity (UV absorbance)	UV Spectrophotometer
Total Organic Carbon	DOC Analysis
Dissolved Organic Carbon (DOC)	
Biodegradable Dissolved Organic Carbon (BDOC)	
Assimilable Organic Carbon (AOC)	Bacterial Regrowth Potential (BRP)
Bacterial Regrowth	
Molecular Weight Distribution	High Performance Size Exclusion Chromatography (HPSEC)
Hydrophobicity/Hydrophilicity	Rapid Fractionation (RF)
Trihalomethane Formation Potential (THMFP)	Gas Chromatography (GC)
Functional Groups (Aliphatic, Aromatic, Nitrogen Containing)	Gas Chromatography-mass Spectroscopy (GC-MS)
	Infrared Spectroscopy (FTIR)
	Nuclear Magnetic Resonance (NMR)

2.5.5 กระบวนการในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ

ในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสี กลิ่น และสารอินทรีย์ออกจากน้ำ โดยกระบวนการทั่ว ๆ ไป ที่นิยมใช้การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) และการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ซึ่งในปัจจุบันยังได้นำวิธีการการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) มาเป็นวิธีการลดปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติลงก่อนที่จะผ่านเข้าระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Morran et al., 1996) หรือใช้กระบวนการกำจัดด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) หรืออัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) แทนการฆ่าเชื้อด้วยสารเคมี

Qin et al. (2006) ได้ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติจากอ่างเก็บน้ำในประเทศสิงคโปร์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยเลือกใช้สารส้ม (Alum) ในการสร้างตะกอน พบว่าปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม 5 mg/L ที่ pH เท่ากับ 5.2 สามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปของ DOC ได้ 45% และกำจัดความขุ่นได้ 97% ในขณะที่ pH เท่ากับ 7.2 สามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปของ DOC ได้ 35% สำหรับ Leiknes et al. (2004) ได้ประยุกต์ใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันในการผลิตน้ำดื่มเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าสามารถลดความขุ่นให้เหลือน้อยกว่า 0.2 NTU กำจัดสีได้มากกว่า 95% กำจัด UV_{254} ได้ 85% และ กำจัดลดสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปของ TOC ได้ประมาณ 65-75% เมื่อใช้โพลีอลูมินัมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 5 mg/L เป็นสารโคแอกกูเลนต์และอัลตราการไหลผ่านเยื่อกรองเมมเบรน เท่ากับ 180 ลิตรต่อชั่วโมง นอกจากนี้การใช้โพลีอลูมินัมคลอไรด์สามารถลดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) ได้มากกว่าการใช้เฟอริกคลอไรด์และเฟอริกซัลเฟตได้ร้อยละ 56 (Korbutowicz et al., 2008)

Siddiqui et al. (1997) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยโอโซนในน้ำดิบจาก 4 แหล่ง คือ (1) Silver Lake (SLW) (2) Barker Lake (BLW) (3) Boulder Reservoir (BRW) และ (4) Colorado River (CRW) ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มี DOC อยู่ในช่วง 2.8-7.0 นำมากรองผ่านเยื่อกรอง 0.45 ไมครอน พบว่า DOC ลดลง 40-50% ในขณะที่ Aldehyde ลดลง 90-100% และ ไตรฮาโลมีเทนลดลง 40-60% ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ Cyclodextrin polyurethanes เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ละลายน้ำได้ 6-33% (Nkambule et al., 2009) และเมื่อใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับโอโซน จะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ละลายน้ำได้มากกว่า 88%

