



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติโดยระบบเยื่อกรองแบบนาโน

Removal of Natural Organic Matter using Nanofiltration Membrane

ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ และ คณะ

มิถุนายน 2547

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติโดยระบบเยื่อกรองแบบนาโน

Removal of Natural Organic Matter using Nanofiltration Membrane

คณะผู้วิจัย

1. ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. ดร.สุพัฒนพงษ์ มัตราช

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

3. ศาสตราจารย์ ดร. รัตนา จิระรัตนานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

สนับสนุนโดย

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

โครงการวิจัย: การกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติโดยระบบเยื่อกรองแบบนาโน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (Natural organic matters, NOM) ด้วยระบบเยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane, NF) รวมทั้งผลของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติต่อการอุดตันเยื่อกรอง (Membrane fouling) ผลการวิจัยพบว่า ระบบเยื่อกรองแบบนาโนสามารถกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติได้ถึงร้อยละ 96 การเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในน้ำที่ป้อนเข้าระบบ (Feed) จาก 0 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้เกิดการอุดตันเยื่อกรองเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการกรอง (Permeate flux) ลดลง การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกลไกการอุดตัน พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ กลไกการอุดตันเปลี่ยนรูปแบบจากการอุดตันที่รูพรุนของเยื่อกรอง (Complete pore block) ที่ความเข้มข้นของ NOM ต่ำ เป็นการอุดตันแบบการสร้างแผ่นเค้กปกคลุมผิวเยื่อกรอง (Cake formation) ที่ความเข้มข้นของ NOM สูง การศึกษาผลของกำลังไอออนในน้ำ (Ionic Strength) โดยปราศจาก NOM พบว่า เมื่อกำลังของไอออนเพิ่มขึ้น จาก 0.004 ถึง 0.1 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรองรวมทั้งความสามารถในการกักกันเกลือ (Salt rejection) ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการรวมตัวกันของประจุลบบนผิวของเยื่อกรองและประจุบวกของโซเดียมไอออน ทำให้ความหนาของชั้น Double layer บนผิวเยื่อกรองลดลง ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายด้วยกลไกแบบการอุดตันที่รูพรุนของเยื่อกรองทำให้จำนวนรูพรุนลดลง (Complete pore block) และกลไกการลดขนาดของรูพรุน (Pore constriction) ในกรณีที่สารป้อนมีทั้ง NOM ร่วมกับค่ากำลังของไอออน พบว่า ค่าการลดลงของอัตราการกรอง (Flux decline) เพิ่มขึ้นเนื่องจากการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนเยื่อกรองซึ่งสอดคล้องกับกลไกการอุดตันแบบการสร้างแผ่นเค้ก การเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายส่งผลให้ค่าการลดลงของอัตราการกรอง เพิ่มขึ้น

Removal of Natural Organic Matter using Nanofiltration Membrane

ABSTRACT

This research investigated removal efficiency of natural organic matters (NOM) and NOM fouling during nanofiltration (NF). The experimental results revealed that 96 percent of NOM was rejected by selected NF membrane. Increased NOM concentrations from 0 to 25 mgL⁻¹ increased membrane fouling, leading to a reduction of permeate flux. Mathematical models of NOM fouling were applied to evaluate NOM fouling mechanisms on NF membrane. It exhibited that fouling mechanisms from complete pore blocking model (at low NOM concentration) to cake formation model (at high NOM concentration). In the absence of NOM, increased ionic strength from 0.004 M to 0.1 M decreased solution flux, possibly due to reduced double layer thickness on the membrane caused by reduced charge repulsion between negatively charged membrane and positively charged sodium (Na⁺), while the solution flux curves were fitted to the complete pore blocking and pore constriction model. However, in the presence of NOM, solutions having high ionic strength (0.05 M) showed greater flux decline than those having low ionic strength (0.01 M), possibly due to NOM accumulation on the membrane surface. This evidence corresponded to cake formation model. Increasing pH caused an increase of flux decline.

Keywords— Cake Formation; Flux decline; Fouling; Nanofiltration; Natural organic matter

EXECUTIVE SUMMARY

การเกิดสารที่เป็นผลพลอยได้ระหว่างกระบวนการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-products, DBPs) ในกระบวนการผลิตน้ำประปานั้นเกิดขึ้นจาก ผลการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matters, NOM) ซึ่งสารดังกล่าวก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพและคุณภาพชีวิตของมนุษย์ อย่างไรก็ตาม NOM สามารถถูกกำจัดได้โดยใช้ระบบเยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane, NF) ที่ให้คุณภาพสูง แต่ข้อเสียของระบบเยื่อกรองนั้นคือการอุดตันเยื่อกรอง (Membrane fouling) ด้วย NOM ซึ่งส่งต่อประสิทธิภาพของการกำจัดสารอินทรีย์ และการลดปริมาณการผลิตน้ำระหว่างการกรอง รวมทั้งการลดระยะเวลาการใช้งานของเยื่อกรอง ดังนั้นการเข้าใจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นของการลดประสิทธิภาพของเยื่อกรองจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

จากผลการวิจัย พบว่า ระบบเยื่อกรองแบบนาโนสามารถแยกสาร NOM ได้ถึงร้อยละ 96 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสาร NOM ในสารละลายส่งผลให้เกิดการอุดตันเยื่อกรองมากยิ่งขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของ NOM ต่ำ กลไกการอุดตันเปลี่ยน เป็นแบบการอุดตันที่รูพรุนของเยื่อกรอง (Complete pore block) ในขณะที่เมื่อความเข้มข้นของ NOM สูง การอุดตันแบบการสร้างแผ่นเค้กปกคลุมผิวเยื่อกรอง (Cake formation) นอกจากความเข้มข้นของสาร NOM แล้ว ยังพบว่า คุณลักษณะของน้ำยังมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อกรองด้วย ซึ่งได้แก่ กำลังไอออนของสารละลาย (Ionic Strength) และค่าพีเอช โดยพบว่า เมื่อกำลังของไอออน และค่าพีเอชที่สูงขึ้น ค่าการลดลงของอัตราการกรอง (Flux decline) เพิ่มขึ้นทั้งนี้เกิดจากกลไกการอุดตันในลักษณะต่าง ๆ กัน ได้แก่ กลไกแบบการอุดตันที่รูพรุนของเยื่อกรองทำให้จำนวนรูพรุนลดลง (Complete pore block) และการลดขนาดของรูพรุน (Pore constriction) และ การอุดตันแบบการสร้างแผ่นเค้ก (Cake formation)

การศึกษานี้ เป็นส่วนหนึ่งที่จะได้เข้าใจถึงปัญหาและแนวทางการแก้ไขปัญหาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและพัฒนาระบบเยื่อกรองเพื่อใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเป็นจุดเริ่มสำหรับการนำระบบเยื่อกรองเพื่อการผลิตน้ำประปาและระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และ สำนักงาน
กองทุนสนับสนุนการวิจัย คณะผู้วิจัยขอขอบคูนหน่วยงานดังกล่าวที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตลอด
โครงการวิจัยนี้ จนได้จัดเป็นรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์ของงานวิจัยนี้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
EXECUTIVE SUMMARY	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matters)	4
2.2 ระบบเยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration Membrane)	5
2.3 การอุดตันของเยื่อกรอง (Membrane Fouling)	6
2.4 กลไกของการอุดตัน (Fouling Mechanisms)	6
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	8
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	8
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้	8
3.3 แหล่งน้ำดิบ	10
3.4 การคัดแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ	10
3.5 เยื่อกรองแบบนาโน	12
3.6 การเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโน	14
3.6.1 การทดสอบค่าการกรองของน้ำบริสุทธิ์	14

3.6.2 การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน	14
3.6.2 การทำความสะอาดระบบเยื่อกรองแบบนาโน	15
3.7 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบเยื่อกรองแบบนาโน	15
3.7.1 ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ	15
3.7.2 ผลของกำลังไออน	16
3.7.3 ผลร่วมระหว่างกำลังไออนและสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ	16
3.7.4 ผลของค่าพีเอชของสารละลาย	16
3.8 การศึกษาแบบจำลองการอุดตันของระบบเยื่อกรองแบบนาโน	16
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปราย	18
4.1 คุณลักษณะของน้ำจากแหล่งน้ำ	18
4.2 การคัดแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ	19
4.2.1 คุณสมบัติของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น	19
4.2.2 ผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ของระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ	21
4.2.3 ผลของความดันต่อค่ารีโคเวอร์รีและอัตราการใช้พลังงาน	22
4.2.4 แบบจำลองที่ใช้อธิบายการแยกสารอินทรีย์ด้วยระบบอาร์โอ	24
4.2.5 การกำจัดสารอินทรีย์และมวลที่เก็บได้จากการแยกสารอินทรีย์	31
4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองแบบนาโน	33
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และความดันของระบบ	33
4.3.2 ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพของเยื่อกรองนาโน	34
4.3.3 ผลของกำลังไออนต่อการทดสอบระบบเยื่อกรอง	38
4.3.4 ผลร่วมของกำลังไออนและสารอินทรีย์ต่อระบบเยื่อกรองแบบนาโน	41
4.3.5 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรอง	45
4.4 แบบจำลองการอุดตันของระบบเยื่อกรองแบบนาโน	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	54
เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก MANUSCRIPT (DRAFT)	58

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
3.1	คุณสมบัติของระบบเยื่อกรองอาร์โอสำหรับแยกสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติ	11
3.2	แบบจำลองการอุดตันของการกรองแบบ Dead-end และ Crossflow operation	17
4.1	คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำจากแหล่งน้ำดิบ	18
4.2	คุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น	20
4.3	มวลทั้งหมดที่ได้จากการแยกสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติ	32
4.4	ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ	37
4.5	ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนและสารอินทรีย์	43
4.6	พารามิเตอร์จากการทดสอบของไอออน 0.01M NaCl	50
4.7	พารามิเตอร์จากการทดสอบของไอออน 0.05M NaCl	50
4.8	พารามิเตอร์จากแบบจำลองการอุดตันโดยสารอินทรีย์ธรรมชาติ	53

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3-1	ผังสรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	9
3-2	กระบวนการคัดแยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติด้วยระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ	11
3-3	ระบบเยื่อกรองแบบนาโนชนิด Bench-scale crossflow system	13
4-1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของคาร์บอนทั้งหมด	21
4-2	ผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ของระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ	22
4-3	ผลของความดันต่อค่ารีโคเวอร์รีและอัตราการไหลเข้าระบบ	23
4-4	ไคอะแกรมการดำเนินการของระบบอาร์โอ	25
4-5	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในถังพักระหว่างการแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติ	30
4-6	ค่าการกำจัดของการนำไฟฟ้าและคาร์บอนทั้งหมดของสารอินทรีย์	31
4-7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับความดันในการดำเนินระบบ	34
4-8	ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ต่อฟลักซ์ของสารละลาย	35
4-9	ความเข้มข้นของคาร์บอนในคอนเซนเตรต	36
4-10	การลดลงของฟลักซ์โดยกำลังไออนจากโซเดียมคลอไรด์	39
4-11	ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในคอนเซนเตรต	40
4-12	ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อการกำจัด โซเดียมคลอไรด์ ในฟีด	40
4-13	ภาพถ่าย SEM พื้นผิวของเยื่อกรองแบบนาโน	41
4-14	การลดลงของฟลักซ์โดยกำลังไออนและสารอินทรีย์	42
4-15	การลดลงของฟลักซ์ของสารละลายที่มีสารอินทรีย์และไม่มีสารอินทรีย์	44
4-16	ภาพถ่าย SEM พื้นผิวของเยื่อกรองแบบนาโนที่มีสารอินทรีย์และโซเดียมคลอไรด์	45
4-17	การลดลงของฟลักซ์โดยการปรับพีเอชที่ปริมาณไออน 0.01 M NaCl	46
4-18	การลดลงของฟลักซ์โดยการปรับพีเอชที่ปริมาณไออน 0.05 M NaCl	47
4-19	ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในคอนเซนเตรตที่ความเข้มข้นไออน 0.01 M NaCl	48
4-20	ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในคอนเซนเตรตที่ความเข้มข้นไออน 0.05 M NaCl	49
4-21	แบบจำลองการอุดตันโดยผลของความเข้มข้นสารละลายอินทรีย์	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยได้ดำเนินโครงการจัดหาน้ำสะอาดเพื่อสนองความต้องการของประชาชนมาเป็นเวลานาน ได้มีการขยายโครงการก่อสร้างและดำเนินการผลิตน้ำประปาไปถึงชุมชนท้องถิ่นระดับสุขาภิบาลและหมู่บ้าน จนทำให้ประชาชนมีน้ำที่สะอาดและปลอดภัยสำหรับอุปโภคบริโภคอย่างทั่วถึงในการผลิตน้ำประปาสำหรับการบริโภคนั้น นอกจากกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพแล้ว สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือการฆ่าเชื้อโรค เพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่ก่อให้เกิดการแพร่กระจายและการติดต่อของโรคขึ้นในชุมชนนั้น ๆ วิธีการที่นิยมใช้ในการฆ่าเชื้อโรค ได้แก่ การใช้คลอรีน (Chlorination) วิธีการดังกล่าวอาจก่อให้เกิดผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection By-Products, DBPs) เช่น ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane, THMs) ซึ่งพบว่าสารดังกล่าวอาจมีส่วนที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogens) โดยสำนักงานพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S.EPA) กำหนดค่าปริมาณสูงสุดของ THMs ทั้งหมดในน้ำดื่ม ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นในการผลิตน้ำประปา นอกจากจะพิจารณาถึงด้านปริมาณแล้ว ควรมีการพิจารณาถึงด้านพัฒนาคุณภาพของน้ำเพื่อความปลอดภัยในการอุปโภคและบริโภคต่อไป

สารประกอบ DBPs เกิดจากการรวมตัวของสารอินทรีย์คาร์บอนทางธรรมชาติ (Natural organic matters, NOM) ที่มีอยู่ตามแหล่งน้ำธรรมชาติ กับสารฮาโลเจน (Halogen) เช่น คลอรีน จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรค โดยพบว่า DBPs มีผลต่อสุขภาพของผู้บริโภค โดยอาจเป็นสารก่อมะเร็ง การกำจัดสารตั้งต้นของการเกิด DBPs (DBP precursors) ซึ่งได้แก่ NOM และสารอินทรีย์อื่น ๆ จึงเป็นวิธีการหนึ่งในการป้องกันการเกิดสารประกอบดังกล่าว การใช้ระบบเยื่อกรอง (Membrane processes) เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการคัดแยก DBPs รวมทั้ง สารตั้งต้นของ DBPs ออกจากน้ำ นอกจากนี่ยังมีระบบเยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane, NF) และอาร์โอ (Reverse osmosis membrane, RO) ยังสามารถกรองจุลินทรีย์ได้ถึงระดับไวรัสซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กที่สุด การใช้เยื่อกรองจึงเป็นการควบคุมปัญหาการแพร่ของเชื้อโรคทางน้ำประปาได้อีกวิธีหนึ่งแทนการใช้สารเคมีในการผลิตน้ำประปาโดยใช้ระบบเยื่อกรองนี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในประเทศสหรัฐอเมริกาและกลุ่มประเทศในทวีปยุโรป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งในการวิจัยและพัฒนาระบบเยื่อกรองสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ในการผลิตน้ำประปาเพื่อรองรับการพัฒนาของประเทศไทยในอนาคต

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในการใช้ระบบเยื่อกรอง ได้แก่ การอุดตันของเยื่อกรอง (Membrane fouling) โดย NOM สามารถนำไปสู่การลดประสิทธิภาพการทำงานของระบบเยื่อกรอง รวมทั้งการลดลงของผลผลิตจากกระบวนการ และการสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำ

การศึกษาวิจัยถึงกลไกการอุดตันของเยื่อกรองโดย NOM เพื่อใช้สำหรับเป็นแนวทางในการป้องกันการอุดตันและการเลือกใช้เยื่อกรองให้เหมาะสมกับประเภทของน้ำดิบและวัตถุประสงค์ของการบำบัด โดยในงานวิจัยนี้ จะมุ่งเน้นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองในการกำจัดสาร NOM โดยระบบเยื่อกรองแบบนาโน รวมทั้งการศึกษาคูณลักษณะของน้ำดิบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและการอุดตันของเยื่อกรอง ผลที่ได้จากการวิจัยนี้นับเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาเทคโนโลยีเยื่อกรอง ในการผลิตน้ำประปาที่มีคุณภาพสูงขึ้นสำหรับประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองแบบนาโนในการผลิตน้ำทั้งทางด้านปริมาณและคุณภาพ
2. เพื่อศึกษาถึงข้อจำกัดในการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโนที่เกิดจากการอุดตันด้วยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
3. เพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมในการบำบัดด้วยระบบเยื่อกรองแบบนาโนและคุณลักษณะของน้ำดิบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบเยื่อกรอง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. แหล่งน้ำดิบที่ใช้เป็นแหล่งน้ำดิบภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี
2. การตรวจสอบคุณลักษณะของน้ำจากแหล่งน้ำดิบโดยหาค่าการดูดกลืนแสง ($UV_{254\text{ nm}}$) ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon) พีเอช ความกระด้าง ค่าของไอออนในสารละลาย
3. การบำบัดน้ำขั้นต้น (Water pretreatment) เพื่อแยกสารประกอบอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) โดยระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ (RO membrane)
4. การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน ใช้น้ำที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติสูงที่ผ่านระบบแบบอาร์โอแล้ว มาทำการเจือจางและทดสอบ โดยการแปรค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ค่าพีเอช และ ค่าความเข้มข้นของไอออนของสารละลาย
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

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงปัญหาการกรองของระบบเยื่อกรองแบบนาโนโดยการศึกษาจากการวิจัยนี้และทราบแนวทางการแก้ปัญหาการอุดตันของระบบเยื่อกรองเพื่อยังคงคุณภาพและปริมาณน้ำที่ผลิตได้
2. พัฒนาระบบการผลิตน้ำประปาที่มีคุณภาพและมาตรฐานสูงขึ้น โดยการกำจัดสารอินทรีย์ก่อนการเติมคลอรีน เพื่อลดการเกิดสารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็ง และเป็นการเพิ่มคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของผู้บริโภค
3. พัฒนาเทคนิคและวิธีการประยุกต์ใช้ระบบเยื่อกรองในการผลิตน้ำให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการวางแผนการผลิตตั้งแต่ระบบบำบัดขั้นต้นจนถึงขั้นสุดท้ายของการผลิตน้ำ เพื่อเพิ่มระยะเวลาของการใช้งานของระบบเยื่อกรอง
4. เป็นจุดเริ่มต้นในการประยุกต์ใช้ระบบเยื่อกรองในงานด้านการผลิตน้ำและการบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งงานด้านสิ่งแวดล้อมด้านอื่นๆ เช่น การประยุกต์ใช้ระบบเยื่อกรองกับตะกอนที่มีองค์ประกอบของโลหะหนักในโรงงานอุตสาหกรรม หรือการใช้ระบบนี้เพื่อนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนน้ำที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต

บทที่ 2

การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบเยื่อกรอง (Membrane processes) เป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตน้ำดื่ม (Howe and Clark, 2002) เนื่องจากกฎหมายได้กำหนดมาตรฐานน้ำดื่มไว้สูง (AWWA committee report, 1992) นอกจากนี้ระบบเยื่อกรองยังให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ที่สูง โดยเฉพาะการกำจัดสารอินทรีย์นี้เป็นการควบคุมการเกิดสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง เช่น ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) จากการเติมสารคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในกระบวนการผลิตน้ำประปา (Singer *et al.*, 1981; Krasner *et al.*, 1989) อย่างไรก็ตามระบบเยื่อกรองยังต้องมีการศึกษาอีกมากเกี่ยวกับผลของสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการอุดตันของระบบเยื่อกรองและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัด เช่น การลดลงของปริมาณน้ำที่ผลิตได้จากระบบเนื่องจากผลของการอุดตันและการลดลงของเปอร์เซ็นต์การกำจัด นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการใช้งานของระบบเยื่อกรองและค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นสำหรับการดำเนินงานกำจัดสารอินทรีย์ ซึ่งการศึกษานี้ทำให้ทราบกลไกการเกิดการอุดตันบนผิวของเยื่อกรองชนิดบาง คุณสมบัติหรือองค์ประกอบของน้ำที่ส่งผลกระทบต่อเกิดการอุดตันของเยื่อกรอง รวมทั้งแนวทางที่ใช้ในการดำเนินงานเช่น แรงดัน หรือความเร็วบนผิวของเยื่อกรองที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเยื่อกรอง

2.1 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matters)

สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matters, NOM) พบได้ทั่วไปจากสภาพธรรมชาติของแหล่งน้ำ โดยทั่วไปค่าสารประกอบคาร์บอนมีอยู่ประมาณ 1 - 27 มิลลิกรัมต่อลิตร (Krasner *et al.*, 1995) ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแต่ละแหล่งน้ำ สารอินทรีย์ธรรมชาติประกอบด้วยสารผสมของสารอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนสูง เช่น สารฮิวมิก (กรดฮิวมิกและฟุลวิก) กรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต กรดคาร์บอกซิลิก กรดอะมิโน และสารไฮโดรคาร์บอน

สารฮิวมิก (Humic Substances) เป็นสารประกอบที่พบมากที่สุดโดยสารอินทรีย์ธรรมชาติประกอบด้วย 30 - 80% ของสารละลายอินทรีย์คาร์บอน (Krasner *et al.*, 1996) และเป็นสารประกอบที่สำคัญที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันบนผิวของเยื่อกรอง โดยทั่วไปร้อยละ 50 ของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ได้แก่ กรดไฮโดรโฟบิก (ประมาณ 40% เป็นกรดฟุลวิก และ 10% เป็นกรดฮิวมิก) ร้อยละ 30 ได้แก่ กรดไฮโดร-ฟิสิก และอีกร้อยละ 20 ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น คาร์โบไฮเดรต กรดคาร์บอกซิลิก กรดอะมิโน และสารไฮโดรคาร์บอน

คุณสมบัติอื่นๆ ของสารประกอบอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น ค่าหมู่ฟังก์ชัน ค่าความเป็นกรด (Acidity) และค่าน้ำหนักโมเลกุล ธาตุที่เป็นองค์ประกอบโมเลกุลของสารฮิวมิก ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนร้อยละ

45-55 ธาตุออกซิเจน ร้อยละ 35-50 ธาตุไฮโดรเจนร้อยละ 3-6 ธาตุไนโตรเจนร้อยละ 1-4 และธาตุซัลเฟอร์ ร้อยละ 0-2 กรดฮิวมิกจะมีคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ที่มากกว่ากรดฟุลวิก และจะมีค่าน้ำหนักโมเลกุลมากกว่ากรดฟุลวิก แต่กรดฟุลวิกจะมีค่าองค์ประกอบของออกซิเจนที่มากกว่าซึ่งจะส่งผลต่อค่าความเป็นกรดสูงเมื่อเทียบกับกรดฮิวมิก (Schnitzer and Khan, 1972) ส่งผลต่อความหนาแน่นของประจุที่สูงขึ้น ธาตุออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบในหมู่ฟังก์ชันของสารฮิวมิกอยู่ในรูป กรดคาร์บอกซิลิก (COOH) ไฮดรอกซิล (OH) คาร์บอนิล (C=O) และฟีนอลิก

กรดฮิวมิกประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่น้อยกว่ากรดฟุลวิก โดยประกอบด้วย หมู่คาร์บอกซิลิก 4.5 meq/g หมู่ฟีนอลิก 2.1 meq/g ค่าความเป็นกรดทั้งหมดเท่ากับ 6.6 meq/g ส่วนกรดฟุลวิก ประกอบด้วย หมู่คาร์บอกซิลิก 9.1 meq/g หมู่ฟีนอลิก 3.3 meq/g ค่าความเป็นกรดทั้งหมดเท่ากับ 12.4 meq/g (จากผลรวมระหว่างค่ากรดคาร์บอกซิลิกและฟีนอลิก) (Ghosh and Schnitzer, 1980)

2.2 ระบบเยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration Membrane)

ระบบเยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane, NF) เป็นระบบหนึ่งของระบบเยื่อกรองที่ใช้ในการกำจัดความกระด้างของน้ำ เช่น การกำจัดประจุสองบวกของอออน (Ca^{2+} และ Mg^{2+}) และการกำจัดสารอินทรีย์รวมทั้งผลกระทบของประจุบวกของอออน (Schafer *et al.*, 1998) ระบบเยื่อกรองแบบนาโนถูกออกแบบให้ดำเนินงานอยู่ระหว่างระบบอาร์โอ (Reverse osmosis, RO) และระบบเยื่อกรองแบบอัลตรา (Ultrafiltration, UF) โดยมีค่าแรงดันอยู่ระหว่าง 345 และ 1,034 กิโลปาสกาล (kPa) หรือ ประมาณ 50 และ 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ซึ่งระบบอาร์โอ เป็นระบบที่ดำเนินงานโดยใช้แรงดันสูงอยู่ระหว่าง 1,378 และ 6,893 kPa (200 และ 1,000 psi ตามลำดับ) กลไกการแยกผ่านระบบเยื่อกรองแบบนาโนและแบบอาร์โอ เป็นกลไกการละลาย-การแพร่ โดยส่วนที่ผ่านเยื่อกรองคือน้ำสะอาด และส่วนที่ไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ คือสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ในขณะที่ระบบเยื่อกรองแบบอัลตรา เป็นระบบที่ดำเนินงานโดยใช้แรงดันต่ำอยู่ระหว่าง 69 และ 483 kPa (10 และ 70 psi ตามลำดับ) มีกลไกการกำจัดโดยใช้การแยกสารตามขนาดขององค์ประกอบ โดยทั่วไปขนาดรูพรุนของเยื่อกรองแบบนาโนจะอยู่ในช่วง 300 ถึง 1,000 ดาลตัน (Dalton, Da) ซึ่งระบบเยื่อกรองนี้สามารถใช้ในการกำจัดความเค็มของน้ำ ความกระด้างของน้ำ สารอินทรีย์ รวมทั้งสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิด DBPs ดังได้กล่าวมาข้างต้น ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ DBPs ค่าความกระด้าง ที และค่าอออนประจุหนึ่งบวก มีค่าประมาณ 90-95%, 91-98%, 85-95%, 90-97% และมากกว่า 70% ตามลำดับ (Duranceau *et al.*, 1992; Kabsch-Korbutowicz *et al.*, 1999; Mattaraj, 2001)

2.3 การอุดตันของเยื่อกรอง (Membrane Fouling)

การอุดตันของระบบเยื่อกรองอาจแบ่งเป็น 2 แบบสองได้แก่ การอุดตันแบบสามารถกำจัดได้โดยการทำความสะอาด (Reversible fouling) และการอุดตันที่ไม่สามารถกำจัดได้หลังจากการทำความสะอาด (Irreversible fouling) โดยทั่วไปการทำความสะอาดผิวของเยื่อกรองทำได้โดยใช้แรงดันน้ำ (Hydrodynamic

cleaning) และสารเคมี (Chemical cleaning) การอุดตันแบบสามารถกำจัดได้โดยการทำความสะอาด เกิดจากสารอินทรีย์หรืออินทรีย์บนผิวของเยื่อกรอง ที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ บนผิวของเยื่อกรอง การอุดตันแบบนี้สามารถกำจัดได้ง่ายโดยใช้แรงดันน้ำ หรือใช้สารเคมี ส่วนการอุดตันที่ไม่สามารถกำจัดได้โดยการทำความสะอาด เกิดจากสารอินทรีย์ที่เหลืตกค้างบนผิวของเยื่อบาง เนื่องจากผลของการดูดซับ การตกตะกอน หรือการทำปฏิกิริยาคิงคูดของสารอินทรีย์ในรูพรุนของเยื่อกรอง ซึ่งทำให้เกิดการลดประสิทธิภาพการผลิตปริมาณน้ำของเยื่อกรอง แต่อาจจะเพิ่มประสิทธิภาพของการกำจัดตัวถูกละลายเนื่องจากผลของการสร้างแผ่นฟิล์มบางๆขึ้นมาใหม่บนผิวของเยื่อกรอง

2.4 กลไกของการอุดตัน (Fouling Mechanisms)

การเกิดการอุดตันของเยื่อกรองเกิดจากผลของสารอินทรีย์ละลาย (Dissolved matter) และสารที่มีขนาดใหญ่ (Particulate matter) โดยจำแนกความแตกต่างระหว่างสารอินทรีย์ได้โดยใช้กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน ส่วนที่ผ่านกระดาษกรอง เรียกว่า สารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic compounds, DOC) ส่วนสารที่ไม่สามารถผ่านกระดาษกรองจะจำแนกเป็นสารที่มีขนาดใหญ่ โดยพบว่าสารอินทรีย์ละลายน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ก่อให้เกิดการอุดตันบนผิวของเยื่อกรองไม่ว่าจะเป็นเยื่อกรองแบบอัลตราหรือนาโน (Howe and Clark, 2002; Mattaraj, 2001; Jarusutthirak *et al.*, 2002; Fu *et al.*, 1994; Braghetta *et al.*, 1997) อย่างไรก็ตาม กลไกการเกิดการอุดตันจากสารอินทรีย์นั้นค่อนข้างเข้าใจยากเนื่องจากคุณสมบัติของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันในแหล่งน้ำดิบแต่ละแห่ง รวมทั้งคุณสมบัติของระบบเยื่อกรองที่เลือก ซึ่งการอุดตันดังกล่าวย่อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตน้ำสะอาด

ในการศึกษากลไกการอุดตันของเยื่อกรอง ได้มีการวิจัยและพัฒนาโดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งได้พัฒนามาจากการดำเนินงานกรองแบบ Dead-end operation (Hermia, 1982) ที่มีการพัฒนามาใช้กับระบบ Crossflow operation โดยแบ่งกลไกการอุดตันของเยื่อกรอง ได้ดังนี้คือ

1) การอุดตันที่รูของเยื่อกรอง (Pore blocking model) เกิดจากตัวถูกละลายปิด หรือ อุดตันรูของเยื่อกรองทำให้ลดประสิทธิภาพของอัตราการไหลของน้ำหรืออัตราการกรองลดลง แต่เปอร์เซ็นต์การกำจัดอาจจะมีสูงขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อย เนื่องจากผลของชั้นอุดตันที่เกิดขึ้นบนผิวเยื่อกรองทำหน้าที่กรองอีกชั้นหนึ่ง

2) การอุดตันแบบดูดซึมบนผิวหรือรูของเยื่อกรอง (Standard blocking model) โดยการดูดซับสารอินทรีย์บนเยื่อกรอง สามารถลดประสิทธิภาพของการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรอง เนื่องจากขนาดของรูมีขนาดลดลง ซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านมากขึ้นบนผิวของเยื่อกรอง

3) การอุดตันที่เกิดขึ้นจากการสะสมสารที่ผิวของเยื่อกรอง (Intermediate blocking model) เป็นการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กกว่าหรือใกล้เคียงกับรูของเยื่อกรอง ก่อนก่อให้เกิดชั้นต่อไปคือการเกิดเค้กบนผิวของเยื่อกรอง

4) การอุดตันแบบเกิดเค้กบนผิวของเยื่อกรอง (Cake formation model) เกิดจากการที่สารมีขนาดใหญ่กว่ารูของเยื่อกรอง ก่อให้เกิดเค้กของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์บนผิวของเยื่อกรอง ทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดน้อยลงเกิดแรงต้านมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อการลดลงของอัตราการกรอง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

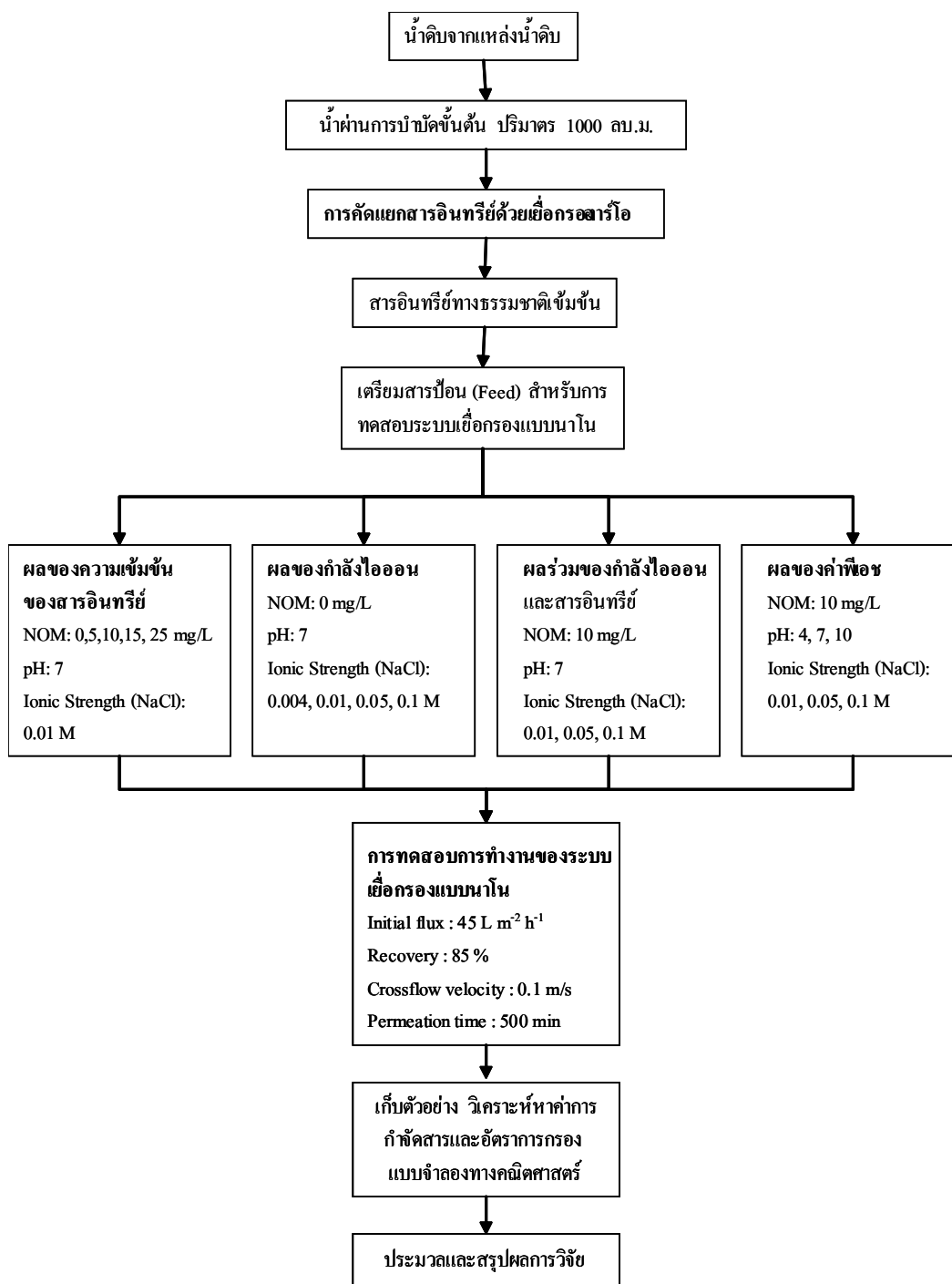
ในการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติโดยระบบเยื่อกรองแบบนาโน มีขั้นตอนการดำเนินการโดยสรุป (รูปที่ 3-1) ดังนี้

1. สำรวจและเลือกสถานที่ที่จะเก็บน้ำตัวอย่างรวมทั้งการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้ข้อมูลที่ใช้มาวิเคราะห์นั้นคือ ค่าการดูดกลืนแสง (UV_{254nm}) และค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC)
2. คัดแยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติจากแหล่งน้ำ โดยใช้ระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ ทำให้ได้สารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงและเก็บรักษาไว้ในตู้เย็นเพื่อยับยั้งการย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ และนำสารอินทรีย์ ความเข้มข้นสูงมาทำการเจือจางตามความเข้มข้นที่ต้องการ ก่อนนำมาทดสอบกับระบบเยื่อกรองแบบนาโน
3. ทำการทดสอบการกรองสารอินทรีย์ทางธรรมชาติด้วยระบบเยื่อกรองแบบนาโน เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสารและกลไกการอุดตันของระบบเยื่อกรอง โดยแบ่งการทดลองขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์และค่าพีเอชและค่าของไอออนในสารละลาย นำผลการทดลองมาวิเคราะห์โดยใช้การจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแต่ละกลไกการอุดตัน
4. ทดสอบประสิทธิภาพโดยวัดค่าอัตราการไหลผ่านระบบเยื่อกรอง และค่าการกำจัดโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของคาร์บอนทั้งหมด ส่วนค่าอื่นๆ ที่จะต้องศึกษาเช่น พีเอช และค่ากำลังของไอออน (Ionic Strength) ของสารละลาย
5. ทดสอบและวิเคราะห์เยื่อกรองโดยใช้เครื่องมือทดสอบบนผิวของเยื่อกรองเพื่อวิเคราะห์หาสารเคมีที่ก่อให้เกิดการอุดตันหรือดูดซับบนผิวของเยื่อกรอง โดยการทดสอบก่อนและหลังการทดลองโดยเยื่อกรองถูกทดสอบกับสารละลายสารอินทรีย์ นำเอาข้อมูลมาศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้
6. ประมวลผลการทดลองและสรุปผลการวิจัย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

- 1) ระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ (Reverse Osmosis Membrane)
- 2) ชุดเยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration Membrane Module) แบบ Cross-flow bench scale
- 3) เครื่องวัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon Analyzer)
- 4) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)

- 5) เครื่องวัดค่าไอออน (Ion Chromatography)
- 6) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity Meter)
- 7) เครื่องวัดค่าพีเอช (pH Meter)
- 8) เครื่องชั่งน้ำหนักวัดปริมาตรของน้ำที่ผ่านระบบเยื่อกรอง
- 9) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)



รูปที่ 3-1 ฟังสรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3 แหล่งน้ำดิบ

แหล่งน้ำดิบที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ หนองน้ำอิมส์ ซึ่งตั้งอยู่ในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี โดยเป็นแหล่งน้ำนี้ใช้เป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาเพื่อใช้ในการกิจการของมหาวิทยาลัย

ตัวอย่างน้ำจะถูกเก็บรวบรวมมาทำการวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ค่าพีเอช (pH) ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ($UV_{254\text{ nm}}$) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ค่าความขุ่น (Turbidity) ค่าความกระด้าง (Hardness) ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และค่าปริมาณไอออนต่าง ๆ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม คลอไรด์ และซัลเฟต เป็นต้น

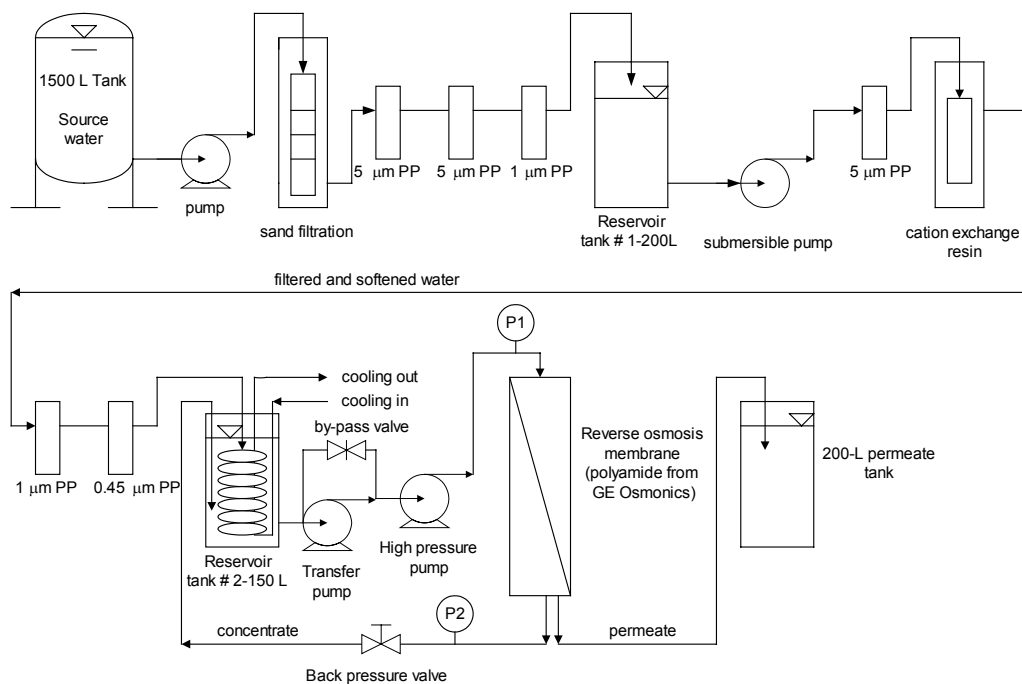
3.4 การคัดแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ

สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (NOM) จากแหล่งน้ำดิบที่ถูกรวบรวมมา ถูกคัดแยกและทำให้เข้มข้น โดยผ่านการกรองด้วยระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ โดยใช้น้ำตัวอย่างประมาณ 1,500 ลิตร ผ่านการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกขนาดใหญ่ รวมทั้งไอออนที่มีโอกาสรวมตัวกันเกิดเป็นตะกอนออกเพื่อป้องกันการอุดตันที่เกิดขึ้นกับระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ โดยระบบบำบัดขั้นต้นประกอบด้วย

- ถังกรองทราย จำนวน 1 ถัง
- ชุดกรองขั้นต้น ประกอบด้วย ตัวกรองโพลีโพรพิลีน ขนาด 5 ไมครอน จำนวน 2 ตัว และตัวกรองโพลีโพรพิลีน ขนาด 1 ไมครอน จำนวน 2 ตัว
- ชุดกรองขั้นที่สองและเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ประกอบด้วย ตัวกรองโพลีโพรพิลีน ขนาด 5 และ 0.45 ไมครอน อย่างละ 1 ตัว และ ถังเรซินประจุบวกแลกเปลี่ยนไอออน (Cation exchange resin) จำนวน 1 ถัง

เมื่อน้ำดิบผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว จะถูกเก็บไว้ในถังพักที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ก่อนสูบส่งไปยังระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอด้วยเครื่องสูบน้ำความดันสูง โดยในการทดลองแต่ละครั้งจะทำการควบคุมความดันให้คงที่ตลอดการทดลอง ปริมาณน้ำที่ถูกสูบผ่านระบบอาร์โอในแต่ละครั้งมีประมาณ 1,000 ลิตร รูปที่ 3-2 แสดงกระบวนการคัดแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ

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



รูปที่ 3-2 กระบวนการคัดแยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติด้วยระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของระบบเยื่อกรองอาร์โอสำหรับแยกสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติ

พารามิเตอร์	คุณสมบัติ
ชนิดของเยื่อกรองอาร์โอ	Thin-film composite
Silt density index (15 min)	น้อยกว่า 5
ความขุ่นเข้าสู่ระบบ	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)

น้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบ เรียกว่า น้ำเพอร์มีเอท (Permeate) เป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง และมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติจะถูกเก็บรวบรวมไว้ในถังพัก เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการล้างระบบเยื่อกรองต่อไป ส่วนน้ำที่ไม่ผ่านระบบเยื่อกรอง เรียกว่า น้ำคอนเซนเตรต (Concentrate) ยังคงมีปริมาณสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ถูกกักกันไว้เป็นจำนวนมาก น้ำส่วนนี้ถูกส่งกลับไปยังถังป้อนน้ำเข้าระบบ (Feed tank) เพื่อส่งเข้าสู่ระบบอาร์โอต่อไป สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ไม่ผ่านระบบเยื่อกรองอาร์โอจะสะสมอยู่ในถังป้อนน้ำเข้าระบบ โดยในการคัดแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยวิธีการนี้ ใช้ปริมาณน้ำที่ป้อนเข้าระบบอาร์โอประมาณ 1,000 ลิตร ทำการเดินระบบดังกล่าวจนได้น้ำเพอร์มีเอท ประมาณ 970 ลิตร ส่วนปริมาณน้ำคอนเซนเตรตที่อยู่ในถังป้อนน้ำเข้าระบบ ประมาณ 30 ลิตร จะถูกเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาประสิทธิภาพและการเกิดอุดตันของสารอินทรีย์ธรรมชาติบนผิวของระบบเยื่อกรองแบบนาโนต่อไป

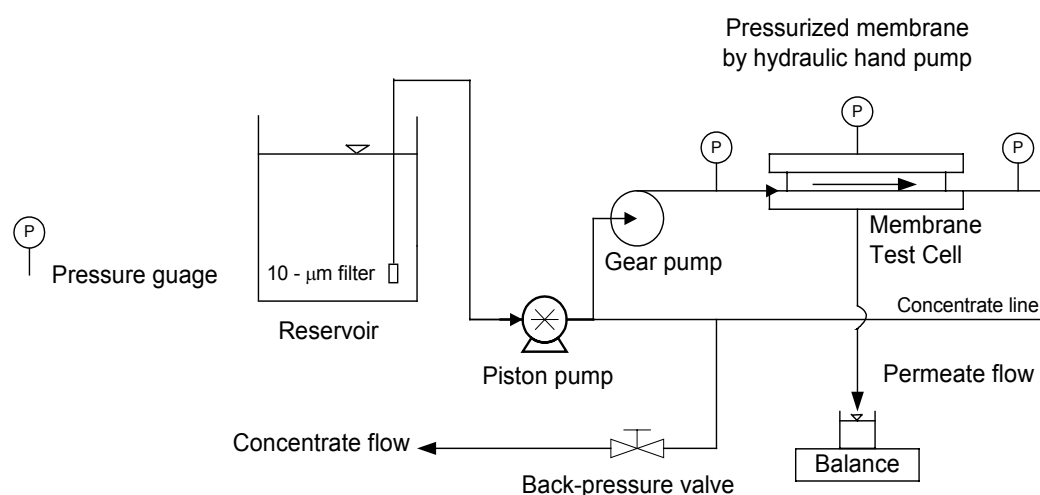
ในการทำความสะอาดระบบเยื่อกรองอาร์โอ จะใช้น้ำเพอร์มีเอทประมาณ 10-15 ลิตรสำหรับทำความสะอาดระบบและเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อหามวลสมดุล (Mass balance) จากนั้นทำความสะอาดด้วยสารเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 10 เดินระบบเป็นเวลาประมาณ 40 นาที เก็บสารละลายอินทรีย์ที่ออกมาจากการล้างด้วยสารเคมีสำหรับคำนวณหาสมดุลมวลของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด จากนั้นระบบอาร์โอถูกล้างออกด้วยน้ำเพอร์มีเอทอีกครั้งจนกระทั่งค่าพีเอชลดลงเท่ากับน้ำเพอร์มีเอท ขั้นตอนสุดท้ายใช้สารโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) ที่ความเข้มข้น 1% สำหรับแช่เก็บเยื่อกรองอาร์โอ

ในระหว่างการเดินระบบอาร์โอ จะทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณสารคาร์บอนทั้งหมด (TOC) ค่าการดูดกลืนแสง (UV_{254}) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ค่าพีเอช (pH) และอุณหภูมิ นอกจากนี้ทำการวัดอัตราการไหลเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลผ่านของน้ำต่อพื้นที่ (ฟลักซ์) ระหว่างที่มีการแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยระบบอาร์โอ

3.5 ระบบเยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration Membrane)

การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์โดยระบบเยื่อกรองแบบนาโนและการอุดตันของสารอินทรีย์บนผิวของเยื่อกรองระบบนาโน ใช้ระบบเยื่อกรองแบบนาโน ชนิด Bench-scale crossflow system ดังรูปที่ 3-2 ตัวระบบทำจากเหล็กสแตนเลส (บริษัท GE Osmonics) สามารถเดินระบบได้ที่มีความดันมากถึง 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) โดยใช้กับเยื่อกรองที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.014 ตารางเมตร (m^2) ปริมาตรทั้งหมดในระบบที่ได้จากการทดสอบแบบ Tracer study เท่ากับ 72 มิลลิลิตร (ml) ปั๊มชนิด Piston pump (รุ่น Eldex, model CC-100-S-4, CA, USA) ทำจากเหล็ก 316 Stainless steel โดยมีอัตราการไหลมากที่สุดเท่ากับ 30 มิลลิลิตรต่อนาที (mL/min) เพื่อใช้ในการปรับอัตราการไหลเข้าสู่ระบบและควบคุมความดันของระบบ ปั๊มชนิด Gear pump (รุ่น 75211-35 บริษัท

Cole-Palmer Instrument Company, IL, USA.) สามารถปรับความเร็วได้ตั้งแต่ 60-3600 rpm ใช้สำหรับปรับความเร็วที่ผิวของระบบเยื่อกรองในระหว่างการดำเนินระบบ ระบบท่อและข้อต่อทำจากเหล็กสแตนเลส รวมทั้งวาล์ว (Back-pressure valve) ใช้สำหรับปรับค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของเพอร์เมตต่ออัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ หรือเรียกว่ารีโคเวอร์รี (Recovery, R , Q_p/Q_f) เกจสำหรับวัดความดันถูกติดตั้งบริเวณทางเข้าสู่ระบบและส่วนที่อยู่บริเวณคอนเซนเตรตของระบบ เพื่อใช้ตรวจสอบความดันในการดำเนินระบบ ส่วนการวัดอัตราการไหลของคอนเซนเตรตและเพอร์เมตวัดได้โดยใช้เครื่องชั่งที่อ่านค่าได้ทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Shimadzu, รุ่น BL-2200H) โดยวัดน้ำหนักมากที่สุดที่ 2,200 กรัม ค่าที่แสดงต่ำสุดเท่ากับ 0.01 กรัม ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากระบบจะถูกกรองรับด้วยบีกเกอร์ ปริมาตรน้ำจริงที่ไหลออกในระยะเวลาที่ใช้วัดสามารถนำมาคำนวณอัตราการไหลของน้ำและค่าอัตราการไหลของน้ำต่อพื้นที่ที่ผ่านระบบหรือที่เรียกว่าฟลักซ์ (Flux, J)



