



สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
The Thailand Research Fund



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: อิทธิพลของสารอนินทรีย์ต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

Influence of Inorganic Scalants on Fouling of Nanofiltration Membrane

ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ และ คณะ

มิถุนายน 2548



สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
The Thailand Research Fund



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์



โครงการ: อิทธิพลของสารอนินทรีย์ต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

Influence of Inorganic Scalants on Fouling of Nanofiltration Membrane

ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ และ คณะ

มิถุนายน 2548

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: อิทธิพลของสารอนินทรีย์ต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

Influence of Inorganic Scalants on Fouling of Nanofiltration Membrane

คณะผู้วิจัย

1. ดร.ชโล จารุสุทธิรักษ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒนพงษ์ มัตราข

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

3. ศาสตราจารย์ ดร. รัตนา จิระรัตนานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

สนับสนุนโดย

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

โครงการวิจัย: อิทธิพลของสารอนินทรีย์ต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

บทคัดย่อ

สารอนินทรีย์มีอิทธิพลต่อการอุดตันของเยื่อกรองนาโน (NF) และการลดลงของฟลักซ์ของเพอร์เมเอทจากการทดสอบการกรองสารละลายที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารอนินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ผ่านเยื่อกรองแบบนาโน (NF) พบว่า 'ไอออนบวกประจุคู่ (Divalent Cation, Ca^{2+}) ของเกลือคลอไรด์ (Cl^-) ทำให้เพอร์เมเอทฟลักซ์ ลดลงมากกว่าไอออนบวกประจุเดี่ยว (Monovalent Cation, Na^+) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงถึงลักษณะการอุดตันที่สอดคล้องกับ Cake Formation Model ส่วนการลดลงของฟลักซ์อื่นเนื่องมาจากไอออนบวกประจุคู่ (Ca^{2+} และ Mg^{2+}) ของเกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) สอดคล้องกับ Pore Blocking Model สารอนินทรีย์ที่เกิดจากไอออนประจุลบ แตกต่างกันได้แก่ คลอไรด์ ซัลเฟต คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และ ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์แตกต่างกัน โดยพบว่าค่าฟลักซ์ที่ลดลงจากอิทธิพลของเกลือซัลเฟต คาร์บอเนต และฟอสเฟต สอดคล้องกับกลไกการอุดตันของ Pore Blocking Model ในขณะที่เกลือคลอไรด์ สอดคล้องกับ Cake Formation Model ทั้งนี้เนื่องมาจากความสามารถในการละลายที่แตกต่างกัน โคอะแกรม pC-pH แสดงถึงโอกาสการเกิดตะกอนอนินทรีย์ (Inorganic scalants) ที่ทำให้เกิดการอุดตันบนผิวหรือในรูของเมมเบรน การพิสูจน์การอุดตันบนเยื่อกรองแบบนาโนด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR), Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive Spectrometer (EDS) และ X-ray Diffractometer (XRD) แสดงถึงการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติรวมทั้งตะกอนอนินทรีย์ ซึ่งส่งผลร่วมกันในการเกิดการอุดตันและลดลงของฟลักซ์

คำสำคัญ : การอุดตันของเยื่อกรอง, เกลืออนินทรีย์, ค่าฟลักซ์ของเพอร์เมเอท, ตะกอนอนินทรีย์, เยื่อกรองแบบนาโน, สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

Influence of Inorganic Scalants on Fouling of Nanofiltration Membrane

ABSTRACT

Inorganic scalants affects nanofiltration (NF) membrane fouling and permeate flux decline. Crossflow bench-scale filtration tests were conducted using solution containing 10-mg/L natural organic matter (NOM) and different types of inorganic compounds. The results showed that divalent cation (i.e. Ca^{2+}) of chloride salts caused greater flux decline than monovalent cation (i.e. Na^+). According to mathematic fouling models, the solution flux decline trends of both cations corresponded with cake formation model, especially at high ionic strength. Flux decline curve divalents (Ca^{2+} and Mg^{2+}) of sulfate salts related to pore blocking model. Different anions (i.e. chloride, carbonate, sulphate, and phosphate) exhibited different flux decline trends. Solution flux curve of carbonate, sulphate, and phosphate salts dominated pore blocking module, whereas that of chloride salt indicated cake formation model. Different mechanisms of fouling of these salts related to their solubility. The pC-pH diagram reflected the possibility inorganic scalant formation. Investigation of membrane foulants by different methods, including Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR), Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive Spectrometer (EDS) and X-ray Diffractometer (XRD), indicated a deposition of NOM and inorganic scalants, on membrane surface, leading to membrane fouling and flux decline.

Keywords : Membrane fouling, Inorganic salts, Permeate flux, Inorganic scale, Nanofiltration membrane, Natural Organic Matter

EXECUTIVE SUMMARY

ระบบเยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane, NF) ถูกใช้ในระบบผลิตน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำและใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (Natural Organic Matters, NOM) ที่เป็นสารตั้งต้นของการเกิดสารที่เป็นผลพลอยได้ระหว่างกระบวนการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-products, DBPs) ซึ่งพบว่าอาจเป็นสารก่อมะเร็ง ข้อเสียของการใช้ระบบเยื่อกรองแบบนาโนได้แก่การอุดตันเยื่อกรอง (Membrane fouling) นอกเหนือจาก NOM ที่มีผลต่อการอุดตันเยื่อกรองแล้ว ชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำมีอิทธิพลต่อการอุดตันด้วยเช่นกัน โดยในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของสารอินทรีย์ที่มีต่อการอุดตันเยื่อกรองแบบนาโน

จากการวิจัย พบว่า ไอออนบวกประจุคู่ (Divalent Cation, Ca^{2+}) ของเกลือคลอไรด์ (Cl^-) ทำให้เพอร์มิเอตฟลักซ์ ลดลงมากกว่าไอออนบวกประจุเดี่ยว (Monovalent Cation, Na^+) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงถึงลักษณะการอุดตันที่สอดคล้องกับ Cake Formation Model ส่วนการลดลงของฟลักซ์อันเนื่องมาจากไอออนบวกประจุคู่ (Ca^{2+} และ Mg^{2+}) ของเกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) สอดคล้องกับ Pore Blocking Model สารอินทรีย์ที่เกิดจากไอออนประจุลบแตกต่างกัน ได้แก่ คลอไรด์ ซัลเฟต คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และ ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์แตกต่างกัน โดยพบว่าค่าฟลักซ์ที่ลดลงจากอิทธิพลของเกลือซัลเฟต คาร์บอเนต และฟอสเฟต สอดคล้องกับกลไกการอุดตันของ Pore Blocking Model ในขณะที่เกลือคลอไรด์สอดคล้องกับ Cake Formation Model ทั้งนี้เนื่องมาจากความสามารถในการละลายที่แตกต่างกัน โดยอะแกรม pC-pH แสดงถึงโอกาสการเกิดตะกอนอนินทรีย์ (Inorganic scalants) ที่ทำให้เกิดการอุดตันบนผิวหรือในรูของเมมเบรน การพิสูจน์การอุดตันบนเยื่อกรองแบบนาโนด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR), Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive Spectrometer (EDS) และ X-ray Diffractometer (XRD) แสดงถึงการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติรวมทั้งตะกอนอนินทรีย์ ซึ่งส่งผลร่วมกันในการเกิดการอุดตันและลดลงของฟลักซ์

การศึกษานี้ทำให้ทราบถึงปัญหาการอุดตันของระบบเยื่อกรองแบบนาโนจากผลของสารอินทรีย์และองค์ประกอบของสารอินทรีย์ เพื่อนำไปสู่แนวทางการแก้ปัญหาการอุดตันของระบบเยื่อกรอง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการผลิตน้ำที่มีคุณภาพและมาตรฐานสูงขึ้น อันเป็นการพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้บริโภค

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และ สำนักงาน
กองทุนสนับสนุนการวิจัย คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานดังกล่าวที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตลอด
โครงการวิจัยนี้ จนได้จัดเป็นรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์ของงานวิจัยนี้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทกึ่ล่ย่อก	ก
ABSTRACT	ข
EXECUTIVE SUMMARY	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญลาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การกรองผ่านเยื่อกรอง (Membrane filtration)	5
2.2 กระบวนการกรองแบบนาโน (Nanofiltration Process)	7
2.3 กลไกการอุดตันเยื่อกรอง (Fouling Mechanisms)	7
2.3.1 ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization, CP)	7
2.3.2 การเกิดชั้นเจล (Gel layer)	8
2.3.3 การเกิดชั้นเค้ก (Cake Formation)	9
2.3.4 การอุดตันรูพรุน (Pore Blockage)	9
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรอง	9
2.4.1 คุณลักษณะของเยื่อกรอง	10
2.4.2 ขนาดน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight)	11
2.4.3 ความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration)	11
2.4.4 ความแรงของประจุ (Ionic Strength)	11
2.4.5 อุณหภูมิและ พีเอช (Temperature and pH)	12

2.4.6 สภาพการทำงาน (Operating Conditions)	12
2.5 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์โดยเยื่อกรองแบบนาโน	12
2.5.1 กลไกการคัดแยกโดยใช้ขนาด (Size Exclusion)	12
2.5.2 ความแตกต่างของประจุ (Charge Interaction)	12
2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเยื่อกรอง	13
2.6.1 อัตราการไหลของกระบวนการออสโมซิสผันกลับ	13
2.6.2 การกรองสารอินทรีย์ทางธรรมชาติด้วยเยื่อกรองแบบนาโน	13
2.6.3 อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลและการเคลื่อนที่กลับของโมเลกุล	14
2.6.4 แบบจำลองการอุดตันของระบบเยื่อกรองแบบนาโน	16
2.6.5 แบบจำลองความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม	17
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	21
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	21
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้	23
3.3 การเก็บตัวอย่างน้ำและการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ	24
3.4 การศึกษาการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน	26
3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน	30
3.6 การวิเคราะห์ตัวอย่าง	31
บทที่ 4 ผลการวิจัย	35
4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง	35
4.2 การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน	36
4.2.1 การหาปริมาตรของระบบโดยการทดสอบแบบ Tracer	36
4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และความดันของระบบ	40
4.2.3 การทดสอบความแม่นยำของระบบ (Reproducibility)	41
4.2.4 ความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเยื่อกรองนาโน	42
4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอุดตันเยื่อกรองนาโน	46
4.3.1 ผลของไอออนประจุเดียวและไอออนประจุคู่ต่อการลดลงของฟลักซ์	46
4.3.2 ผลของสารอนินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ต่อการลดลงของฟลักซ์	49
4.3.3 ผลของชนิดไอออนประจุต่อการลดลงของฟลักซ์	55

4.4 การวิเคราะห์การดูดตันของเยื่อกรองแบบนาโน	59
4.4.1 ผลการทดสอบด้วย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)	59
4.4.2 ภาพถ่ายเยื่อกรองด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)	61
4.4.3 การตรวจวิเคราะห์ด้วย Energy Dispersive Spectrometer (EDS)	62
4.4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer	64
4.5 การศึกษาด้วยแบบจำลองความต้านทานของการดูดตันแบบอนุกรม	65
 บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	 68
 เอกสารอ้างอิง	 70
 ภาคผนวก MANUSCRIPT (DRAFT)	 73

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
2.1	แบบจำลองการดูดตันของการกรองแบบ dead end และ crossflow operation	17
3.1	คุณสมบัติของระบบเยื่อกรองอาร์โอสำหรับแยกสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติ	26
3.2	คุณสมบัติของเยื่อกรองแบบนาโนที่ใช้ในงานวิจัย	27
3.3	ตารางสรุปการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดตันของเยื่อกรองแบบนาโน	30
3.4	พารามิเตอร์ที่ศึกษาและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ	31
3.5	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาตัวอย่างเยื่อกรองแบบนาโน	32
4.1	คุณลักษณะของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ	35
4.2	ผลการทดสอบการกักกันสารอินทรีย์โดยเยื่อกรองแบบนาโน	45
4.3	การจำลองทางคณิตศาสตร์ของกลไกการดูดตันระหว่างไอออนประจุเดียวและไอออนประจุคู่ 48	
4.4	ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของกลไกการดูดตันของสารอนินทรีย์ (I.S. = 0.01 M)	51
4.5	ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของกลไกการดูดตันของสารอนินทรีย์ (I.S. = 0.05 M)	53
4.6	ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างชนิดของไอออนประจุคู่	56

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
2.1	หลักการของกระบวนการของเยื่อกรอง	5
2.2	มวลสมดุลในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ	6
2.3	แผนภาพแสดงค่าความต้านทานแบบอนุกรมที่เกิดขึ้นจากการอุดตัน	18
3.1	ผังสรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	22
3.2	ภาพแสดงระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ	25
3.3	กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติด้วยระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ	25
3.4	ภาพแสดงระบบเยื่อกรองแบบนาโน	28
3.5	ภาพแสดงการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโนชนิด Bench-scale crossflow	29
4.1	ผลกระทบของอัตราการไหลต่อความสัมพันธ์แบบกราฟ F(t)	38
4.2	ผลกระทบของอัตราการไหลต่อความสัมพันธ์แบบกราฟ E(t)	38
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจาย (d) กับอัตราการไหล	39
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับความดันในการดำเนินระบบ	41
4.5	การทดสอบความแม่นยำของระบบเยื่อกรองแบบนาโน	42
4.6	ผลของความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ต่อฟลักซ์ของเพอมีเอท	43
4.7	ความเข้มข้นของคาร์บอนในรีเทนเทท	44
4.8	ผลของไอออนประจุเดี่ยวและไอออนประจุคู่ต่อการลดลงของฟลักซ์	47
4.9	ผลกระทบของไอออนประจุเดี่ยวและไอออนประจุคู่ต่อการกำจัดการนำไฟฟ้า	49
4.10	ผลของสารอินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ต่อการลดลงของฟลักซ์ (I.S. = 0.01 M)	50
4.11	ผลของสารอินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ต่อการลดลงของฟลักซ์ (I.S. = 0.05 M)	52
4.12	ผลของกำลังไอออนต่อค่าฟลักซ์ (J_v^*) จำแนกตามประเภทของสารอินทรีย์	54
4.13	สปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบฟอสเฟตที่ส่งผลต่อการตกตะกอนบนผิวหน้าเยื่อกรอง	55
4.14	ผลของชนิดไอออนประจุต่อการลดลงของฟลักซ์	56
4.15	pC-pH ไดอะแกรมของขององค์ประกอบของสารอินทรีย์แคลเซียมซัลเฟต	57
4.16	pC-pH ไดอะแกรมของขององค์ประกอบของสารอินทรีย์แมกนีเซียมซัลเฟต	58
4.17	สเปกตรัม FTIR แสดงการเปรียบเทียบการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติต่อการเกิดการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน	59
4.18	สเปกตรัม FTIR แสดงการเปรียบเทียบการทำความสะอาดเยื่อกรองแบบนาโน	60