2.5.6 สารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำที่ผ่านการบำบัด

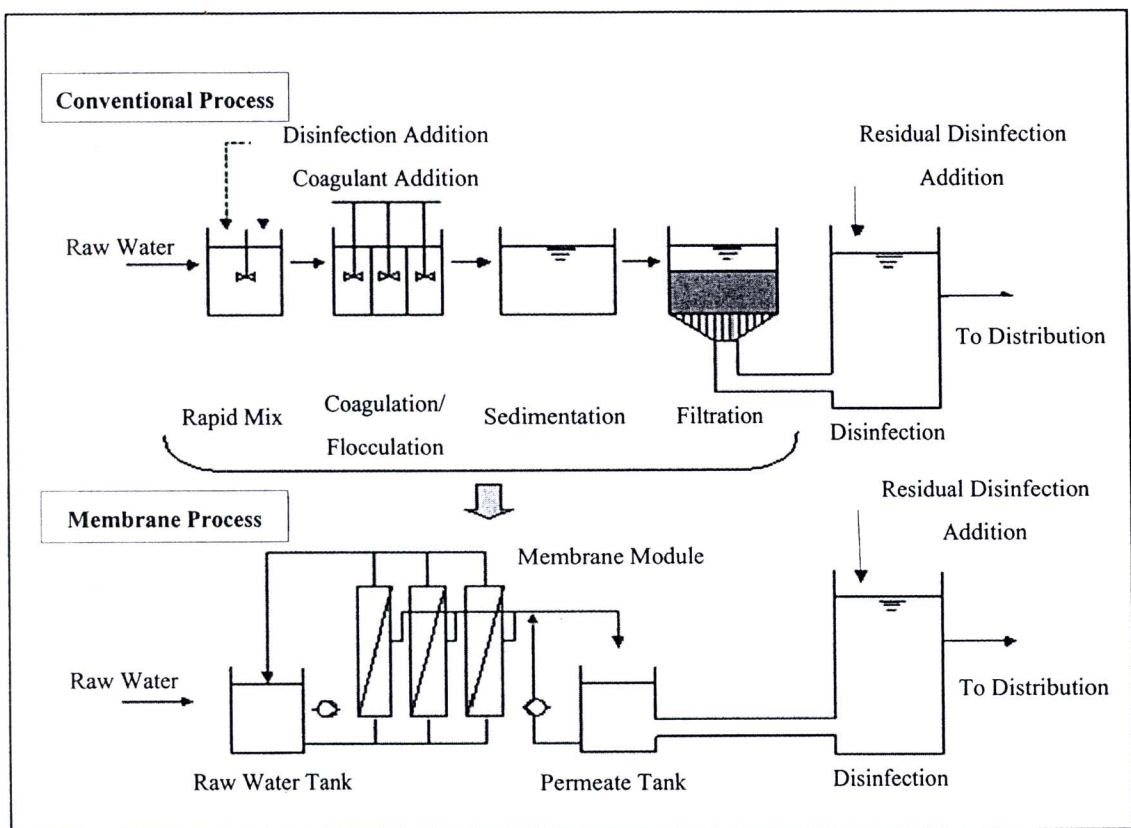
การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำมีจุดประสงค์เพื่อกำจัดผลพลอยได้ที่เกิดสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by Product) และสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการผลิตน้ำประปาโดยทั่วไปที่เรียกว่า Conventional Process ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟลอคกูเลชัน การตกตะกอนและการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนนั่นไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำออกจากน้ำได้อย่างเพียงพอ ในทางกลับกันอาจยังเพิ่มปัญหาให้กับน้ำประปาที่ผลิตได้ ยกตัวอย่างเช่น ในกระบวนการเติมคลอรีนให้กับน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติต่ำ จะทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติหลงเหลืออยู่ในน้ำมาก อีกทั้งยังเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้เกิดสีและกลิ่น (Uyak et al., 2008) หากเติมคลอรีนโดยคำนึงถึงแต่ปริมาณคลอรีนที่ต้องการให้ตกค้างอยู่ในน้ำ (Chlorine Residual) อาจทำให้เกิดสาร DBPs เช่น สารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes: THMs) ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในกลุ่มสารก่อมะเร็งในน้ำดื่ม (Jimiez et al., 1993) สารอินทรีย์ธรรมชาติเป็นสารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก เรียกว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยสารตั้งต้น (Disinfection by products: DBPs) ประกอบด้วย ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes) และสารประกอบคลอรีนอื่น ๆ (Tan and Amy, 1991) สารที่ใช้ฆ่าเชื้อในการผลิตน้ำดื่ม นั้น เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มาจากสารประกอบฮาโลเจนที่เกิดเป็น Disinfection by Products (DBPs) โดยสารสองตัวหลัก ได้แก่ (1) Trihalomethanes (THMs) และ (2) Haloacetic Acids (HAAs) จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ซึ่งในการกำหนดค่ามาตรฐานของน้ำประปา หรือที่เรียกว่า ค่าระดับความปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Contaminate Levels: MCLs) ของสารปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำประปา ถูกกำหนดโดยมาตรฐานของ U.S. EPA ในน้ำดื่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 มาตรฐานระดับความปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ในน้ำดื่ม (Walsh, 2008)

