

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน
โดยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

FACTORS AFFECTING FOULING OF NANOFILTRATION MEMBRANE BY
NATURAL ORGANIC MATTER



ชฤพนธ์ เจริญสุข
CHAREOPON CHAROENSUK

อ.พ.
๕๒๑๘/
๒๕๔๘

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 60491

วัน,เดือน,ปี..... - 3 ก.ค. 2549

b..... 11๕๘๖๓๓๑.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2548
ISBN 974-15-1600-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FACTORS AFFECTING FOULING OF NANOFILTRATION MEMBRANE BY
NATURAL ORGANIC MATTER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2005
ISBN 974-15-1600-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดตันของเยื่อกรองแบบนาโนโดยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
นักศึกษา	นายชฎพนธ์ เจริญสุข
รหัสประจำตัว	45064503
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติและปัจจัยร่วมอื่น ๆ ที่มีต่อการดูดตันของเยื่อกรองแบบนาโน จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ทำให้เกิดการดูดตันบนเยื่อกรองแบบนาโนมากขึ้นส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทลดลง นอกจากนี้พบว่า ปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง ได้แก่ การเพิ่มขึ้นของค่าความแรงประจุ ค่าพีเอชที่สูงขึ้น และเกลืออนินทรีย์ในน้ำ ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทลดลง เกลืออนินทรีย์แต่ละประเภทมีผลต่อการเกิดการดูดตันของเยื่อกรองแบบนาโนและการลดลงของฟลักซ์แตกต่างกัน เกลืออนินทรีย์ของไอออนบวกที่มีประจุเท่ากับสอง (Divalent cations) เช่น แคลเซียมและแมกนีเซียม ทำให้เกิดการดูดตันของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติได้มากกว่าเกลืออนินทรีย์ของไอออนบวกที่มีประจุเดียว ได้แก่ โซเดียม ทั้งนี้เนื่องมาจากกลไกการเกิดสะพานเชื่อม (Bridging effect) ระหว่างเยื่อกรองและสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ เกลืออนินทรีย์ที่มีโอกาสตกตะกอนได้มาก เช่น แคลเซียมฟอสเฟต และแคลเซียมซัลเฟต ทำให้เกิดการดูดตันสูงกว่า เกลืออนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ดี เช่น โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ การตรวจวิเคราะห์การดูดตันของเยื่อกรองแบบนาโนด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) แสดงถึงการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนผิวหน้าของเยื่อกรองแบบนาโน ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายจาก Scanning Electron Microscope (SEM) และ Energy Dispersive Spectrometer (EDS) การตรวจสอบด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) แสดงถึงการเกิดผลึกของเกลืออนินทรีย์บนผิวหน้าของเยื่อกรองแบบนาโน

คำสำคัญ : การดูดตันของเยื่อกรอง, เกลืออนินทรีย์, ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอท, เยื่อกรองแบบนาโน, สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และช่วยแนะแนวทางการแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ดร. อุตสาหกรรม ภัคดีสุข และ ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำในเรื่องความเป็นระเบียบเรียบร้อยและความถูกต้องของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ รวมทั้งขอเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร. สุพัฒน์พงษ์ มัตราข ห้วนหน้าภาควิชาเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้คำแนะนำ ขอเสนอแนะ และดูแลในระหว่างทำการทดลองที่มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความช่วยเหลือในระหว่างทำการทดลอง และวิเคราะห์ตัวอย่างอยู่ที่มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยเหลือในการวิเคราะห์ตัวอย่างเยื่อกรอง

เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว รวมทั้งเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ และเป็นกำลังใจให้สามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นอกจากรายนามที่ได้กล่าวมาแล้ว ผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกท่านที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นายชฎพนธ์ เจริญสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	XVI
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XVIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.....	4
2.1.1 ผลกระทบของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีต่อคุณภาพน้ำ.....	4
2.1.2 ผลกระทบของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีต่อระบบบำบัดน้ำ.....	6
2.1.3 วิธีการบำบัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.....	6
2.2 หลักการกรองผ่านเยื่อกรอง.....	7
2.3 กระบวนการนาโนฟิวเตรชัน.....	9
2.4 กลไกการดูดตันเยื่อกรอง.....	10
2.4.1 ปฏิกิริยาการก่อก้อนบนเยื่อกรอง.....	10
2.4.2 การเกิดชั้นเจล.....	11
2.4.3 การเกิดชั้นเค้ก.....	11
2.4.4 การดูดตันรูพรุน.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดหนุนเยื่อกรอง.....	12
2.5.1 คุณลักษณะของเยื่อกรอง.....	13
2.5.2 ขนาดน้ำหนักโมเลกุล.....	14
2.5.3 ความเข้มข้น.....	14
2.5.4 ความแรงของประจุ.....	15
2.5.5 พีเอชและอุณหภูมิ.....	15
2.5.6 สภาพการทำงาน.....	15
2.6 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์โดยเยื่อกรองแบบนาโนพิวเตรชั่น.....	16
2.6.1 กลไกการคัดแยกโดยใช้ขนาด.....	16
2.6.2 ความแตกต่างของประจุ.....	16
2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเยื่อกรอง.....	16
2.7.1 อัตราการไหลของกระบวนการออสโมซิสผันกลับ.....	16
2.7.2 การกรองสารอินทรีย์ทางธรรมชาติด้วยเยื่อกรองแบบนาโน.....	17
2.7.3 อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลและการเคลื่อนที่กลับของโมเลกุล.....	18
2.7.4 แบบจำลองความต้านทานแบบอนุกรมของการอุดหนุน.....	19
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	24
3.2.1 อุปกรณ์.....	24
3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์.....	25
3.2.3 ระบบเยื่อกรอง.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.4 ตัวอย่างน้ำและการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.....	29
3.4.1 การเก็บตัวอย่างน้ำ.....	29
3.4.2 การเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.....	29
3.5 การศึกษาการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน.....	30
3.5.1 เยื่อกรองแบบนาโน.....	30
3.5.2 การทำความสะอาดเยื่อกรอง.....	31
3.5.3 การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน.....	32
3.6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน.....	34
3.6.1 ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.....	34
3.6.2 ผลของความแรงประจุ.....	35
3.6.3 ผลของค่าพีเอช.....	35
3.6.4 ผลร่วมระหว่างสารอินทรีย์ทางธรรมชาติกับเกลืออนินทรีย์.....	36
3.7 การวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	36
3.7.1 ตัวอย่างน้ำ.....	36
3.7.2 ตัวอย่างเยื่อกรอง.....	37
3.8 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองความต้านทานแบบอนุกรม.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	39
4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง.....	39
4.2 การทดสอบระบบเยื่อกรองแบบนาโน.....	40
4.2.1 ผลของความดันที่มีต่อฟลักซ์ของระบบเยื่อกรองแบบนาโน.....	40
4.2.2 การทดสอบความแม่นยำของระบบ.....	42
4.3 ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อค่าฟลักซ์และความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.....	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.....	43
4.3.2 ผลของค่าความแรงของประจุ.....	46
4.3.3 ผลของพีเอช.....	48
4.3.4 ผลของเกลืออนินทรีย์.....	53
4.4 การวิเคราะห์การดูดตันของเยื่อกรองแบบนาโน.....	59
4.4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR.....	69
4.4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM.....	61
4.4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วย EDS.....	63
4.4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD.....	65
4.5 การศึกษาด้วยแบบจำลองความต้านทานแบบอนุกรม.....	66
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
บรรณานุกรม.....	71
ภาคผนวก ก.....	74
ภาคผนวก ข.....	105
ภาคผนวก ค.....	120
ภาคผนวก ง.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	134