4.19 ภาพถ่าย SEM แสดงการเปรียบเทียบการอุดต้นบนเข็กรองนาโนด้วยสารอินทรีย์ ทางธรรมชาติร่วมเกล็ดคอนกรีตเป็นส่วนประกอบ (กำลังขยาย 5,000 เท่า)	61
4.20 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS แสดงการผสมตัวของธาตุบนเข็กรองแบบนาโน	63
4.21 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง XRD แสดงถึงการตกผลึกของสารบนเข็กรองแบบนาโน	64
4.22 ความต้านทานของการอุดต้นรูปแบบต่างๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ	65
4.23 ความต้านทานของการอุดต้นเปรียบเทียบระหว่างสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์และ แคลเซียมคลอไรด์	66
4.24 ความต้านทานของการอุดต้นเปรียบเทียบระหว่างสารละลายที่มีแคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมฟอสเฟต	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้ระบบเยื่อกรอง (Membrane Filtration) ในการพัฒนาคุณภาพน้ำกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากระบบดังกล่าว สามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพได้ในปริมาณสูง ซึ่งสอดคล้องกับการยกระดับมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มมาใช้ในอนาคต รวมทั้งแนวโน้มการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Water Reclamation) เพื่อแก้ไขปัญหามลพิษทางน้ำ กระบวนการกรองแบบนาโน (Nanofiltration process, NF) เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำตาล กรดอินทรีย์ รวมทั้ง สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (Natural organic matters, NOM) เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถกรองจุลินทรีย์ได้ถึงระดับไวรัสซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กที่สุด เป็นการควบคุมปัญหาการแพร่ของเชื้อโรคทางน้ำประปาได้อีกวิธีหนึ่งแทนการใช้สารเคมี เนื่องจากการใช้สารเคมี เช่น คลอรีน สำหรับการฆ่าเชื้อโรค ในขณะที่มีสารอินทรีย์อยู่ในน้ำ อาจทำให้เกิดสารที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection By-Products, DBPs) เช่น ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane, THMs) และกรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic acids, HAAs) ขึ้นได้ โดยสำนักงานพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S.EPA) พบว่าสารดังกล่าวอาจมีส่วนที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogens) การใช้เยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane, NF) กำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (Natural organic matters, NOM) ที่มีอยู่ตามแหล่งน้ำธรรมชาติ จึงเป็นวิธีการหนึ่งในการป้องกันการเกิดสาร DBPs ดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่าระบบเยื่อกรองแบบนาโนมีความเหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่ออุปโภคบริโภคเนื่องจากสามารถกรองสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และรูพรุนของเยื่อกรองระบบนาโนยังสามารถที่จะปล่อยให้แร่ธาตุบางส่วนผ่านออกมาได้ (มันสิน ตันจุลเวศร์, 2539 ; รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าระบบเยื่อกรองแบบนาโนสามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) ประมาณ 90-95% กำจัดสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง เช่น ไตรฮาโลมีเทน ประมาณ 91-98% กำจัดความกระด้างที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมกับแมกนีเซียมประมาณ 85-95% รวมทั้งกำจัดไดออกซินที่มีประจุเดี่ยวได้ประมาณ 70% (Watson and Hornburg, 1989 ; Duranceau et al. 1992 ; Escobar and Randall, 1999)

ปัญหาการอุดตันบนผิวของระบบเยื่อกรองแบบนาโนนับเป็นปัญหาที่สำคัญ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ การเพิ่มค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน การลดปริมาณการผลิตของระบบ รวมทั้งการลดระยะเวลาการใช้งานของระบบ การอุดตันเยื่อกรอง (Membrane fouling) สามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ได้แก่ การเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization) การเกิดชั้นเจล (Gel layer) การเกิดชั้นเค้ก (Cake formation) การเกิด

ตะกรัน (Scale formation) รวมทั้งการเกิดการอุดตันจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Biofouling) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า NOM เป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งของการอุดตันบนเยื่อกรอง NF โดย NOM ทำให้เกิดการอุดตันในรูปแบบของการเกิดชั้นเจลและการเกิดชั้นเค้ก (Collins *et al.* 1985 ; Kaiya *et al.* 1996 ; Schafer *et al.* 1998) อย่างไรก็ตามยังมีสาเหตุอีกหลายประการ นอกเหนือจาก NOM ที่สามารถทำให้เกิดการอุดตันเยื่อกรอง NF เช่น ประเภทและคุณสมบัติของเยื่อกรอง คุณสมบัติของน้ำ รวมทั้งวิธีการเดินระบบ เป็นต้น เกลืออนินทรีย์ (Inorganic salts) ในน้ำตัวอย่างนับเป็นปัจจัยอีกประการหนึ่ง ที่ก่อให้เกิดการอุดตันเยื่อกรอง โดยสามารถเกิดการอุดตันได้ในหลายลักษณะ ได้แก่ การเกิดตะกรัน (Scalants) หรือ การทำหน้าที่เป็นสะพาน (Bridging effect) ระหว่างผิวเยื่อกรองและสารอนินทรีย์ ซึ่งล้วนแล้วแต่มีผลให้เกิดการลดประสิทธิภาพของการกรองทั้งสิ้น งานวิจัยด้านการอุดตันของเยื่อกรองโดยส่วนใหญ่มักศึกษาถึงผลของ NOM แต่การศึกษถึงกลไกการอุดตันบนเยื่อกรองจากสารอนินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ยังไม่มีการศึกษาแพร่หลายมากนัก งานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการขึ้นเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของสารอนินทรีย์ประเภทต่างๆ ต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน โดยศึกษาผลของสารอนินทรีย์ร่วมกับผลของ NOM สารอนินทรีย์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ สารอนินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ที่พบได้ตามแหล่งน้ำ เช่น แคลเซียม (Ca^{2+}) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) และ ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) เป็นต้น ผลการวิจัยทำให้เข้าใจถึงกลไกการอุดตันเยื่อกรองแบบนาโนในกรณีที่มีสารอนินทรีย์และสารอนินทรีย์ในแหล่งน้ำ รวมทั้งการหาแนวทางแก้ไขปัญหการอุดตันของระบบเยื่อกรองอันจะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพและพัฒนาระบบเยื่อกรองเพื่อ การพัฒนาและยกระดับมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม น้ำใช้ของประเทศไทยในอนาคต การใช้ระบบเยื่อกรองในการผลิตน้ำที่มีคุณภาพสูง และการประยุกต์ใช้ในงานอื่น ๆ ทางด้านสิ่งแวดล้อมต่อไป

1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของการอุดตันเยื่อกรองแบบนาโนอันเกิดจากสารอนินทรีย์ทางธรรมชาติและสารอนินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ที่มีในแหล่งน้ำ
2. ศึกษากลไกการอุดตันของสารอนินทรีย์ในน้ำและปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน
3. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่สามารถอธิบายถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. แหล่งน้ำดิบที่ใช้เป็นแหล่งน้ำดิบภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี

2. การตรวจสอบคุณลักษณะของน้ำจากแหล่งน้ำดิบ โดยหาค่าการดูดกลืนแสง (UV_{254nm}) ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon) พีเอช ความกระด้าง ค่าของไอออนในสารละลาย

3. การแยกและเพิ่มความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) โดยใช้ระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ (RO membrane)

4. การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน ใช้น้ำที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติสูงที่ผ่านระบบแบบอาร์โอแล้ว มาทำการเจือจางและทดสอบ โดยควบคุมค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ค่าพีเอช ค่าความเข้มข้นของไอออนของสารละลาย และแปรค่าปริมาณและลักษณะของสารอินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ได้แก่ เช่น แคลเซียม (Ca^{2+}) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) และ ฟอสเฟต (PO_4^{3-})

5. การศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองใช้เยื่อกรองแบบนาโน การทดลองดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale experiment)

6. ระบบเยื่อกรองแบบนาโนแบบแผ่น (Flat sheet) ใช้ทดสอบกับระบบ Bench-scale test cell ลักษณะการไหลของของเหลวเป็นแบบ Cross-flow

7. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองแบบนาโนระหว่างทำการทดลอง ได้แก่ ผลของการกักกันสารอินทรีย์ (Organic rejection) และผลของการลดลงของอัตราการไหลต่อพื้นที่ผิวของเยื่อกรอง (Permeate flux) นอกจากนี้ยังหาประสิทธิภาพการฟื้นคืนของ flux (Flux recovery) ของเยื่อกรองทั้งก่อนและหลังการกรอง

8. ทำการศึกษาคุณลักษณะของสารอุดตันบนผิวเยื่อกรอง (Foulants) โดยการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ประเภทต่าง ๆ เช่น เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) สำหรับวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารที่เกิดการอุดตัน Scanning Electron Microscope (SEM) สำหรับภาพถ่ายการอุดตัน Energy Dispersive Spectrometer (EDS) สำหรับวิเคราะห์บนผิวเยื่อกรองและเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) สำหรับการวิเคราะห์ผลึกอินทรีย์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. บรรเทาถึงปัญหาการกรองของระบบเยื่อกรอง จากผลของสารอินทรีย์และองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ เพื่อนำไปสู่แนวทางการแก้ปัญหาการอุดตันของระบบเยื่อกรอง

2. พัฒนาระบบการผลิตน้ำที่มีคุณภาพและมาตรฐานสูงขึ้น โดยการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยเยื่อกรองก่อนการเติมคลอรีน เพื่อลดสารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็ง และเป็นการพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้นับถือ

3. พัฒนาเทคนิคและวิธีการประยุกต์ใช้ระบบเอือกรองในการผลิตน้ำให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการวางแผนการผลิตตั้งแต่ระบบบำบัดขั้นต้นจนถึงขั้นสุดท้ายของการผลิตน้ำ เพื่อเพิ่มระยะเวลาของการใช้งานของระบบเอือกรอง

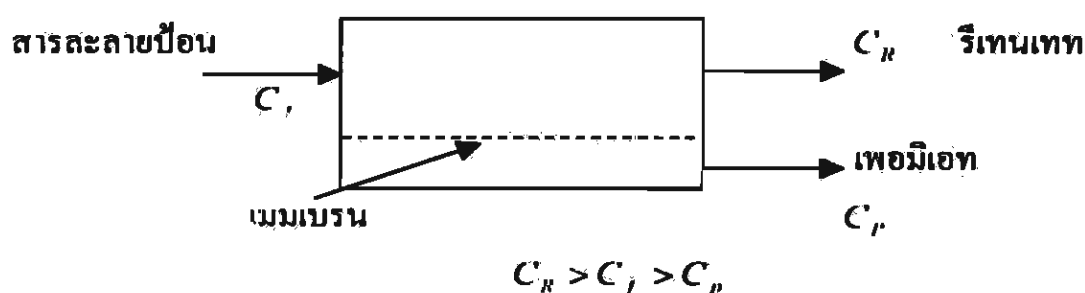
4. เป็นจุดเริ่มต้นในการประยุกต์ใช้ระบบเอือกรองในงานด้านการผลิตน้ำและการบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งงานด้านสิ่งแวดล้อมด้านอื่นๆ ได้แก่ การใช้ระบบเอือกรองในการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ เป็นการลดปัญหาการขาดแคลนน้ำที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต

บทที่ 2

การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

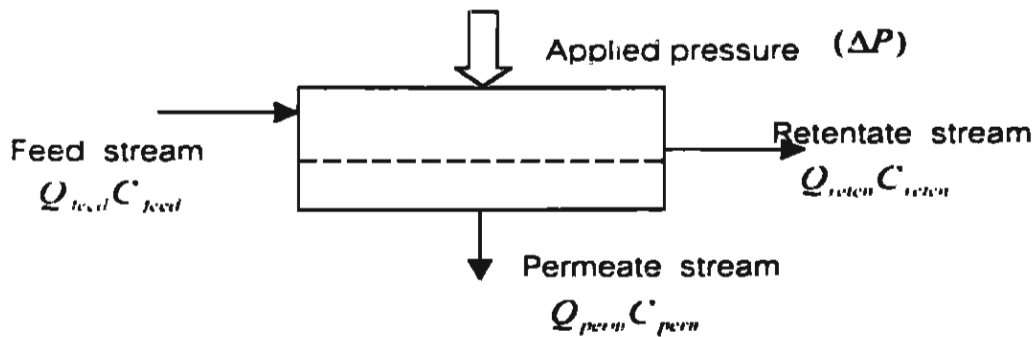
2.1 การกรองผ่านเยื่อกรอง (Membrane filtration)

การกรองผ่านเยื่อกรองอาศัยหลักการแพร่ โดยปกติตามหลักการของกระบวนการออสโมซิสสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า จะเกิดการแพร่กระจายมายังสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า โดยที่น้ำหรือสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าสารละลายเกลือแร่ ดังนั้น ทิศทางการแพร่จะเกิดขึ้นไปทางด้านสารละลายเกลือแร่โดยการกระทำของแรงดันออสโมติก หากต้องการให้เกิดการแพร่มาทางน้ำหรือสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า เพื่อให้เกิดการบำบัดน้ำหรือสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงจำเป็นต้องใช้แรงดันที่สูงกว่าแรงดันออสโมติก จะทำให้เกิดการย้อนกลับของทิศทาง ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการออสโมติกผันกลับ (Reverse osmosis) และเมื่อนำเยื่อกรองมาวางทิศทางการไหลจะทำให้เกิดการไหลผ่านช่องของเยื่อซึ่งมีขนาดต่างกัน ตามแต่ชนิดของเยื่อกรอง ดังนั้น อนุภาคมวลสารแขวนลอยขนาดเล็กมากจะถูกเก็บกักไว้บริเวณผิวของเยื่อกรองโดยกระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) ทำให้แรงดันในระบบต้องสูงกว่าแรงดันออสโมติกรวมกับแรงดันที่ต้องเอาชนะแรงเสียดทานของกระบวนการดูดซับ โดยปกติในกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับจะยอมให้โมเลกุลของน้ำหรือตัวทำละลายผ่านได้ และยอมให้เกลือแร่ผ่านได้ในจำนวนที่น้อยมาก ๆ



รูปที่ 2.1 หลักการของกระบวนการของเยื่อกรอง (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

จากรูปที่ 2.1 หลักการและตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการออสโมซิสผันกลับคือ สารละลายที่เข้าสู่กระบวนการออสโมซิสผันกลับจะมีความเข้มข้นด้านเข้าระบบ (C_f) เมื่อผ่านเยื่อกรอง ค่าความเข้มข้นจะลดลงต่ำมากเมื่อออกจากระบบ โดยปกติจะเรียกว่า เพอมีเอท (C_p) ส่วนความเข้มข้นอีกส่วนหนึ่งที่มีค่าสูงมาก ๆ อยู่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง ส่วนนี้จะถูกระบายออกจากระบบ เรียกว่ารีเทนเทท (C_R) จากการพิจารณาสมดุลมวลของระบบเพื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลอง และเป็นการพิจารณาระบบลักษณะอุณหพลศาสตร์ไม่ผันกลับโดยพิจารณาจากรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 นวลสมดุลในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Mattaraj and Kilduff. 2003)