Country	Method	Concentration	
		µg/L of TTHMs	µg/L of HAAs
USA	Established Maximum Contaminant level (MCLs)	80	60
Canada	The Federal-provincial-Territorial Committee on Drinking Water Quality Has an Established Maximum Acceptable Concentration (MAC)	100	-
European Union	-	100	-

2.6 การประยุกต์ใช้เยื่อกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

การใช้กระบวนการกรองผ่านเยื่อกรองในทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อเพิ่มศักยภาพในการบำบัดหรือปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบให้มีคุณภาพดีสม่ำเสมอและเป็นที่ยอมรับ อีกทั้งยังช่วยให้การทำงานรวดเร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้กระบวนการกรองผ่านเยื่อกรองสามารถทดแทนหน่วยบำบัดได้ถึง 4 หน่วยบำบัด คือ (1) ประกอบด้วย กระบวนการกวนเร็ว (Rapid Mixing) (2) กระบวนการสร้างตะกอน (Flocculation) (3) กระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) และ (4) กระบวนการกรอง (Filtration) (Mallevalle et al., 1996)



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปกับกระบวนการกรองผ่านเยื่อกรอง

ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration: MF) เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อกรองที่มีรูพรุนขนาด 500-1,000 nm ใช้สำหรับแยกสารโมเลกุลใหญ่ สารแขวนลอยหรืออนุภาคเล็ก ๆ ออกจากของเหลว โดยช่วงความดันที่ใช้อยู่ในช่วง 0.5-5.0 atm ซึ่งมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น การบำบัดน้ำเสีย การบำบัดน้ำทิ้ง การปรับปรุงคุณภาพน้ำ สำหรับอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration: UF) เป็นกระบวนการ

แยกสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน เอ็นไซม์ และแป้งออกจากน้ำและสารโมเลกุลเล็กอื่น ๆ โดยใช้เยื่อกรองที่มีขนาดรูพรุน 5-20 nm โดยช่วงความดันที่ใช้อยู่ในช่วง 1.0-10.0 atm

กระบวนการกรองผ่านเยื่อกรองโดยทั่วไปจะใช้ลักษณะการกรองแบบไหลขวาง (Cross Flow) เป็นการผ่านสารละลายขนานกับเยื่อแผ่นหรือตั้งฉากกับทิศทางการไหล ทำให้สารละลายพัดพาอนุภาคจากผิวหน้าเยื่อกรอง ซึ่งเรียกว่าเค้ก (Cake) การสะสมของสารบนเยื่อกรองจะเกิดเพียงบาง ๆ เท่านั้น ดังนั้นการประยุกต์ใช้ในปัจจุบันจึงเป็นแบบไหลขวางเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเทียบกับ การกรองแบบ Dead-end ซึ่งจะเกิดการอุดตันเยื่อกรองได้ง่ายกว่า โดย Owen et al. (1995) ได้ศึกษาระบบไมโครฟิลเตรชัน (MF) แบบ Dead-end ของสารละลายเบ็นโตนีกับสารละลาย Bovine Serum Albumin (BSA) โดยใช้แผ่นโพลีคาร์บอนเนตที่มีรูพรุนแบบแคลปาลี พบว่ากลไกการเกิดการอุดตันเยื่อกรองมีดังนี้ (1) เกิดการอุดตันที่รูพรุนที่เล็กที่สุดก่อน (2) เกิดการสะสมภายในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ (3) อนุภาคใหญ่เริ่มปกคลุมหรือสะสมทับอนุภาคที่สะสมหรืออุดตันอยู่ก่อน (4) เกิดชั้นเค้ก (Cake) เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการถ่ายเทมวลในกระบวนการกรองแบบไหลขวางก็ยังมีปัญหาการอุดตันเยื่อกรองซึ่งเป็นการสะสม และ/หรืออุดตันภายในรูพรุนและเกิดเป็นชั้นเค้ก (Cake) สาเหตุที่ทำให้เกิดการอุดตันในการกรองผ่านเยื่อกรองเกิดจากการดูดซับตัวถูกละลาย (โปรตีน ไขมัน) บนผิวหน้าเยื่อแผ่นและบนผนังรูพรุน เนื่องจากการเกิด Concentration Polarization (CP) และเกิดการอุดตัน/การบดบังรูพรุน ลักษณะสำคัญอย่างหนึ่งของการอุดตันเยื่อกรองคือ การไม่สามารถใช้วิธีเปลี่ยนสภาวะการทำงาน เช่น เพิ่มอัตราการไหล การปรับเปลี่ยนความดัน หรือการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ เพื่อแก้ไขปัญหานี้ให้หมดไป จึงจำเป็นต้องใช้สารเคมีเพื่อล้างทำความสะอาด (รัตนจิระรัตนานนท์, 2543) พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลหรือเพิ่มความเร็วในการผ่านสารละลายจะช่วยลดการเกิด CP ที่เป็นสาเหตุของการอุดตันเยื่อกรองได้ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย

ในการนำเอาระบบกรองผ่านเยื่อกรองมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ได้มีผู้ทำวิจัยมากมายโดยมีการศึกษาระบบกรองผ่านเยื่อกรองร่วมกับระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศ และระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศ ในการศึกษาการใช้เยื่อกรองไมโครฟิลเตรชันร่วมกับระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Digester) พบว่าสามารถลดความสกปรกในรูป COD ได้สูงกว่า 80% (Puetpaiboon et al., 1989) ในการศึกษากระบวนการกรองผ่านเยื่อกรองที่มีรูพรุนขนาด 0.1 ไมครอน ร่วมกับระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ (Organic Loading) และเวลาเก็บกัก ระบบนี้สามารถลดความสกปรกในรูป COD ได้ร้อยละ 90-95 (Yamonato et al., 1989) จากรายงานเปรียบเทียบการใช้เยื่อกรองไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางและเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันเพื่อผลิตน้ำจากแหล่งน้ำดิบซึ่งมีความสกปรกไม่สูงมากในระดับโรงงานต้นแบบ ขนาดกำลังการผลิต 30 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยโรงงานที่

ใช้เยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Membrane) มีจำนวน 14 โรงงาน และโรงงานที่ใช้เยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane) จำนวน 10 โรงงาน พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดด้วยเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน และเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันไม่มีความแตกต่างกัน (Kumikane et al., 1995) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและลดปัญหาการอุดตันเยื่อกรองด้วยการบำบัดน้ำขึ้นต้นก่อนเข้ากระบวนการกรองผ่านเยื่อกรอง (Drewes et al., 2003) พบว่าการกรองด้วยไมโครฟิลเตรชันสามารถลดสารอินทรีย์ทั้งหมดได้ถึง 93% ซึ่งในกระบวนการกรองน้ำล้างจากการชุบนิเกิลด้วยเยื่อกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ที่มี MWCO 13,000 50,000 และ 100,000 คาร์ตัน ที่ผลิตจาก Polyacrylonitrile มีพื้นที่การกรอง 64 ตารางเมตร มีผลต่อสภาพการซึมผ่านของน้ำ พบว่าที่ MWCO 50,000 คาร์ตัน เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการกรองน้ำล้างรวมจากกระบวนการชุบนิเกิลมากที่สุด (Qin et al., 2003)

การใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) และกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (MF) เพื่อผลิตน้ำจากแหล่งน้ำดิบซึ่งมีความสกปรกไม่สูงมาก พบว่าความแตกต่างของกระบวนการทั้งสองไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ในกรณีที่น้ำทิ้งมีอิมัลชันจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่ากระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) สามารถแยกน้ำมันอิมัลชันได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้ (ขวัญจิตร วงษ์ขารี, 2539) สำหรับน้ำเสียชุมชนมีการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) ร่วมกับกระบวนการบำบัดอื่น เพื่อเพิ่มความเข้มข้นตะกอน (Sludge Concentration) และจากการศึกษาของ Alonso et al. (2001) พบว่าการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียชุมชนสามารถลดปริมาณสารอาหาร (ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน) และสีได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