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณลักษณะของแหล่งน้ำธรรมชาติในแต่ละสถานที่.....	5
3.1 คุณสมบัติของเยื่อกรองแบบนาโนของ Osmonics รุ่น HL 2540F1072.....	31
3.2 ตารางสรุปการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน.....	34
3.3 พารามิเตอร์ที่ศึกษาและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....	36
3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาตัวอย่างเยื่อกรองแบบนาโน.....	37
4.1 คุณลักษณะของน้ำผิวดินที่ใช้ในการทดลอง.....	39
4.2 ค่าคงตัวของการละลาย (K_{sp}) ของสารอินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง.....	58
ก.1 ตารางแสดงผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ของระบบเยื่อกรองแบบนาโน.....	75
ก.2 ตารางแสดงฟลักซ์ของการทดสอบความแม่นยำของระบบโดยตัวอย่างสารละลายที่มีความเข้มข้นของอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ครั้งที่ 1 และ 2.....	76
ก.3 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	78
ก.4 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	79
ก.5 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	80
ก.6 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	81
ก.7 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.004 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.8 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	83
ก.9 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	84
ก.10 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.1 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	85
ก.11 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.004 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	86
ก.12 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	87
ก.13 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.1 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	88
ก.14 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.004 โมลต่อลิตรปรับด้วยแคลเซียมคลอไรด์.....	89
ก.15 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยแคลเซียมคลอไรด์.....	90
ก.16 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วยแคลเซียมคลอไรด์.....	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.25 ตารางแสดงพลั๊กซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมซัลเฟต.....	100
ก.26 ตารางแสดงพลั๊กซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมฟอสเฟต.....	101
ก.27 ตารางแสดงพลั๊กซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมฟอสเฟต.....	102
ก.28 ตารางแสดงพลั๊กซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย แมกนีเซียมซัลเฟต.....	103
ก.29 ตารางแสดงพลั๊กซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย แมกนีเซียมซัลเฟต.....	104
ข.1 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์.....	106
ข.2 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์.....	106

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.3 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์.....	107
ข.4 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์.....	107
ข.5 ผลการกำจัดของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.004 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	108
ข.6 ผลการกำจัดของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	108
ข.7 ผลการกำจัดของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	109
ข.8 ผลการกำจัดของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.1 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์.....	109
ข.9 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.004 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์.....	110
ข.10 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์.....	110
ข.11 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.1 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์.....	11

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.12 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.004 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมคลอไรด์.....	112
ข.13 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมคลอไรด์.....	112
ข.14 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมคลอไรด์.....	112
ข.15 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.1 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมคลอไรด์.....	113
ข.16 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 4 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์.....	113
ข.17 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 10 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์.....	114
ข.18 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 4 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์.....	114
ข.19 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 10 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์.....	115

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.20 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต.....	115
ข.21 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต.....	116
ข.22 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมซัลเฟต.....	116
ข.23 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมซัลเฟต.....	117
ข.24 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมฟอสเฟต.....	117
ข.25 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมฟอสเฟต.....	118
ข.26 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย แมกนีเซียมซัลเฟต.....	118
ข.27 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย แมกนีเซียมซัลเฟต.....	119

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.1 ตารางแสดงค่าความต้านแบบอนุกรมของการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ระดับ 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	121
ค.2 ตารางแสดงค่าความต้านแบบอนุกรมของการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 7 โดยปรับความแรงประจุด้วยโซเดียมคลอไรด์ระดับต่าง ๆ.....	121
ค.3 ตารางแสดงค่าความต้านแบบอนุกรมของการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 7 โดยปรับความแรงประจุด้วยแคลเซียมคลอไรด์ระดับต่าง ๆ.....	121
ค.4 ตารางแสดงค่าความต้านแบบอนุกรมของการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 7 ปรับความแรงประจุเป็น 0.01 M ด้วยเกลืออนินทรีย์.....	122
ค.5 ตารางแสดงค่าความต้านแบบอนุกรมของการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 7 ปรับความแรงประจุเป็น 0.05 M ด้วยเกลืออนินทรีย์.....	122