รูปที่ 3-2 ระบบเยื่อกรองแบบนาโนชนิด Bench-scale crossflow system

เยื่อกรองแบบนาโน (บริษัท GE Osmonics) เป็นเยื่อกรองชนิด Thin-film membrane (TFM) รุ่น HL 2540F1072 ชุด 7933937 โมเลกุลาร์เวทคัทออฟ (Molecular weight cut off, MWCO) ของเยื่อกรองมีขนาดเท่ากับ 150-300 ดาลตัน (Dalton, Da) สำหรับโมเลกุลที่ใช้ทดสอบแบบไม่มีประจุได้แก่ กลูโคสและซูโครส ค่าพีเอชที่ใช้ในการดำเนินระบบอยู่ในช่วง 3.0 – 9.0 สำหรับการทำความสะดวกจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 – 10.0 ความต้านทานของคลอรีนน้อยกว่า 0.1 ppm อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการดำเนินระบบเท่ากับ 50 °C สำหรับอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการทำความสะดวกเท่ากับ 45 °C เปอร์เซ็นต์ค่าการกำจัดของแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ 98% ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 2,000 mg/L ที่ความดัน 100 psi (690 kPa) อุณหภูมิ 25°C และ 15% รีโคเวอร์รี การเก็บแผ่นตัวอย่างของเยื่อกรองนาโนจะเก็บในสาร

ละลายที่ความเข้มข้น 1% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ และเก็บไว้ที่ตู้เย็นอุณหภูมิ 4 °C เพื่อลดการเกิดเชื้อแบคทีเรียบนผิวของเยื่อกรอง

3.6 การเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโน

น้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้นสูงที่ได้จากระบบอาร์โอ (Reverse osmosis) ถูกนำมาปรับสภาพในถังบรรจุน้ำตัวอย่างได้ถึง 20 ลิตร โดยการปรับความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ที่ต้องการใช้สามารถทำได้โดยวิธีการเจือจางโดยใช้น้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (Deionized water, DI) รวมทั้งการเติมกรดหรือเบสเพื่อให้ได้ค่าพีเอชตามต้องการและการปรับค่ากำลังของไอออนในน้ำโดยใช้สารโซเดียมคลอไรด์และ/หรือแคลเซียมคลอไรด์ หลังจากนั้นน้ำตัวอย่างจะถูกไล่อากาศก่อนโดยใช้ปั๊มสูญญากาศ (Vacuum pump) เพื่อลดปัญหาฟองอากาศเกิดขึ้นระหว่างการปั๊มของ Piston pump

3.6.1 การทดสอบค่าการกรองของน้ำบริสุทธิ์ (Pure water permeability)

ก่อนการทดสอบน้ำตัวอย่างจากสารละลายอินทรีย์ เยื่อกรองแบบนาโนจะถูกติดตั้งในระบบเพื่อทดสอบกับน้ำบริสุทธิ์ สำหรับคำนวณหาค่าฟลักซ์ของน้ำ (Water flux, Q_p/A_m) หรือสัดส่วนของอัตราการไหลของเพอร์มีเอท (Q_p) ต่อพื้นที่หน้าตัดเยื่อกรอง (A_m) โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำ โดยปรับเปลี่ยนความดันโดยการปรับค่าอัตราไหลของน้ำเข้าระบบ ค่าฟลักซ์ที่ได้จะให้สัญลักษณ์เป็น $J_{\text{new membrane}}$
- 2) ล้างเยื่อกรองด้วยการผ่านสารละลายกรดซิตริกซึ่งปรับค่าพีเอชประมาณ 3 - 4 เป็นเวลาประมาณ 30 นาที
- 3) ล้างเยื่อกรองด้วยการผ่านสารละลายเบสซึ่งเตรียมจาก NaOH ค่าพีเอชประมาณ 10 โดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที
- 4) ล้างเยื่อกรองด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI Water) และหาค่าฟลักซ์อีกครั้งโดยการปรับเปลี่ยนความดันของระบบ และบันทึกค่าฟลักซ์เป็น $J_{\text{pretreatment}}$
- 5) ผ่านน้ำบริสุทธิ์ในระบบเยื่อกรองเป็นเวลา 45 นาที โดยปรับค่าฟลักซ์ประมาณ 45 L/m²/h (LMH) เพื่อลดปัญหาของการอัดตัวของแผ่นกรองที่จะส่งผลต่อค่าฟลักซ์ระหว่างการทดสอบ จากนั้นจะทดสอบค่าฟลักซ์อีกครั้ง โดยใช้สัญลักษณ์ของฟลักซ์ว่า $J_{\text{compaction}}$

3.6.2 การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน

มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ล้างระบบนาโนในระบบ Bench-scale test cell ด้วยสารละลายอินทรีย์ที่เตรียมไว้ประมาณ 200 - 300 มิลลิลิตร เพื่อไล่น้ำบริสุทธิ์ที่หลงเหลืออยู่ในระบบ
- 2) ปั๊มสารละลายเข้าสู่ระบบโดยจะปรับให้ค่าฟลักซ์เริ่มต้นประมาณ 45 LMH
- 3) ควบคุมสถานะการดำเนินการของระบบเยื่อกรองแบบนาโน ดังนี้
 - ความดันที่ปรับได้ ณ ค่าฟลักซ์เริ่มต้น ควบคุมให้มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง
 - ค่ารีโวกเวอร์รี ($R, Q_p/Q_p$) เท่ากับ 85% ตลอดการทดลอง

- ความเร็วบนผิวของเยื่อกรองควบคุมไว้ที่ 0.1 m/s (530 mL/min) โดยปรับที่ gear pump

4) ระยะเวลาการทดสอบทั้งหมด 500 นาที (8 ชั่วโมง) การวัดปริมาณน้ำจะวัดโดยใช้เครื่องชั่งเพื่อคำนวณอัตราการไหลที่จะวัดโดยแบ่งเป็นการวัดอัตราการไหลทุก 10 นาที ในสองชั่วโมงแรก และทุก 15 นาทีจากสองชั่วโมงไปจนถึงห้าชั่วโมง หลังจากห้าชั่วโมงจะวัดอัตราการไหลทุก 20 นาทีจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ

5) เก็บตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์สารในน้ำเพอร์มีเอทและคอนเซนเตรต โดยเก็บตัวอย่างที่เวลา 30, 60, 120, 210, 300, 380 และ 500 นาที

6) การวิเคราะห์จะวัดค่าสารคาร์บอนทั้งหมด (TOC) ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ($UV_{254\text{ nm}}$) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) และค่าพีเอช (pH)

3.6.3 การทำความสะอาดระบบเยื่อกรองแบบนาโน

หลังจากการทดสอบด้วยสารละลายอินทรีย์ น้ำบริสุทธิ์ ถูกใช้เพื่อไล่สารละลายอินทรีย์ที่เหลืออยู่บนผิวของเยื่อกรอง โดยทำการเก็บตัวอย่างเพื่อคำนวณหามวลของสารอินทรีย์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) การทำความสะอาดด้วยน้ำบริสุทธิ์ แบบ Hydrodynamic cleaning โดยใช้ น้ำประมาณ 1 ลิตร และปรับค่าอัตราการไหล ประมาณ 2.5 เท่าของการดำเนินระบบ (ประมาณ 1,330 mL/min) และน้ำบริสุทธิ์ DI จะถูกปั๊มหมุนเวียนในระบบเพื่อล้างสารอินทรีย์ที่เกาะบนผิวของเยื่อกรองเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทดสอบเพื่อหาค่าฟลักซ์ และจะให้สัญลักษณ์เป็น $J_{\text{hydrodynamic cleaning}}$

2) การทำความสะอาดด้วยสารเคมี หรือเรียกว่า Chemical cleaning โดยการปรับสภาพน้ำปริมาตร 1 ลิตรให้เป็นเบส ค่าพีเอชประมาณ 10 โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารละลายเบสจะถูกปั๊มให้หมุนเวียนในระบบเป็นเวลา 30 นาที ก่อนการทดสอบหาค่าฟลักซ์หลังการใช้สารเคมีในการทำความสะอาด เรียกฟลักซ์นี้ว่า $J_{\text{chemical cleaning}}$

3) ทำการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับในระบบ จากปริมาณของสารละลายและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่อยู่ในสารละลาย เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับบนผิวของเยื่อกรองละลายได้ดีในสารละลายที่เป็นเบส

3.7 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบเยื่อกรองแบบนาโน

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานและการอุดตันของระบบเยื่อกรองแบบนาโน รวมทั้งประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติโดยระบบเยื่อกรองแบบนาโน ดังนี้

3.7.1 ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

สารละลายอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ถูกคัดแยกด้วยระบบอาร์โอ จะถูกนำมาเจือจางเพื่อทดสอบผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานและการอุดตันของระบบเยื่อกรองแบบนาโน โดยแปรค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติเป็น 0 5 10 15 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg C/L) ทั้งนี้ ควบคุมค่าพีเอช เท่ากับ 7 โดยการปรับด้วย HCl หรือ NaOH และ

ควบคุมค่ากำลังไอออน เท่ากับ 0.01 โมลาร์ หรือ วัดค่าการนำไฟฟ้าได้เท่ากับ 1170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ โดยการปรับด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส

3.7.2 ผลของกำลังไอออน (Ionic Strength)

การศึกษาผลของกำลังไอออนต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน ใช้สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยปราศจากสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ความเข้มข้นของ NaCl ที่ใช้ได้แก่ 0.004 0.01 0.05 และ 0.1 โมลาร์ โดยปริมาณ NaCl สามารถวัดจากค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งได้ทำการ Calibrate ไว้แล้ว

3.7.3 ผลร่วมระหว่างกำลังไอออนและสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลร่วมระหว่างกำลังไอออนและสารอินทรีย์ทางธรรมชาติต่อประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองแบบนาโน ทำโดยการควบคุมค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ 10 mg C/L และแปรค่ากำลังไอออนด้วยการปรับค่าความเข้มข้นของ NaCl ที่ 0.004 0.01 0.05 และ 0.1 โมลาร์

3.7.4 ผลของค่าพีเอชของสารละลาย

ในการทดลองนี้ ควบคุมค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในน้ำเข้าให้เท่ากับ 10 mg/L และแปรค่าพีเอชที่ 4 7 และ 10 โดยปรับด้วย HCl หรือ NaOH ทั้งนี้ควบคุมค่ากำลังไอออนที่ 0.01 และ 0.05 โมลาร์ของ NaCl โดยปรับด้วยสารละลาย NaCl

3.8 การศึกษาแบบจำลองการอุดตันของระบบเยื่อกรองแบบนาโน

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 แสดงกลไกการกรองเกี่ยวข้องกับการเกิดคราบของอนุภาคบนผิวของเยื่อกรองที่ระยะเวลาที่นานขึ้นหรืออนุภาคอาจปิดบางส่วนของพื้นที่ของเยื่อกรองทำให้เพิ่มความหนาของการกรองมากขึ้น (Intermediate standard blocking)

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

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

สำหรับการกรองที่เกิดจากการดำเนินระบบแบบไหลขวาง (Crossflow operation) แบบจำลองกลไกการอุดตันแบบ Crossflow สามารถทำได้ประยุกต์ได้กับการดำเนินระบบแบบ 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 3.2 สรุปแบบจำลองการอุดตันของการกรองแบบ Dead-end และ Crossflow operation โดยความสัมพันธ์ของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เท่ากับผลคูณของค่าคงที่ของการอุดตันและสัดส่วนของค่าฟลักซ์ตามแบบจำลองของการกลไกการอุดตันบนผิวของเยื่อกรอง

ตารางที่ 3.2 แบบจำลองการอุดตันของการกรองแบบ Dead end และ Crossflow operation

Model	Dead end operation	Crossflow operation
Complete	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_A J_v$	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_A (J_v - J^*)$
Standard	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_B J_v^{1.5}$	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_B J_v^{0.5} (J_v - J^*)$
Intermediate	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_C J_v^2$	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_C J_v (J_v - J^*)$
Cake formation	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_D J_v^3$	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_D J_v^2 (J_v - J^*)$

โดยที่ k_A , k_B , k_C และ k_D เท่ากับค่าคงที่ของการอุดตันตามแบบจำลองของกลไกการอุดตัน

จากแบบจำลองนี้ค่า k จะเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ระหว่างข้อมูลฟลักซ์จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยจะให้ผลรวมของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองน้อยที่สุด หรือ Sum of squared error (SSE) โดยใช้การแก้สมการแบบ Fourth-order Runge-Kutta routine และใช้ Solver ในการแก้สมการ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 คุณลักษณะของน้ำจากแหล่งน้ำดิบ

แหล่งน้ำที่ใช้แยกสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำเป็นแหล่งน้ำดิบจากหนองน้ำอ้อมเจมส์ ภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำจากแหล่งน้ำดิบถูกแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของน้ำจากแหล่งน้ำดิบ

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้	หน่วย
พีเอช	7.04	-
การดูดกลืนแสง UV _{254 nm}	0.185	cm ⁻¹
สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon)	4.54	mg L ⁻¹
ค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะ (SUVA, UV _{254 nm} /TOC)	4.07	L. mg ⁻¹ . m ⁻¹
การนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่อุณหภูมิ 25 °C	31.9	μS/cm
ความขุ่น (Turbidity)	6.58	NTU
ความกระด้างของน้ำ (Hardness)	15.0	mg as CaCO ₃ /L
แคลเซียม (Ca ²⁺)	13.5	mg as CaCO ₃ /L
แมกนีเซียม (Mg ²⁺)	1.5	mg as CaCO ₃ /L
ความเป็นด่าง (Alkalinity) i.e. HCO ₃ ⁻	8.0	mg as CaCO ₃ /L
คลอไรด์ (Cl ⁻)	5.4	mg Cl ⁻ /L
ซัลเฟต (SO ₄ ²⁻)	93.25	mg SO ₄ ²⁻ /L

จากตาราง พบว่า ความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดมีค่าประมาณ 4.54 mg/L ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่พบในน้ำธรรมชาติ โดยทั่วไปความเข้มข้นของคาร์บอนทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 1–27 มิลลิกรัมต่อลิตร ขึ้นกับชนิดและแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Krasner et al., 1995; Tseng and Edwards, 1999) และค่าการดูดกลืนแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการบ่งชี้ถึง

พันธะคู่ของธาตุคาร์บอนในโครงสร้างของสารอินทรีย์ธรรมชาติ วัดได้ 0.185 cm^{-1} อัตราส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงต่อค่าความเข้มข้นของคาร์บอนทั้งหมด หรือค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะ (Specific ultraviolet absorbance at 254 nm, SUVA) วัดได้จากแหล่งน้ำนี้เท่ากับ $4.07 \text{ L.mg}^{-1}.\text{m}^{-1}$ ค่า $\text{SUVA}_{254\text{nm}}$ ที่สูงแสดงถึงสารละลายเป็นสารละลายอินทรีย์ที่ยากต่อการรวมตัวกับน้ำ หรือมีความเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) มาก ส่วนค่า $\text{SUVA}_{254\text{nm}}$ ที่มีค่าต่ำแสดงถึงสารละลายมีความเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) หรือเป็นสารละลายอินทรีย์ที่ง่ายต่อการละลายในน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งน้ำอื่นๆ ค่า SUVA ที่วัดได้แสดงถึงความเป็นไฮโดรโฟบิกที่ค่อนข้างสูงของสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำแห่งนี้ Mattaraj and Kilduff (2003) ศึกษาคุณสมบัติของสารละลายอินทรีย์สามชนิดที่มีผลกระทบต่อระบบเยื่อกรองแบบนาโน พบว่าสารละลายอินทรีย์ธรรมชาติที่ใช้มีค่า $\text{SUVA}_{254\text{nm}}$ ระหว่าง $2.5\text{--}4.7 \text{ L.mg}^{-1}.\text{m}^{-1}$

ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างมีค่าประมาณ $31.9 \text{ }\mu\text{S/cm}$ ที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งถือว่ามีความค่อนข้างต่ำแสดงถึงองค์ประกอบของไอออนทั้งหมดในน้ำมีความเข้มข้นต่ำ ได้แก่ ความกระด้างของน้ำซึ่งมีค่าน้อยเท่ากับ $15.0 \text{ mg as CaCO}_3/\text{L}$ (โดยทั่วไปน้ำกระด้างที่มีค่าน้อยหรือเป็นน้ำอ่อนมีค่าอยู่ในช่วง $0\text{--}75 \text{ mg/L as CaCO}_3$) ความเข้มข้นของแคลเซียมเท่ากับ $13.5 \text{ mg as CaCO}_3/\text{L}$ ความเข้มข้นของแมกนีเซียมเท่ากับ $1.5 \text{ mg as CaCO}_3/\text{L}$ ความเข้มข้นของคลอไรด์เท่ากับ $5.4 \text{ mg Cl}^-/\text{L}$ ความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ $93.25 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$ และความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตที่มีค่าน้อยเท่ากับ $8 \text{ mg as CaCO}_3/\text{L}$

ค่าพีเอชของแหล่งน้ำประมาณ 7.04 ซึ่งเป็นค่าโดยทั่วไปของน้ำในธรรมชาติ นอกจากนี้ยังบ่งถึงชนิดของไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ที่มีค่ามากกว่าชนิดของคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) อัลคาไลน์ดีในน้ำอีกด้วย

4.2 การคัดแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยระบบเยื่อกรองอาร์โอ

4.2.1 คุณสมบัติของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น

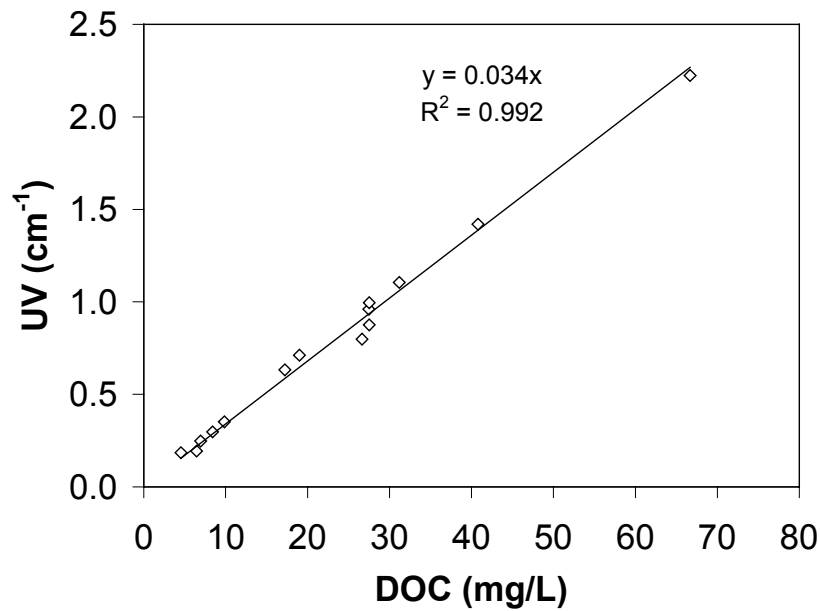
น้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ 1,500 ลิตร ถูกนำมาเก็บไว้ในถังพักน้ำ จากนั้นถูกปั๊มผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่ระบบเยื่อกรองอาร์โอ ซึ่งประกอบด้วยถังกรองทรายและระบบการกรองโดยมีขนาด $5\text{-}\mu\text{m}$ และ $1\text{-}\mu\text{m}$ ชนิด Polypropylene โดยส่วนใหญ่จะเป็นการกำจัดวัตถุที่มีขนาดใหญ่ สาหร่าย หรือวัตถุอื่น ๆ ที่ก่อให้เกิดความขุ่นในน้ำ น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วจะมีความขุ่น 1.94 NTU คิดเป็นความขุ่นลดลงร้อยละ 70.5 ตารางที่ 4.2 แสดงคุณลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้	หน่วย
พีเอช	6.98	-
การดูดกลืนแสง UV _{254 nm}	0.175	cm ⁻¹
สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon)	4.47	mg L ⁻¹
ค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะ (SUVA, UV _{254 nm} /TOC)	3.92	L. mg ⁻¹ . m ⁻¹
การนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่อุณหภูมิ 25 °C	30	μS. cm ⁻¹
ความขุ่น (Turbidity)	1.94	NTU

ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดลดลงไม่มากนัก หลังจากผ่านการบำบัดขั้นต้น โดยมีค่าเท่ากับ 4.47 mg L⁻¹ และค่าการดูดกลืนแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 254 nm เท่ากับ 0.175 cm⁻¹ ค่า SUVA เท่ากับ 3.92 L. mg⁻¹.m⁻¹ แสดงให้เห็นว่ามีสารอินทรีย์ธรรมชาติบางส่วนถูกกำจัดออกด้วยการบำบัดขั้นต้น ค่าพีเอชที่วัดได้เท่ากับ 6.98 มีคุณสมบัติเป็นกลาง และค่าไม่ต่างกันมากนักจากแหล่งน้ำดิบหลังผ่านการบำบัดขั้นต้น ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่า 30 μS.cm⁻¹ ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงนักจากแหล่งน้ำธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่าไอออนยังคงละลายอยู่ในน้ำหลังผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่กำจัดเฉพาะวัตถุที่มีขนาดใหญ่ก่อนการแยกสารละลายอินทรีย์ธรรมชาติโดยระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ

ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างกันสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของคาร์บอนทั้งหมดได้ ดังรูปที่ 4-1 จากกราฟพบว่า ค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นเส้นตรง ความชันที่ได้ระหว่างอัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงต่อค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เท่ากับ 3.40 L.mg⁻¹.m⁻¹ ค่าความสัมพันธ์ในเชิงเส้นมีค่าค่อนข้างสูงโดยมีค่า R² เท่ากับ 0.99



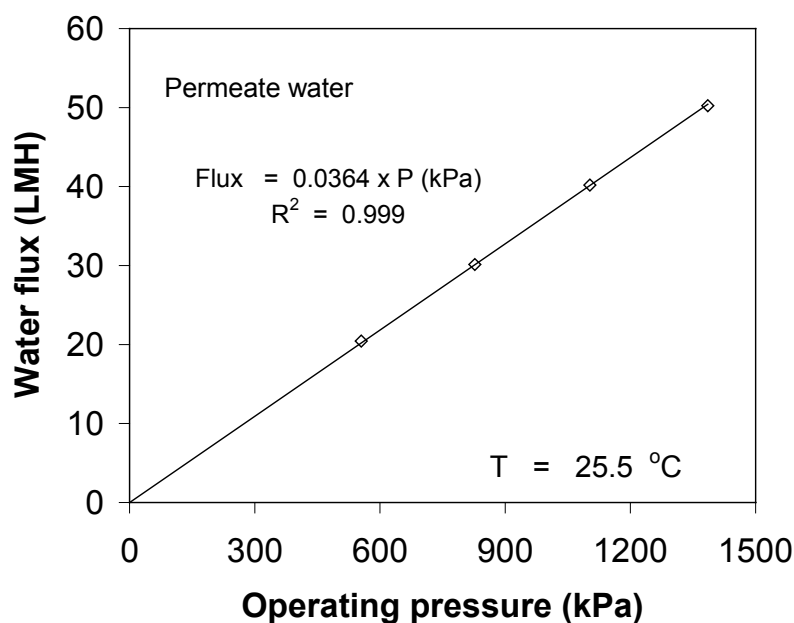
รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของคาร์บอนทั้งหมด

4.2.2 ผลของความดันต่อฟลักซ์ของระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ

ก่อนการแยกสารอินทรีย์โดยระบบเยื่อกรองอาร์โอ น้ำบริสุทธิ์ถูกใช้ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอโดยการทดสอบฟลักซ์ของระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอที่ความดันค่าต่างๆ การทดลองทำโดยการเพิ่มความดันให้แก่ระบบด้วยการเพิ่ม-ลด การปิด Back-pressure valve เพื่อให้ได้ความดันตามที่กำหนดตั้งแต่ 80.5 psi (554.9 kPa) ถึง 201 kPa (1385.5 kPa) รูปที่ 4-2 แสดงค่าฟลักซ์ของระบบเยื่อกรองอาร์โอโดยผลของความดัน โดยแกน Y แสดงค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มีเอท (Water permeate flux) ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการซึมผ่านระบบเยื่อกรองอาร์โอ (Membrane permeability) คูณด้วยความดันในการดำเนินระบบ ตามทฤษฎีของระบบอาร์โอ (Reverse osmosis theory) ดังแสดงได้ตามสมการข้างล่างนี้

$$J_v = L_p (\Delta P - \sigma \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A_m}$$

โดยที่ค่า J_v เท่ากับฟลักซ์ของการไหลผ่านของน้ำ [LMH, $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$], L_p เท่ากับค่าการซึมผ่านของระบบเยื่อกรอง [$LMH \cdot kPa^{-1}$, $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot kPa^{-1}$], ΔP เท่ากับค่าความดันในการดำเนินระบบ [kPa], σ เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ของออสโมติก [-], $\Delta \pi$ เท่ากับค่าความดันของออสโมติกจากเกลือ [kPa], Q_p เท่ากับอัตราการไหลของเพอร์มีเอท [$L \cdot h^{-1}$], A_m เท่ากับพื้นที่ของระบบเยื่อกรอง [m^2]