จากรูปที่ 2.2 เป็นแบบจำลองการแพร่กระจายสารละลายที่อธิบายการถ่ายเทมวลสารของน้ำหรือสารละลายและตัวถูกละลายผ่านเยื่อกรอง พิจารณาจากสมดุลมวลของทั้งระบบพบว่าเป็นไปตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ โดยที่ให้ความหนาแน่นของน้ำคงที่

$$Q_{feed} = Q_{perm} + Q_{reten} \quad (2.1)$$

$$Q_{feed} C_{feed} = Q_{perm} C_{perm} + Q_{reten} C_{reten} \quad (2.2)$$

และค่า Recovery ของระบบมีค่าดังสมการที่ 2.3

$$R = \frac{Q_{perm}}{Q_{feed}} \quad (2.3)$$

โดยที่

Q_{feed} , Q_{perm} และ Q_{reten} คือ อัตราการไหลเข้า อัตราการซึมผ่านของเพอมีเอท และอัตราการไหลของ รีเทนเทท ตามลำดับ ($L \cdot min^{-1}$)

C_{feed} , C_{perm} และ C_{reten} คือ ความเข้มข้นของสารละลายเข้าสู่ระบบ ความเข้มข้นของสารละลายในเพอมีเอท และความเข้มข้นของรีเทนเทท ($mg \cdot L^{-1}$)

และ R (Recovery) คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการซึมผ่านของเพอมีเอทต่ออัตราการไหลเข้าเยื่อกรอง

2.2 กระบวนการกรองแบบนาโน (Nanofiltration Process)

กระบวนการกรองแบบนาโนเป็นกระบวนการเยื่อกรองที่ใช้ความดันอยู่ระหว่างอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) และออสโมซิสผกกลับ (Reverse Osmosis, RO) โดยปกติ ออสโมซิส ผกกลับจะใช้ความดันอยู่ในช่วง 200 – 1,000 psi (1,378 – 6,893 kPa) โดยที่นาโนจะใช้ความดันอยู่ในช่วง 50 – 150 psi หรือ 3-10 บาร์ (345-1,034 kPa) ในขณะที่ อัลตราฟิลเตรชันจะใช้ความดันอยู่ในช่วง 10-70 psi (69-483 kPa) (Schafer *et al.* 1998 ; Kilduff *et al.* 2002)

กระบวนการนาโนเป็นกระบวนการที่มีหลักการเหมือนออสโมซิสผกกลับ ใช้สำหรับแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น กลีโกลินทรีย์ สารอินทรีย์ เช่น น้ำตาล กลูโคส ซูโครส กรดอินทรีย์ และสารอินทรีย์ที่เจือปนในน้ำทิ้ง การพัฒนากระบวนการแบบนาโนเกิดขึ้นหลังกระบวนการออสโมซิสผกกลับประมาณ 25 ปี เนื่องจากออสโมซิสผกกลับใช้สำหรับแยกเกลือต่าง ๆ ออกจากน้ำกร่อย น้ำทะเลเป็นหลักและความสามารถในการกักกันเกลือในรูปของ NaCl ได้สูงเกิน 98% ดังนั้น ถ้าต้องการใช้แยกตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่กว่า NaCl แต่น้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 500 กระบวนการออสโมซิสผกกลับจึงไม่เหมาะสม เพราะมีโครงสร้างแน่นเกินไป ทำให้ฟลักซ์ต่ำ จึงมีการพัฒนากระบวนการกรองแบบนาโนขึ้น สำหรับการใช้งานที่ไม่ได้เน้นการแยกเกลือจากน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) กระบวนการนาโน สามารถที่จะกรองสารอินทรีย์ที่มีไอออนบวกแบบประจุคู่ได้ และสามารถแยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติออกจากน้ำได้ด้วย (Conlon and McClellan, 1989 ; Durandean *et al.* 1992)

จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการกรองแบบนาโนในด้านการกรองสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในรูปของสารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon ,TOC) ได้ถึง 90-95% กำจัดสาร Trihalomethane (THM_s) ได้ 91-98% กำจัดความกระด้างและสีได้ 85-95 % และ 90-97 % ตามลำดับ รวมทั้งกำจัดสารละลายไอออนประจุเดียว ได้มากกว่า 70 % (Watson and Hornburg, 1989 ; Durandean *et al.* 1992 ; Kabsch-Korbutowicz *et al.* 1994 ; Mattaraj and Kilduff, 2003)

2.3 กลไกการอุดตันเยื่อกรอง (Fouling Mechanisms)

การอุดตันเยื่อกรองแบบนาโนส่งผลให้อัตราการกรองลดลง (Flux decline) ส่งผลต่อประสิทธิภาพรวมในการผลิตน้ำ การอุดตันอาจเกิดขึ้นจากการที่สารอุดตันเกาะติดค้างบนผิวหน้าหรือในรูพรุนของเยื่อกรอง หรือการสะสมความเข้มข้นของตัวถูกละลายบริเวณผิวของเยื่อกรอง โดยลักษณะการอุดตันของเยื่อกรองสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.3.1 ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization, CP) คือการสะสมความเข้มข้นของสารถูกละลายบริเวณผิวของเยื่อกรองภายในชั้น Boundary Layer ซึ่งเป็นชั้นที่ใกล้ผิวหน้าของเยื่อกรอง Boundary Layer จะอยู่เป็นอิสระและขัดขวางการไหลผ่านเยื่อกรอง โดยทั่วไปจะมีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นปกติหลายเท่า CP ก่อผลเสียดังต่อไปนี้

- ทำให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการกรองลดลง
- ทำให้มีการรั่วไหลของสารละลายผ่านเยื่อกรองเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำมีการปนเปื้อน
- ทำให้เยื่อกรองเสื่อมสภาพเร็วขึ้น
- ทำให้มีการตกผลึกของ CaCO_3 และ CaSO_4 และสารประกอบอนินทรีย์อื่น

จากกลไกการกำจัดเกลือแร่และกลไกในการกำจัดสารอินทรีย์ คุณสมบัติของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (เช่น น้ำหนักโมเลกุล และ Hydrophobicity) มีผลต่อการลดลงของอัตราการกรองผ่านเยื่อกรองในการกรองที่ใช้ระยะเวลาานาน (Nilson and Digiano. 1996 ; Cho *et al.* 1999)

สารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการอุดตันบน Polysulfone NF membrane ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่า จะทำให้เกิดแรงดึงดูดมากขึ้นด้วยเช่นกัน (Nilson and Digiano. 1996) การอุดตันเยื่อกรองแบบนาโนนั้นนอกจากน้ำหนักโมเลกุลแล้วยังสามารถเกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของอนุภาคและจากขนาดของอนุภาคเนื่องจากการเกิดขึ้นของตะกอนอนุภาคนบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง (Lin *et al.* 2000)

ผลกระทบจากขนาดน้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ทางธรรมชาตินั้นขึ้นอยู่กับ pH และ ค่าความแรงของประจุ (ionic strength) ของสารละลาย โดยพบว่าอัตราการรวมตัวกันของอนุภาค Humic acid ลดลงเมื่อทำการเพิ่มค่า pH โดยทำให้แรงผลักรัง (Ionic repulsion forces) ระหว่างอะตอม Humic acid มีค่าเพิ่มขึ้น (Watson and Hornburg. 1989)

2.3.2 การเกิดชั้นเจล (Gel layer) คือชั้นของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ที่สะสมอยู่ในบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองซึ่งพบมากในกระบวนการอัลตราฟิเตรชัน ซึ่งมีการเกิดขึ้นดังต่อไปนี้ คือหากว่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในพื้นที่บริเวณใกล้กับผิวหน้าของเยื่อกรองมีค่าที่สูงมากจนสูงถึงขีดจำกัดของสารที่จะละลายได้ (C_g = Gel concentration) ของสารตัวนั้นๆ ตัวถูกละลายอาจมีลักษณะคล้ายกับเจลเกิดขึ้นในบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง ซึ่งจะเป็นเหตุทำให้ความต้านทานอัตราการไหลนั้นสูงขึ้นมากกว่าเดิม อัตราการไหลของสารละลายจึงมีค่าที่ลดลงจากค่าเดิม และชั้นของเจลนี้ยังอาจจะทำให้ค่าการ Recovery สารของเยื่อกรองเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของชั้นเจลที่มีการเกิดขึ้นที่บริเวณหน้าผิวของระบบ ถ้าตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็กจะสามารถที่จะเคลื่อนที่ผ่านในชั้นของเจลได้เร็วกว่าในเยื่อกรอง ดังนั้น จะทำให้ค่าการ Recovery ของตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็กจะลดลง แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าตัวถูกละลายนั้นสามารถที่จะเคลื่อนที่ภายในชั้นของเจลได้ช้า หรือเป็นเพราะว่ารูพรุนภายในชั้นของเจลเล็กและแน่นกว่าเยื่อกรองจะทำให้โอกาสที่ตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นของเจลเข้าสู่ชั้นของแผ่นเยื่อกรองเดิมย่อมเป็นไปได้ยากกว่าจึงทำให้ค่าการ Recovery ของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น

2.3.3 การเกิดชั้นเค้ก (Cake Formation) การเกิดขึ้นของเค้กนั้นมักเกิดจากความใกล้เคียงกันกับกระบวนการการเกิดชั้นเจล แต่การเกิดชั้นเค้กนั้นเป็นการที่เกิดจากระดับของอนุภาคซึ่งสามารถที่จะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

1. ถ้าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรอง อนุภาคจะถูกสะสมและเกิดการรวมตัวกันเกิดขึ้นเป็นเค้กขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง

2. ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ผสมกันอยู่ อนุภาคขนาดเล็กจะสามารถถูกสะสมอยู่ในรูพรุนของเยื่อกรองก่อนจนแน่นและเต็ม ต่อจากนั้นไปจะเกิดการสะสมตัวของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ตามมาแล้วเกิดเป็นเค้กขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองในที่สุด

เยื่อกรองนั้นสามารถที่จะดูดซับโมเลกุลหรืออนุภาคที่มีขนาดเล็กไว้เกิดเป็นชั้นของบางๆบริเวณบนผิวหน้าของเยื่อกรอง (ในกรณีที่เป็นโมเลกุลจะถูกเรียกว่า เจล และในกรณีที่เป็นอนุภาคจะถูกเรียกว่า เคก) ความแตกต่างระหว่างเจลและเค้กนั้น สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

การสะสมตัวของตัวถูกละลาย เจลนั้นจะเป็นการสะสมตัวของโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecules) ส่วนในเคกนั้นจะเป็นการสะสมตัวที่เป็นชั้นของอนุภาคหรือสารแขวนลอย (Particles Colloids)

จากความหนา โดยที่ชั้นความหนาของเจลนั้นมีความหนาที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับของหน่วยไมครอน ในขณะที่ชั้นความหนาของเคกซึ่งอาจจะทำการวัดได้นั้น มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

2.3.4 การอุดตันรูพรุน (Pore Blockage) คือการอุดตันรูพรุนของเยื่อกรอง ซึ่งได้แสดงลักษณะของการเกิดการอุดตันของแผ่นเยื่อกรองที่มีรูพรุนขนาดต่าง ๆ เมื่อทำการเทียบกับตัวถูกละลาย

1. สำหรับเยื่อกรองที่มีขนาดของรูพรุนที่แน่นและมีขนาดเล็กกว่าตัวถูกละลาย จะทำให้เกิดการอุดตันที่บนบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง

2. สำหรับในกรณีที่ขนาดของรูพรุนมีขนาดที่ใหญ่กว่าตัวที่ถูกละลายเล็กน้อย จะทำให้เกิดการอุดตันในรูพรุนก่อน ต่อจากนั้นจะเริ่มมีการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง ซึ่งจะมีการอุดตันบนบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองเป็นส่วนใหญ่

3. สำหรับในกรณีที่ขนาดของรูพรุนของเยื่อกรองห่างกันและมีขนาดที่ใหญ่กว่าตัวถูกละลายมากจะทำให้เกิดการอุดตันบริเวณภายในรูพรุนก่อน ต่อจากนั้นจะเริ่มมีการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรอง

คุณภาพของน้ำหรือสารละลายที่ผ่านกระบวนการกรอง รวมทั้งอายุการใช้งานของเยื่อกรองขึ้นอยู่กับการปัจจัยหลายประการ ประกอบด้วย ส่วนประกอบของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration) ความแรงของประจุ (Ionic strength) pH ของสารละลาย และลักษณะการ

ไหลเข้าที่เรียกว่า Cross flow velocity รวมทั้ง ประเภทและปริมาณของสารอนินทรีย์ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.4.1 คุณลักษณะของเยื่อกรอง

1. **รูพรุน** ความหมายของคำว่า “รูพรุน” ตามที่จำกัดความโดย IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) แบ่งตามขนาดรูพรุนออกเป็น 3 ระดับตามขนาดดังนี้

ขนาดใหญ่ : ขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร

ขนาดกลาง : ขนาดของรูพรุนอยู่ระหว่าง 2 นาโนเมตร ถึง 50 นาโนเมตร

ขนาดเล็ก : ขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร

โดยขนาดของรูพรุน หมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดความกว้างของรูพรุน ดังนั้น เยื่อกรองแบบไมโครฟิลเตรชันจัดว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ และสำหรับอัลตราฟิลเตรชันเป็นขนาดกลาง ถ้าขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร นิยมเรียกว่า เยื่อกรองแบบแน่นมากกว่าที่จะเรียกว่ามีรูพรุนขนาดเล็ก

การแสดงความขนาดของรูพรุนของเยื่อกรอง อาจแสดงด้วยค่าโมเลกุลลาร์เวทคัทออฟ (Molecular weight cutoff, MWCO) ซึ่งบ่งชี้ถึง ขนาดของรูพรุนที่สามารถกักสารที่มีขนาดใหญ่กว่า ได้ถึงร้อยละ 90 ขึ้นไป

2. **Hydrophobicity** โดยทั่วไป โพลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อกรองสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. ถ้าต้องการที่จะทำการแยกน้ำ (ซึ่งอาจจะมียูในปริมาณที่น้อย) ออกจากสารละลายอินทรีย์ โดยโพลิเมอร์ที่จะใช้ในการผลิตเยื่อกรองต้องมีคุณสมบัติที่ชอบน้ำ

2. ถ้าต้องการที่จะทำการแยกสารอินทรีย์ (ซึ่งอาจจะมียูในปริมาณที่น้อย) ออกจากสารละลายเจือจาง โดยโพลิเมอร์ที่จะใช้ในการผลิตเยื่อกรองต้องมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ แต่ยังไม่มีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างจริงจัง

3. **ประจุหรือความมีขั้วของเยื่อกรอง** อัตราการไหลและค่า Recovery ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างเยื่อกรองและตัวถูกละลาย โดยปกติ ที่ผิวของเยื่อกรองมีการแสดงประจุหรือความมีขั้วตามลักษณะของโพลิเมอร์ที่ใช้ และหมู่ฟังก์ชันของโพลิเมอร์นั้น เช่น เซลลูโลสอะซิเตดและโพลีเอไมด์ จะแสดงความเป็นขั้วลบเล็กน้อย ในขณะที่โพลิเมอร์อื่น ๆ อาจจะมีคุณสมบัติที่เป็นกลาง