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หลักการของกระบวนการของเยื่อกรอง.....	7
2.2 มวลสมดุลในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ.....	8
2.3 แผนภาพแสดงค่าความต้านทานแบบอนุกรมที่เกิดขึ้นจากการอุดตัน.....	21
3.1 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ.....	26
3.2 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน.....	27
3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....	28
3.4 ภาพแสดงระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ.....	30
3.5 ภาพระบบเยื่อกรองแบบนาโน.....	33
4.1 ผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ของเยื่อกรองแบบนาโน.....	41
4.2 ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทในช่วงเวลาต่างๆ.....	42
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์.....	44
4.4 ผลของค่าการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติต่างๆ.....	45
4.5 ผลของความแรงประจุต่อการลดลงของฟลักซ์.....	46
4.6 ความสามารถในการกำจัดเกลือของเยื่อกรองแบบนาโนจากสารละลายที่มีค่าความแรงประจุต่างๆ.....	47
4.7 การเปรียบเทียบผลของการลดลงของอัตราการไหลจากการกรองของน้ำตัวอย่างที่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติกับไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.....	48
4.8 ผลของพีเอชต่อการลดลงของฟลักซ์ที่ความแรงประจุต่างๆ.....	49
4.9 ผลของพีเอชต่อการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติพิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความแรงประจุต่างๆ.....	51
4.10 ผลของพีเอชต่อการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติพิจารณาจากปริมาณคาร์บอนที่มีความแรงประจุต่างๆ.....	52
4.11 ผลของประจุบวกที่ต่างกันต่อการลดลงของฟลักซ์.....	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ผลของไอออนประจุวขนาดต่างๆ ต่อการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.....	55
4.13 ผลของเกลือไอออนบวกสองต่อการลดลงของฟลักซ์.....	56
4.14 ผลของไอออนประจุสองบวกต่อการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.....	57
4.15 ผลของเกลืออนินทรีย์ที่มีประจุลบต่างกันต่อการลดลงของฟลักซ์.....	59
4.16 สเปกตรัม FTIR แสดงการเปรียบเทียบการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติต่อการเกิดการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน.....	60
4.17 สเปกตรัม FTIR แสดงการเปรียบเทียบการทำความสะอาดเยื่อกรองที่ใช้ทดลอง.....	61
4.18 ภาพถ่าย SEM clifการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนเยื่อกรองแบบนาโนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.....	62
4.19 ภาพถ่าย SEM แสดงการเปรียบเทียบการอุดตันบนเยื่อกรองแบบนาโนด้วยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติร่วมเกลืออนินทรีย์เป็นส่วนประกอบ.....	63
4.20 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS แสดงการสะสมตัวของธาตุบนเยื่อกรองแบบนาโน.....	64
4.21 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง XRD แสดงการตกผลึกของสารบนเยื่อกรองแบบนาโน.....	65
4.22 ความต้านทานของการอุดตันรูปแบบต่างๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.....	66
4.23 ความต้านทานของการอุดตันเปรียบเทียบระหว่างสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ที่ความแรงประจุต่างๆ.....	67
4.24 ความต้านทานของการอุดตันเปรียบเทียบระหว่างสารละลายที่มีแคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมฟอสเฟต.....	68