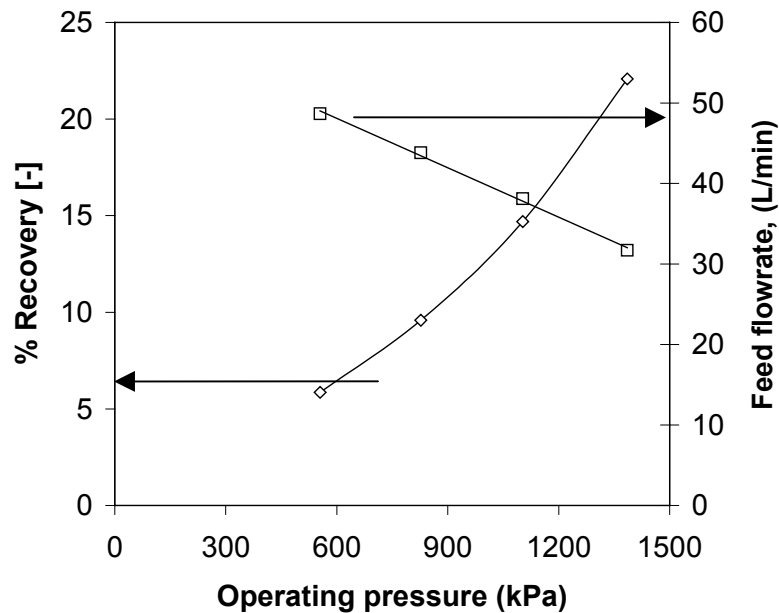


รูปที่ 4-2 ผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ของระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ

เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเพอร์มีเอท มีค่าน้อยกว่า $3 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ จึงไม่คำนึงถึง ผลของความดันออสโมติก จากการทดสอบ พบว่าค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทเป็นสัดส่วนตรงกับความดันที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความสัมพันธ์ R^2 สูงเท่ากับ 0.999 ค่าการซึมผ่านของน้ำเพอร์มีเอท (หรือความชัน) ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ต่อค่าความดันในการดำเนินระบบ มีค่าเท่ากับ $0.0364 \text{ LMH} \cdot \text{kPa}^{-1}$ เมื่อเทียบกับข้อมูลของทางผู้ผลิตกำหนดไว้ประมาณ $0.032 \text{ LMH} \cdot \text{kPa}^{-1}$ เมื่อไม่รวมผลกระทบของความดันออสโมติกที่เกิดจากโซเดียมคลอไรด์ ค่าความต่างของการซึมผ่านของน้ำเพอร์มีเอทมีค่าประมาณ 12% ตามที่ทางบริษัทได้เสนอแนะค่าความต่างของฟลักซ์ในช่วงระหว่าง $\pm 15\%$

4.2.3 ผลของความดันต่อค่ารีโคเวอร์รี และอัตราการไหลเข้าระบบ

ความดันมีความสำคัญต่อการดำเนินการของระบบ เช่น ค่ารีโคเวอร์รี (Recovery) ซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนของอัตราการไหลของเพอร์มีเอท (Permeate flowrate, Q_p) ต่ออัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ระบบ (Feed flowrate, Q_f) รูปที่ 4-3 แสดงผลของความดันต่อค่ารีโคเวอร์รีและอัตราการไหลเข้าระบบ จากการทดลองพบว่าการเพิ่มความดันของระบบจาก 80.5 psi (554.9 kPa) ถึง 201 psi (1385.5 kPa) ทำให้อัตราการไหลของเพอร์มีเอทที่ผ่านการกรองมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ารีโคเวอร์รีมีค่าสูงขึ้นจากร้อยละ 5.9 ถึงร้อยละ 22.1



รูปที่ 4-3 ผลของความดันต่อค่ารีโคเวอร์รีและอัตราการไหลเข้าสู่ระบบ

ขณะเดียวกันความดันที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดลงของอัตราการไหลเข้าสู่ระบบ โดยลดลงจาก 48.7 L.min^{-1} ถึง 31.7 L.min^{-1} เนื่องจากผลของค่าการสูญเสียเฮดที่มากขึ้น ประกอบกับคุณสมบัติของกราฟของปั๊ม (Pump performance curve) ที่ลดลงเนื่องจากเฮดที่ลดลง การลดลงของอัตราการไหลมีผลต่อความเร็วของการไหลที่ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการเดินระบบเปลี่ยนแปลงไป โดยปกติค่าความดันที่ทางบริษัทได้เสนอในการดำเนินระบบเท่ากับ 200 psi (1378.6 kPa) ส่วนรีโคเวอร์รีสูงสุดในการดำเนินระบบสำหรับระบบเชื่อมต่อแบบเดี่ยว เท่ากับ 15% จากผลการทดสอบพบว่าค่าความดันสูงสุดที่ใช้ (200 psi หรือ 1378.6 kPa) ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ารีโคเวอร์รีประมาณ 21% ซึ่งมากกว่าค่ารีโคเวอร์รีที่ทางบริษัทกำหนดไว้ ดังนั้นการคำนวณหาความดันที่อนุญาตให้ใช้ได้กับระบบสามารถทำได้โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลเข้าสู่ระบบในรูปของฟังก์ชันของความดันดังนี้

จากกราฟหาความสัมพันธ์ $Q_f = a\Delta P + b$;

$$Q_f (\text{L.hr}^{-1}) = -1.224 \text{ L.hr}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1} \times \Delta P (\text{kPa}) + 3620.6 \text{ L.hr}^{-1}$$

โดยที่ค่า a เท่ากับ $-1.224 \text{ L.hr}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$ และ b เท่ากับ 3620.6 L.hr^{-1}

ค่าฟังก์ชันสามารถเขียนในอยู่ในรูปของอัตราการไหลของเพอร์มิเอทได้ดังนี้

$$J_v = \frac{Q_p}{A_m} = L_p(\Delta P - \Delta\pi); \text{ assume } \sigma = 1$$

ค่าอัตราการไหลของเพอร์มิเอตเท่ากับ

$$Q_p = A_m L_p (\Delta P - \Delta\pi)$$

ค่ารีโควเอร์รี่สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้ $r = \frac{Q_p}{Q_f}$

แทนค่า Q_p และ Q_f จะได้

$$r = \frac{Q_p}{Q_f} = \frac{A_m L_p (\Delta P - \Delta\pi)}{a \cdot \Delta P + b}$$

แทนค่า r เท่ากับ r_{max} และ ΔP เท่ากับ $\Delta P_{allowable}$ จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

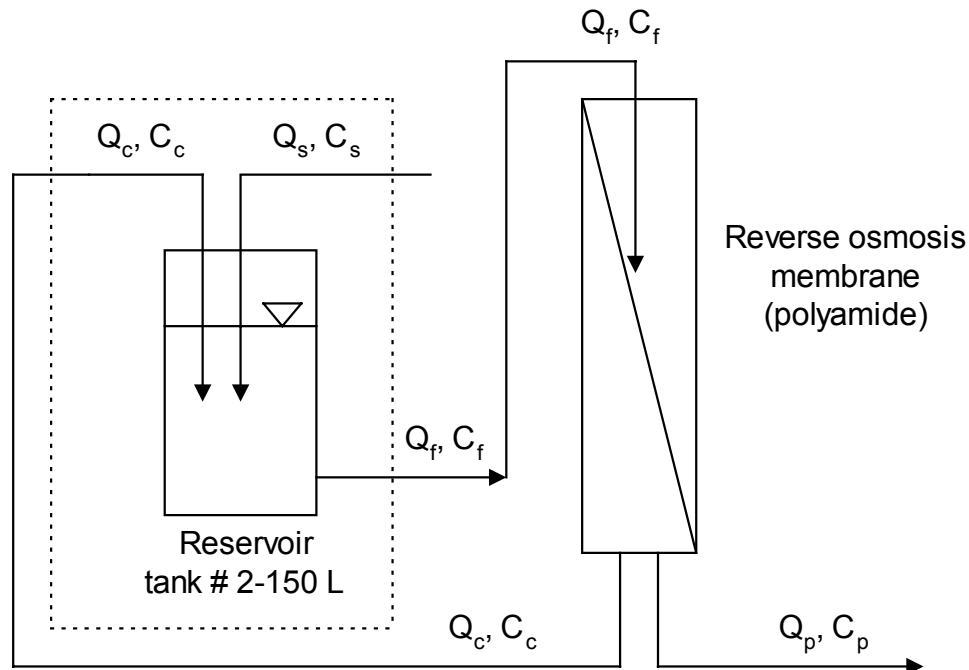
$$\Delta P_{allowable} = \frac{r_{max} b + A_m L_p \Delta\pi}{A_m L_p - r_{max} a}$$

จากสมการข้างต้นแทนค่าตัวแปรในสมการได้แก่ $r_{max} = 0.15$, $a = -1.224 \text{ L.hr}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$, $b = 3620.6 \text{ L.hr}^{-1}$, $L_p = 0.0364 \text{ L.m}^2 \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$, $A_m = 8.36 \text{ m}^2$ และไม่คำนึงถึงผลของค่าความดันออสโมติก ดังนั้นความดันที่อนุญาตในการดำเนินการในระบบมีค่าเท่ากับ 1113.1 kPa (161.5 psi)

4.2.4 แบบจำลองที่ใช้อธิบายการแยกสารอินทรีย์ด้วยระบบอาร์โอ

สมการแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สามารถเขียนขึ้นจากสมการมวลสมดุลเพื่อทำนายผลของประสิทธิภาพของระบบอาร์โอ รูปที่ 4-4 แสดงไดอะแกรมการดำเนินระบบของอาร์โอ โดยน้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจะถูกเก็บในถังพัก 150 ลิตร ก่อนถูกปั๊มเข้าระบบอาร์โอเพื่อแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นคอนเซนเตรต (concentrate) และส่วนที่เป็นเพอร์มิเอต (permeate) ขณะเดียวกันน้ำที่ผ่านการบำบัด (Source water) จะถูกเติมเข้าในถังพักเพื่อให้ปริมาตรคงที่จนถึงปริมาณน้ำที่กำหนดไว้คือ ประมาณ 1,000 ลิตร หลังจากนั้นจะเปลี่ยนการดำเนินระบบเป็นแบบปริมาตรไม่คงที่ ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์จะมีค่าสูงมาก ดังนั้นการเขียนสมการสมดุลสามารถเขียนออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่ดำเนินการระบบแบบปริมาตรคงที่ (Constant volume) และกรณีดำเนินการระบบแบบปริมาตรไม่คงที่ (Variable volume) โดยทั่วไปสมการมวลสมดุลเขียนได้ดังนี้

$$accumulation = input - output \pm generation \text{ or } lost$$



รูปที่ 4-4 โค้ดแแกรมการดำเนินการของระบบอาร์โอ

สมมุติสมการมวลสมดุลไม่รวมผลของการเพิ่มและการลดของมวลในระบบ ดังนั้นจะไม่มี
เทอมของค่า Generation หรือ Lost สมการลดรูปได้ดังนี้

$$accumulation = input - output$$

จากรูปข้างต้นเส้นปะแสดงระบบที่ต้องการพิจารณาประกอบด้วยถังพักมีปริมาตร 150 ลิตร
โดยน้ำที่เข้าสู่ระบบเกิดจากสองส่วนคือส่วนที่เป็นคอนเซนเตรต (concentrate) ที่ผ่านมาจากระบบอาร์
โอ และส่วนที่เป็นน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น (Source water) ในการดำเนินการของระบบ มีการเติมน้ำ
ส่วนที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นนี้ลงไปเพื่อให้ปริมาตรของน้ำส่วนที่เข้าระบบอาร์โอมีค่าคงที่ ส่วนน้ำที่ถูก
ปั๊มเข้าสู่ระบบอาร์โอจะเป็นส่วนที่ออกจากถังพักในส่วนของ output ดังนั้นสมการมวลสมดุลของถัง
พักปริมาตร 150 ลิตร สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dC_r V_r}{dt} = Q_r C_r + Q_s C_s - Q_f C_f$$

โดยที่ C_r เท่ากับความเข้มข้นของคอนเซนเตรต [mg.L^{-1}] Q_r เท่ากับอัตราการไหลของคอน
เซนเตรต [L.min^{-1}] C_s เท่ากับความเข้มข้นของน้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น (Source water) [mg.L^{-1}]
 Q_s เท่ากับอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น [L.min^{-1}] C_f เท่ากับความเข้มข้นของน้ำที่
เข้าสู่ระบบอาร์โอ [mg.L^{-1}] Q_f เท่ากับอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ระบบอาร์โอ [L.min^{-1}] V_r เท่า
กับปริมาตรของถังพัก [$\sim 150 \text{ L}$] และ t เท่ากับเวลาในการดำเนินระบบอาร์โอ [min]

สำหรับระบบอาร์โอมวลสมดุล ในสภาวะคงที่ (Steady state) มวลเข้าสู่ระบบเท่ากับมวลออกจากระบบ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Q_f C_f = Q_r C_r + Q_p C_p$$

โดยที่ C_p เท่ากับความเข้มข้นของเพอร์มีเอท (Permeate) [mg.L^{-1}] Q_r เท่ากับอัตราการไหลของเพอร์มีเอท [L.min^{-1}] ดังนั้นได้ความสัมพันธ์มวลสมดุลในถังพักดังนี้

$$\frac{dC_r V_r}{dt} = Q_s C_s - Q_p C_p$$

เขียนสมการใหม่โดยค่า $C_p = (1 - R_r) \cdot C_r$ จะได้

$$V_r \frac{dC_r}{dt} + C_r \frac{dV_r}{dt} = Q_s C_s - Q_p (1 - R_r) \cdot C_r$$

โดยที่ค่า R_r เท่ากับค่าการกำจัดสาร โดยพิจารณาจากความเข้มข้นของคอนเซนเตรต

การดำเนินการแยกสารอินทรีย์สามารถทำได้สองส่วนคือ 1) การดำเนินระบบโดยใช้ปริมาตรคงที่ (Constant volume) 2) การดำเนินระบบโดยใช้ปริมาตรที่ไม่คงที่ (Variable volume)

1) สำหรับการดำเนินระบบโดยใช้ปริมาตรคงที่ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร ($dV/dt = 0$) สมการลดรูปดังนี้

$$V_r \frac{dC_r}{dt} = Q_s C_s - Q_p (1 - R_r) \cdot C_r$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{dC_r}{dt} + \frac{Q_p (1 - R_r)}{V_r} \cdot C_r = \frac{Q_s C_s}{V_r}$$

แฟกเตอร์ที่ใช้ในการแก้สมการมีดังนี้

$$e^{\int \frac{Q_p (1 - R_r)}{V_r} dt} = e^{\frac{Q_p (1 - R_r)}{V_r} \cdot t}$$

ใช้แฟกเตอร์นี้คูณตลอด โดยกำหนดให้ $\beta = \frac{Q_p (1 - R_r)}{V_r}$

$$e^{\beta \cdot t} \cdot \left(\frac{dC_r}{dt} + \beta \cdot C_r \right) = \frac{Q_s C_s}{V_r} \cdot (e^{\beta \cdot t})$$

สมการความสัมพันธ์

$$\frac{d(e^{\beta \cdot t} \cdot C_r)}{dt} = e^{\beta \cdot t} \cdot \left(\frac{dC_r}{dt} + Q_p (1 - R_r) \cdot C_r \right)$$

จัดสมการใหม่ดังนี้

$$\frac{d(e^{\beta \cdot t} \cdot C_r)}{dt} = \frac{Q_s C_s}{V_r} \cdot (e^{\beta \cdot t})$$

ดังนั้น

$$(e^{\beta \cdot t} \cdot C_r) = \frac{Q_s C_s}{V_r} \cdot \int e^{\beta \cdot t} dt$$

จะได้

$$(e^{\beta \cdot t} \cdot C_r) = \frac{Q_s C_s}{V_r \beta} \cdot e^{\beta \cdot t} + K$$

ถ้า K หาโดยแทนค่า $t = 0$; $C_r = C_{r,0}$

$$K = C_{r,0} - \frac{Q_s C_s}{V_r \beta}$$

แทนค่า K เพื่อหาสมการหาค่า C_r

$$C_r = C_{r,0} \cdot e^{-\lambda \cdot t} + \frac{Q_s C_s}{V_r \beta} (1 - e^{-\lambda \cdot t})$$

$$C_r = C_{r,0} \cdot e^{-\lambda \cdot t} + \frac{Q_s C_s}{Q_p (1 - R_r)} (1 - e^{-\lambda \cdot t})$$

โดยที่ $\lambda = \frac{Q_p (1 - R_r)}{V_{r,0}}$ และ $V_{r,0}$ เท่ากับปริมาตรเริ่มต้นของถังพักที่ใช้ ซึ่งสมการนี้

สามารถเป็นรูปแบบโดยทั่วไปของการหาความเข้มข้นของ C_r

2) สำหรับการดำเนินระบบโดยใช้ปริมาตรไม่คงที่ ดังนั้นสมการสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั้งหมดดังนี้

$$V_r \frac{dC_r}{dt} + C_r \frac{dV_r}{dt} = Q_s C_s - Q_p (1 - R_r) \cdot C_r$$

คำนวณหาปริมาตรได้จาก

$$\frac{dV_r}{dt} = Q_s + Q_r - Q_f = Q_s - Q_p$$

อินทิเกรตจะได้

$$\int_{V_{r,0}}^{V_r} dV_r = (Q_s - Q_p) \int_0^t dt$$

$$V_r = V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t$$

แทนค่าในสมการมวลสมดุลจะได้

$$[V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t] \frac{dC_r}{dt} + C_r(Q_s - Q_p) = Q_s C_s - Q_p(1 - R_r) \cdot C_r$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\begin{aligned} [V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t] \frac{dC_r}{dt} + [Q_s - R_r Q_p] \cdot C_r &= Q_s C_s \\ \frac{dC_r}{dt} + \frac{[Q_s - R_r Q_p]}{[V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t]} \cdot C_r &= \frac{Q_s C_s}{[V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t]} \end{aligned}$$

แฟกเตอร์ที่ใช้ในการแก้สมการ

$$\begin{aligned} e^{\int \frac{[Q_s - R_r Q_p]}{[V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t]} \cdot dt} &= e^{\frac{[Q_s - R_r Q_p]}{(Q_s - Q_p)} \int \frac{V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t}{V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t}} = e^{\frac{[Q_s - R_r Q_p]}{(Q_s - Q_p)} \cdot \ln(V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)} \\ e^{\int \frac{[Q_s - R_r Q_p]}{[V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t]} \cdot dt} &= (V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^{\frac{[Q_s - R_r Q_p]}{(Q_s - Q_p)}} \end{aligned}$$

กำหนดให้ $\kappa = \frac{Q_s - R_r Q_p}{Q_s - Q_p}$ ดังนั้น

$$e^{\int \frac{[Q_s - R_r Q_p]}{[V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t]} \cdot dt} = (V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa$$

ใช้แฟกเตอร์คูณสมการมวลสมดุลตลอดจะได้

$$\begin{aligned} (V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa \frac{dC_r}{dt} + (V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^{\kappa-1} \cdot [Q_s - R_r Q_p] \cdot C_r \\ = Q_s C_s \cdot (V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^{\kappa-1} \end{aligned}$$

จัดรูปสมการใหม่พร้อมทั้งแก้สมการจะได้

$$(V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa \cdot C_r = Q_s C_s \cdot \int (V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^{\kappa-1} dt$$

ดังนั้น

$$(V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa \cdot C_r = \frac{Q_s C_s}{(Q_s - Q_p)} \cdot \frac{(V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa}{\kappa} + K$$

ถ้า K หาโดยแทนค่า $t = 0$; $C_r = C_{r,0}$

$$K = V_{r,0}^\kappa \cdot C_{r,0} - \frac{Q_s C_s}{(Q_s - Q_p)} \cdot \frac{(V_{r,0})^\kappa}{\kappa}$$

แทนค่า K เพื่อหาสมการหาค่า C_r

$$(V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa \cdot C_r = \frac{Q_s C_s}{(Q_s - Q_p)} \cdot \frac{(V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa}{\kappa} + K$$

$$\begin{aligned} (V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa \cdot C_r &= \frac{Q_s C_s}{(Q_s - Q_p)} \cdot \frac{(V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa}{\kappa} + \\ &\quad V_{r,0}^\kappa \cdot C_{r,0} - \frac{Q_s C_s}{(Q_s - Q_p)} \cdot \frac{(V_{r,0})^\kappa}{\kappa} \\ C_r &= \frac{Q_s C_s}{(Q_s - Q_p)} \cdot \frac{1}{\kappa} + \frac{V_{r,0}^\kappa \cdot C_{r,0}}{(V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa} - \frac{Q_s C_s}{(Q_s - Q_p)} \cdot \frac{(V_{r,0})^\kappa}{\kappa} \cdot \frac{1}{(V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa} \end{aligned}$$

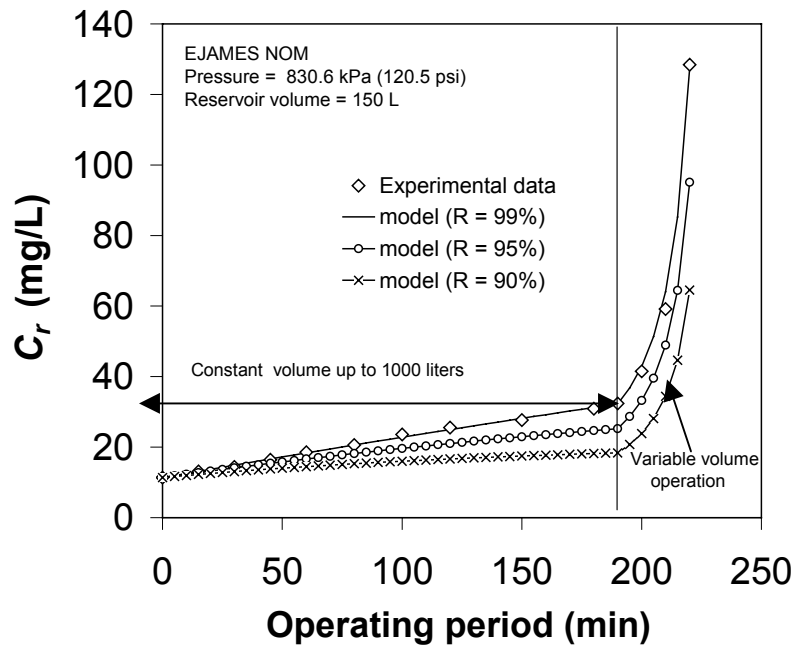
$$C_r = \frac{Q_s C_s}{(Q_s - Q_p)} \cdot \frac{1}{\kappa} + \frac{V_{r,0}^\kappa}{(V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa} [C_{r,0} - \frac{Q_s C_s}{(Q_s - Q_p)} \cdot \frac{1}{\kappa}]$$

$$\text{แทนค่า } \kappa = \frac{Q_s - R_r Q_p}{Q_s - Q_p}$$

$$C_r = \frac{Q_s C_s}{(Q_s - R_r Q_p)} \cdot + \frac{V_{r,0}^\kappa}{(V_{r,0} + (Q_s - Q_p) \cdot t)^\kappa} [C_{r,0} - \frac{Q_s C_s}{(Q_s - R_r Q_p)}]$$

สมการนี้เป็นสมการที่ใช้โดยทั่วไปในการดำเนินระบบในกรณีที่มีปริมาณไม่คงที่

ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในถังพักระหว่างการแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติ แสดงได้ดังรูปที่ 4-5 ข้อมูลที่แสดงในสัญลักษณ์รูป “จุด” เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ส่วนสัญลักษณ์ที่เป็น“เส้น” เพียงอย่างเดียว เป็นข้อมูลที่ได้การคำนวณความเข้มข้นของสารอินทรีย์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่มีค่าการกำจัดเท่ากับ 98.5% เส้นอื่นที่มีสัญลักษณ์ $\diamond$ และ $\times$ ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ค่าการกำจัดเท่ากับ 95% และ 90% ตามลำดับ

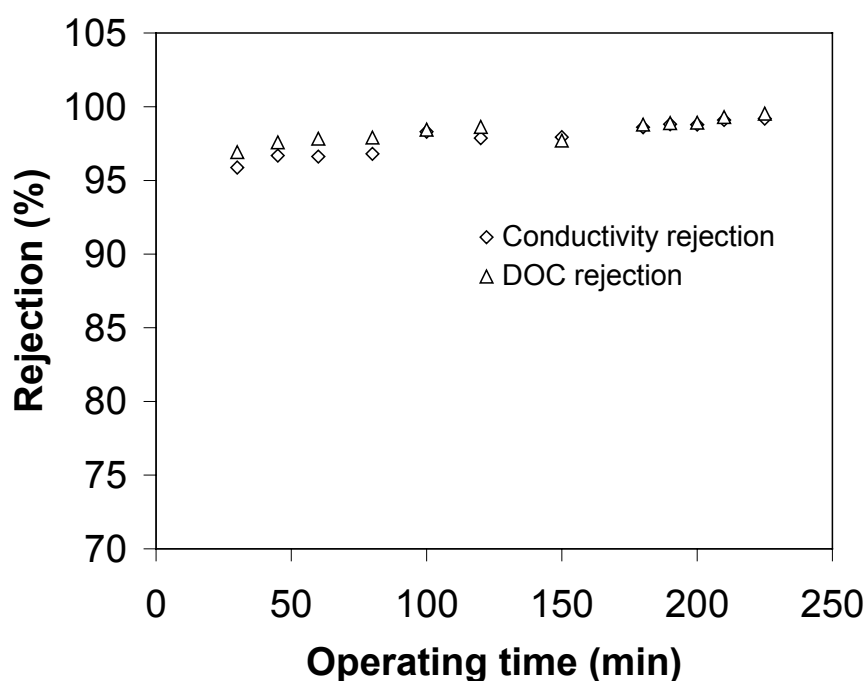


รูปที่ 4-5 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในถังพักระหว่างการแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติ

การดำเนินการแยกสารอินทรีย์แบ่งออกเป็นสองช่วงคือช่วงที่ปริมาตรคงที่กับปริมาตรไม่คงที่ สมการแบบจำลองที่ใช้จึงแบ่งออกเป็นสองช่วงดังกล่าว จากกราฟช่วงที่มีปริมาตรคงที่ ความเข้มข้นของคอนเซนเตรตมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงจากความเข้มข้นประมาณ 11.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงประมาณ 30.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลาจาก 0 ถึง 180 นาที (3 ชั่วโมง) โดยปริมาตรของน้ำที่ใช้ประมาณ 1,000 ลิตร หลังจากเวลา 180 นาที ปริมาตรน้ำเริ่มลดลงเนื่องจากไม่มีมวลของน้ำเติมเข้าสู่ถังพัก ($Q_s C_s = 0$) น้ำที่ออกจากระบบจะเป็นน้ำเพอร์มิเอท ส่วนที่เป็นคอนเซนเตรตจะมีความเข้มข้นสูงมากขึ้นในระยะเวลาที่สั้น ดังนั้นข้อมูลที่ได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องขณะที่ค่าการกำจัดที่ได้จากแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 98.5% แบบจำลองที่ทำนายผลการกำจัดประมาณ 95% และ 90% ถูกแสดงเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารอินทรีย์ของระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอ ความเข้มข้นที่ได้จากแบบจำลองมีค่าลดลงตามค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัด (R_p) ความเข้มข้นสุดท้ายที่วัดได้หลังจากหยุดการทดลองมีค่าประมาณ 128.5 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เปอร์เซ็นต์การกำจัดประมาณ 98.5%

4.2.5 การกำจัดสารอินทรีย์และมวลที่เก็บได้จากการแยกสารอินทรีย์

รูปที่ 4-6 ค่าการกำจัดของการนำไฟฟ้าและคาร์บอนทั้งหมดของสารอินทรีย์ เปอร์เซ็นต์การกำจัดของค่าการนำไฟฟ้าและคาร์บอนทั้งหมดของสารอินทรีย์มีค่าต่ำในช่วงแรกประมาณมากกว่า 95% และค่าการกำจัดมีค่าสูงขึ้นและเริ่มคงที่โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 97.9% และ 98.5% สำหรับค่าการกำจัดของการนำไฟฟ้าและคาร์บอนทั้งหมดของสารอินทรีย์ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าการกำจัดของสารอินทรีย์จะมีความสูงขึ้นในช่วงที่มีการดำเนินระบบแบบปริมาตรไม่คงที่ โดยที่มวลสะสมที่อยู่ในระบบมีความสูงขึ้นขณะเดียวกันการกำจัดสารอินทรีย์ก็มีความสูงขึ้นโดยประมาณมากกว่า 99%



รูปที่ 4-6 ค่าการกำจัดของการนำไฟฟ้าและคาร์บอนทั้งหมดของสารอินทรีย์

มวลที่เก็บได้หลังจากการแยกสารอินทรีย์ โดยทั่วไปค่าการกระจายมวลของสารอินทรีย์แยกเป็นค่าคาร์บอนที่อยู่ในรูปของคอนเซนเตรต การล้างโดยใช้น้ำเพอร์มีเอท การล้างโดยใช้สารเคมี โซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่าคาร์บอนที่ได้จากเก็บตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ ส่วนสารคาร์บอนที่ไม่ได้มารวมในระบบจะเป็นคาร์บอนจากเพอร์มีเอท การคำนวณค่าสารอินทรีย์ที่เก็บได้หลังการแยกสารอินทรีย์สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\% \text{ Total mass recovery} = \frac{V_r C_r + V_{flush} C_{flush} + V_{NaOH} C_{NaOH} + \sum V_{sample} C_{sample}}{V_{initial} C_{initial}}$$

โดยที่ V_r เท่ากับปริมาตรของสารอินทรีย์ในส่วนคอนเซนเตรต [L] C_r เท่ากับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในส่วนคอนเซนเตรต [mg.L^{-1}] V_{flush} เท่ากับปริมาตรที่ได้หลังการล้างระบบด้วยน้ำเพอร์มิเอท [L] C_{flush} เท่ากับความเข้มข้นที่วัดได้หลังการล้างระบบด้วยน้ำเพอร์มิเอท [mg.L^{-1}] V_{NaOH} เท่ากับปริมาตรที่ได้หลังการล้างระบบด้วยน้ำเพอร์มิเอทปรับพีเอชประมาณ 10 [L] C_{NaOH} เท่ากับความเข้มข้นที่วัดได้หลังการล้างระบบด้วยน้ำเพอร์มิเอทปรับพีเอชประมาณ 10 [mg.L^{-1}] V_{sample} เท่ากับปริมาตรที่เก็บตัวอย่างระหว่างการแยกสารอินทรีย์ [L] [$\sim 40 \text{ mL}$] C_{sample} เท่ากับความเข้มข้นที่วัดได้ของแต่ละตัวอย่างระหว่างการแยกสารอินทรีย์ [mg.L^{-1}] $V_{initial}$ เท่ากับปริมาตรทั้งหมดที่ใช้ในการแยกสารอินทรีย์ [L] [$\sim 1000 \text{ L}$] $C_{initial}$ เท่ากับความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้นหลังผ่านการบำบัดเบื้องต้น [mg.L^{-1}]

มวลที่อยู่ในรูปของเพอร์มิเอทจะไม่นำมารวมเนื่องจากเป็นส่วนที่ทิ้งไปเพื่อใช้ในการทำความสะอาดระบบเนื่องจากการกำจัดสารอินทรีย์โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 98.5% ดังนั้น มวลที่สูญเสียไปจากการแยกสารอินทรีย์เท่ากับความเข้มข้นของสารคาร์บอนในน้ำเพอร์มิเอท คูณกับปริมาตรของน้ำเพอร์มิเอท ตารางที่ 4.3 แสดงมวลทั้งหมดที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการแยกสารอินทรีย์ในน้ำ

ตารางที่ 4.3 มวลทั้งหมดที่ได้จากการแยกสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติ

พารามิเตอร์	มวลทั้งหมด [มิลลิกรัม]
มวลของเริ่มต้นทั้งหมด	4587.3
มวลของคอนเซนเตรต	1839.7
มวลของการล้างโดยใช้น้ำเพอร์มิเอท	1901.7
มวลของการล้างโดยใช้น้ำเพอร์มิเอทปรับพีเอช	348.6
มวลทั้งหมดจากการเก็บตัวอย่าง	31.9
มวลทั้งหมดจากน้ำเพอร์มิเอท	459.2
เปอร์เซ็นต์มวลทั้งหมดที่ได้	99.8%
เปอร์เซ็นต์มวลสารอินทรีย์ที่เก็บได้	90%

มวลเริ่มต้นทั้งหมดเท่ากับ 4587.3 มิลลิกรัมโดยมีปริมาตรน้ำประมาณ 1,000 ลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 4.54 มิลลิกรัมต่อลิตร มวลที่ได้หลังผ่านการแยกสารอินทรีย์จะอยู่ในส่วนที่เป็นคอนเซนเตรตและมวลที่ได้จากการล้างโดยใช้น้ำเพอร์มีเอทคิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 90.8% ส่วนมวลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างมีปริมาตรน้อยประมาณ 0.77% มวลที่อยู่ในส่วนของน้ำเพอร์มีเอทไม่สามารถเก็บได้คิดเป็นประมาณ 10% ของปริมาณมวลสารอินทรีย์ทั้งหมด ซึ่งส่วนใหญ่เกิดการสูญเสียมวลในน้ำเพอร์มีเอทที่มีค่าการกำจัดสารอินทรีย์โดยเฉลี่ยประมาณ 98.5% ส่วนสารอินทรีย์ที่เก็บได้ประมาณ 90% ของปริมาณมวลสารอินทรีย์ทั้งหมดซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการทดสอบการอุดตันของระบบกรองแบบนาโน จากการตรวจสอบมวลทั้งหมดที่ได้ของแต่ละส่วนที่มวลของสารอินทรีย์แยกไปคิดแล้วมีปริมาณมวลที่ไม่สามารถนำมาคิดได้ค่อนข้างน้อย โดยเปอร์เซ็นต์มวลทั้งหมดรวมแล้วในแต่ละส่วนคิดเป็น 99.8% จากปริมาณมวลทั้งหมด

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองแบบนาโน

น้ำที่ผ่านกระบวนการแยกสารอินทรีย์จากระบบอาร์โอในส่วนของคอนเซนเตรตถูกนำมาเตรียมเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองแบบนาโนและศึกษากลไกการอุดตันของสารละลายอินทรีย์บนเยื่อกรองแบบนาโน

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และความดันของระบบ

แผ่นเยื่อกรองแบบนาโนถูกทดสอบเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำบริสุทธิ์ (DI) ต่อพื้นที่ของเยื่อกรองแบบนาโนที่แปรตามความดันของระบบ ความดันที่ใช้ในการทดสอบประมาณ 205 kPa ถึง 618 kPa (30 psi - 90 psi) และไม่คำนึงถึงผลของความดันออสโมติก เนื่องจากน้ำ DI เป็นน้ำที่บริสุทธิ์และเป็นสารละลายที่เจือจางมาก รูปที่ 4-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับความดันในการดำเนินระบบ จากกราฟ เมื่อความดันมีค่ามากขึ้น ส่งผลต่อค่าฟลักซ์ให้มากขึ้น ค่าฟลักซ์มีค่าเท่ากับอัตราการไหลของเพอร์มีเอท (Q_p) ต่อพื้นที่เยื่อกรอง (A_m) ความชันของกราฟแสดงค่าการซึมผ่านของระบบเยื่อกรอง (Membrane permeability, L_p) แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$J_v = L_p \cdot (\Delta P) = \frac{Q_p}{A_m}$$

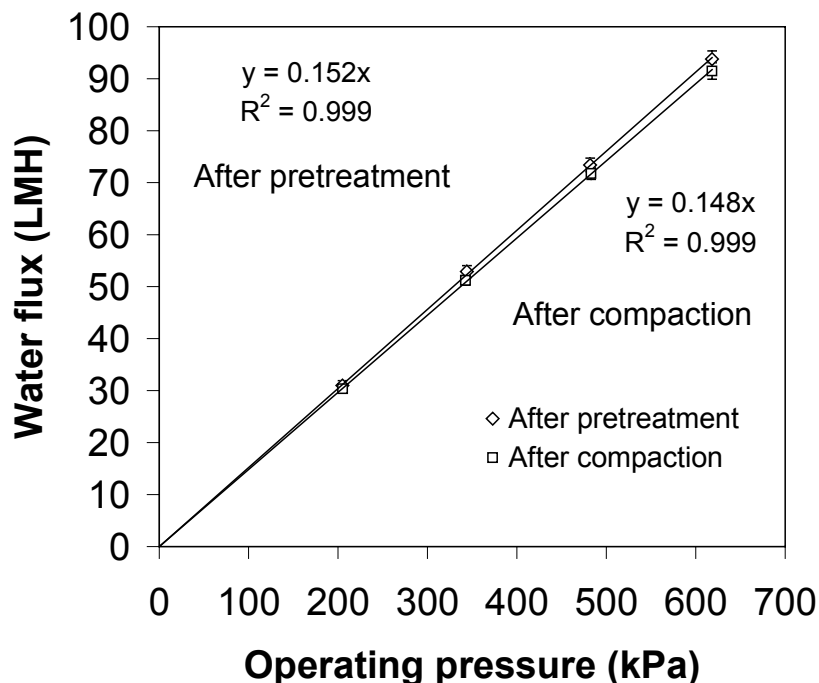
โดยที่ J_v เท่ากับฟลักซ์ของการไหลผ่านของน้ำ มีหน่วยเป็น [$\text{LM}^{-2}\text{H}^{-1}, \text{ms}^{-1}$]

Q_p เท่ากับอัตราการไหลของเพอร์มีเอท [Lh^{-1}]

A_m เท่ากับพื้นที่หน้าตัดของระบบเยื่อกรอง [m^2]

L_p เท่ากับค่าการซึมผ่านของระบบเยื่อกรอง [$\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{kPa}^{-1}$ (LMH. kPa^{-1}), $\text{ms}^{-1}.\text{kPa}^{-1}$]

ΔP เท่ากับความดันในการดำเนินระบบ [kPa หรือ psi]

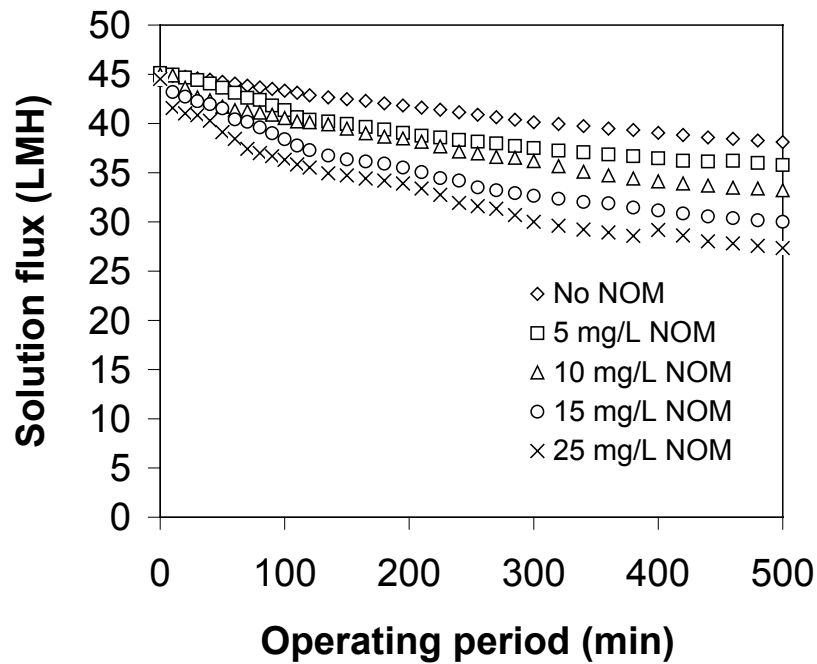


รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับความดันในการดำเนินระบบ

ค่าการซึมผ่านของระบบเยื่อกรองแบบนาโนฟลักซ์ที่ได้หลังการทำความสะอาดด้วยกรดซิตริกและเบสหรือมีค่าเท่ากับ $0.152 \text{ LMH} \cdot \text{kPa}^{-1}$ หลังจากการทดสอบเพื่อลดปัญหาการอุดตันของแผ่นเยื่อกรองแล้ว ค่าการซึมผ่านของระบบเยื่อกรองแบบนาโนเท่ากับ $0.148 \text{ LMH} \cdot \text{kPa}^{-1}$ คิดเป็นการลดลงของฟลักซ์ประมาณ 2.6 % จากนั้นจึงทดสอบด้วยสารละลายอินทรีย์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเยื่อกรองและการอุดตันบนผิวของเยื่อกรองแบบนาโนต่อไป

4.3.2 ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อประสิทธิภาพของเยื่อกรองนาโน

ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) มีผลต่อค่าการกำจัดของสารอินทรีย์และฟลักซ์ระหว่างการดำเนินระบบ สารละลาย NOM ที่เตรียมขึ้นมามีค่าพีเอชเท่ากับ 7 และปรับค่ากำลังของไอออนเท่ากับ 0.01 M ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โดยวัดค่าการนำไฟฟ้าได้เท่ากับ $1170 \mu\text{m/cm}$ ที่อุณหภูมิ 25°C ความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ที่ใช้ทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 25 mg C/L รูปที่ 4-8 แสดงผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อฟลักซ์ของสารละลาย



รูปที่ 4-8 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ต่อฟลักซ์ของสารละลาย

จากกราฟจะสังเกตว่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 25 mg/L ส่งผลให้อัตราการไหลของเพอร์มีเอทมีค่าลดลงตามลำดับ การลดลงของอัตราการไหลของเพอร์มีเอทอาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้นบนผิวของเยื่อกรองแบบนาโน

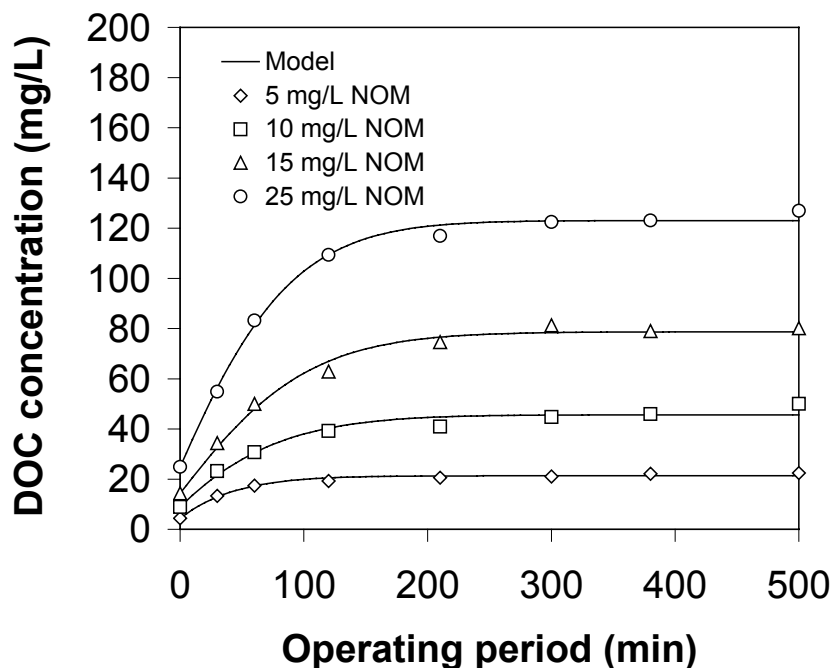
ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยการวัดสารอินทรีย์คาร์บอนสามารถคำนวณโดยใช้สมการมวลสมดุลโดยพิจารณาการดำเนินระบบใน crossflow bench-scale test cell ที่มีค่าความเร็วบนผิวของระบบเยื่อกรองแบบนาโน เป็นการเกิดปฏิกิริยาในลักษณะ Continuous stirred-tank reactor (CSTR) ซึ่งได้มีการทดสอบจากผลของ Tracer study ดังนั้นสมการมวลสมดุลแสดงได้ดังนี้

$$V_s \frac{dC_r}{dt} = Q_f C_f - Q_r C_r - Q_p C_p - k_a (C_{ss} - C_r) V_s$$

โดยที่ V_s เท่ากับปริมาตรของระบบประมาณ 72 mL ค่า C_r เท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนในส่วนของคอนเซนเตรต [mg.L^{-1}] ค่า Q_r เท่ากับอัตราการไหลของน้ำในส่วนของคอนเซนเตรต [L.min^{-1}] ค่า C_f เท่ากับความเข้มข้นของคาร์บอนในส่วนของน้ำที่ไหลเข้าระบบ (feed) [mg.L^{-1}] ค่า Q_f เท่ากับอัตราการไหลของน้ำในส่วนของน้ำที่ไหลเข้าระบบ [L.min^{-1}] ค่า C_p เท่ากับความเข้มข้น

คาร์บอนในส่วนของเพอร์มีเอท (permeate) [mg.L^{-1}] ค่า Q_p เท่ากับอัตราการไหลของน้ำในส่วนของเพอร์มีเอท (permeate) [L.min^{-1}] ค่า C_{ss} เท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนในสภาวะสมดุล (steady state condition) [mg.L^{-1}] ค่า k_a เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารทั้งหมด (overall mass transfer coefficient) [min^{-1}] ($k_a = K_a a_s$) เท่ากับผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (K_a) [m.min^{-1}] กับอัตราส่วนของพื้นที่เยื่อกรองต่อปริมาตรของระบบ (a_s) [$\text{m}^2.\text{m}^{-3}$] และค่า t เท่ากับเวลาที่ใช้ในการดำเนินระบบ [min] จากแบบจำลองนี้ค่า k_a และค่า C_{ss} เป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ระหว่างข้อมูลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการแก้สมการโดยใช้ Fourth-order Runge-Kutta routine ซึ่งทำให้ผลรวมของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองน้อยที่สุด หรือ sum of squared error (SSE) โดยจะใช้แก้สมการของแต่ละชนิดของความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์

รูปที่ 4-9 แสดงความเข้มข้นของคาร์บอนในคอนเซนเตรต จากกราฟจุดที่ได้เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ขณะที่เส้นเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่มีการปรับค่า k_a และค่า C_{ss} ให้มีค่า SSE น้อยที่สุด พบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการเพิ่มของความเข้มข้นมีค่ามากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงต้นของการดำเนินระบบและค่าความเข้มข้นเริ่มคงที่ C_{ss} เมื่อเวลาในการดำเนินระบบมีค่ามากกว่า 100 นาที การใช้สารละลายอินทรีย์เริ่มต้นที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์มากขึ้นบนผิวของเยื่อกรองซึ่งส่งผลต่อการลดลงของอัตราการไหลของเพอร์มีเอท



รูปที่ 4-9 ความเข้มข้นของคาร์บอนในคอนเซนเตรต

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ จากตารางจะสังเกตว่า ค่าการกำจัดของสารโซเดียมคลอไรด์โดยไม่มีสารละลายอินทรีย์มีค่าเท่ากับ 3.3% ในน้ำเข้าระบบ (Feed) และ 20.9% ในคอนเซนเตรต ค่าการกำจัดในคอนเซนเตรตมีค่ามากกว่าเนื่องจากความเข้มข้นในรีเทนเนตรตสูงขึ้นระหว่างการทดสอบ การเพิ่มปริมาณของสารละลายอินทรีย์ทำให้เพิ่มค่าการกำจัดของสารโซเดียมคลอไรด์โดยใช้เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า และเพิ่มการกำจัดของสารอินทรีย์ระหว่าง 75.3% ถึง 88.4% สำหรับ Feed และระหว่าง 94.9% ถึง 97.6% สำหรับคอนเซนเตรต การเพิ่มขึ้นของการกำจัดเกลือโซเดียมคลอไรด์และสารละลายอินทรีย์อาจเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างประจุบวกของสารโซเดียมและประจุลบของสารละลายอินทรีย์ทำให้เกิดการสะสมบนผิวของเยื่อกรองเป็นผลทำให้ค่าการกำจัดของสารอินทรีย์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสารละลายอินทรีย์ส่งผลต่อการเพิ่มค่าการกำจัดของสารอินทรีย์ ซึ่งแตกต่างจากทฤษฎีของระบบเยื่อกรองแบบอาร์โอที่ความเข้มข้นของสารมากขึ้นค่าการกำจัดมีค่าน้อยลง อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในเพอร์มิเททมีค่ามากขึ้นจากประมาณ 1.08 mg/L เป็น 3.2 mg/L ตามการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์

ตารางที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (mg/L)				
	0	5	10	15	25
$C_{p,NOM}$ (mg/L)	-	1.08	1.93	3.2	2.9
$C_{ss,NOM}$ (mg/L)	-	21.2	45.5	78.7	122.1
$R_{f,NOM}$ (%)	-	75.3	78.5	77.7	88.4
$R_{r,NOM}$ (%)	-	94.9	95.8	95.9	97.6
$R_{f,s}$ (%) (salt)	3.51	4.3	5.4	4.6	5.7
$R_{r,s}$ (%) (salt)	21.4	26.3	25.3	25.4	28.2
k_a (min^{-1})	0.398	0.510	0.517	0.519	0.521
K_a (ms^{-1})	3.41×10^{-5}	4.38×10^{-5}	4.43×10^{-5}	4.45×10^{-5}	4.47×10^{-5}
Average K_a (ms^{-1})	3.41×10^{-5}	4.43×10^{-5}			

โดยที่ $R_f = (1 - \frac{C_p}{C_f}) \times 100$ (โดยที่ C_f = feed concentration) และ $R_r = (1 - \frac{C_p}{C_r}) \times 100$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารทั้งหมด (k_a) ได้จากการวิเคราะห์ระหว่างข้อมูลจากการทดลองและแบบจำลองของมวลสมดุลมีค่าประมาณ $0.51 - 0.521 \text{ min}^{-1}$ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารที่มีองค์ประกอบทั้งสารอินทรีย์และสารโซเดียมคลอไรด์มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ $4.43 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารโซเดียมคลอไรด์อย่างเดียวมีค่าเท่ากับ $3.41 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ ค่าการถ่ายเทมวลสารของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ได้จากการวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน (NF70, DOW-Filmtec, Co.Ltd.) มีค่าประมาณ $1.6 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ (Mattaraj, 2001) ส่วนค่าการถ่ายเทมวลสารของสารอินทรีย์ที่ได้จากการคำนวณประมาณ $4.7 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ จากรายงานโดย Kilduff *et al.*, (2002) จะเห็นว่าผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของโซเดียมคลอไรด์มีค่าสูงกว่า ค่าการกระจายของสารละลายอินทรีย์เนื่องจากขนาดของสารโซเดียมคลอไรด์ มีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของสารละลายอินทรีย์ สำหรับเยื่อกรองที่ทดสอบนี้มีค่ากำจัดเกลือค่อนข้างต่ำประมาณ 4.3 – 5.7% (Feed rejection) ดังนั้นการเกิดขึ้นของสารโซเดียมคลอไรด์บนผิวของเยื่อกรองมีค่าน้อยอาจเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่ได้มีค่ามากกว่าเยื่อกรองที่ขนาดค่อนข้างเล็กเช่นเปอร์เซ็นต์การกำจัดเกลือโซเดียมคลอไรด์โดยเยื่อกรองนาโนแบบ NF70 46.3% (feed rejection) (Kilduff *et al.*, 2004(b)) ที่สภาวะของพีเอชเท่ากับ 7 และค่ากำลังของไอออนเท่ากับ 0.01 M โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของการค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสามารถเขียนได้ดังนี้