สำหรับเยื่อกรองแบบนาโนส่วนใหญ่จะเป็นเยื่อเชิงประกอบซึ่งบริเวณผิวหน้าผลิตมาจากโพลิเมอร์ได้หลายชนิด และโดยส่วนใหญ่จะมีประจุที่บริเวณผิวหน้าเป็นลบ ดังนั้นจึงมีค่า Recovery สูงกับตัวถูกละลายที่มีประจุเดียวกันกับเยื่อกรอง

2.4.2 ขนาดน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight)

ขนาดน้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ เป็นปัจจัยหนึ่งที่จะใช้ทำการศึกษาถึงการดูดตันของเยื่อกรอง โดยสังเกตการลดลงของอัตราการกรองผ่านเยื่อกรอง

Nilson and Digiano (1996) พบว่าสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่ทำให้เกิดการดูดตันบนเยื่อกรองนาโนแบบ Polysulfone ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่า จะทำให้เกิดแรงดึงดูดมากขึ้นด้วยเช่นกัน

Lin *et al.* (2000) แสดงผลการทดลองว่าการดูดตันอย่างรุนแรงของเยื่อกรองในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เกิดขึ้นเนื่องจากสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยมีการทดลองในช่วงน้ำหนักโมเลกุลขนาด 6.5 – 22.6 kDa

2.4.3 ความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration)

ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ มีผลต่อการดูดตันของเยื่อกรอง เป็นอย่างมาก ถือได้ว่าเป็นปัจจัยหลัก เนื่องจากในระบบไฮโดรไดนามิกใด ๆ รวมทั้งระบบออสโมซิสผกกลับ จะมีชั้นน้ำที่เรียกว่า Boundary Layer อยู่ติดกับผิวหน้าของเยื่อกรอง ชั้นดังกล่าวนี้จะอยู่เป็นอิสระไม่ผสมกับน้ำที่อยู่ภายนอกของชั้นความหนาของ Boundary Layer ซึ่งแปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำ และ ความปั่นป่วน น้ำสะอาดจะถูกบังคับออกจากชั้นนี้และกระจายซึมผ่านเยื่อกรองออกไปภายนอก ถ้าให้มีการสะสมตัวของสารละลายต่าง ๆ เกิดขึ้นภายใน Boundary Layer จนกระทั่งมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำดิบหลายเท่า ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิด Concentration Polarization ระดับการเกิด Concentration Polarization อาจแสดงได้ด้วยอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นสูงสุดของสารละลายใน Boundary Layer และความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำดิบ

2.4.4 ความแรงของประจุ (Ionic Strength)

Hong and Elimelech (1997) ได้ทำการศึกษาการดูดตันเยื่อกรองนาโน อันเนื่องมาจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ที่มาจากแหล่งน้ำ 3 แหล่ง พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จะส่งผลให้เกิดการสะสมของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนผิวของเยื่อกรอง Hong and Elimelech (1997) พบว่าความแรงของประจุมีผลต่ออัตราการซึมผ่านเยื่อกรอง ทั้งนี้เพราะที่ความแรงของประจุสูงจะทำให้ประจุที่บริเวณผิวของเยื่อกรองและโมเลกุลของอิมิกลดลง เนื่องมาจากการที่ชั้น Double Layer ถูกบีบอัดให้แน่น ทำให้ชั้นมีความหนาลดลง ส่งผลต่อการลดลงของแรงผลักระหว่างผิวของเยื่อกรองกับสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ทำให้สารอินทรีย์ทางธรรมชาติมีโอกาสที่จะเข้าสัมผัสและติดค้างตามกลไกได้มากขึ้น และย่อมจะส่งผลเสียได้มากขึ้นด้วย

2.4.5 อุณหภูมิและ พีเอช (Temperature and pH)

การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแต่ละองศาในช่วง 15-30 องศาเซลเซียส ช่วยให้ อัตราการซึมผ่านเยื่อกรองมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ การที่เยื่อกรองเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส อุณหภูมิและค่าพีเอชของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติจึงมีบทบาทสำคัญ โดยอัตราเร็วของปฏิกิริยาแปรตามอุณหภูมิของน้ำและค่าพีเอชที่ต่ำที่สุดเมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4-5 ด้วยเหตุนี้ถ้าต้องการให้เยื่อกรองมีอายุยืนนานควรรักษาระดับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 3-7 และไม่ใช่กับงานที่มีอุณหภูมิสูง

2.4.6 สภาพการทำงาน (Operating Conditions)

สภาพการทำงานของระบบเยื่อกรอง ได้แก่ ความดัน และความเร็วของการไหลตามขวาง (Crossflow velocity) และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากสภาพการทำงาน การเพิ่มความดันแก่ระบบทำให้ อัตราการไหลของเพอเมตเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้เกิดการอุดตันเร็วขึ้น ความเร็วของการไหลตามแนวขวางมีส่วนทำให้เกิดแรงเฉือนบนผิวหน้าเยื่อกรอง เป็นการลดการสะสมตัวของสารอุดตันบนผิวหน้าของเยื่อกรอง ทำให้การลดลงของอัตราการไหลมีค่าน้อยลง

2.5 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์โดยเยื่อกรองแบบนาโน

2.5.1 กลไกการคัดแยกโดยใช้ขนาด (Size Exclusion)

เยื่อกรองแบบนาโนมีขนาดรูที่เล็กคือ มีขนาดประมาณ 150 – 300 ดาลตัน สามารถคัดแยกสารที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพุนของเยื่อกรองไม่ให้ผ่านออกมาได้ พบว่า เยื่อกรองแบบนาโนสามารถกรอง Total organic carbon (TOC), สาร Trihalomethane (THM), ความกระด้าง, สี และสารละลายไอออนประจุเดี่ยว คิดเป็น 90-95 %, 91-98 %, 85-95 %, 90-97 % และมากกว่า 70 % ตามลำดับ (Watson and Hornburg, 1989 ; Duranceau *et al.* 1992 ; Kabsch-Korbutowicz *et al.* 1994 ; Mattaraj and Kilduff, 2003)

2.5.2 ความแตกต่างของประจุ (Charge Interaction)

เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองจะมีประจุที่เกิดจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตในแต่ละชนิด แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมีประจุเป็นลบ ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกัน และยังมีค่าประจุที่มากก็จะทำให้เกิดแรงผลักรุนแรงขึ้น อย่างไรก็ตามแรงผลักรุนแรงไม่มีผลมากเพราะว่าเยื่อกรองแบบนาโนมีการใช้แรงดันที่สูงจะทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำออกมาจึงทำให้อาจจะมีค่าความเข้มข้นของเกลือที่สูงอยู่ได้

2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเยื่อกรอง

2.6.1 อัตราการไหลของกระบวนการออสโมซิสผันกลับ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Lonsdale ใช้ในการศึกษาการทำงานของกระบวนการออสโมซิสผันกลับ ดังสมการที่ 2.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านเยื่อเมมเบรน (Water Flux, J_w) กับความดันที่ให้กับระบบและความดันออสโมติก ดังนี้

$$J_w = L_p(\Delta P - \Delta\pi) \quad (2.4)$$

โดยที่

J_w คือ อัตราการซึมของน้ำผ่านเยื่อกรอง หรือ Water Flux ($\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$)

L_p คือ สัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรอง ($\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{kPa}^{-1}$)

ΔP คือ ความแตกต่างระหว่างแรงดันของน้ำที่อยู่คนละด้านของเยื่อกรอง (kPa)

$\Delta\pi$ คือ ความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมติกของน้ำที่อยู่คนละข้างของเยื่อกรอง (kPa)

จากสมการที่ 2.4 เป็นสมการที่มีลักษณะเป็นเชิงอุดมคติเนื่องจากเยื่อกรอง โดยเฉพาะกระบวนการออสโมซิสผันกลับ จะไม่ยอมให้สารละลายอื่นไหลผ่าน แต่ในความเป็นจริงแล้ว เยื่อกรองไม่สามารถผลึกโมเลกุลหรือไอออนได้หมดทุกตัว ทำให้น้ำที่ผลิตได้ (Permeate) มีสิ่งเจือปนเสมอ การรั่วของสารละลายผ่านเยื่อกรอง เรียกว่า Salt Flux (J_s) ระบบออสโมซิสผันกลับที่ดี ควรมีอัตราการซึมของน้ำผ่านเยื่อกรอง หรือ Water Flux (J_w) สูง ในขณะที่ Salt Flux (J_s) ควรมีค่าต่ำ และ Salt Flux (J_s) จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเข้าสู่ระบบ และไม่ขึ้นกับแรงดัน

2.6.2 การกรองสารอินทรีย์ทางธรรมชาติด้วยเยื่อกรองแบบนาโน

จากการศึกษาของ Mattaraj and Kilduff (2003) เกี่ยวข้องกับการอุดตันเยื่อกรองอันเป็นผลมาจากสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในกระบวนการกรองแบบนาโน ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการซึมผ่านเยื่อกรองดังสมการที่ 2.5

$$J_w = L_p(\Delta P - \sigma\Delta\pi) = \frac{Q_{perm}}{A_m} \quad (2.5)$$

โดยที่ J_w คือ อัตราการซึมผ่านเยื่อกรอง ($\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$)

L_p คือ สัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรอง ($\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{kPa}^{-1}$)

ΔP คือ ค่าความแตกต่างของความดันเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ

$$\left[\frac{(P_{feed} + P_{retn})}{2} - P_{perm} \right] \text{ (kPa)}$$

σ คือ สัมประสิทธิ์ของแรงดันออสโมติกมีค่าเท่ากับ $1 - \frac{C_{perm}}{C_{mem}}$

$\Delta \pi$ คือ ค่าความแตกต่างของแรงดันออสโมติก ($\pi_{mem} - \pi_{perm}$) (kPa)

จะเห็นได้ว่าหากใช้สารละลายเป็นสารอินทรีย์ทางธรรมชาติแล้ว สิ่งที่ได้จากการผ่านเยื่อกรองจะประกอบด้วยน้ำและบางส่วนของเกลือแร่ซึ่งสิ่งปนเปื้อนดังกล่าวเรียกว่า Solute Flux จะมีค่าเท่ากับผลคูณของอัตราการซึมผ่านเยื่อกรองของน้ำหรือสารละลาย (J_s) กับความเข้มข้นของสารละลายที่ซึมผ่านมาแล้ว (Permeate: C_{perm}) ดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$J_s = \frac{Q_{perm} C_{perm}}{A_m} = J_v C_{perm} \quad (2.6)$$

ส่วนการกำจัดตัวถูกละลายออกจากน้ำ (Rejection) โดยการกรองผ่านเยื่อกรองจะสกัดเอาตัวถูกละลายต่าง ๆ ออกจากน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.7 - 2.9

$$R_{feed} = 1 - \frac{C_{perm}}{C_{feed}} \quad (2.7)$$

$$R_{retn} = 1 - \frac{C_{perm}}{C_{retn}} \quad (2.8)$$

$$R_{mem} = 1 - \frac{C_{perm}}{C_{mem}} \quad (2.9)$$

โดยที่ R คือ อัตราการกำจัดตัวถูกละลายออกจากน้ำ (%)

C_{mem} คือ ความเข้มข้นที่ผิวของเยื่อกรอง (mg.L⁻¹)

C_{retn} คือ ความเข้มข้นของรีเทนเทท (mg.L⁻¹) (Mattaraj and Kilduff. 2003)

2.6.3 อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลและการเคลื่อนที่กลับของโมเลกุล

ค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของน้ำและการเคลื่อนที่กลับของโมเลกุลของตัวถูกละลาย (J/k) แสดงถึงโอกาสของการสะสมตัวของสารอุดตันบนผิวหรือในรูพรุนของเยื่อกรอง ค่า J/k มี

ความสัมพันธ์กับการอุดตันบนเยื่อกรอง นั่นคือ ค่า J/k มักแสดงถึงอัตราการไหลของน้ำที่สูง ในขณะที่เดียวกันมีการเคลื่อนที่กลับของตัวถูกละลายต่ำ ทำให้มีโอกาสเกิดการอุดตันได้สูง ส่วนค่า J/k ที่ต่ำ แสดงถึงอัตราการไหลของน้ำที่น้อย ประกอบกับการเคลื่อนที่กลับของตัวถูกละลายที่สูง นั่นคือโอกาสของการเกิดการอุดตันต่ำ

ค่า J_v คือ ค่าอัตราการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรองต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โดยสามารถคำนวณได้จากสมการตามกฎของ Darcy (Darcy's Law) ดังสมการที่ 2.10

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu r_m} \quad (2.10)$$

โดยที่ ΔP คือ ค่าของความดันที่ลดลง (kPa)

μ คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s)

r_m คือ ค่าความต้านทานของเยื่อกรองแผ่นใหม่ (m^{-1})

ค่า k คือ สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวล ($m.s^{-1}$) โดยสามารถที่จะหาได้จากสมการที่ 2.11

$$k = 1.62 \left(\frac{U D^2}{d_h L} \right)^{0.33} \quad (2.11)$$

โดยที่ U คือ ความเร็วของการไหลในแนวขวาง ($m.s^{-1}$)

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ ($m^2.s^{-1}$)

d_h คือ ขนาดของโมเลกุล (m)

L คือ ความยาวของการไหลในแนวขวาง (m)

โดยค่า D สามารถที่จะหาได้จากสมการที่ 2.12 ดังนี้

$$D = \frac{k_B T}{6 \pi \mu r_p} \quad (2.12)$$

โดยที่ k_B คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} J.K^{-1}$)

T คือ อุณหภูมิจุดสัมบูรณ์ (K)

μ คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s)

r_p คือ รัศมีของอนุภาค (m)

2.6.4 แบบจำลองการอุดตันของระบบเยื่อกรองแบบนาโน

แบบจำลองการอุดตันของการกรองได้พัฒนามาจากการกรองแบบ dead end ที่ได้เสนอโดย Hermia (1982) โดยสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์สำหรับกลไกการอุดตันบนผิวของเยื่อกรองสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dJ_v}{dt} = kJ_v^{2-n} J_v$$

โดยที่ ค่า k เท่ากับค่าคงที่ของการอุดตัน (fouling coefficient) ขึ้นอยู่กับกลไกการอุดตันของเยื่อกรอง n ซึ่งเท่ากับค่าคงที่สำหรับการกรองไม่มีหน่วย

โดยที่ค่าคงที่ของ n เท่ากับ 0 แสดงกลไกการกรองเกี่ยวข้องกับการเกิดเค้กบนผิวของเยื่อกรอง (cake formation model)

ค่าคงที่ของ n เท่ากับ 1 แสดงกลไกการกรองเกี่ยวข้องกับการเกิดจุดจับของอนุภาคบนผิวของเยื่อกรองที่ระยะเวลาที่นานขึ้นหรืออนุภาคอาจปิดบางส่วนของพื้นที่ของเยื่อกรองทำให้เพิ่มชั้นความหนาของการกรองมากขึ้น (intermediate standard blocking)

ค่าคงที่ของ n เท่ากับ 1.5 แสดงกลไกการกรองเกี่ยวข้องกับการเกิดจุดจับของอนุภาคในรูของผิวของเยื่อกรองทำให้ปริมาตรของรูมีขนาดลดลง (pore constriction or standard blocking)