การนำเยื่อกรองเมมเบรนมาประยุกต์ใช้กับน้ำผิวดิน นลินี เหลืองรุ่งรอง ปฎิรูป ผลจันทร์ และ ขวลิศ รัตนธรรมสกุล (2545) ได้ศึกษากระบวนการกรองไมโครฟิลเตรชัน สำหรับการผลิตน้ำประปาจากแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติ พบว่าสามารถกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้ 100% กำจัดความขุ่นได้มากกว่า 99% และกำจัดสีได้มากกว่า 97% ส่วน Wang et al. (2008) ได้ทำการศึกษาการใช้เยื่อกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่มี MWCO 150,000 คาร์ตัน ที่ผลิตจาก Cellulose Acetate พบว่าความเร็วที่เหมาะสมต่อการกรอง คือ 1.6 m/s โดยจะสามารถกรองน้ำที่ออกจากระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จากการศึกษาของ Glucina et al. (2000) ได้นำน้ำผิวดินที่มีความขุ่นเฉลี่ย 10 NTU มาผ่านเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันที่มี MWCO 10,000 คาร์ตัน ที่ผลิตจาก Cellulose Acetate มีพื้นที่การกรอง 64 ตารางเมตร สามารถลดความขุ่นให้เหลือ 0.10 NTU โดยทำการล้างย้อนทุก ๆ 30-40 นาที ในขณะที่ Kim et al. (2002) ได้นำกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการกรองน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่มี



ความขุ่น 9-11 NTU พบว่าน้ำที่ผ่านเยื่อกรองเมมเบรนสามารถลดความขุ่นได้เหลือ 0.6-1.2 NTU โดยทำการล้างย้อนทุก ๆ 4 ชั่วโมง เป็นเวลานาน 5 นาที

สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชัน Korbutowicz et al. (2006) นำกระบวนการโคแอกกูเลชันมาใช้ร่วมกับกระบวนการกรอง โดยเลือกใช้สารเคมีในการโคแอกกูเลชัน 3 ชนิด ได้แก่ (1) Alum (2) PACl และ (3) NaAlO_2 ที่ความเข้มข้นของ Al = 3.59 g/m^3 แล้วนำมาผ่านเยื่อกรองที่ทำจาก PES และ Cellulose ที่มี MWCO 30 กิโลดาร์ตัน พบว่าเยื่อกรองที่ทำจาก PES มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติประมาณ 80% และในปี 2008 ได้ศึกษาน้ำจาก Odra River โดยใช้เยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันที่ทำจาก Cellulose และ PES ที่มี MWCO 5-100 กิโลดาร์ตัน พบว่าที่ MWCO 5 กิโลดาร์ตัน PES มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ 73% และสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย UV_{254} ได้ 56% สำหรับ สักคีสิทธิ์ อัมแมน และชวลิต รัตนธรรมสกุล (2552) ได้ทดลองด้วยการแปรผันความดันจาก 110 120 130 140 และ 150 kPa พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นมีผลต่ออัตราการไหลของน้ำสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูงขึ้นด้วยกลไกการดูดซับสารอินทรีย์ แต่การเพิ่มความดันไม่มีผลต่อการกำจัดไอออน นอกจากนี้ทำให้ทราบว่าความดันที่เพิ่มขึ้นไม่แตกต่างกันมากในการกำจัดความขุ่นซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยเฉลี่ยร้อยละ 99 จากการศึกษาของ จริยา สุขผล และสุพัฒน์พงษ์ มัตราข (2552) พบว่า เยื่อกรองนาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำใต้ดิน อีกทั้งยังมีความสามารถในการแยกสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาค 0.001-0.01 ไมครอน โดยแรงดันที่ใช้ในการเดินระบบอยู่ในช่วง 70-220 psi มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการกรองน้ำ การบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแยกสีย้อม (Synthetic Dyes) การแยกเกลือ (Aqueous Salt) การกำจัดประจุเดี่ยว (Monovalent) และหลายประจุ (Divalent) ในน้ำกระด้างได้ร้อยละ 80-90 เป็นต้น นอกจากนี้ ปกฉัตร ชูติวิสุทธิ (2552) ได้ศึกษาการแยกคอลลอยด์โดยใช้เยื่อกรองขนาด 5 ไมครอน ด้วยการกรองแบบไหลขวาง (Cross Flow) จากนอกเข้าไป (Out Site In) โดยทำการแปรผันอัตราการไหลผ่านเยื่อกรองและอัตราการไหลไม่ผ่านเยื่อกรอง (Permeate:Retentate) ที่อัตราส่วน 25:75 50:50 และ 75:25 พบว่าอัตราส่วน 25:75 มีประสิทธิภาพในการแยกคอลลอยด์ได้ดีที่สุดในขณะที่อัตราส่วน 75:25 ทำให้คอลลอยด์หลุดออกไปหมด