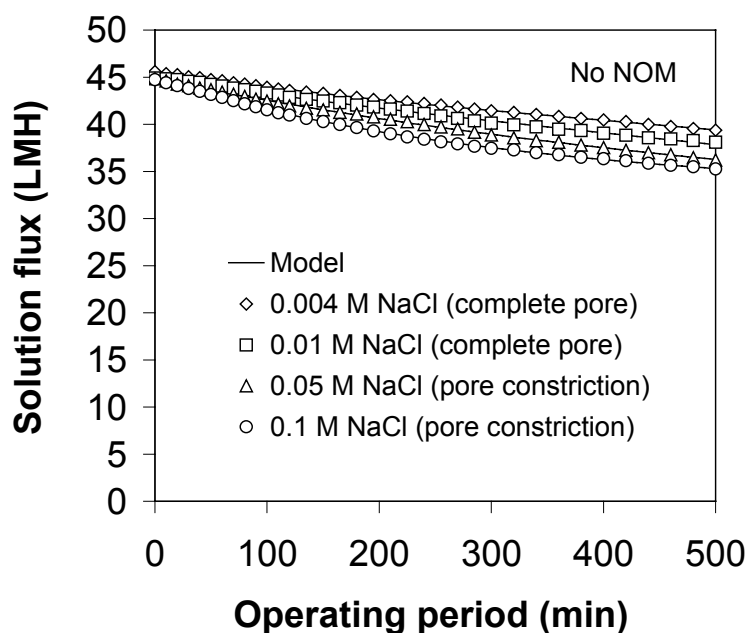
$$K_a = \frac{D}{\delta}$$

โดยที่ D เท่ากับสัมประสิทธิ์การแพร่ [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$] และค่า δ เท่ากับความหนาของชั้นเจล บนผิวของเยื่อกรอง [m]

4.3.3 ผลของกำลังไอออนต่อการทดสอบระบบเยื่อกรอง

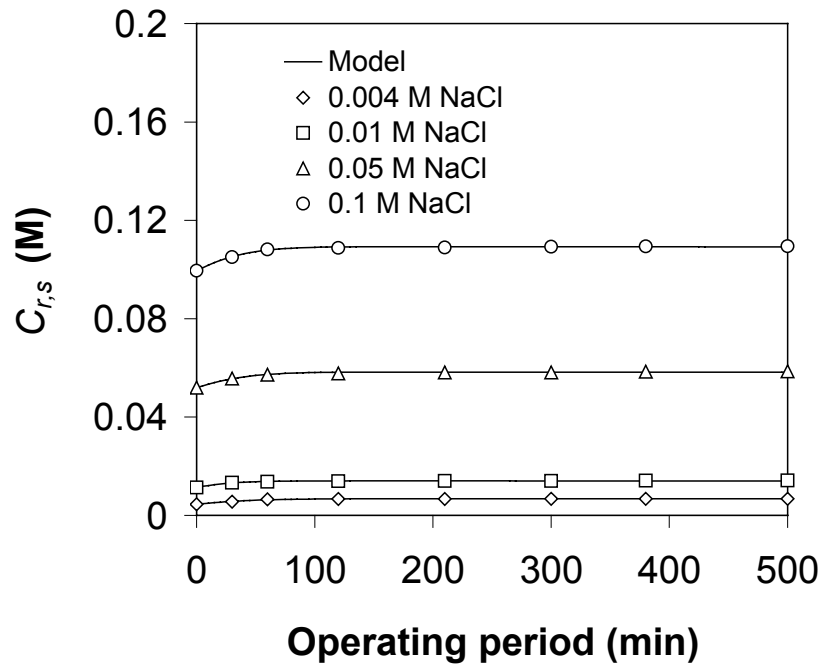
จากการทดสอบการลดลงของฟลักซ์ที่กำลังไอออนของสารละลายค่าต่าง ๆ โดยปราศจากสารอินทรีย์พบว่า ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของกำลังไอออนโดยการปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4-10 ทั้งนี้เนื่องจากผลของประจุบวกที่รวมตัวของประจุลบจากแผ่นเยื่อกรองทำให้เกิดชั้น Double layer บนผิวของเยื่อกรองส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองโดยการลดลงของฟลักซ์และการลดลงของค่าการกำจัดของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จะสังเกตว่าความเข้มข้นของสารโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่ำประมาณ 0.004 M และ 0.01 M NaCl จะให้กลไกการอุดตันชนิด Complete pore blocking เนื่องจากผลของ Double layer บนผิวของเยื่อกรองลดลงจากการรวมตัวของระหว่างประจุบวกของสารและประจุลบของเยื่อกรอง ขณะเดียวกันกลไกการอุดตันบนผิวของเยื่อกรองเริ่มเปลี่ยนจากการอุดตันแบบ Complete pore blocking เป็นการอุดตันแบบ

Pore constriction (standard) ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.05 M NaCl และ 0.1 M NaCl อาจเนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์โดยตรงกับเยื่อกรองเนื่องจากความเข้มข้นที่สูงขึ้น

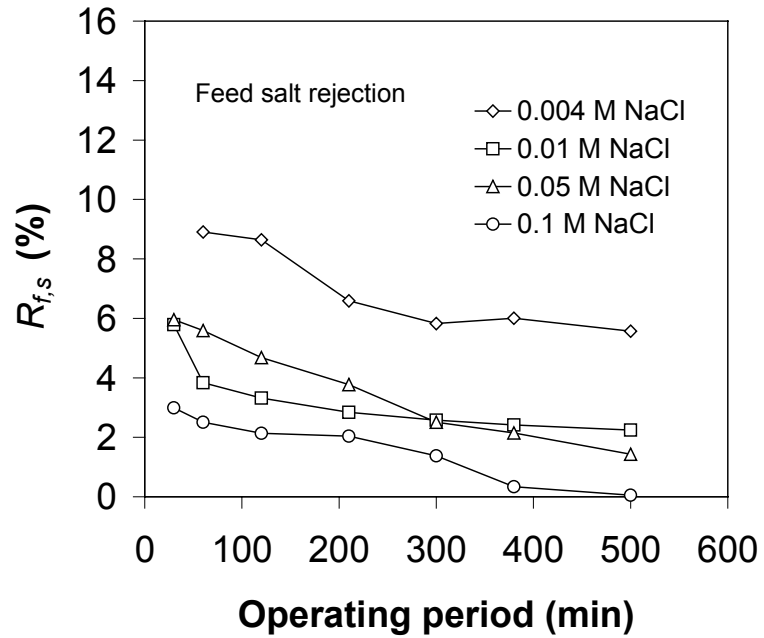


รูปที่ 4-10 การลดลงของฟลักซ์โดยกำลังไอออนโดยโซเดียมคลอไรด์

รูปที่ 4-11 แสดงความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในคอนเซนเตรต พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมคลอไรด์ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในคอนเซนเตรต อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของสารโซเดียมคลอไรด์ไม่มากนัก เนื่องจากความสามารถในการกักสารโซเดียมคลอไรด์โดยแผ่นเยื่อกรองนี้ค่อนข้างต่ำ รูปที่ 4-12 แสดงความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อการกำจัดโซเดียมคลอไรด์ใน Feed จากกราฟ ค่าการกำจัดของโซเดียมคลอไรด์ (วัดโดยค่าการนำไฟฟ้า) ลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารโซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้น และค่าการกำจัดลดลงตามระยะเวลาการกรองเนื่องจากผลของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นบนผิวของเยื่อกรอง

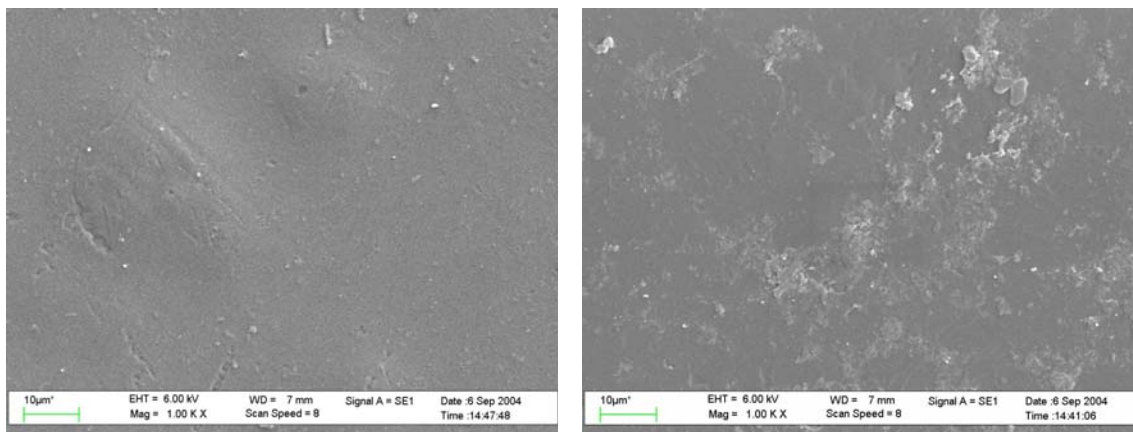


รูปที่ 4-11 ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในคอนเซนเตรต



รูปที่ 4-12 ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อการกำจัดโซเดียมคลอไรด์ใน Feed

รูปที่ 4-13 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวของเยื่อกรองด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า เปรียบเทียบกันระหว่าง (ก) เยื่อกรองแบบนาโนสะอาด และ (ข) เยื่อกรองแบบนาโนที่ผ่านการกรองสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ผลึกสีขาวน่าจะเป็นจากโซเดียมคลอไรด์ส่วนที่ถูกกักโดยเยื่อกรอง และติดค้างบนเยื่อกรองนาโน



(ก) เยื่อกรองแบบนาโนสะอาด

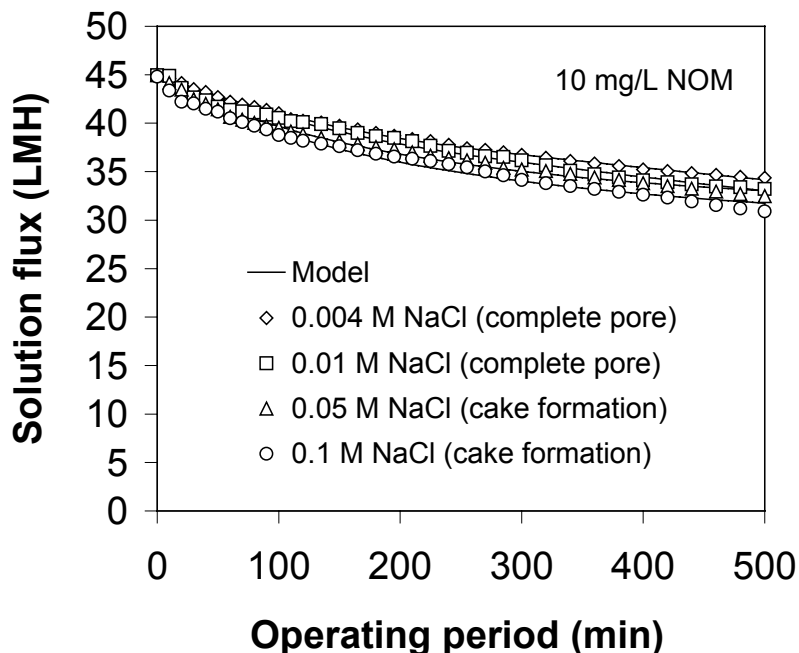
(ข) เยื่อกรองแบบนาโนที่ผ่านการกรอง NaCl

รูปที่ 4-13 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวของเยื่อกรองแบบนาโน กำลังขยาย 1000 เท่า
(ก) เยื่อกรองแบบนาโนสะอาด และ (ข) เยื่อกรองแบบนาโนที่ผ่านการกรอง NaCl

4.3.4 ผลรวมของกำลังไอออนและสารอินทรีย์ต่อระบบเยื่อกรองแบบนาโน

รูปที่ 4-13 แสดงการลดลงของฟลักซ์โดยกำลังไอออนและสารอินทรีย์ จากกราฟจุดที่ได้เป็นผลจากการทดลอง กราฟเส้นได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม การทดลองนี้ใช้สารละลายอินทรีย์ประมาณ 10 mgC/L และเพิ่มกำลังไอออนโดยใช้สารโซเดียมคลอไรด์จาก 0.004 M ถึง 0.1 M NaCl จากการทดลองพบว่าการลดลงของฟลักซ์มากขึ้นตามปริมาณการเพิ่มกำลังของไอออนจาก 0.004 M ถึง 0.1 M แต่การลดลงของฟลักซ์มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก จากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองการอุดตัน พบว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังไอออนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกลไกการอุดตันบนผิวของเยื่อกรอง ที่ความเข้มข้นของกำลังไอออนต่ำประมาณ 0.004 M และ 0.01 M NaCl กลไกการเกิดการอุดตันเป็นแบบ complete pore blocking ส่วนหนึ่งอาจเนื่องมาจากผลของการจับตัวของประจุบวกของโซเดียมและประจุลบของเยื่อกรอง ซึ่งทำให้การไหลผ่านของเยื่อกรองเปลี่ยนไป สารอินทรีย์เองก็มีส่วนต่อการอุดตันของเยื่อกรองขณะที่การเกิดขึ้น Double layer ของเยื่อกรองมีค่าลดลงเนื่องจากผลของโซเดียมที่มีต่อเยื่อกรอง ที่ความเข้มข้นของกำลังไอออนสูงประมาณ 0.05 M และ 0.1

M NaCl กลไกการอุดตันที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์จากแบบจำลองเป็นการเกิดเค้กบนผิวของเยื่อกรอง (Cake formation) อาจเนื่องมาจากผลของประจุบวกโซเดียมกับประจุลบของสารอินทรีย์ทำให้ลดประจุของสารอินทรีย์ลงและเกิดการสะสมบนผิวของเยื่อกรอง



รูปที่ 4-14 การลดลงของฟลักซ์โดยกำลังไอออนและสารอินทรีย์

ตารางที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดไอออนและสารอินทรีย์ จากตารางพบว่าการเพิ่มโซเดียมคลอไรด์อย่างเดียวกจากความเข้มข้นประมาณ 0.004 ถึง 0.1 M ลดค่าการกำจัดของเกลือในฟีดและคอนเซนเตรต โดยการกำจัดในฟีดลดลงจาก 6.67% เป็น 1.51% และการกำจัดในคอนเซนเตรตบนผิวของเยื่อกรองลดลงจาก 37.3% เป็น 10.1% เนื่องจากผลของประจุบวกของโซเดียมที่รวมตัวกับประจุลบของเยื่อกรองส่งผลต่อความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้นดังนั้นค่าการกำจัดของเกลือมีค่าลดลงสำหรับสารละลายที่มีทั้งโซเดียมคลอไรด์และสารอินทรีย์ ค่าการกำจัดของเกลือในคอนเซนเตรตมีปริมาณมากขึ้นกว่าสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์อย่างเดียว อาจเนื่องจากการรวมตัวของประจุบวกโซเดียมกับประจุลบของสารอินทรีย์ทำให้เกิดการสะสมบนสารอินทรีย์ อย่างไรก็ตามค่าการกำจัดของเกลือที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่ำ (0.004 M NaCl) ค่าการกำจัดของเกลือมีค่าเท่ากับ 28.6% ต่ำกว่าค่าการกำจัดของเกลือที่ใช้โซเดียมคลอไรด์อย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากผลการรวมตัวของประจุบวกโซเดียมคลอไรด์ และประจุลบของเยื่อกรองมีน้อยกว่าที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ที่มีค่าสูงขึ้น ทำให้ความหนาชั้น Double layer ขยายตัวมากขึ้นและเกลือผ่านได้น้อยลง ทำให้ค่าการกำจัด

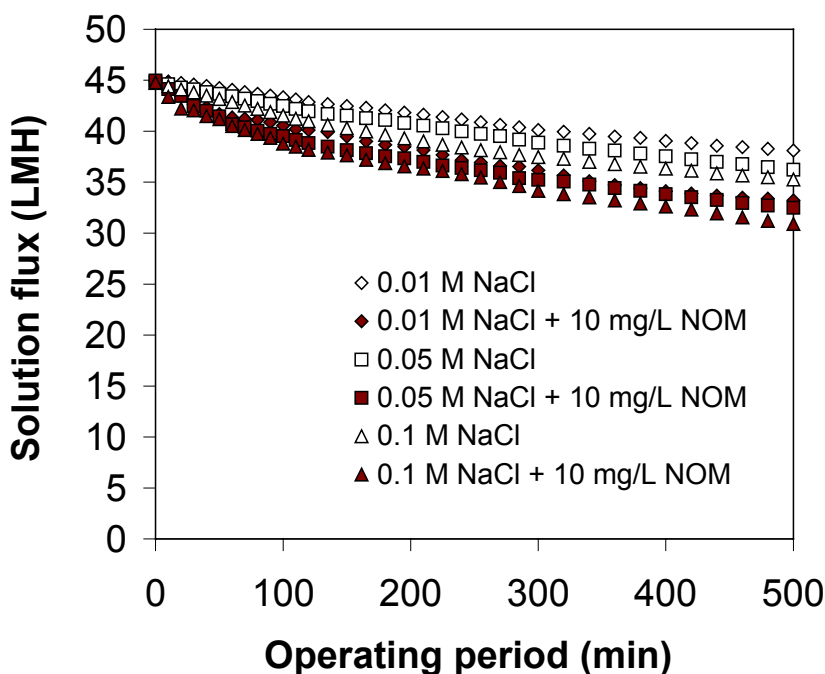
เกลือสูงขึ้นเป็น 37.3% อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์การใช้แบบจำลองการดูดซับยังพบว่าเกลือโซเดียมคลอไรด์ มีส่วนที่ส่งผลกระทบต่อเชื้อกรองโดยการลดลงของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ จากตารางยังพบว่าค่าการกำจัดเกลือในสารป้อน (Feed) มีค่าน้อยลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์มีค่าสูง เช่นที่ความเข้มข้นของ 0.05 M และ 0.1 M NaCl ขณะที่การกำจัดเกลือในคอนเซนเตรตมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น เป็นผลจากความเข้มข้นในคอนเซนเตรตที่มีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาการทดสอบ

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนและสารอินทรีย์

พารามิเตอร์	กำลังไอออนของโซเดียมคลอไรด์ (mol/L)			
	0.004	0.01	0.05	0.10
ไอออนของโซเดียมคลอไรด์อย่างเดียว				
$C_{p,s}$ ($C_{f,s}$) (mol/L)	0.0042 (0.0045)	0.011 (0.0114)	0.05 (0.052)	0.098 (0.0995)
$C_{ss,s}$ (mol/L)	0.0067	0.014	0.0577	0.109
$R_{f,s}$ (%)	6.67	3.51	3.85	1.51
$R_{r,s}$ (%)	37.3	21.4	13.3	10.1
ไอออนของโซเดียมคลอไรด์และสารอินทรีย์				
$C_{p,s}$ ($C_{f,s}$) (mol/L)	0.00389 (0.0043)	0.0105 (0.011)	0.0496 (0.0504)	0.0964 (0.0968)
$C_{ss,s}$ (mol/L)	0.0056	0.0141	0.059	0.108
$R_{f,s}$ (%)	6.98	4.55	1.59	0.413
$R_{r,s}$ (%)	28.6	25.5	15.9	10.7
$R_{f,NOM}$ (%)	78	78.5	77.9	64.7
$R_{r,NOM}$ (%)	95.2	94.9	95.3	91.3
$K_{a,s}$ (ms ⁻¹)	3.57×10^{-5}	3.40×10^{-5}	3.5×10^{-5}	3.37×10^{-5}
Average $K_{a,s}$ (ms ⁻¹)	3.46×10^{-5}			

การกำจัดสารอินทรีย์ที่ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นส่งผลต่อการลดลงของการกำจัดสารอินทรีย์อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ที่เกิดการอัดตัวกันมากขึ้นในชั้นเค้กบนผิวของเยื่อกรอง ทำให้ขนาดสารอินทรีย์ลดลงและสามารถผ่านเยื่อกรองได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการกำจัดของสารอินทรีย์จึงลดลง การพบว่าการเปลี่ยนแปลงรูปของสารอินทรีย์ถูกยืนยันโดย Kilduff *et al.* (2004b) ที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความต้านทานจำเพาะเนื่องจากเค้ก (Specific cake resistance) ที่เกิดผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของโมเลกุลของสารอินทรีย์เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์

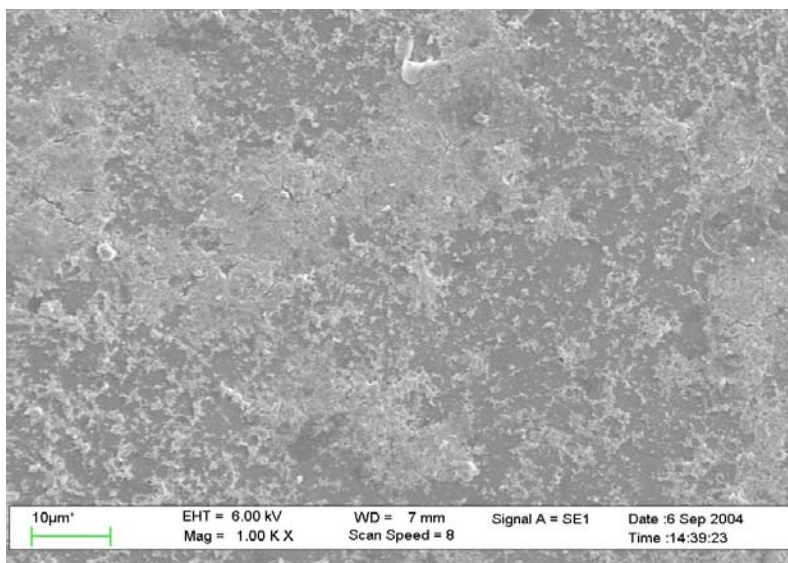
รูปที่ 4-15 แสดงการเปรียบเทียบการลดลงของฟลักซ์โดยสารอินทรีย์และไม่มีสารอินทรีย์ จากกราฟพบว่าการลดลงของฟลักซ์สูงขึ้นเมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์ในสารละลาย การเพิ่มขึ้นของโซเดียมคลอไรด์ส่งผลทำให้ฟลักซ์ลดลงทั้งในสารละลายที่มีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพียงอย่างเดียวและในสารละลายที่มีทั้งสารอินทรีย์และโซเดียมคลอไรด์ การลดลงของฟลักซ์ พบว่าเป็นไปตามลำดับส่วนของการเพิ่มขึ้นของปริมาณโซเดียมคลอไรด์หรือกำลังของไอออนโดยโซเดียมคลอไรด์



รูปที่ 4-15 เปรียบเทียบการลดลงของฟลักซ์โดยใช้สารอินทรีย์และไม่มีสารอินทรีย์

รูปที่ 4-16 แสดงภาพถ่าย SEM ของเยื่อกรองนาโนที่ผ่านการกรองสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีโซเดียมคลอไรด์ร่วมอยู่ด้วย จากภาพ พบว่า นอกจากผลึกของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่แสดงในรูปที่ 4-13

แล้ว ยังมีโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่พื้นผิวของเยื่อกรองที่มีส่วนในการอุดตันเยื่อกรอง ส่งผลให้
ฟลักซ์ของสารละลายที่ผ่านเยื่อกรองลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองในรูปที่ 4-15



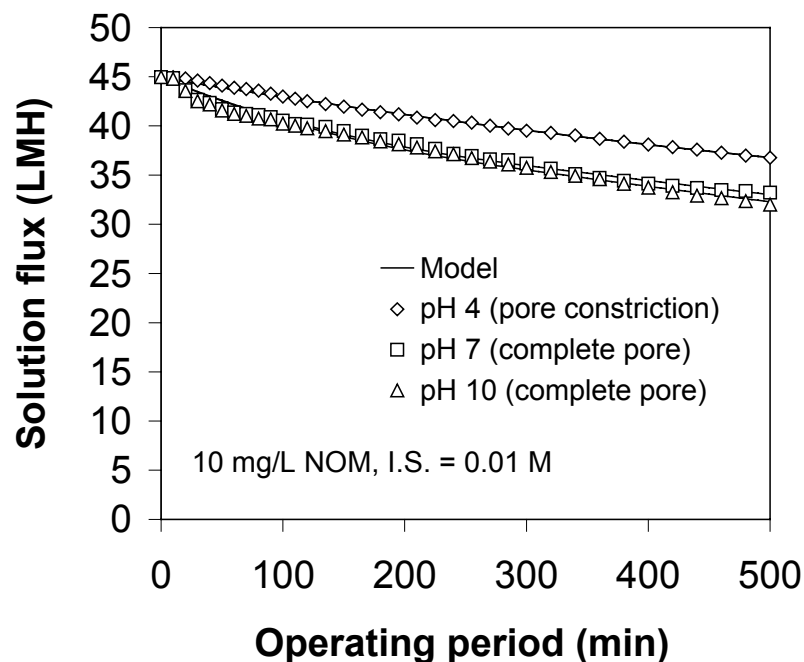
รูปที่ 4-16 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวเยื่อกรองแบบนาโนที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติและโซเดียมคลอไรด์
(กำลังขยาย 1000 เท่า)