ค่าคงที่ของ n เท่ากับ 2 แสดงกลไกการกรองเกี่ยวข้องกับการอุดตันที่ตกตะกอนบนผิวของเยื่อกรองและปิดรูของเยื่อกรองทำให้จำนวนรูของเยื่อกรองมีจำนวนลดลง (pore blocking or complete blocking)

สำหรับการกรองที่เกิดจากการดำเนินระบบที่มีความเร็วบนผิวของเยื่อกรอง (crossflow operation) แบบจำลองการอุดตันแบบ crossflow สามารถประยุกต์ได้กับการดำเนินระบบแบบ dead end operation ดังนี้

$$\frac{dJ_v}{dt} = kJ_v^{2-n} (J_v - J^*)$$

โดยที่ ค่า k เท่ากับค่าคงที่ของการอุดตัน (fouling coefficient) ขึ้นอยู่กับกลไกการอุดตันของเยื่อกรอง n ค่า J^* เท่ากับค่าฟลักซ์ที่เกิดจากความเร็วของ crossflow บนผิวของเยื่อกรอง

ตารางที่ 2.1 แสดงตารางสรุปแบบจำลองการอุดตันของการกรองแบบ dead end และ crossflow operation โดยความสัมพันธ์ของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เท่ากับผลคูณของค่าคงที่ของการอุดตันและสัดส่วนของค่าฟลักซ์ตามแบบจำลองของการกลไกอุดตันบนผิวของเยื่อกรอง

ตารางที่ 2.1 แบบจำลองการอุดตันของการกรองแบบ dead end และ crossflow operation

Model	Dead end operation	Crossflow operation
Pore Blocking (Complete Pore Blocking)	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_A J_v$	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_A (J_v - J^*)$
Pore Constriction (Standard Blocking)	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_B J_v^{0.5} (J_v)$	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_B J_v^{0.5} (J_v - J^*)$
Intermediate Blocking	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_C J_v (J_v)$	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_C J_v (J_v - J^*)$
Cake formation	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_D J_v^2 (J_v - J^*)$	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_D J_v^2 (J_v - J^*)$

โดยที่ k_A , k_B , k_C และ k_D เท่ากับ ค่าคงที่ของการอุดตันตามแบบจำลองของกลไกการอุดตัน

จากแบบจำลองนี้ค่า k จะเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ระหว่างข้อมูลอัตราการไหลของเพอมีเอทจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยจะให้ผลรวมของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองน้อยที่สุด หรือ sum of squared error (SSE) โดยใช้การแก้สมการแบบ Fourth-order Runge-Kutta routine และใช้ solver ในการแก้สมการ

2.6.5 แบบจำลองความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม (Resistance-in-series Model)

จากสมการตามกฎของ Darcy ในส่วนของค่าความต้านทานของเยื่อกรองนั้น เมื่อมีการใช้งานจนเกิดการอุดตันที่ผิวของเยื่อกรอง ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจะไม่ได้มีเฉพาะความต้านทานของเยื่อกรองเท่านั้น แต่จะมีความต้านทานอันเกิด จากการอุดตันเพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นมีผลต่อค่าความต้านทานรวม ดังแสดงในสมการที่ 2.13

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu(r_m + r_c + r_g + r_{o1} + r_{o2})} \quad (2.13)$$

โดยที่

J_v คือ ค่าอัตราการไหล ($L.m^{-2}.h^{-1}.kPa^{-1}$)

ΔP คือ ค่าความดันที่ลดลง (KPa)

μ คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s)

r_m คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากเยื่อกรอง (m^{-1})

r_c คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้น Concentration Polarization (m^{-1})

r_s คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของเจล (m^{-1})

r_{o1} คือ ค่าความต้านทานที่การดูดซับที่สามารถล้างออกได้ (m^{-1})

r_{o2} คือ ค่าความต้านทานที่ไม่สามารถล้างออกได้ (m^{-1}) (Cho *et al.* 2000)

จากการศึกษาของ Cho *et al.* (2000) พบว่าค่าพหุคูณเอฟลักซ์ที่ลดลงเกิดจากค่าความต้านทานรวมสูงขึ้น โดยค่าความต้านทานต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการกรอง (รูปที่ 2.3) ประกอบด้วย

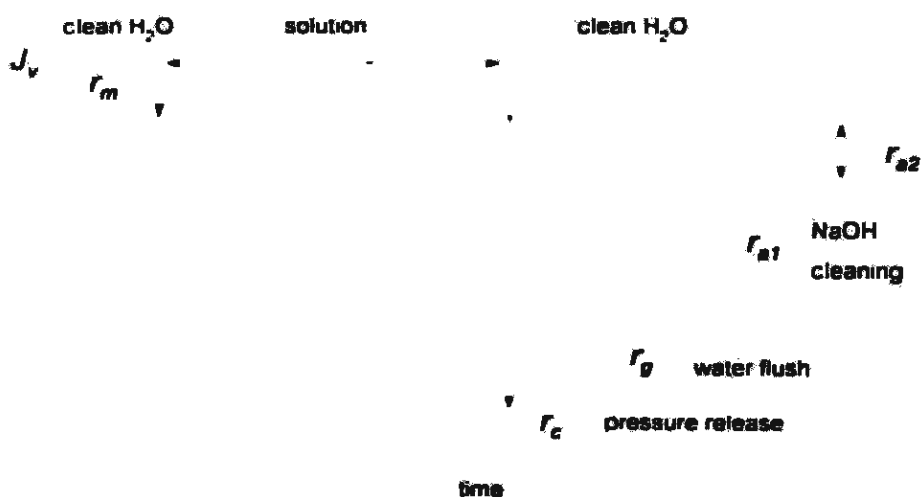
1. ค่าความต้านทานที่เกิดจากเยื่อกรอง (r_m) เกิดขึ้นจากเยื่อกรองแต่ละตัว นั้นมีขนาดรูพรุนที่ใช้ในการคัดแยกสารที่แตกต่างกัน เยื่อกรองที่มีขนาดรูพรุนต่ำ มีค่า r_m สูงกว่าเยื่อกรองที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า

2. ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของ Concentration Polarization (r_c) เกิดจากการสะสมความเข้มข้นของตัวถูกละลายบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง ภายในชั้น Boundary ส่งผลให้แรงดันออสโมติกสูง หรือเกิดการสะสมตัวของสาร

3. ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของเจล (r_s) เกิดขึ้นจากเมื่อบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองมีความเข้มข้นที่สูงขึ้น จนมีค่าเกินขีดจำกัดของการละลายของสารที่มีอยู่ในน้ำ จะมีลักษณะคล้ายเจลเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง

4. ค่าความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับอย่างอ่อน (r_{o1}) เกิดจากการดูดซับที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของเยื่อกรองซึ่งการดูดซับนี้สามารถที่จะล้างออกได้โดยใช้สารเคมี

5. ค่าความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับอย่างถาวร (r_{o2}) เกิดจากการดูดซับ อย่างถาวร ซึ่งจะติดแน่นอยู่กับเยื่อกรองดังนั้นจึงไม่สามารถทำความสะอาดด้วยสารเคมีได้



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงค่าความต้านทานแบบอนุกรมที่เกิดขึ้นจากการอุดตัน (Cho *et al.* 2000)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bowen *et al.* (1995) พบว่าอนุภาคของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ปกคลุมผิวหน้าของเยื่อกรอง จะมีผลต่อการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจากการสะสมตัวที่เกิดขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติสูง จนมีลักษณะเป็นชั้นคล้ายเค้กปกคลุมที่ผิวเยื่อกรองเป็นผลให้มีความต้านทานของระบบที่เพิ่มมากขึ้น

Cho *et al.* (2000) พบว่าส่วนประกอบของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ โดยใช้แหล่งน้ำธรรมชาติในการทดลอง เป็นผลให้เกิดการลดลงของฟลักซ์มากที่สุด เนื่องจากการติดค้างอยู่ในบริเวณรูของเยื่อกรองสูง เป็นผลให้รูของเยื่อกรองแคบลง เกิดการขัดขวางการไหลเป็นผลให้มีความต้านทานสูงขึ้นทำให้เกิดการลดลงของฟลักซ์

Crozes *et al.* (1993) พบว่าการอุดตันของเยื่อกรองแบบอัลตราฟิวดเรชันเป็นผลมาจากการลดจำนวนและขนาดของรูเยื่อกรอง ทำให้น้ำไหลไม่สะดวก ทำให้เกิดความต้านทานที่สูงทำให้ ฟลักซ์ลดลง และยิ่งขนาดของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติมีขนาดที่เล็กกว่ารูเยื่อกรอง ยิ่งจะทำให้เกิด การอุดตันได้สูงและทำให้ยากแก่การทำความสะอาด เมื่อมีการใช้งานไปเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเยื่อกรองได้ง่าย

Hong and Elimelech (1997) ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ มีผลต่อการเกิดการอุดตันของเยื่อกรองโดยใช้น้ำธรรมชาติจาก 3 แหล่ง โดยที่มีการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งทำให้เกิดการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ผิวหน้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้านทานเพิ่มมากขึ้น ค่าฟลักซ์ที่ได้มีค่าต่ำลง

Kilduff *et al.* (2004a) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ระดับ 0 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง โดยความเข้มข้นสูง ยิ่งทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง มากขึ้น เนื่องมาจากความต้านทานจากชั้นเค้ก ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงและความสามารถในการกำจัดเกลือลดลง และเมื่อมีการเพิ่มระดับพีเอชเป็น 10 พบว่าค่า ฟลักซ์ที่ได้ มีค่าที่ลดลงมากที่สุด

Lin *et al.* (2000) พบว่าการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและขนาดอนุภาค โดยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาด 6.5 – 22.6 kDa เกิดการสะสมตัวบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองแบบอัลตราฟิวดเรชัน ทำให้มีค่าความต้านทานสูง และการลดลงของฟลักซ์

Mattaraj and Kilduff (2003) พบว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติต่ำจะเกิดกลไกการอุดตันตามแบบจำลองประเภท standard blocking และ intermediate blocking ส่วนความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติสูง จะเกิดกลไกการอุดตันแบบจำลองประเภท complete blocking และ cake formation ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการลดลงของฟลักซ์ โดยทำการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติตั้งแต่ 5, 10, 20, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

Nilson and Digiano (1996) พบว่าสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลใหญ่ สามารถจะทำให้เกิดการอุดตันบนเยื่อกรองแบบนาโน ทำให้ฟลักซ์ลดลง เนื่องมาจากน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าแรงตึงผิวมากขึ้น ทำให้ติดค้างอยู่กับเยื่อกรอง

Schafer *et al.* (1998) พบว่าถ้ามีการรวมตัวระหว่างแคลเซียมกับสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ที่ระดับความเข้มข้นสูง จะส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์เป็นอย่างมาก เนื่องจากแคลเซียมสามารถเป็นตัวสะพานเชื่อม (Bridging) ระหว่างสารอินทรีย์ทางธรรมชาติกับผิวของเยื่อกรอง ทำให้เกิดการอุดตันเร็วขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าฟลักซ์ที่ได้ และการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมยังสามารถทำให้เกิดการลดลงของฟลักซ์ได้เช่นเดียวกัน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาการดูดตันระบบเยื่อกรองแบบนาโน โดยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติร่วมกับสารอนินทรีย์โดย มีขั้นตอนการดำเนินการโดยสรุป (รูปที่ 3.1) ดังนี้

1. สำรวจและเลือกสถานที่ที่จะเก็บน้ำตัวอย่างรวมทั้งการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้ข้อมูลที่ใช้มาวิเคราะห์นั้นคือ ค่าการดูดกลืนแสง (UV_{254nm}) และค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC)

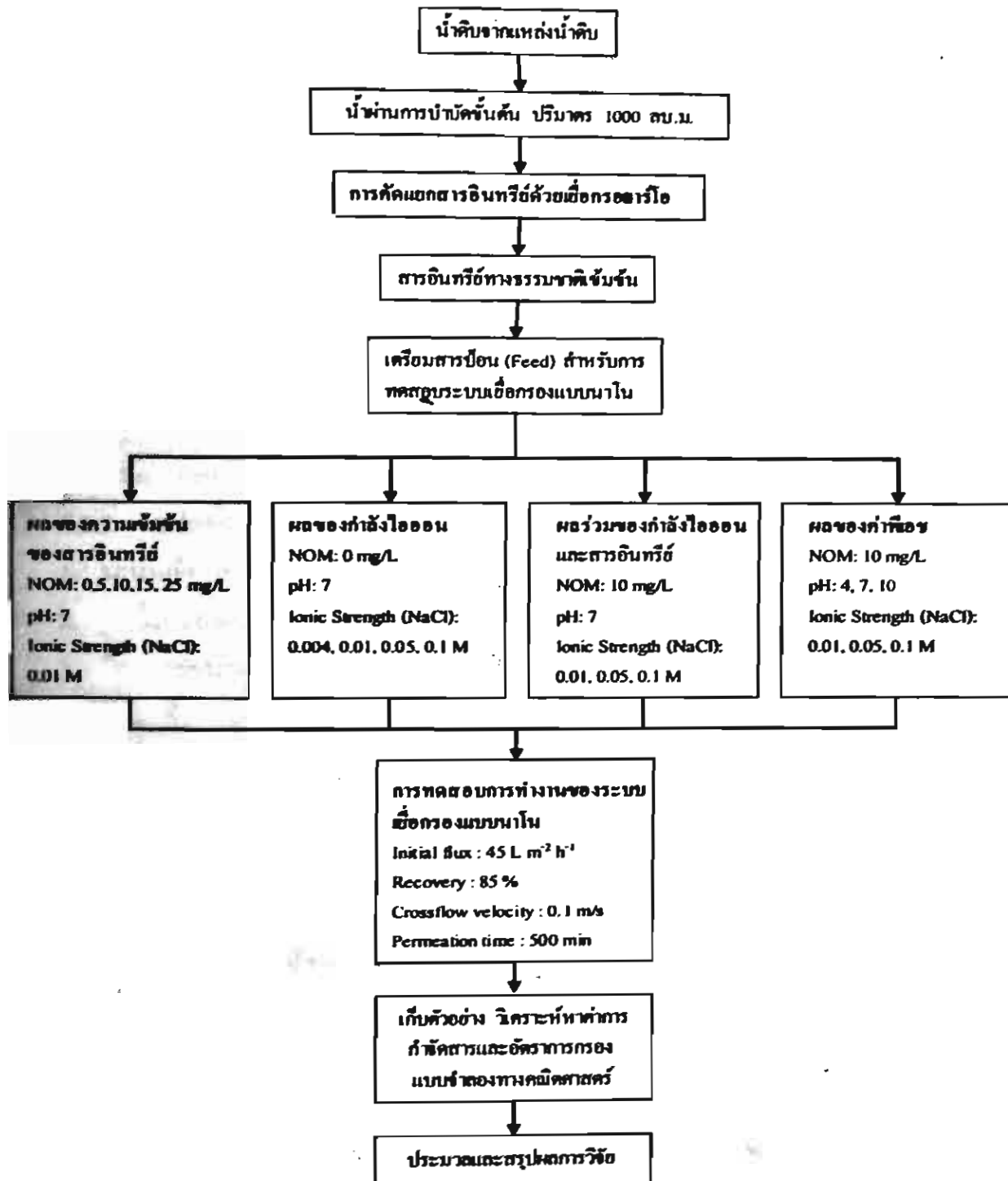
2. คัดแยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติจากแหล่งน้ำ โดยใช้ระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ ทำให้ได้สารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงและเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส เพื่อยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์และนำสารอินทรีย์ ความเข้มข้นสูงมาทำการเจือจางตามความเข้มข้นที่ต้องการ ก่อนนำมาทดสอบกับสารอนินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ในระบบเยื่อกรองแบบนาโน