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
EDS	เอเนนเอจี้ดิสเพอร์ซีฟสเปกโตรมิเตอร์
FT-IR	ฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
HAA	กรดฮาโลอะซีติก
MF	เยื่อกรองแบบไมโคร
NF	เยื่อกรองแบบนาโน
NOM	สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
RO	เยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ
SEM	สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป
UF	เยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน
THM	ไตรฮาโลมีเทน
TOC	สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด
XRD	เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์
C_{feed}	ความเข้มข้นของน้ำเข้าระบบ
C_{mem}	ความเข้มข้นที่ผิวหน้าเยื่อกรอง
C_{perm}	ความเข้มข้นของเพอร์มีเอท
C_{reten}	ความเข้มข้นของรีเทนเทท
d_n	ขนาดของอนุภาค
D	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
J_v	อัตราการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรองต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
J/k	อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลและการเคลื่อนที่กลับของโมเลกุล
k	สัมประสิทธิ์ของการเคลื่อนที่ย้อนกลับของโมเลกุล
k_b	ค่าคงที่ Boltzmann (1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน)
K_{sp}	ค่าคงที่ของการละลาย
ΔP	ค่าความแตกต่างของแรงดัน
Q_{feed}	อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
Q_{perm}	อัตราการไหลของเพอร์มีเอท
Q_{reter}	อัตราการไหลของรีเทนเทท
r_p	รัศมีของอนุภาค
r_m	ค่าความต้านทานที่เกิดจากเยื่อกรอง
r_c	ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นเค้ก
r_s	ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นเจล
r_a	ค่าความต้านทานที่ไม่สามารถล้างออกได้
R	อัตราการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ
R^2	สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์
R_{feed}	อัตราการกำจัดสารละลายออกจากน้ำเมื่อเทียบกับน้ำเข้าระบบ
R_{mem}	อัตราการกำจัดสารละลายออกจากน้ำเมื่อเทียบกับเยื่อกรอง
R_{reten}	อัตราการกำจัดสารละลายออกจากน้ำเมื่อเทียบกับรีเทนเทท
U	ความเร็วของการไหลในแนวขวาง
$\Delta\pi$	ค่าความแตกต่างของแรงดันออสโมติก
σ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันออสโมติก
μ	ค่าความหนืดของน้ำ
μm	ไมโครเมตร
$\mu S.cm^{-1}$	ไมโครซีเมนต่อตารางเซนติเมตร
cm^{-1}	หนึ่งต่อเซนติเมตร
kPa	กิโลปาสคาล
kDa	กิโลดาลตัน
LMH	ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง
$L.min^{-1}$	ลิตรต่อนาที
$L.m^{-2}.h^{-1}$	ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
$L \cdot m^{-1} \cdot h^{-1} \cdot kpa^{-1}$	ลิตรต่อเมตรต่อชั่วโมงต่อความดัน
m	เมตร
m^{-1}	หนึ่งต่อเมตร
$mg \cdot L^{-1}$	มิลลิกรัมต่อลิตร
$mg^{-1} \cdot m^{-1}$	หนึ่งต่อมิลลิกรัมต่อเมตร
mg as $CaCO_3/L$	มิลลิกรัมของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร
mg Cl^{-1}/L	มิลลิกรัมของคลอไรด์ต่อลิตร
mg SO_4^{2-}/L	มิลลิกรัมของซัลเฟตต่อลิตร
$m \cdot s^{-1}$	เมตรต่อวินาที
psi	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์(เคลวิน)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (Natural Organic Matters, NOM) พบได้โดยทั่วไปตามแหล่งน้ำธรรมชาติ มีสีเหลืองถึงน้ำตาลดำมีในปริมาณที่มาก และทำให้ค่าความต้องการออกซิเจนในแหล่งน้ำดังกล่าวมีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังมีผลต่อกระบวนการผลิตน้ำประปาอีกด้วย กล่าวคือจะต้องทำให้สารเคมีจำนวนมากกว่าเดิมในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น (www.waterquality.crc.org.au) นอกจากนี้กระบวนการผลิตน้ำประปายังมีการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคก่อนที่จะนำไปอุปโภคและบริโภค สารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากกระบวนการบำบัดอาจเกิดปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THM_s) และกรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic acids, HAA_s) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Rodriguez and Sadiq, 2004) ดังนั้นการลดปริมาณสารอินทรีย์ทางธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ DBP_s (Disinfection by products -precursor) ให้เหลือน้อยที่สุด ก่อนส่งเข้าระบบการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งในการป้องกันการเกิด DBP_s

สารอินทรีย์ทางธรรมชาติเป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลอยู่ระหว่าง 300 ถึง 500 ดาลตัน (รัตนจิระรัตนานนท์, 2543) วิธีการหนึ่งที่เหมาะสมในการบำบัดคือ กระบวนการคัดแยกด้วยเยื่อกรอง (Membrane Filtration) ได้แก่ระบบออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis, RO), นาโน (Nanofiltration, NF) และอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) นั้น สามารถที่จะกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติได้ กระบวนการกรองด้วยเยื่อกรองที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตน้ำประปาได้แก่ ระบบนาโน เนื่องจากว่าระบบนาโนนี้มีรูพรุนที่มีขนาดอยู่ระหว่างระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน เยื่อกรองแบบอาร์โอมีขนาดเล็กทำให้กรองพวกแร่ธาตุออกจนหมด อาจไม่เหมาะสมกับการผลิตน้ำประปา โดยน้ำดังกล่าวใช้มากในกระบวนการทางอุตสาหกรรม ประกอบกับความดันออสโมติกในระบบที่สูง ทำให้จำเป็นต้องใช้พลังงานมากในการเพิ่มความดันให้แก่ระบบ ส่วนระบบอัลตราฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ อาจทำให้มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติปนออกมากับน้ำที่ผ่านการกรอง ดังนั้นระบบนาโนจึงเป็นระบบที่เหมาะสมเพราะว่าสามารถกรองสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และรูพรุนของเยื่อกรองระบบนาโนยังสามารถที่จะปล่อยให้แร่ธาตุบางส่วนผ่านออกมาได้ (มันสิน ตันฑุลเวศน์, 2539 ; รัตนจิระรัตนานนท์, 2543) จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าระบบเยื่อ

กรองแบบนาโนสามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) ประมาณ 90-95% กำจัดสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง เช่น ไทโรซอลมีเทน ประมาณ 91-98% กำจัดความกระด้างที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมกับแมกนีเซียมประมาณ 85-95% รวมทั้งกำจัดไอออนที่มีประจุเดี่ยวได้มากกว่า 70% (Watson and Hornburg. 1989 ; Duranceau *et al.* 1992 ; Escobar and Randall. 1999)

ปัญหาการอุดตันบนผิวของระบบเยื่อกรองแบบนาโนนับเป็นปัญหาที่สำคัญ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการผลิตประสิทธิภาพการทำงานของระบบ การเพิ่มค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน การลดปริมาณการผลิตของระบบ รวมทั้งการลดระยะเวลาการใช้งานของระบบ เยื่อกรองอาจเกิดการอุดตันจากสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในน้ำ (Collins *et al.* 1985 ; Kaiya *et al.* 1996 ; Schafer *et al.* 1998) ปัจจัยที่ทำให้เกิดการอุดตันนั้น มีหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น ประเภทและคุณสมบัติของเยื่อกรอง คุณลักษณะของน้ำรวมทั้งวิธีการเดินระบบ ปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ, ค่าพีเอชของสารละลาย, ค่าความแรงของประจุ (Ionic strength) รวมทั้งสารเกลืออนินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง โดยงานวิจัยนี้ มุ่งศึกษากลไกและปัจจัยของการอุดตันของเยื่อกรองอันที่เกิดจากสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ผลการวิจัยมีส่วนช่วยในการพัฒนาและยกระดับมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม น้ำใช้ของประเทศไทยในอนาคต รวมทั้งการประยุกต์ใช้ระบบเยื่อกรองในการผลิตน้ำที่มีคุณภาพสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองแบบนาโนในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน
3. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของน้ำที่มีผลต่อการอุดตันของระบบเยื่อกรองแบบนาโน
4. เพื่อศึกษาผลกระทบของสารอนินทรีย์ร่วมกับสารอินทรีย์ทางธรรมชาติต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน
2. ใช้น้ำดิบจากแหล่งน้ำผิวดินซึ่งอยู่ภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี มาผ่านกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
3. ศึกษาการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโนโดยวัดจากอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเยื่อกรองต่อหน่วยพื้นที่และความสามารถในการกักกันสารโดยเยื่อกรองนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติต่อการอุดตันของเยื่อกรองโดยแปรค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติเป็น 0, 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

5. เปรียบเทียบปัจจัยทาง พีเอช, ค่าความแรงของประจุ, ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติและเกลืออนินทรีย์ ที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

6. เปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรองหลังจากที่ได้มีการทำความสะอาดเยื่อกรองด้วยน้ำ และโซเดียมไฮดรอกไซด์

7. ศึกษาคุณลักษณะของสารที่ตกค้างอยู่บนผิวเยื่อกรองโดยการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ต่าง ๆ เช่น เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารที่เกิดการอุดตัน Scanning Electron Microscope (SEM) สำหรับภาพถ่ายการอุดตัน Energy Dispersive Spectrometer (EDS) สำหรับวิเคราะห์บนผิวเยื่อกรองและเครื่อง X-ray Diffractometer เพื่อวิเคราะห์ผลึกอนินทรีย์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงปัญหาของการกรองด้วยระบบเยื่อกรอง เนื่องจากการอุดตันของสารอินทรีย์และนำไปสู่แนวทางการแก้ปัญหาการอุดตันของระบบเยื่อกรอง

2. พัฒนาระบบการผลิตน้ำที่มีคุณภาพและมาตรฐานสูงขึ้น เพื่อเพิ่มคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นแก่ผู้บริโภค

3. พัฒนาเทคนิคและวิธีการประยุกต์ใช้ระบบเยื่อกรองในการผลิตน้ำให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการวางแผนการผลิตตั้งแต่ระบบบำบัดขั้นต้นจนถึงขั้นสุดท้ายของการผลิตน้ำ เพื่อเพิ่มระยะเวลาของการใช้งานของระบบเยื่อกรอง