4.3.5 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรอง

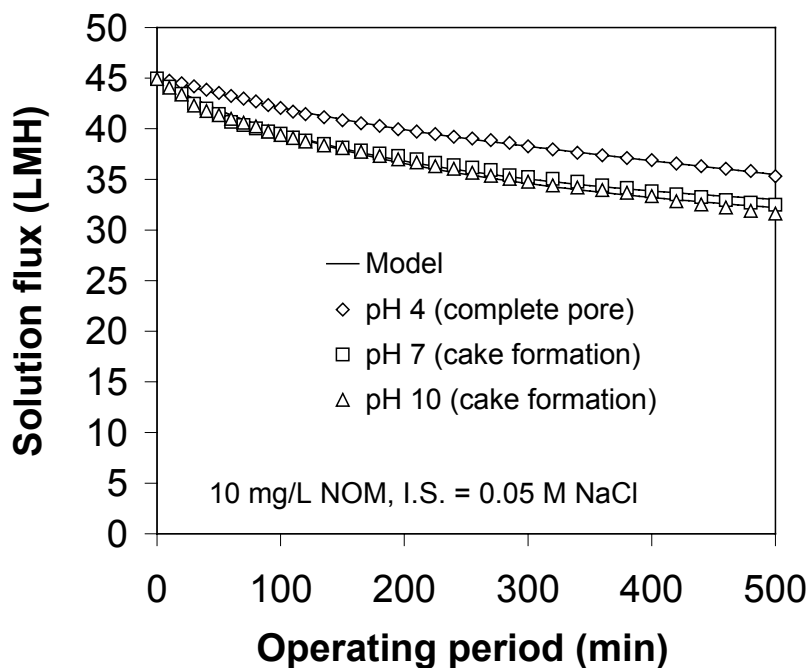
รูปที่ 4-17 และรูปที่ 4-18 แสดงการลดลงของฟลักซ์โดยการปรับพีเอชที่ 4, 7 และ 10 ที่ปริมาณ
ไอออน 0.01 M NaCl และ 0.05 M NaCl ตามลำดับ จุดที่ได้จากกราฟเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
และกราฟเส้นเป็นกราฟที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ของกลไกการอุดตัน จากผลการทดลองพบ
ว่า ฟลักซ์มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของพีเอชทั้งในสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนเท่ากับ 0.01
M NaCl และ 0.05 M NaCl อย่างไรก็ตามที่พีเอชเท่ากับ 7 และ 10 ข้อมูลของฟลักซ์ที่ได้ไม่แตกต่าง
กันมากนัก แต่ที่พีเอชเท่ากับ 4 ค่าฟลักซ์มีการลดลงน้อยกว่า

การทดสอบที่ความเข้มข้นของไอออนเท่ากับ 0.01 M NaCl กราฟฟลักซ์ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4
แสดงความเหมาะสมของข้อมูลกับแบบกลไกการอุดตันชนิด Pore constriction อาจเนื่องมาจากความ
เข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่มีค่ามากกว่าที่พีเอชต่ำ ทำให้เกิดการรวมตัวระหว่างประจุบวกของ H^+ และ
ประจุลบของเยื่อกรองแบบนาโน เกิดชั้น Double layer ทำให้ค่าการกักเก็บน้ำลดลง ดังแสดงในตา
รางที่ 4.6 นั่นคือเกลือสามารถผ่านเยื่อกรองได้มากขึ้น และความเข้มข้นของเกลือบนผิวของเยื่อกรองมี

ค่าน้อยกว่าความเข้มข้นที่ค่าพีเอชสูง นอกจากนี้การเกิดการดูดซับของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเนื่องจาก Functional group ของสารอินทรีย์โดยคาร์บอกซิลิกทำให้ประจุน้อยลงเมื่อเทียบกับค่าพีเอชที่สูง ทำให้สารอินทรีย์ดูดซับและมีผลต่อการลดลงของปริมาตรของรูเยื่อกรอง ค่าพีเอชที่สูงขึ้นเช่น พีเอชที่ 7 และ 10 ค่าการกำจัดเกลือมีค่าสูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นของเกลือบนผิวของเยื่อกรองมีค่าสูงขึ้นและส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ซึ่งมีผลต่อการอุดตันแบบ Complete pore block โดยความเข้มข้นของเกลือที่ทำให้ชั้น Double layer ลดลง ส่วนสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กหรือการลดขนาดของสารอินทรีย์ส่งผลต่อการอุดรูบนผิวของเยื่อกรอง



รูปที่ 4-17 การลดลงของฟลักซ์โดยการปรับพีเอชที่ปริมาณไอออน 0.01 M NaCl

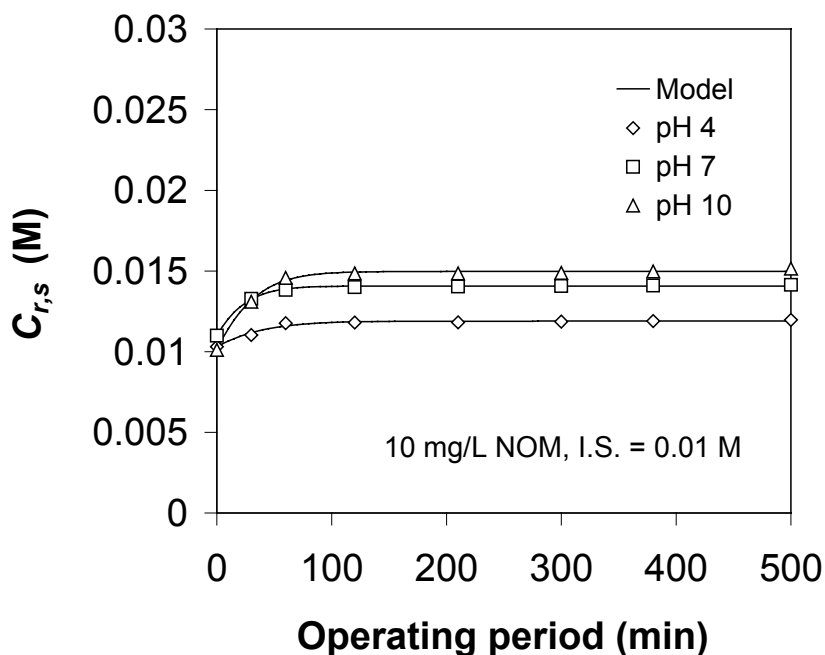


รูปที่ 4-18 การลดลงของฟลักซ์โดยการปรับพีเอชที่ปริมาณไอออน 0.05 M NaCl

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของไอออนเป็น 0.05 M NaCl ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ขณะที่ค่าพีเอชปรับเปลี่ยนจากพีเอช 4 เป็น 10 ที่ค่าพีเอชต่ำประมาณ 4 ให้ผลการจำลองการอุดตันชนิด Complete pore ดีที่สุดกับข้อมูลจากการทดลอง อาจเนื่องมาจากผลของประจุบวก Na^+ และ H^+ ที่รวมตัวกับประจุลบของเยื่อกรองส่งผลทำให้ชั้น Double layer ของประจุบนผิวของเยื่อกรองลดลงส่งผลทำให้ค่าการกักเก็บเกลือลดลง (แสดงในตารางที่ 4.7) จากการเพิ่มความเข้มข้นของไอออนและค่าพีเอชต่ำทำให้ประจุลบของสารอินทรีย์มีค่าน้อย ทำให้การรวมตัวของสารอินทรีย์กับประจุบวกของ Na^+ และ H^+ มีค่าน้อย ดังนั้นผลกระทบของสารอินทรีย์จึงมีน้อยกว่าผลของไอออนที่มีต่อเยื่อกรอง

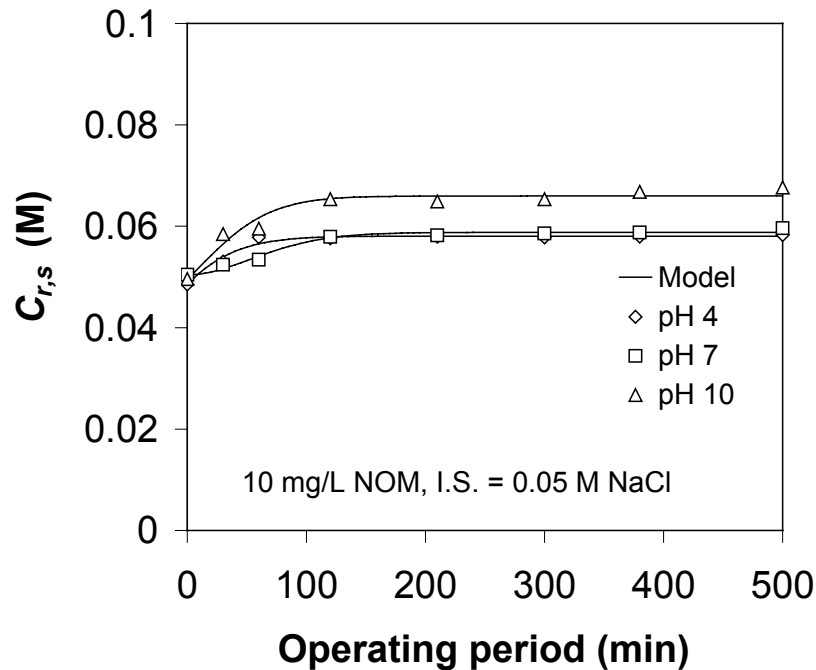
ค่าพีเอชที่สูงเช่นพีเอช 7 และ 10 ที่ความเข้มข้นของไอออนสูงส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการกักเก็บเกลือในคอนเซนเตรต (แสดงในตารางที่ 4.7) ส่วนแบบจำลองการอุดตันเป็นแบบ Cake formation อาจเนื่องมาจากการรวมตัวของประจุบวกของโซเดียม Na^+ กับประจุลบของสารอินทรีย์ทำให้เกิดการสะสมของสารอินทรีย์บนผิวของเยื่อกรอง สำหรับพีเอช 10 การกักเก็บของสารอินทรีย์ในคอนเซนเตรต (แสดงในตารางที่ 4.7) มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบการกักเก็บของสารอินทรีย์ในคอนเซนเตรตที่ความเข้มข้นของไอออนต่ำ (แสดงในตารางที่ 4.6)

รูปที่ 4-19 แสดงความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในคอนเซนเตรตที่ความเข้มข้นไอออน 0.01 M NaCl จุดที่ได้เป็นข้อมูลจากการทดลองและกราฟเส้นได้จากแบบจำลองของมวลสมดุล จากกราฟความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในคอนเซนเตรตมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น เนื่องจากค่าพีเอชต่ำทำให้ประจุบวกของโซเดียม Na^+ รวมตัวกับประจุบวกของผิวเยื่อกรองซึ่งมีผลต่อการลดลงของค่าการกำจัดของเกลือทำให้ความเข้มข้นของไอออนมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของไอออนสำหรับค่าพีเอชที่สูงขึ้น



รูปที่ 4-19 ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในคอนเซนเตรตที่ความเข้มข้นไอออน 0.01 M NaCl

รูปที่ 4-20 แสดงความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในคอนเซนเตรตที่ความเข้มข้นไอออน 0.05 M NaCl จากกราฟพบว่าความเข้มข้นของไอออนในคอนเซนเตรตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ผลที่เกิดขึ้นไปในทิศทางเดียวกันกับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 0.01 M แต่ว่าความเข้มข้นของไอออนที่พีเอช 4 และ 7 มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4-20 ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในคอนเซนเตรตที่ความเข้มข้นไอออน 0.05 M NaCl

ตารางที่ 4.6 แสดงผลจากการทดสอบในสถานะที่มี NaCl เข้มข้น 0.01 M จากตารางพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าการกำจัดในคอนเซนเตรตจาก 16- 37.3 % และค่าการกำจัดสารอินทรีย์ในสารป้อนมีค่า 91.6 – 94.9% เมื่อค่าพีเอชมีค่าจาก 4 7 และ 10 ความเข้มข้นของไอออนบนผิวของเยื่อกรองมีค่าสูงขึ้นเมื่อพีเอชมีค่ามากขึ้น เนื่องจากค่าพีเอชต่ำทำให้ไฮโดรเจนไอออนส่งผลกระทบต่อประจุลบของเยื่อกรองทำให้เกิดชั้น double layer บนผิวของเยื่อกรอง ทำให้ค่าการกำจัดของเกลือน้อยลง นั่นคือเกล็ดผ่านเยื่อกรองมากขึ้น ทำให้ความเข้มข้นเกล็ดบนผิวของเยื่อกรองน้อยลงส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าน้อยลงด้วย (จากกราฟของฟลักซ์)

ตารางที่ 4.7 แสดงพารามิเตอร์จากการทดสอบในสถานะที่มี NaCl เข้มข้น 0.05 M จากตารางพบว่าเมื่อค่าพีเอชมีค่าสูงขึ้น ค่าการกำจัดเกล็ดในคอนเซนเตรตมีค่ามากขึ้นและค่าการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของประจุบวกของสารอินทรีย์และประจุลบของไอออนทำให้ค่าการกำจัดสูงขึ้น เกิดการสะสมบนผิวของเยื่อกรอง

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์จากการทดสอบ เมื่อค่ากำลังของไฮดรอน เท่ากับ 0.01 M NaCl

Parameters	pH		
	4	7	10
$C_{p,s} (C_{f,s})$ (mol/L)	0.01 (0.0103)	0.0105 (0.011)	0.0094 (0.0101)
$C_{ss,s}$ (mol/L)	0.0119	0.0141	0.015
$R_{f,s}$ (%)	2.91	4.55	6.93
$R_{r,s}$ (%)	16.0	25.5	37.3
$R_{f,NOM}$ (%)	78.8	78.5	81.1
$R_{r,NOM}$ (%)	94.9	94.9	91.6
$k_{a,s}$ (min^{-1})	0.391	0.396	0.419
$K_{a,s}$ (ms^{-1})	3.36×10^{-5}	3.40×10^{-5}	3.59×10^{-5}
Average $K_{a,s}$ (ms^{-1})	3.45×10^{-5}		

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์จากการทดสอบ เมื่อค่ากำลังของไฮดรอน เท่ากับ 0.05 M NaCl

พารามิเตอร์	pH		
	4	7	10
$C_{p,s} (C_{f,s})$ (mol/L)	0.0477(0.0485)	0.0496(0.0504)	0.0491 (0.0496)
$C_{ss,s}$ (mol/L)	0.0581	0.059	0.0664
$R_{f,s}$ (%)	1.65	1.59	1.0
$R_{r,s}$ (%)	17.9	15.9	26.1
$R_{f,NOM}$ (%)	80.1	77.9	80.7
$R_{r,NOM}$ (%)	95.5	95.3	96.4
$k_{a,s}$ (min^{-1})	0.396	0.408	0.415
$K_{a,s}$ (ms^{-1})	3.39×10^{-5}	3.50×10^{-5}	3.56×10^{-5}
Average $K_{a,s}$ (ms^{-1})	3.48×10^{-5}		

4.4 แบบจำลองการอุดตันของระบบเยื่อกรองแบบนาโน

การทดสอบหากลไกการอุดตันของระบบเยื่อกรองสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอุดตัน ข้อมูลที่ได้จากการทดลองคือค่าการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ (J) ตามระยะเวลาของการทดลอง รูปที่ 4-21 แสดงแบบจำลองการอุดตันโดยผลของความเข้มข้นสารละลายอินทรีย์ธรรมชาติ จากกราฟจุดที่ได้เป็นข้อมูลที่วัดได้จากการทดลองและเส้นกราฟเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง ค่าคงที่ของการอุดตันได้จากผลรวมของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองน้อยที่สุด (SSE) ระหว่างข้อมูลจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ใช้เพื่อให้ได้ผลรวมของ SSE น้อยที่สุด จากกราฟพบว่าสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ (แต่ประกอบด้วยค่าลั่งของไอออนเท่ากับ 0.01 M NaCl และค่าพีเอชเท่ากับ 7) แสดงผลการลดลงของฟลักซ์อาจเนื่องมาจากผลของโซเดียมคลอไรด์ที่มีประจุบวกของโซเดียม (Na^+) ทำปฏิกิริยากับประจุลบจากแผ่นเยื่อกรองทำให้ค่า การกักตดลงจาก 5.78% เป็น 2.24% นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นจาก 5 mg/L เป็น 25 mg/L NOM ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ตามความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น กลไกการอุดตันที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารอินทรีย์สามารถทำได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตารางที่ 4.8 แสดงพารามิเตอร์จากแบบจำลองการอุดตันโดยสารอินทรีย์ธรรมชาติ จากตารางพบว่าสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ แสดงผลของฟลักซ์ที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Complete pore blocking ที่ให้ค่า SSE น้อยที่สุดประมาณ 0.563 อาจเนื่องจากผลของประจุบวกของโซเดียมที่ทำปฏิกิริยากับประจุลบจากแผ่นเยื่อกรองทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าลดลง ค่า k_d เท่ากับ 0.068 1/h และค่าฟลักซ์ที่เกิดจากความเร็วบนผิวของเยื่อกรอง (J^*) เท่ากับ 29.1 LMH ส่วนแบบจำลองการอุดตันแบบ Cake formation ให้ค่าการทดสอบของ SSE มากที่สุดเปรียบเทียบกับแบบจำลองการอุดตันชนิดอื่น ๆ

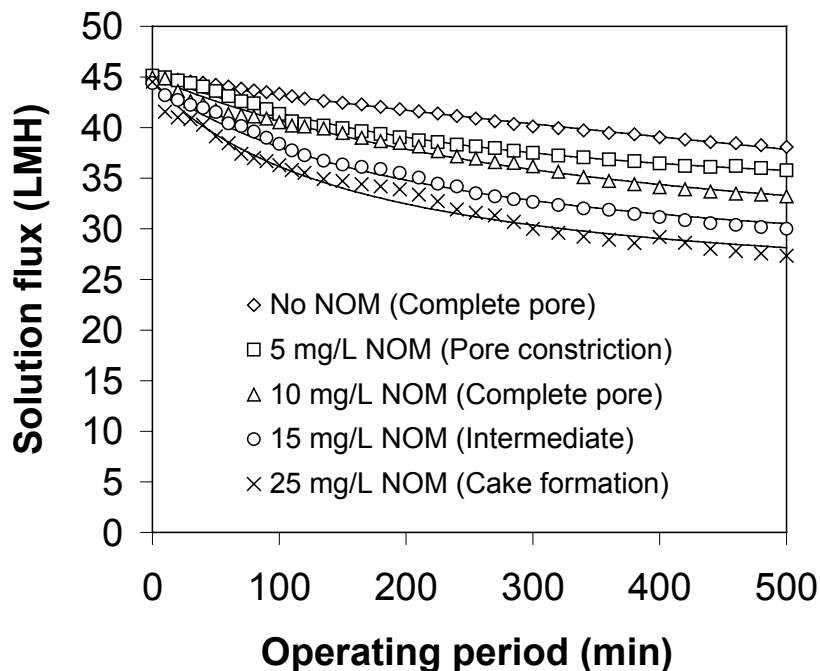
แบบจำลองการอุดตันที่ให้ค่า SSE น้อยที่สุดสำหรับความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์เท่ากับ 5 mg/L NOM ได้แก่ Pore constriction (Standard blocking) ค่าคงที่การอุดตัน (k_d) ที่ได้จากแบบจำลองเท่ากับ $1.205 \text{ 1/(m.h)}^{0.5}$ และค่า J^* เท่ากับ 34.3 LMH กลไกที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากการดูดซับของสารอินทรีย์บนผิวและรูของเยื่อกรองในขณะที่ผลของโซเดียมอาจมีผลต่อการลดค่าการซึมผ่านของน้ำเพอร์มิเอทที่ไหลผ่านแผ่นเยื่อกรอง

แบบจำลองกลไกการอุดตันชนิด Complete pore blocking สามารถให้ SSE น้อยที่สุดสำหรับสารละลายอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 mg/L NOM อย่างไรก็ตามค่า SSE ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันกับค่า SSE ของแบบจำลองของ Intermediate blocking ซึ่งกลไกการเกิดอาการอุดตันเนื่องจากผลของประจุบวกของโซเดียมที่ทำปฏิกิริยากับประจุลบของเยื่อกรองทำให้เกิดกาเปลี่ยนแปลงของค่าการซึม

ผ่านของเยื่อกรองและเกิดการสะสมของสารอินทรีย์บนผิวของเยื่อกรองเนื่องจากการรวมตัวของประจุบวกของโซเดียมและประจุลบของสารอินทรีย์ ส่วนค่าคงที่การอุดตัน (k_d) ที่ได้จากแบบจำลองเท่ากับ 0.246 1/h และค่า J^* เท่ากับ 32.3 LMH

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกลไกการอุดตันเนื่องจากผลของฟลักซ์มีค่าลดลง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ 15 mg/L NOM ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของชั้นความหนาของสารละลายอินทรีย์บนแผ่นเยื่อกรองเนื่องจากการสะสมที่เพิ่มมากขึ้นของสารอินทรีย์ที่รวมตัวกับประจุบวกของโซเดียมและส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ แบบจำลองที่ให้ค่าผลรวมความแตกต่างน้อยที่สุดของแบบจำลองและผลการทดลองได้แก่แบบจำลองของ Intermediate blocking ค่าคงที่ของการอุดตัน (k_c) เท่ากับ 5.88 1/m ส่วนค่า J^* เท่ากับ 26.8 LMH

แบบจำลองแบบ Cake formation เกิดขึ้นในกรณีของสารอินทรีย์มีค่ามากขึ้นเป็น 25 mg/L NOM ค่าคงที่ของการอุดตัน (k_d) เท่ากับ 221.4 h/m² และค่า J^* เท่ากับ 25.6 LMH กลไกการเกิดเค้กอาจเนื่องมาจากความเข้มข้นที่สะสมเพิ่มมากขึ้นบนผิวของเยื่อกรองและส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์อย่างต่อเนื่อง การรวมตัวของสารละลายอินทรีย์กับประจุบวกของโซเดียมมีผลมากกว่าประจุบวกของโซเดียมที่รวมตัวกับประจุลบของเยื่อกรอง



รูปที่ 4-21 แบบจำลองการอุดตันโดยผลของความเข้มข้นสารละลายอินทรีย์

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์จากแบบจำลองการอุดตันโดยสารอินทรีย์ธรรมชาติ

Model Parameter	Pore blocking			Pore constriction			Intermediate			Cake formation		
	k_A	J^*	SSE	k_B	J^*	SSE	k_C	J^*	SSE	k_D	J^*	SSE
Concentration	(1/h)	(LMH)		$1/(m.h)^{1/2}$	(LMH)		(1/m)	(LMH)		(h/m ²)	(LMH)	
No NOM	0.068	29.1	0.563	0.379	30.6	0.741	1.68	29.5	0.817	41.4	29.9	1.5
5 mg/L	0.294	35.4	2.803	1.205	34.3	2.359	6	34.3	2.615	114	32.7	2.785
10 mg/L	0.246	32.3	5.31	0.968	30.2	5.756	4.5	29.5	5.41	108	29	5.474
15 mg/L	0.309	29.7	1.816	1.275	27.8	1.761	5.88	26.8	1.635	167.4	27.4	5.356
25 mg/L	0.397	28.1	17.707	1.729	26.6	18.426	8.7	26.3	16.355	221.4	25.6	15.186

จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ระหว่างการดำเนินการกรอง การวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถให้ค่าคงที่ของการอุดตันและผลของค่า J^* ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นกลไกการเกิดอุดตัน การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ โดยความเข้มข้นของละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์เป็นองค์ประกอบส่งผลต่อการลดลงเนื่องจากผลของประจุบวกโซเดียมกับประจุลบของเยื่อกรองส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้ของเพอร์มิเอท โดยแบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองชนิด Complete pore blocking การเพิ่มสารละลายอินทรีย์ขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแบบจำลองการอุดตันจาก Pore constriction (standard) blocking จนถึงแบบจำลองชนิดเกิดเค้กบนผิวของเยื่อกรอง (Cake formation) เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีค่าเพิ่มมากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ระบบเยื่อกรองแบบนาโนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ที่พบได้ตามแหล่งน้ำ โดยสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้เฉลี่ยร้อยละ 96 ซึ่งสารอินทรีย์ที่ถูกกักกันมีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อกรอง นั่นคือการอุดตัน และการลดลงของอัตราการกรอง

การเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ตามระยะเวลาการทดสอบ ผลกระทบของไอออนต่อการลดลงของฟลักซ์และค่าการกำจัดของเกลือเนื่องจากผลของการรวมตัวของประจุบวกของโซเดียมและประจุลบของเยื่อกรองแบบนาโน ทำให้ความหนาของชั้น Double layer บนผิวของเยื่อกรองมีค่าลดลง การกำจัดสารมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการอุดตันที่มีผลโดยตรงกับแผ่นเยื่อกรองชนิด Complete pore และ Pore constriction เมื่อความเข้มข้นของไอออนมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามสารละลายที่มีทั้งสารอินทรีย์และความเข้มข้นของไอออนที่มีค่าสูง ส่งผลต่อการเกิดเค้ก (Cake formation) บนผิวของเยื่อกรองเนื่องจากผลการรวมตัวของประจุบวกของโซเดียมและประจุลบของสารอินทรีย์ทำให้เกิดการสะสมของสารอินทรีย์บนผิวของเยื่อกรอง ซึ่งพบว่าค่าการกำจัดของสารอินทรีย์มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ฟลักซ์ของการไหลผ่านเยื่อกรองลดลง

ค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อการกลไกการอุดตันของเยื่อกรอง ต่อการกำจัดโซเดียมคลอไรด์ และต่อค่าฟลักซ์ พบว่า ค่าฟลักซ์มีค่าสูงแต่ค่าการกำจัดเกลือมีค่าต่ำที่พีเอชเท่ากับ 4 ทั้งนี้เนื่องจากผลรวมระหว่างประจุบวกของไฮโดรเจนและประจุลบของเยื่อกรอง ส่งผลให้การผ่านของเกลือและน้ำสูงขึ้น เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ค่าการกำจัดเกลือเพิ่ม ปริมาณเกลือบนผิวเยื่อกรองมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้เกิดการลดลงของฟลักซ์ การใช้ความเข้มข้นไอออนต่ำประมาณ 0.01 M NaCl ส่งผลต่อกลไกการอุดตันแบบ Complete pore และ Pore constriction ส่วนการเกิดเค้ก (Cake formation) บนผิวของเยื่อกรองพบที่ค่าพีเอชและความเข้มข้นของไอออนสูงเนื่องจากการสะสมของสารอินทรีย์บนผิวของเยื่อกรอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกลไกการอุดตันสามารถนำมาใช้การอธิบายกลไกของการอุดตันเยื่อกรองแบบนาโนในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติได้ การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสารอินทรีย์สามารถเปลี่ยนกลไกการอุดตันจากผลที่กระทบจากการอุดตันบนผิวของเยื่อกรองและการลดขนาดรูของเยื่อกรองเนื่องจากการดูดซับของสารอินทรีย์ในรูของเยื่อกรองจนเกิดชั้นบนผิวเยื่อกรองและสุดท้ายเกิดเค้กบนผิวของเยื่อกรองเมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีค่าสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- AWWA membrane technology research committee, committee report. 1992. "Membrane Processes in Potable Water Treatment," *J. AWWA*, 84(1): 59-67.
- Braghetta, A., F. A. DiGiano, and W. P. Ball. 1997. "Nanofiltration of Natural Organic Matter: pH and Ionic Strength Effects," *J. Environ. Engrg., ASCE*, 123(7): 628-641.
- Danielsson, L. G. 1982. "On the Use of Filters for Distinguishing Between Dissolved and Particulate Fractions in Natural Waters," *Wat. Res.*, 16, 179-182.
- Draper, N. R., and H. Smith. 1998. *Applied Regression Analysis: An Introduction to Nonlinear Estimation*, John Wiley, NY, USA, ISBN: 0-471-17082-8.
- Duranceau, S. J., J. S. Taylor, and L. A. Mulford. 1992. "SOC Removal in a Membrane Softening Process," *J. AWWA*, 84(1): 68-78.
- Fu, P., H. Ruiz, K. Thompson, and C. Spangenberg. 1994. "Selecting Membranes for Removing NOM and DBP Precursors," *J. AWWA*, 86(12): 55-72.
- Ghosh, K. and M. Schnitzer. 1980. "Macromolecular Structures of Humic Substances," *Soil Sci.*, 129(5): 266-276.
- Hermia, J. 1982. "Constant Pressure Blocking Filtration Laws: Application to Power-law non-Newtonian Fluids," *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 60, 183-187.
- Howe, K. J., and M. M. Clark. 2002. "Fouling of Microfiltration and Ultrafiltration Membranes by Natural Waters", *Environ. Sci. Technol.*, 36, 3571-3576.
- Jarusutthirak, C., Amy, G., and Crouè, J-P. (2002) Fouling characteristics of wastewater effluent organic matter (EfOM) isolates on NF and UF membranes, *Desalination*, 145:247-255.
- Kabsch-Korbutowicz, M., K. Majewska-Nowak, and T. Winnicki. 1999. "Analysis of Membrane Fouling in the Treatment of Water Solutions Containing Humic Acids and Mineral Salts," *Desalination*, 126, 179-185.
- Kilduff, J. E., Mattaraj, S., Sensibaugh, J., Pieracci, J. P., Yuan, T., and Belfort, G. (2002) "Modeling Flux Decline during Nanofiltration of NOM with Poly(arylsulfone) Membranes Modified Using VU-Assisted Graft Polymerization," *Environmental Engineering Science*, Vol. 19, NO. 6, 477-495.

- Kilduff, J. E., Mattaraj, S., Wigton, A., Kitis, M., Karanfil, T. (2004a) "Effects of Reverse Osmosis Isolation on Reactivity of Naturally Occurring Dissolved Organic Matter in Physicochemical Processes," *Water Research*, 38, 1026-1036.
- Kilduff, J. E., Mattaraj, S., Belfort, G. (2004b) "Flux Decline during Nanofiltration of Naturally-Occurring Dissolved Organic Matter: Effects of Osmotic Pressure Membrane Permeability, and Cake Formation, ongoing for publication in *J. Mem. Sci.*
- Krasner, S. W., M. J. McGuire, J. G. Jacangelo, N. L. Patania, K. M. Reagan, and E. M. Aieta. 1989. "The Occurrence of Disinfection By-products in US Drinking Water," *J. AWWA*, 81(8): 41-53.
- Krasner, S. W., J. J. Westrick, and S. Regli. 1995. "Bench and Pilot Testing under the ICR," *J. AWWA*, 87(8): 60-79.
- Krasner, S. W., J.-P. Croue, J. Buffle, and E. M. Perdue. 1996. "Three Approaches for Characterizing NOM," *J. AWWA*, 88(6): 66-79.
- Levenspiel, O. (1999) *Chemical Reaction Engineering*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., NY, USA.
- Mattaraj, S. 2001. "The Influence of Natural Organic Matter Properties on Nanofiltration Fouling," *Ph.D. Thesis*, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.
- Mattaraj, S. 2003. "Using Reverse Osmosis to Remove Natural Organic Matter from Power Plant Makeup Water," *PowerPlant Chemistry Journal*, 5(1), 31-35.
- Mattaraj, S. and J. E. Kilduff. 2003. "Effect of Natural Organic Matter Properties on Nanofiltration Flux," *The Fourth Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering*," Kasetsart University, Bangkok, Thailand, pp.1051-1060.
- Schafer, A. I., A. G. Fane, and T. D. Waite. 1998. "Nanofiltration of Natural Organic Matter: Removal, Fouling and the Influence of Multivalent Ions," *Desalinatn.*, 118, 109-122.
- Schnitzer, M., and S. U. Khan. 1972. *Humic Substances in the Environment*, Mercel Decker, New York.
- Serkiz, S. M., and E. M. Perdue. 1990. "Isolation of Dissolved Organic Matter From the Suwannee River Using Reverse Osmosis," *Wat. Res.*, 24(7): 911-916.

- Singer, P. C., J. J. Barry III, G. M. Palen, and Alan E. Scrivner. 1981. "Trihalomethane Formation in North Carolina Drinking Water," *J. AWWA*, 73(8): 392-401.
- Sun, L., E. M. Perdue, and J. F. McCARTHY. 1995. "Using Reverse Osmosis To Obtain Organic Matter From Surface and Ground Waters," *Wat. Res.*, 29(6): 1471-1477.
- Tseng, T., and M. Edwards. 1999. "Predicting Full-Scale TOC Removal," *J. AWWA*, 91(4): 159-170.

ภาคผนวก

MANUSCRIPT (DRAFT)

Reverse Osmosis (RO) in Removal of Natural Organic Matter (NOM) from Surface Water

Chalor Jarusutthirak¹, Supatpong Mattaraj², Ratana Jiraratananon³,
Chaeopon Charoensuk², Jittrapol Decha¹, and Prakasit Hongtong¹

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung Road, Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
Email: kjchalor@kmitl.ac.th

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Rajathanee University
Warinchumrab, Ubon Rajathanee 34190 Thailand
Email: mattas@eng.ubu.ac.th

³Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of
Technology Thonburi, Prachautid Road, Tungkru, Bangkok 10140 Thailand
Email: ratana.jir@kmutt.ac.th

ABSTRACT

A field-scale polyamide reverse osmosis (RO) membrane was used to remove natural organic matter (NOM) from surface water. This system was investigated with different operating pressures. Increased operating pressures from 554.9 kPa to 1413 kPa increased water recovery from 7% to 23.8% and increased permeate flow rate from 192.3 to 429.7 L/hr. The increased operating pressures provided higher removal efficiency for NOM and dissolved inorganic up to 99.1% and 98.5%, respectively. NOM rejection at long-term filtration period was greater than that at the initial period of filtration, possibly due to an increase of NOM accumulation on the membrane surface. Mathematical model based on mass balance model could be used to evaluate the performance of RO system.

Keywords

Humic substances, Natural organic matter, Reverse osmosis, Solution flux

1. INTRODUCTION

Natural organic matter (NOM) is widely distributed throughout all aquatic environments, for example, surface water and groundwater. NOM is composed of a heterogeneous mixture of complex organic materials, including humic substances (humic and fulvic acids), low molecular weight (hydrophilic) acids, proteins, carbohydrates, carboxylic acids, amino acids, and hydrocarbons. Humic substances are the main compounds of NOM in surface waters, typically comprising 30 to 80% of dissolved organic carbon (DOC) (Thurman et al.¹). During chlorination in water treatment

processes, NOM may act as a precursor of disinfection by-products (DBPs), possibly damage human health. Membrane filtration, especially using reverse osmosis (RO) or nanofiltration (NF), is found to be effective in removal of NOM, i.e. DBP-precursor (Kilduff et al.²). However, NOM is considered as a major cause of membrane fouling in water treatment applications (Hong and Elimelech³, Braghetta, et al.⁴, Manttari et al.⁵). Reverse osmosis is a pressure-driven membrane process which operates at high pressures. The objectives of this study are to determine the removal efficiency of NOM using RO system, to investigate the effect of operating pressures on rejection of NOM and dissolved inorganic matter, water flux, recovery, and feed flowrate, and finally to evaluate mathematical model for characterizing RO operation.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 NOM-source water

NOM-source water for RO membrane process was obtained from a reservoir located in Ubon Rajathanee University, Ubon Rajathanee, Thailand. This reservoir serves raw water for water supply in university community. Dissolved organic carbon (DOC), representing NOM, from source water was about 4.54 mg L⁻¹ while the ultraviolet absorbance at a wavelength of 254 nm (UV_{254 nm}) was about 0.185 cm⁻¹. The ratio between UV_{254 nm} and DOC, a.k.a. specific UV absorbance (SUVA), was 4.1 L.mg⁻¹.m⁻¹, approximately. Hardness concentration (containing Ca²⁺ and Mg²⁺) was relatively low about 15 mg L⁻¹ as CaCO₃. Conductivity was relatively low about 31.9 μS.cm⁻¹. Sulfate and chloride

concentrations were 93.3 mg.L⁻¹ and 5.4 mg.L⁻¹, respectively.

2.2 RO filtration procedure

RO system was previously studied to isolate organic matter from surface and ground waters (Sun et al.⁶; Mattaraj and Kilduff⁷; Kilduff et al.⁸). This RO system was a polyimide thin-film composite (AG4040F) in a spiral-wound crossflow configuration housed in a stainless steel pressure vessel (GE Osmonics, USA). The effective area of the membrane was 8.36 m². NOM-source water was initially prefiltered through sand filter, 5-μm and 1-μm PP filters. The pretreated water was then pumped through 5-μm filter, cation exchange resin to remove Ca²⁺, Mg²⁺, and hardness, and 1-μm filter and followed with 0.45-μm filter. The pretreated water was then stored in a 150-liter reservoir. Before RO system was started, a 20-liter NOM-source water was used to flush the RO system. Pretreated water was passed through the RO system using high pressure pump. Back pressure valve was used in order to adjust the desired operating pressures. The concentrated water was recirculated to the reservoir while the permeate water was collected in 200-L permeate tank for cleaning the RO system. During filtration period, a 20-L pretreated water was added to the reservoir until the total volume of 1000-L pretreated water (measured using electronic balance) was reached. The sample was also collected about 15-20 min each for chemical analysis. After the system was terminated, the concentrated water in the reservoir about 35- 40 liters was collected in two 20-L containers. The permeate water was used to flush the system. The flushed water was collected for mass balance analysis. Chemical cleaning (pH 10 adjusted by NaOH) was subsequently applied for 40-min each. The system was flushed with permeate water until pH of permeate water was achieved. The RO system was then stored in 1% Na₂S₂O₅ solution.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows the effect of operating pressure on flow rate. It was observed that increased operating pressures increased permeate flow rate but decreased feed and retentate flow rate. Increased operating pressures from 554.9 kPa (80.5 psi) to 1413 kPa (205 psi) increased permeate flow rate from 5.34×10⁻⁵ m³/s to 1.19×10⁻⁴ m³/s (192.3 to 429.7 L/hr). The relation between solution flux ($J_v = Q_p/A_m$) and operating pressure (ΔP) can be written as follows (Eq.1):

$$J_v = L_p \cdot (\Delta P - \sigma \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A_m} \quad (1)$$

where L_p is the membrane permeability (LMH kPa⁻¹), σ is the osmotic reflection coefficient, $\Delta \pi$ is the osmotic pressure (kPa), Q_p is the permeate flow rate, and A_m is the membrane area (8.36 m²).

The osmotic pressure can be neglected in the above equation due to relatively low conductivity in source water. The membrane permeability (L_p) can be calculated by the ratio between solution flux and operating pressures as shown in Eq. 2.

$$L_p = \frac{J_v}{\Delta P} = \frac{Q_p}{A_m \cdot \Delta P} \quad (2)$$

The membrane permeability is approximately 0.0378 LMH. kPa⁻¹ (at 29.3 °C) while the membrane permeability recommended by the manufacturer is 0.032 LMH. kPa⁻¹. Figure 2 illustrates the effect of operating pressure on recovery. It was found that increased operating pressures ranging from 554.9 kPa (80.5 psi) to 1413 kPa (205 psi) increased water recovery (Q_p/Q_f) from 7% to 23.8%. The relation between water recovery (R) and operating pressure (P) can be written as $R = 0.0017 P^{1.31}$; $r^2 = 0.996$. Based on this relationship, the recovery for this RO system of 15% should be operated at 1036.6 kPa (150 psi).

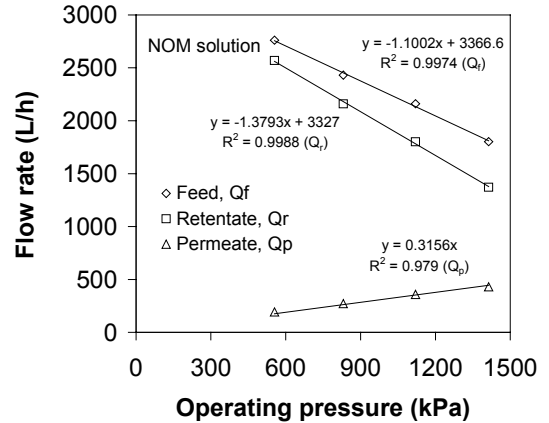


Figure 1 Effect of operating pressure on flow rate

(DRAFT)

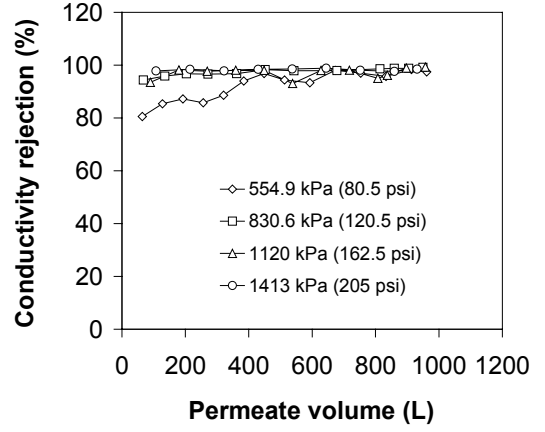
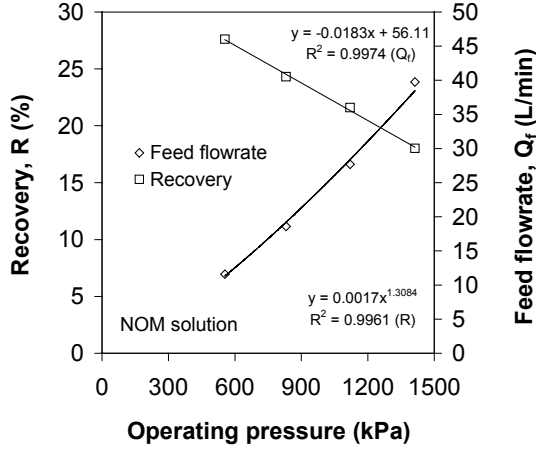


Figure 2 Effect of operating pressure on recovery
Figure 3 presents the effect of operating pressures on conductivity rejection. It was observed that increased operating pressures increased conductivity (dissolved inorganic matter) rejection. The lowest operating pressures of 554.9 kPa (80.5 psi) gives the lowest conductivity rejection at the initial stage of filtration while the rejection increased with increasing period of filtration. At high operating pressure of 1413 kPa (205 psi), the averaged rejection of dissolved inorganic matter was relatively high about 98.5%. However, at low operating pressure of 554.9 kPa (80.5 psi), the averaged rejection of dissolved inorganic matter was about 92.7%. This suggests that operating pressures has a significant effect on conductivity rejection over the increased concentration of dissolved inorganic matter on the membrane surface.

Figure 3 Conductivity rejection

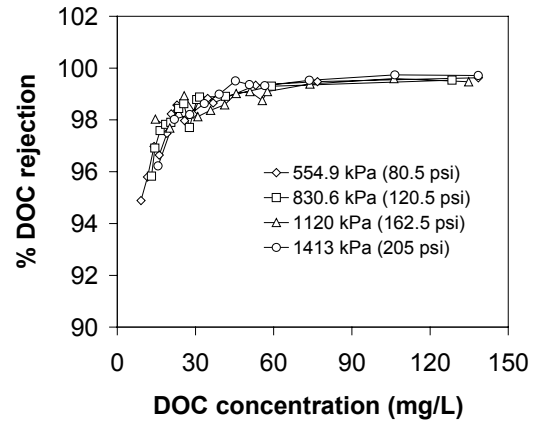


Figure 4 shows the effect of operating pressures on DOC rejection. It was evident that increased DOC concentration increased the rejection of NOM while increased operating pressures slightly increased DOC rejection during long-term period of filtration. High NOM concentration obtained from long-term filtration showed greater NOM rejection than low NOM concentration at the initial period of filtration. However, the averaged DOC rejections were relatively high for greater than 98%. This was possibly due to NOM accumulation on the membrane surface, thus increased NOM rejection.

Figure 4 Effect of operating pressure on DOC rejection

Figure 5 shows the schematic diagram of RO operation. Mathematical model can be developed based on mass balance equation. The equation can be written as shown in equation (3):

$$\begin{aligned} \frac{dC_r V_r}{dt} &= Q_r C_r + Q_s C_s - Q_f C_f \\ \frac{dC_r V_r}{dt} &= Q_s C_s - Q_p C_p \\ \frac{dC_r V_r}{dt} &= Q_s C_s - Q_p (1 - R_r) C_r \end{aligned} \quad (3)$$

where C_r is the retentate concentration [mg.L^{-1}]; Q_r is the retentate flow rate [L.min^{-1}]; C_s is the pretreated water concentration [mg.L^{-1}]; Q_s is the pretreated

(DRAFT)

flow rate [$\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$]; C_f is the feed concentration [$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$]; Q_f is the feed flow rate [$\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$]; C_p is the permeate concentration [$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$]; Q_p is the permeate flow rate [$\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$]; R_m is the retentate rejection $(1 - C_p/C_r) \times 100$; V_r is the reservoir volume [$\sim 150 \text{ L}$]; and t is the operating period [min].

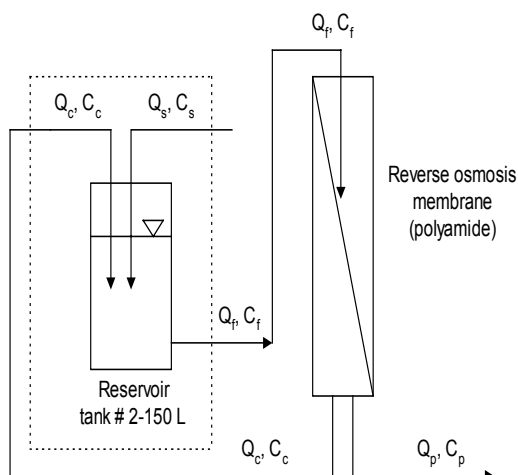


Figure 5 Schematic Diagram of RO operation

Figure 6 presents the retentate concentration on the RO membrane surface. The dot points were experimental results while the solid lines were determined based on mass balance model. From the graph, there are two stages of filtration. At the initial period of filtration, the DOC concentrations increased slightly during constant volume operation (0 to 186 minutes) (adding pretreated water in the reservoir). Subsequently, the DOC concentrations increased significantly with variable volume operation due to decreased reservoir volume in the system. It was found that mass balance model with DOC rejection of 99% was fitted very well with experimental results, suggesting high NOM rejection. Mass balance model with DOC rejections of 90% and 95% showed relatively lower DOC concentration in the retentate line than experimental results.

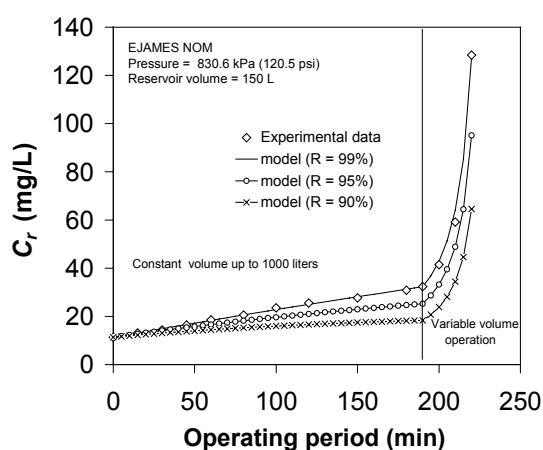


Figure 6 Retentate concentration on RO surface

4. CONCLUSIONS

Field-scale RO system can be applied to remove NOM from surface water in the water treatment applications. Membrane operating pressure affects system performance of RO, (i.e. NOM and inorganic rejection) and increases system operation (i.e. solution flux and recovery). Increased operating pressures slightly increased the rejection of dissolved inorganic matter and NOM concentration, especially at low operating pressure. Increased DOC concentration provided higher DOC rejection during filtration period, possibly due to NOM accumulation on membrane surface. Mathematical model based on mass balance model can be used to characterize the filtration behavior on membrane performance.

5. REFERENCES

1. Thurman, E. M., Wershaw, R. L., Malcolm, R. L., and Pinckney, D. J. (1982). Molecular size of aquatic humic substances, *Org. Geochem.*, 4(1), 27-35.
2. Kilduff, J. E., Mattaraj, S., Wigton, A., Kitis, M., and Karanfil, T. (2004) Effects of Reverse Osmosis Isolation on Reactivity of Naturally Occurring Dissolved Organic Matter in Physicochemical Processes, *Water Res.*, 38, pp.1026-1036.
3. Hong, S., and Elimelech, M. (1997) Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes, *J. Membr.Sci.*, 132, 159-181.
4. Braghetta, A., DiGiano, F.A., and Ball, W. P. (1998) NOM accumulation at NF membrane surface: Impact of chemistry and shear, *J. Environ. Eng.*, 123, 1087-1098.
5. Manttari, M., Puro, L., Nuortila-Jokinen, J., and Nystrom, M. (2000) Fouling effects of polysaccharides and humic acid in nanofiltration, *J. Membr.Sci.*, 165, 1-17.
6. Sun, L., Perdue, E. M., and McCarthy, J. F. (1995) Using reverse osmosis to obtain organic matter from surface and ground waters, *Water Res.*, 29, 1471-1477.
7. Mattaraj, S. and Kilduff, J. E. (2003) Using Reverse Osmosis to Remove Natural Organic Matter from Power Plant Makeup Water," *PowerPlant Chemistry Journal*, 5(1), pp. 31-35.
8. Kilduff, J.E., Mattaraj, S., Sensibaugh, J., Pieracci, J. P., Yuan, Y., and Belfort, G. (2002)

(DRAFT)

Modeling Flux Decline during Nanofiltration of NOM with Poly(arylsulfone) Membranes Modified Using UV-Assisted Graft Polymerization, *Environ. Eng. Sci.*, 19(6), 477- 495.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Commission on Higher Education and the Thailand Research Fund (TRF) for financial support.

(DRAFT)