3. ทำการศึกษาผลของสารอนินทรีย์ต่อการดูดตันเยื่อกรองแบบนาโนโดยสารละลายผสมที่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติและสารอนินทรีย์ประเภทต่างๆ เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และกลไกการดูดตันของระบบเยื่อกรอง โดยควบคุมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ค่าพีเอชและค่าความแรงไอออน (Ionic Strength) ในสารละลาย และปรับเปลี่ยนประเภทของสารอนินทรีย์ ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) แคลเซียมฟอสเฟต ($(Ca_3(PO_4)_2)$) และ แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) นำผลการทดลองมาวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแต่ละกลไกการดูดตัน

4. ทดสอบประสิทธิภาพการกักกันสารของเยื่อกรองแบบนาโน โดยวัดค่าอัตราการไหลผ่านระบบเยื่อกรอง และค่าการกำจัดโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของคาร์บอนทั้งหมด

5. ทดสอบและวิเคราะห์การดูดตันของเยื่อกรองโดยใช้เครื่องมือทดสอบบนผิวของเยื่อกรอง เพื่อวิเคราะห์สารที่มีโอกาสก่อให้เกิดการดูดตันหรือดูดซับบนผิวของเยื่อกรอง โดยการทดสอบก่อนและหลังการทดลองโดยเยื่อกรองถูกทดสอบกับสารละลายสารอินทรีย์ นำเอาข้อมูลมาศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้

6. ประมวลผลการทดลองและสรุปผลการวิจัย



รูปที่ 3.1 ผังสรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้

3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. Acetic acid (CH_3COOH), Analytical reagent, Carlo Erba reagent
2. Calcium chloride (CaCl_2), Analytical univar reagent, APS Finechem
3. Calcium carbonate (CaCO_3), Analytical univar reagent, APS Finechem
4. Calcium phosphate ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), Laboratory reagent, Himedia laboratory Pvt. Limited
5. Calcium sulfate dehydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Laboratory unilab reagent, APS Finechem
6. Magnesium sulphate hydrated ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), Reagent grade, Scharlau
7. Sodium chloride (NaCl), Analytical univar reagent, APS Finechem
8. Sodium hydroxide (NaOH), Analytical univar reagent, Ajax Finechem
9. Sodium metabisulphite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$), Analytical univar reagent, APS Finechem

3.2.2 อุปกรณ์

1. ระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ (Reverse Osmosis Membrane)
2. ชุดเยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration Membrane Module) แบบ Cross-flow bench scale
3. บีกเกอร์ขนาด 100, 400, และ 1000 มิลลิลิตร
4. แท่งแก้วคนสาร
5. ถังผสมน้ำตัวอย่าง
6. ถังสำหรับใส่น้ำตัวอย่างที่เตรียมแล้ว
7. ซ้อนฉักสารเคมี
8. ปิ๊มดูดอากาศ
9. เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง
10. สายยางซิลิโคน

3.2.3 เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องวัดค่าพีเอช (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GMBH, ประเทศเยอรมัน)
2. เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้า (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GMBH, ประเทศเยอรมัน)
3. เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (Shimadzu Corporation รุ่น UV mini 1240, ประเทศญี่ปุ่น)
4. เครื่องวิเคราะห์ Total Organic Carbon (TOC) (Shimadzu Corporation รุ่น TOC-VCPH, ประเทศญี่ปุ่น)
5. เครื่อง Ion Chromatography (IC) (Metrohm Herisaw รุ่น 761 Compact IC, ประเทศสวีเดน)

6. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และ Energy Dispersive Spectrometer (EDS)

(Leo Co., Ltd รุ่น 1455VP)

7. เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) (Bruker A.G. Co., Ltd รุ่น D8 Advane)

8. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) (Model: FTIR Spectrum

GX)

3.3 การเก็บตัวอย่างน้ำและการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

3.3.1 การเก็บตัวอย่างน้ำ

ตัวอย่างน้ำถูกนำมาจากแหล่งน้ำผิวดินธรรมชาติภายในบริเวณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งใช้เป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับกระบวนการผลิตน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคภายในมหาวิทยาลัย ตัวอย่างน้ำประมาณ 1,500 ลิตรถูกเก็บไว้ภายในถังสแตนเลส ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติเพื่อใช้ในการทดลอง น้ำตัวอย่างถูกเก็บรวบรวมและทำการวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ พีเอช, ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity), ค่าการดูดกลืนแสง $UV_{254\text{ nm}}$ และสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon)

3.3.2 การเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

ระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ เป็นระบบที่ใช้แยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในแหล่งน้ำธรรมชาติ ดังแสดงในรูป 3.2 กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

1) เก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำดิบประมาณ 1,000 ลิตร

2) ผ่านเข้าสู่กระบวนการบำบัดเบื้องต้นเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่ และกำจัด

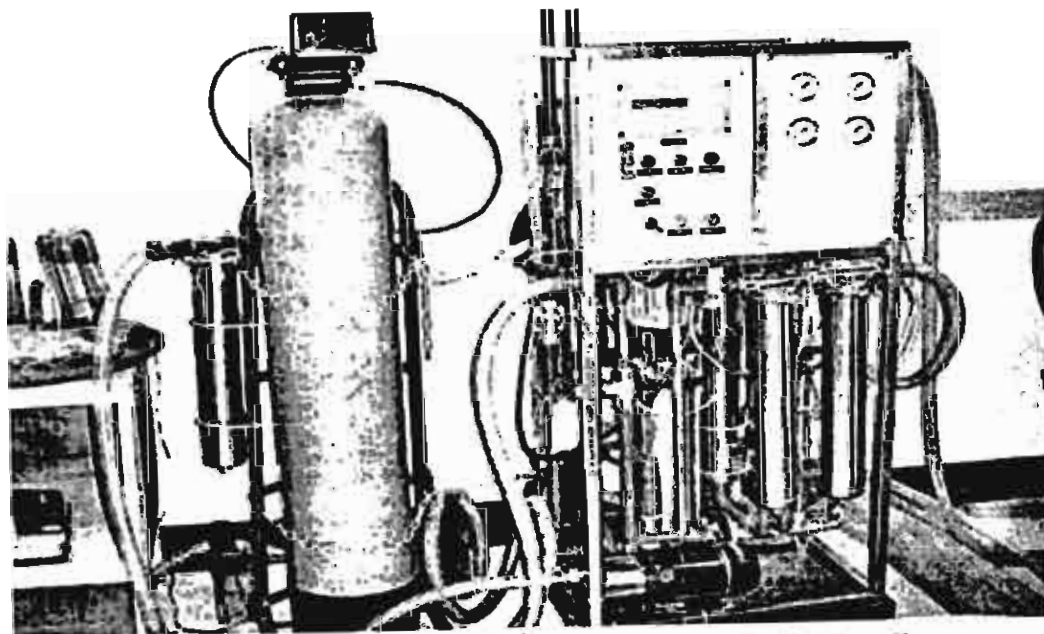
ไอออนที่ส่งผลต่อการเกิดตะกอนบนผิวของเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ

3) การผ่านน้ำเข้าสู่ระบบเยื่อกรองทำให้สามารถแยกน้ำออกมาได้เป็น 2 ส่วน คือน้ำที่ผ่านระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับที่มีความสะอาดสูงหรือมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำมากเรียกส่วนนี้ว่า เพอร์มิเอท (Permeate) และน้ำที่ไม่ผ่านเยื่อกรอง เรียกว่า คอนเซนเตรท (Concentrate) ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติสูง อันเนื่องมาจากความสามารถในการกักกัน (Retention) ของเยื่อกรอง

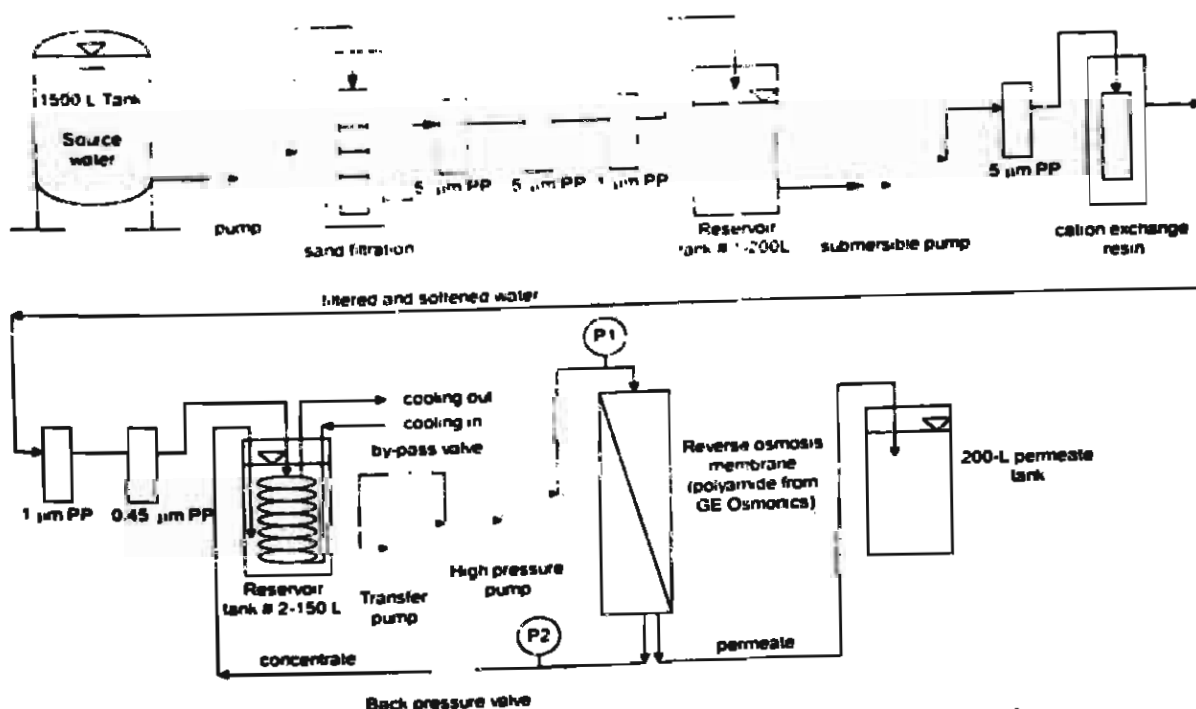
4) ทำการเวียนน้ำคอนเซนเตรทกลับไปยังถังป้อน ผสมกับน้ำดิบเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบเยื่อกรองตลอดเวลาที่เดินระบบ ส่วนน้ำเพอร์มิเอทที่ผลิตได้ ถือว่าเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง ถูกเก็บแยกในถังเก็บ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการล้างระบบต่อไป

5) หยุดการเดินระบบเยื่อกรอง ตามข้อ 4. เมื่อปริมาณน้ำเพอร์มิเอทที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 970 ลิตร และน้ำคอนเซนเตรทในถังป้อน ลดลงเหลือประมาณ 30 ลิตร

๓) เก็บน้ำคอนเซนเตรท ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติสูงนำไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์เพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพ และการเกิดการอุดตันของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนผิวของเยื่อกรองแบบนาโนต่อไป



ภาพที่ 3.2 ภาพแสดงระบบเยื่อกรองแบบนาโนสโมซิสผันกลับ



รูปที่ 3.3 กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติด้วยระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ

ระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอที่ใช้ในการคัดแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติจากโพลีเอไมด์ (Polyamide membrane) ประเภท Brackish Water-RO Polyamide PA โดยบริษัท GE-Osmonics ประเทศสหรัฐอเมริกา คุณสมบัติของระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของระบบเยื่อกรองอาร์โอสำหรับแยกสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติ

พารามิเตอร์	คุณสมบัติ
ชนิดของเยื่อกรองอาร์โอ	Thin-film composite
Silt density index (15 min)	น้อยกว่า 5
ความดันเข้าสู่ระบบ	น้อยกว่า 1 NTU
ช่วงค่าพีเอชของการดำเนินงาน	4 - 11
ช่วงค่าพีเอชของการกำจัดที่เหมาะสม	6.5 - 7.5
ช่วงค่าพีเอชสำหรับการทำความสะอาด	2 - 11.5
ค่าความดันที่ใช้ในการดำเนินงาน	200 psig (1,379 กิโลปาสกาล)
ค่าความดันสูงสุดที่ใช้	400 psig (2,758 กิโลปาสกาล)
ค่าการต้านของคลอรีน	น้อยกว่า 1,000 พีพีเอ็ม
อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านระบบเยื่อกรอง	2,350 gpd (8.88 m ³ d ⁻¹)
พื้นที่ผิวของระบบเยื่อกรอง	8.36 m ²
ค่าฟลักซ์	1.23 × 10 ⁻⁵ m.s ⁻¹
การกำจัดเกลือ @ 225 psig (2000 ppm NaCl)	99.4% (สูงสุด) / 99.0% (ต่ำสุด)

3.4 การศึกษาการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน

3.4.1 เยื่อกรองแบบนาโน

ในการวิจัย ใช้เยื่อกรองแบบนาโนของ Osmonics รุ่น HL2540F1072 นำมาตัดให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 4 × 6 นิ้ว เพื่อให้สามารถนำมาใส่ลงในชุดทดลองเยื่อกรอง สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ได้ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ถ้ายังไม่ได้มีการใช้งานในทันที จะเก็บรักษาโดยแช่ไว้ในสารละลาย Sodium metabisulphite ความเข้มข้น 1% เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แล้วนำไปแช่ไว้ในตู้เย็นเพื่อลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่มีผลต่อผิวหน้าเยื่อกรอง โดยเยื่อกรองแบบนาโนที่ใช้ในการทดลอง มีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเยื่อกรองแบบนาโนที่ใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	คุณสมบัติ
ผู้ผลิต และรุ่น	Osmonics / รุ่น HL2540F1072
ประเภทของเยื่อกรอง	Thin film membrane
วัสดุที่ใช้ทำเยื่อกรอง	Polyamide
ขนาดรูพรุน	150 – 300 ดาลตัน
การกำจัดเกลือ $MgSO_4$	98% ที่ 100 psi (690kPa)
ช่วงพีเอชของการดำเนินการ	3 – 9
ช่วงพีเอชของการทำความสะอาด	1 – 10
ความทนทานต่อคลอรีน	< 0.1 ppm
ความดันของการดำเนินการ	10 – 30 psi (483 – 2,069 kPa)
ความดันสูงสุดที่ทนได้	400 psi (2,758 kPa)