อย่างไรก็ตามการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในประเทศไทยยังมีการศึกษาวิจัยไม่มากนัก เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษายังสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตน้ำจากแหล่งน้ำดิบธรรมชาติด้วยกระบวนการปรับคุณภาพน้ำทั่วไป ดังนั้นการประยุกต์ใช้กระบวนการกรองผ่านเยื่อกรอง (MF/UF) สำหรับการนำน้ำทิ้งชุมชนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เพื่อที่จะศึกษาผลกระทบในการที่จะทำให้เกิดการอุดตันเยื่อกรอง (Membrane Fouling) และการทดลองเดินระบบในระยะยาว (Long-term Experiment) เพื่อให้ได้ค่าที่น่าเชื่อถือ

และทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์โดยเลือกเอาปัจจัยที่มีความสำคัญ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานจริงในอนาคตต่อไป โดยกระบวนการเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันนิยมมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 การประยุกต์ใช้กระบวนการเมมเบรน

อ้างอิง	การประยุกต์ใช้
จริยา สุขผล และ สุพัฒน์พงษ์ มัตราข(2552)	กระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ในน้ำใต้ดิน สามารถแยกสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาค 0.001-0.01 ไมครอน และมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในน้ำได้ร้อยละ 80-90
ศักดิ์สิทธิ์ อัมแมน และ ขวลิศ รัตนธรรมสกุล (2552)	ในการกรองด้วยเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชัน พบว่าการแปรผันความดัน จาก110-150 kPa พบว่าความดันที่สูงขึ้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด สารอินทรีย์แต่ไม่มีผลต่อการกำจัด ไอออน ความดันที่เพิ่มขึ้นไม่แตกต่างกัน ในการกำจัดความขุ่นซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยได้ 99%
Puetpaiboon et al. (1988)	การใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันร่วมกับกระบวนการย่อยสลายแบบ ไม่ใช้ออกาศ พบว่าสามารถลด COD ได้มากกว่า 80%
Glucina et al. (2000)	เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ที่มี MWCO 10,000 คาร์ตัน นำมากรองน้ำผิวดินจาก แม่น้ำที่มีความขุ่นเฉลี่ย 10 NTU โดยใช้อัตราการซึมผ่านเมมเบรน 15.5 L/m ² .hr พบว่าน้ำเพอมีเอทมีความขุ่นเฉลี่ย 0.10 NTU มีการรักษาอัตราการซึมผ่าน ของน้ำด้วยการล้างย้อนทุก ๆ 30-40 นาที
Siddiqui et al. (2000)	เปรียบเทียบการนำน้ำผิวมาผ่าน MF ขนาด 0.1 ไมครอน UF ขนาด MWCO 60,000 คาร์ตัน และ NF ขนาด MWCO 500 คาร์ตัน พบว่าประสิทธิภาพในการ กำจัด NOM ของ MF น้อยกว่า10% UF น้อยกว่า 30% และ NF มากกว่า 80%
Alonso et al. (2001)	กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่า สามารถลดฟอสฟอรัส ในโตรเจนและสีได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับ กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน
Kim et al. (2002)	การประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการกรองน้ำทิ้งจากระบบ บำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่มีความขุ่น 9-11 NTU พบว่าสามารถลดความขุ่นได้ เหลือ 0.6-1.2 NTU โดยทำการล้างย้อนทุก ๆ 4 ชั่วโมง เป็นเวลานาน 5 นาที
Zularisam et al. (2007)	ศึกษาการนำน้ำผิวดินที่มีความเข้มข้น DOC เท่ากับ 6.8 mg/L มาผ่าน เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ที่มี MWCO 50,000 คาร์ตัน สามารถกำจัด DOC ได้ 25%