3.4.2 การทำความสะอาดเยื่อกรอง

การทำความสะอาดเยื่อกรอง มีขั้นตอนดังนี้

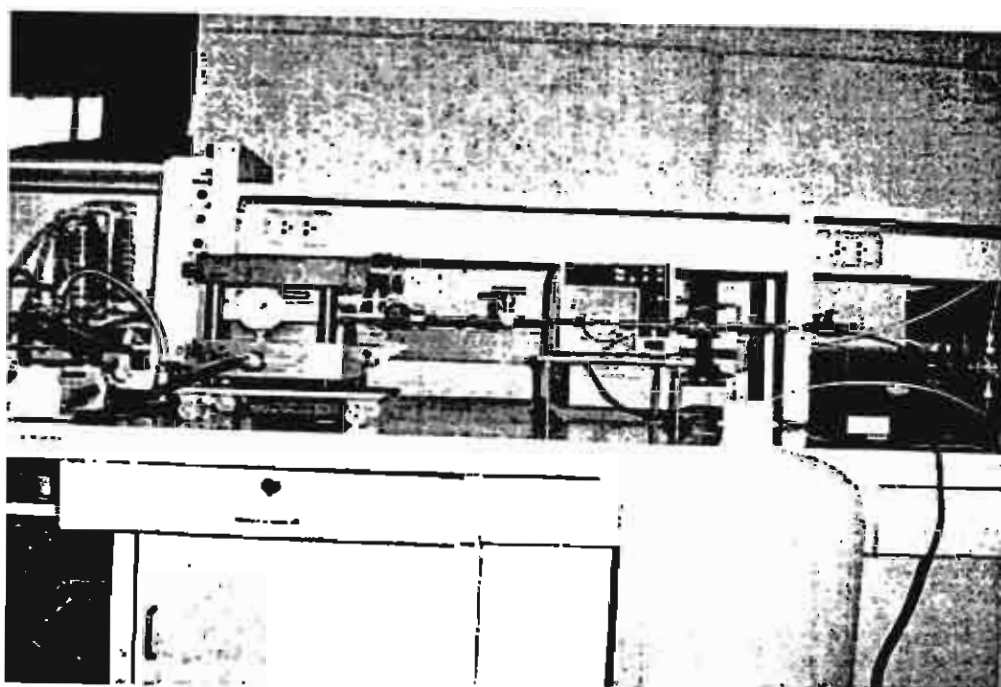
- 1) นำเยื่อกรองแบบนาโนที่ได้เก็บรักษาไว้ออกมา ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน
- 2) ติดตั้งเยื่อกรองในชุดทดลองเยื่อกรอง
- 3) ทำการล้างด้วยกรด โดยการปั่นสารละลายกรด CH_3COOH เข้มข้น 0.0001 โมลต่อลิตร ผ่านระบบเป็นเวลา 30 นาที
- 4) ล้างออกด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยผ่านน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 500 มิลลิลิตร เข้าสู่ระบบ
- 5) ทำการล้างเบส โดยใช้ด้วยสารละลาย $NaOH$ เข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร ไหลผ่านระบบเป็นเวลา 30 นาที
- 6) ผ่านน้ำปราศจากไอออนเข้าสู่ระบบ เพื่อทำความสะอาดเยื่อกรองขั้นสุดท้าย ก่อนการเดินระบบด้วยน้ำตัวอย่าง

3.4.3 การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโน

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของเยื่อกรองแบบนาโน ได้แก่ ชุดทดลอง เยื่อกรอง (Bench scale filtration test cell) ซึ่งเป็นระบบเยื่อกรองแบบไหลขวาง (Crossflow filtration unit) ดังรูปที่ 3.4 โดยในการทดลองด้วยระบบเยื่อกรองแบบนาโนทำการควบคุมการทำงานของระบบดังนี้

- อัตราการไหลเริ่มต้น (Initial flux) : $45 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
- เปอร์เซนต์การแยกกลับคืน (Percent recovery) : 85 %

- อัตราเร็วที่ไหลตามขวาง (Crossflow velocity) : 0.1 m.s^{-1}
- เวลาที่ใช้ในการเดินระบบ : 500 min



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงระบบเยื่อกรองแบบนาโน

การเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโน แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ติดตั้งเยื่อกรองในระบบ และทำความสะอาดเยื่อกรอง ดังได้กล่าวมาแล้วในข้อ

3.4.1 และ 3.4.2

- 2) หลังจากทำความสะอาดเยื่อกรองก่อนใช้งานแล้ว เดินระบบด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง วัดอัตราการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรอง (Pure water permeability) ปรับสภาวะการทำงานของระบบดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

- 3) ผ่านน้ำตัวอย่างที่ต้องการศึกษา เริ่มจับเวลานับตั้งแต่ น้ำตัวอย่างผ่านเข้าสู่ระบบเยื่อกรอง

- 4) วัดอัตราการไหล ทุก 10 นาทีในช่วง 1 ชั่วโมงแรกและทุก 20 นาทีหลังจากนั้น ตลอดการเดินระบบ เพื่อศึกษาการลดลงของฟลักซ์อันเนื่องมาจากการอุดตัน การวัดอัตราการไหล โดยใช้บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ร่อนน้ำที่ผ่านออกมาทางเพอร์มิเอท เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (เนื่องจากต้องการความแม่นยำจึงต้องใช้การชั่งน้ำหนัก) เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของเพอร์มิเอท

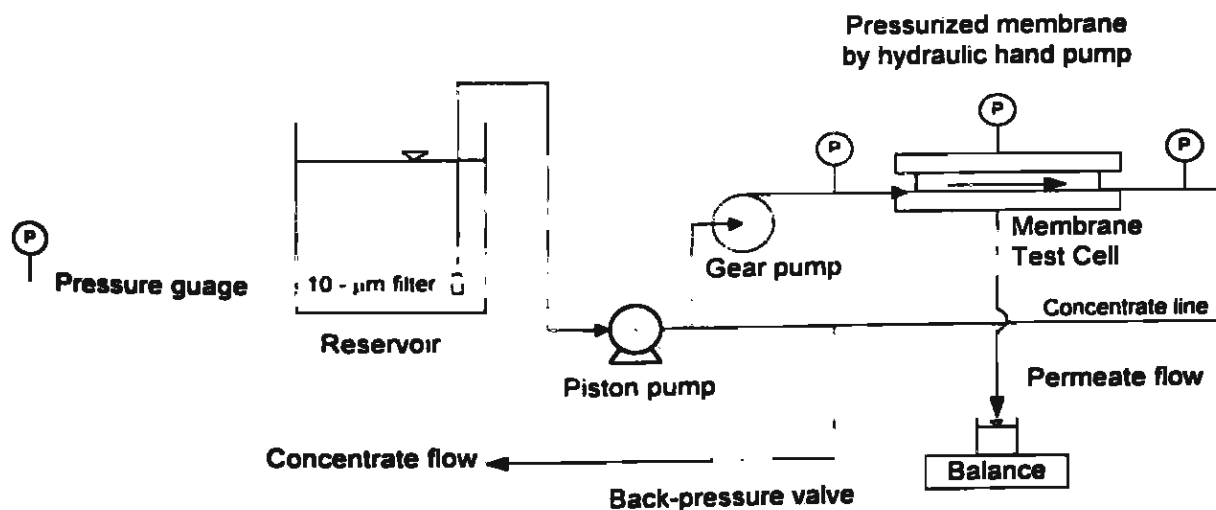
- 5) เก็บตัวอย่างน้ำและนำไปวิเคราะห์ค่าพีเอช สภาพการนำไฟฟ้า ค่าการดูดกลืนแสง สารอินทรีย์ทั้งหมด เพื่อทดสอบความสามารถของเยื่อกรองในการกักสาร โดยเก็บตัวอย่างทั้งหมด 7 ตัวอย่าง

อย่าง ที่เวลาเดินระบบ 30, 60, 120, 210, 300, 380 และ 500 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างทั้งรีเทนเทท และเพอร์มีเอท

6) ทำความสะอาดเยื่อกรองด้วยน้ำปราศจากไอออนเมื่อเดินระบบครบเวลาที่กำหนด โดยแบ่งการทำความสะอาดเป็น 2 ครั้ง ก็คือครั้งที่ 1 โดยการใช้น้ำปราศจากไอออนได้สารอินทรีย์ทางธรรมชาติในระบอบออกมา ก่อน โดยใช้น้ำประมาณ 200 มิลลิลิตร และในครั้งที่ 2 ใช้น้ำประมาณ 1,000 มิลลิลิตร เป็นการทำความสะอาดสารอินทรีย์ที่เกาะอยู่บนผิวหน้าเยื่อกรองโดยใช้เวลาประมาณ 20 นาที วัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอท ด้วยการผ่านน้ำปราศจากไอออน

7) ทำความสะอาดเยื่อกรองด้วยด่าง โดยผ่านด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร ประมาณ 20 นาที เพื่อทำความสะอาดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ถูกดูดซับและอุดตันเยื่อกรองที่ยังเหลืออยู่หลังจากทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้ว วัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอท ด้วยการผ่านน้ำปราศจากไอออน

8) ล้างเยื่อกรองด้วยน้ำปราศจากไอออนอีกครั้ง และเก็บเยื่อกรองที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์หาหลักฐานการอุดตันต่อไป



รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโนชนิด Bench-scale crossflow

3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดตันเยื่อกรองแบบนาโนสามารถที่จะสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางสรุปการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

ปัจจัยที่ศึกษา	ค่าที่ศึกษา	ปัจจัยควบคุม
สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ	0, 5, 10, 20 และ 30 mg.L ⁻¹	pH = 7, I.S. = 0.01 M
ค่าความแรงของประจุ	0.004, 0.01, 0.05 และ 0.1 M	NOM = 10 mg.L ⁻¹ , pH = 7
ค่าพีเอช	4, 7, 10 ที่ค่า I.S. = 0.01 และ 0.05 M	NOM = 10 mg.L ⁻¹
ผลของสารอินทรีย์ต่อ	NaCl และ CaCl ₂	NOM = 10 mg.L ⁻¹ , pH = 7
การดูดตันของสารอินทรีย์	ปรับค่า I.S. = 0.004, 0.01, 0.05, 0.1 M	
ทางธรรมชาติ	CaCO ₃ , CaSO ₄ , Ca ₃ (PO ₄) ₂ และ MgSO ₄ ปรับค่า I.S. = 0.01 และ 0.05 M	NOM = 10 mg.L ⁻¹ , pH = 7

3.5.1 ผลของความแรงของประจุ (Ionic Strength)

- 1) ใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นน้ำตัวอย่าง
- 2) ปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 7 โดยการใส่ HCl ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร หรือ NaOH ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
- 3) วัดค่าการนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับค่าความแรงของประจุ (Ionic Strength)
- 4) ปรับค่าความแรงของประจุ โดยใช้ NaCl โดยแปรค่าความแรงของประจุเท่ากับ 0.004, 0.01, 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตร
- 5) ดูดอากาศออกด้วยปั๊มดูดอากาศ เพื่อลดฟองอากาศที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
- 6) ทำการเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโนตามที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.4.4

3.5.2 ผลของค่าพีเอช

- 1) เจือจางสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นสูง ด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีค่าความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมของคาร์บอนต่อลิตร
- 2) ปรับพีเอช โดยแปรค่าพีเอช ที่ 4, 7 และ 10 โดยใช้ HCl เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร หรือ NaOH เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
- 3) วัดค่าการนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับค่าความแรงของประจุ (Ionic Strength)
- 4) ปรับค่าความแรงของประจุ โดยใช้ NaCl ให้มีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.05 โมลต่อลิตร

5) ดูดอากาศออกด้วยปั๊มดูดอากาศ เพื่อลดฟองอากาศที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

6) ทำการเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโนตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 3.4.4

3.5.3 ผลของสารอินทรีย์ต่อการดูดซับของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

1) เจือจางสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นสูง ด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีค่าความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมของคาร์บอนต่อลิตร

2) ปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 7 โดยการใช้ HCl ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร หรือ NaOH ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

3) วัดค่าการนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับค่าความแรงของประจุ (Ionic Strength)

4) ปรับค่าความแรงของประจุ โดยใช้เกลืออนินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ดังนี้

- NaCl ให้มีค่าเท่ากับ 0.004, 0.01, 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตร

- CaCl_2 ให้มีค่าเท่ากับ 0.004, 0.01, 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตร

- CaCO_3 ให้มีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.05 โมลต่อลิตร

- CaSO_4 ให้มีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.05 โมลต่อลิตร

- $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ให้มีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.05 โมลต่อลิตร

- MgSO_4 ให้มีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.05 โมลต่อลิตร

5. ดูดอากาศออกด้วยปั๊มดูดอากาศ เพื่อลดฟองอากาศที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง โดยใช้เวลา

ประมาณ 1 ชั่วโมง

6) ทำการเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโนตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 3.4.4

3.6 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.6.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ จากการเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโน นำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ศึกษาและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

พารามิเตอร์	เครื่องมือ
ค่าพีเอช	เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter)
สภาพการนำไฟฟ้า	เครื่องวัด Conductivity
ค่าการดูดกลืนแสง	UV-Visible Spectrophotometer
สารอินทรีย์ทั้งหมด	Total Organic Carbon Analyzer(TOC)

3.6.2 การวิเคราะห์เยื่อกรอง

การวิเคราะห์เยื่อกรองแบบนาโน เพื่อการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างเยื่อกรองใหม่ที่ยังไม่ได้ผ่านการกรองและเยื่อกรองที่ผ่านการกรองโดยมีสารอุดตันติดค้างอยู่บนผิวของเยื่อกรอง ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์สารที่อุดตันอยู่บนบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาตัวอย่างเยื่อกรองแบบนาโน

พารามิเตอร์	เครื่องมือ
โครงสร้างของสารอินทรีย์	X-ray Diffractometer (XRD)
ภาพถ่ายและธาตุที่อยู่บนผิวเยื่อกรอง	Scanning Electron Microscope (SEM) และ Energy Dispersive Spectrometer (EDS)
สารอินทรีย์ที่ติดค้างบนเยื่อกรอง	Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

3.7 การวิเคราะห์การอุดตันเยื่อกรองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.7.1 แบบจำลองความต้านทานแบบอนุกรม

แบบจำลองความต้านทานแบบอนุกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ ปรับปรุงจากCho *et al.* 1999 โดยหลักการที่ว่า ฟลักซ์ของเพอร์มิเททที่ผลิตได้มีการลดลง มีสาเหตุมาจากการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าและภายในรูเยื่อกรอง ซึ่งการอุดตันที่เกิดขึ้นทำให้ค่าความต้านทานรวมของเยื่อกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นนี้มีหลายสาเหตุด้วยกัน คือ เกิดจาก Concentration Polarization และชั้นเค้ก (r_c). การอุดตันที่สามารถทำความเข้าใจได้ด้วยสารละลายต่างได้ (r_s) และการอุดตันอย่างถาวร (r_a) โดยความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ตามกฎของ Darcy และแบบจำลองความต้านทานแบบอนุกรม (Cho *et al.* 1999) ดังนี้

$$\text{สำหรับเยื่อกรองที่สะอาด} \quad J_v = \frac{\Delta P}{\mu r_m} \quad (3.1)$$

$$\text{เยื่อกรองที่มีการอุดตัน} \quad J_v = \frac{\Delta P}{\mu(r_c)} = \frac{\Delta P}{\mu(r_m + r_c + r_s + r_a)} \quad (3.2)$$

โดยที่ J_v คือ ค่าอัตราการไหล ($\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$)

ΔP คือ ค่าความดันที่ลดลง (kPa)

μ คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s)

r_m คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากเยื่อกรอง (m^{-1})

r_c คือ ค่าความต้านทานของ Concentration Polarization และชั้นเค้ก (m^{-1})

r_g คือ ค่าความต้านทานของชั้นเจลการดูดซับที่สามารถล้างออกได้ (m^{-1})

r_o คือ ค่าความต้านทานของการดูดซับอย่างถาวร (m^{-1})

ในการทดลองเพื่อหาความต้านทานแบบอนุกรม มีขั้นตอนปฏิบัติดังนี้

1. ทำความสะอาดเยื่อกรองด้วยสารละลายกรดและสารละลายเบส แล้วทำการเดินระบบด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2. ปรับอัตราการไหลของน้ำเพอร์มิเอทให้มีค่าประมาณ 45 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง บันทึกความดัน และอัตราการไหลเริ่มต้น เพื่อใช้หาความต้านทานของเยื่อกรองแบบนาโน (r_m)

3. เดินระบบด้วยน้ำตัวอย่างที่เตรียมไว้เป็นเวลา 500 นาที โดยการรักษาความดันให้มีค่าคงที่ตั้งแต่เริ่มการทดลองจนสิ้นสุดการทดลอง ค่าอัตราการไหลที่ลดลงในช่วงเวลาสิ้นสุดการทดลองที่เกิดจากความต้านทานประเภทต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว บันทึกค่าความดันและอัตราการไหลเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เพื่อใช้หาความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันบนเยื่อกรองแบบนาโน ($r_m + r_c + r_g + r_o$)

4. ป้อนน้ำปราศจากไอออนเข้าในระบบ โดยเพิ่มความเร็วของอัตราการไหลตามขวาง ปรับความดันให้มีค่าเท่ากับความดันที่ใช้ในการทดลองและวัดอัตราการไหลของน้ำ ค่าความต้านทานของเยื่อกรองที่หายไปจากการดำเนินการขั้นตอนนี้ ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และเค้ก (r_c)

5. ป้อนด้วยสารละลาย NaOH เข้าระบบ เป็นเวลา 20 นาที ตามด้วยน้ำปราศจากไอออน ปรับความดันให้มีค่าที่เท่ากับความดันที่ใช้ในการทดลองด้วยอย่างนั้น วัดอัตราการไหลของน้ำ เพอร์มิเอท ความต้านทานที่หายไปจากการดำเนินการขั้นนี้ ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดจากชั้นเจล (r_g) ส่วนความต้านทานที่เหลือ ได้แก่ ความต้านทานที่ยังคงติดค้างบนเยื่อกรอง (r_o)

จากขั้นตอนดังกล่าว ทำให้สามารถทราบค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากสาเหตุต่าง ๆ และถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การอุดตันบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง

3.7.2 แบบจำลองการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

แบบจำลองการอุดตันของการกรองได้พัฒนามาจากการกรองแบบ Dead end ที่ได้เสนอโดย Hermia (1982) สมการที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์สำหรับกลไกการอุดตันบนผิวของเยื่อกรอง

$$\frac{dJ_v}{dt} = kJ_v^{2-n} J_v \quad (3.3)$$

โดยที่ ค่า k เท่ากับค่าคงที่ของการอุดตัน (Fouling coefficient) ขึ้นอยู่กับกลไกการอุดตันของเยื่อกรอง n ซึ่งเท่ากับค่าคงที่สำหรับการกรองไม่มีหน่วย

โดยที่ค่าคงที่ของ n เท่ากับ 0 แสดงกลไกการกรองเกี่ยวข้องกับการเกิดเค้กบนผิวของเยื่อกรอง (Cake formation model)

ค่าคงที่ของ n เท่ากับ 1 แสดงกลไกการกรองเกี่ยวข้องกับการเกิดจุดจับของอนุภาคบนผิวของเยื่อกรองที่ระยะเวลาที่นานขึ้นหรืออนุภาคอาจปิดบางส่วนของพื้นที่ของเยื่อกรองทำให้เพิ่มขึ้นความหนาของการกรองมากขึ้น (Intermediate standard blocking)

ค่าคงที่ของ n เท่ากับ 1.5 แสดงกลไกการกรองเกี่ยวข้องกับการเกิดจุดจับของอนุภาคในรูของผิวของเยื่อกรองทำให้ปริมาตรของรูมีขนาดลดลง (Pore constriction or standard blocking)

ค่าคงที่ของ n เท่ากับ 2 แสดงกลไกการกรองเกี่ยวข้องกับการอุดตันที่ตกตะกอนบนผิวของเยื่อกรองและปิดรูของเยื่อกรองทำให้จำนวนรูของเยื่อกรองมีจำนวนลดลง (Pore blocking or Complete blocking)

สำหรับการกรองที่เกิดจากการดำเนินระบบแบบไหลขวาง (Crossflow operation) แบบจำลองกลไกการอุดตันแบบ Crossflow สามารถทำได้ประยุกต์ได้กับการดำเนินระบบแบบ Dead-end operation ดังสมการที่ 3.4

$$\frac{dJ_v}{dt} = kJ_v^{2-n} (J_v - J^*) \quad (3.4)$$

โดยที่ ค่า k เท่ากับค่าคงที่ของการอุดตัน (Fouling coefficient) ขึ้นอยู่กับกลไกการอุดตันของเยื่อกรอง n ค่า J^* เท่ากับค่าฟลักซ์ที่เกิดจากความเร็วของ Crossflow บนผิวของเยื่อกรอง

ตารางที่ 2.1 สรุปแบบจำลองการอุดตันของการกรองแบบ Dead-end และ Crossflow operation โดยความสัมพันธ์ของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เท่ากับผลคูณของค่าคงที่ของการอุดตันและสัดส่วนของค่าฟลักซ์ตามแบบจำลองของการกลไกการอุดตันบนผิวของเยื่อกรอง

จากแบบจำลอง ค่า k เป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ระหว่างข้อมูลฟลักซ์จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยจะหาผลรวมของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองน้อยที่สุด หรือ Sum of squared error (SSE) โดยใช้การแก้สมการแบบ Fourth-order Runge-Kutta routine และใช้ Solver ในการแก้สมการ

จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความเข้มข้นของคาร์บอนทั้งหมด (TOC) มีค่าประมาณ 4.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่สามารถพบได้โดยทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าของความเข้มข้นในช่วงกว้างตามประเภทและแหล่งกำเนิดของแหล่งน้ำนั้นๆ โดยมีค่าอยู่ในระหว่าง 1 – 27 มิลลิกรัมต่อลิตร (Krasner *et al.* 1998 ; Tseng and Edwards, 1999) ค่าการดูดกลืนแสงยูวีโดยวัดที่ความยาวของช่วงคลื่นที่ 254 นาโนเมตร บ่งชี้ถึงพันธะคู่ของคาร์บอนที่มีอยู่ภายในโครงสร้างของสารอินทรีย์ทางธรณาคตินั้น ค่าที่วัดได้มีค่าประมาณ 0.185 cm^{-1} ค่าดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่าของคาร์บอนทั้งหมด เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะ (Specific Ultraviolet Absorbance: SUVA) ซึ่งได้แก่อัตราส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงต่อปริมาณของสารอินทรีย์คาร์บอน ($\text{UV}_{254}/\text{TOC}$) ค่า SUVA บ่งบอกถึงคุณสมบัติไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ของน้ำตัวอย่างนั้น ค่า SUVA ที่สูงแสดงถึงภายในแหล่งน้ำธรรมชาติ นั้น มีสารอินทรีย์ทางธรณาคติซึ่งเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) มาก (Mallaraj and Kilduff, 2003) ค่าที่วัดได้จากแหล่งน้ำธรรมชาติที่ใช้ในการทดลองมีค่า SUVA เท่ากับ $4.07 \text{ L.mg}^{-1}.\text{m}^{-1}$ แสดงให้เห็นว่าน้ำตัวอย่างมีปริมาณสารอินทรีย์ทางธรณาคติที่ค่อนข้างสูง จากการศึกษาของ Cho *et al.* (1999) และ Cho *et al.* (2000) พบว่า น้ำผิวดินอื่น ๆ ที่มีค่า SUVA อยู่ระหว่าง $0.024 - 3.0 \text{ L.mg}^{-1}.\text{m}^{-1}$ และน้ำใต้ดิน ที่มีค่า SUVA เท่ากับ $6 \text{ L.mg}^{-1}.\text{m}^{-1}$ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างวัดได้ $31.9 \mu\text{S cm}$ แสดงถึงองค์ประกอบของไอออนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำธรรมชาติที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่าที่ต่ำ สอดคล้องกับค่าความกระด้างของน้ำที่วัดได้ซึ่งมีค่าที่น้อยคือ $15.0 \text{ mg as CaCO}_3/\text{L}$ ความเข้มข้นของแคลเซียมมีค่า $13.5 \text{ mg as CaCO}_3/\text{L}$ ความเข้มข้นของแมกนีเซียมมีค่า $1.5 \text{ mg as CaCO}_3/\text{L}$ ความเข้มข้นของคลอไรด์มีค่า $5.9 \text{ mg Cl}^{-}/\text{L}$ ความเข้มข้นของซัลเฟตมีค่า $93.25 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$ และค่าความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตที่ค่า $8 \text{ mg as CaCO}_3/\text{L}$ ค่าพีเอชของแหล่งน้ำที่วัดได้มีค่าประมาณ 7.04 และค่าความขุ่นของน้ำที่สามารถวัดได้มีค่าประมาณ 6.58 NTU

4.2 การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน

4.2.1 การหาปริมาตรของระบบโดยการทดสอบแบบ Tracer

สารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ถูกใช้เป็นสาร tracer เพื่อใช้ในการทดสอบหาปริมาตรของระบบ bench scale test cell ที่ใช้ทดสอบระบบเยื่อกรองแบบนาโน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 0.3 M NaCl ($2855 \mu\text{S/cm}$ at 25°C) ถูกผ่านเข้าสู่ระบบและปล่อยให้หมุนเวียนในระบบก่อนที่จะใช้น้ำบริสุทธิ์ DI ผ่านเข้าสู่ระบบตามอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ความเข้มข้นของสารโซเดียมคลอไรด์ที่ออกจากระบบจะถูกเก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 วินาทีจนถึง 200 วินาที เครื่องวัดการนำไฟฟ้าจะถูกใช้เพื่อวัดปริมาณไอออนตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง รูปที่ 4.1 แสดงผลกระทบของอัตราการไหลต่อความสัมพันธ์แบบกราฟ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง

สารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ใช้ในการทดลอง ได้มาจากแหล่งน้ำผิวดินที่อยู่ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี โดยเป็นแหล่งน้ำผิวดินที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาเพื่อการอุปโภคและบริโภคภายในมหาวิทยาลัย ตารางที่ 4.1 แสดงคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำตัวอย่าง น้ำดิบที่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติอยู่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นสารอินทรีย์ทางธรรมชาติด้วยระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis system) จากนั้นสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่แยกได้จะถูกนำไปใช้ในการทดสอบกับระบบเยื่อกรองแบบนาโน

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้
พีเอช	7.04
สารคาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon)	4.54 mg.L ⁻¹
การดูดกลืนแสง UV _{254nm} (UV Absorbance)	0.185 cm ⁻¹
การดูดกลืนแสงจำเพาะ (Specific UVA (UV _{254nm} /TOC))	4.07 L. mg ⁻¹ . m ⁻¹
การนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่อุณหภูมิ 25°C	31.9 μ S.cm ⁻¹
ความขุ่น (Turbidity)	6.58 NTU
ความกระด้าง (Hardness)	15 mg as CaCO ₃ /L
ความเป็นด่าง (Alkalinity) i.e. HCO ₃ ⁻	8 mg as CaCO ₃ /L
ปริมาณแคลเซียม (Ca ²⁺)	13.5 mg as CaCO ₃ /L
ปริมาณแมกนีเซียม (Mg ²⁺)	1.5 mg as CaCO ₃ /L
ปริมาณคลอไรด์ (Cl ⁻)	5.4 mg Cl ⁻ /L
ปริมาณซัลเฟต (SO ₄ ²⁻)	93.25 mg SO ₄ ²⁻ /L

F(๖) จากกราฟจุดต่าง ๆ แสดงผลการทดลองที่ได้จากการวัดปริมาณของไอออน ส่วนกราฟเส้นแสดงแบบจำลองของ plug flow reactor (PFD) model with dispersion จากกราฟแสดงผลการทดสอบตามอัตราการไหลที่เปลี่ยนไป ค่าปริมาตรที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเฉลี่ยเท่ากับ 72 mL โดยได้จากการหาผลรวมที่น้อยที่สุดระหว่างความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองยกกำลังสองหรือ sum square error (SSE) จากกราฟอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟ เนื่องจากมวลของสารโซเดียมคลอไรด์ออกมาจากระบบเร็วขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาที่ดำเนินในระบบมีค่าน้อยลง

รูปที่ 4.2 แสดงผลกระทบบของอัตราการไหลต่อความสัมพันธ์แบบกราฟ E(๖) จากกราฟจุดที่ปรากฏจะเป็นข้อมูลจริงที่ได้จากการทดลอง ส่วนกราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากการทดลองกับแบบจำลองชนิด plug flow reactor (PFD) model with dispersion ที่สามารถให้ปริมาตรโดยเฉลี่ยเท่ากับ 72 mL อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นทำให้เวลาที่ใช้โดยเฉลี่ยมีค่าน้อยลงโดยสังเกตจุดสูงสุดของกราฟที่แสดงในกราฟแบบกราฟ E(๖) อัตราการไหลที่มากขึ้นทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ของ Peclet number (uL/D) มีค่าน้อยลงหรือค่า dispersion number ($d, D/uL$) มีค่ามากขึ้น จากกราฟอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจาก 140 mL/min เป็น 434 mL/min ทำให้ค่า Peclet number มีค่าลดลงจาก 4.2 เป็น 7.0 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลทำให้ค่าการกระจาย (dispersion number) มีค่ามากขึ้นเนื่องจากเป็นสัดส่วนผกผันกับค่า Peclet number การเพิ่มขึ้นของค่า dispersion number ที่ได้จากการวิเคราะห์ให้เกิดการผสมมากขึ้น อย่างไรก็ตามค่า dispersion number มีค่าเท่ากับ 0.14 ถึง 0.24 ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของระบบ ซึ่งถือว่ามีค่ามากและเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันมากและเหมาะสำหรับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ PFD model