4. เป็นจุดเริ่มต้นในการประยุกต์ใช้ระบบเยื่อกรองในงานด้านการผลิตน้ำ และการบำบัดน้ำเสียรวมทั้งงานด้านสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เช่นการประยุกต์ใช้ระบบนี้เพื่อการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนน้ำที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (Natural Organic Matter, NOM)

สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (Natural Organic Matter, NOM) พบมากในแหล่งน้ำธรรมชาติต่าง ๆ เกิดจากการย่อยสลายของซากพืชและซากสัตว์ โดยปกติจะประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นหลัก บางครั้งมีส่วนประกอบของไนโตรเจนและซัลเฟอร์อยู่ด้วย มีสารประกอบที่กว้างมาก โดยมีตั้งแต่ Hydrophilic acid ขนาดเล็ก โปรตีน และกรดอะมิโน ไปจนถึง Humic acid และ Fulvic acid ขนาดใหญ่ ลักษณะของโครงสร้างมีตั้งแต่ Aliphatic ขนาดใหญ่ จนถึง Aromatic มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10,000 ลดลงจนถึง 200 มีค่าประจุอย่างแรงจนถึงไม่มีประจุเลย

สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ สารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีสี และสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ไม่มีสี โดยที่สารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีสี ได้แก่ กรดฮิวมิก (Humic acid) และกรดฟูลวิก (Fulvic acid) ซึ่งกรดทั้งสองชนิดนี้จัดเป็นสารฮิวมิก ในส่วนของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ไม่มีสี ได้แก่ กรดไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic acid) ต่าง ๆ โปรตีน กรดอะมิโน และคาร์โบไฮเดรต กล่าวได้ว่าสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ไม่มีสี คือสารไม่ใช่ฮิวมิกนั่นเอง และสารฮิวมิกเป็นสารไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากกว่า (Swietli et al. 2003 ; Lin et al. 2000)

จากอดีตจนถึงปัจจุบัน สารฮิวมิกไม่สามารถถูกวิเคราะห์ได้โดยตรง ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะว่ายังไม่มีใครรู้ส่วนประกอบโครงสร้างทางเคมีที่แท้จริงของกรดฮิวมิกและกรดฟูลวิก ดังนั้นการวิเคราะห์สารฮิวมิกจึงต้องอาศัยวิธีการวิเคราะห์โดยอ้อม เช่น วัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลาย (Dissolved organic carbon, DOC) และวัด UV₂₅₄ นอกจากนี้ก็ยังใช้วิธีวัดแนวโน้มในการสร้าง Trihalomethanes (THM₅) ที่ได้จากปฏิกิริยาคลอรีนชันของตัวอย่างน้ำที่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

2.1.1 ผลกระทบของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีต่อคุณภาพน้ำ

สารอินทรีย์ทางธรรมชาติทำให้เกิดสี โดยสีของน้ำธรรมชาติมักเป็นสีเหลืองน้ำตาลหรือสีชา เกิดจากการเน่าเปื่อยของใบไม้ใบหญ้าหรือพืชนานาชนิดซึ่งมีสารลิกนิน (Lignin) เป็นส่วนประกอบ การย่อยสลายลิกนินทำให้เกิดสารแทนนิน (Tannin) สารประกอบประเภทฮิวมิก (Humic) และฟูลวิก (Fulvic) ซึ่งให้สีเหลืองชา สีธรรมชาติเช่นนี้มีลักษณะคุณสมบัติของอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าลบ การกำจัดสีธรรมชาติในน้ำจึงสามารถทำได้ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มหรือสารประกอบเหล็ก ซึ่งเป็นลักษณะของน้ำที่มีสีจริงหรือสีธรรมชาติที่เป็นสีเหลืองชา (สีคล้ำน้ำ

บัสสาวะ) เกิดจากสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) เช่น สารประกอบประเภทฮิวมิกและฟูลวิก อย่างไรก็ตาม ผู้ใช้น้ำย่อมพึงพอใจในการใช้น้ำประปาที่ใสสะอาดและปราศจากสี สีธรรมชาติอาจทำให้เกิดสารก่อมะเร็งทั้งนี้เพราะคลอรีนที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ เกิดเป็นสาร THM_s ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งได้ (มันสิน ตันทุลเวศน์. 2539 ; Rodriguez and Sadiq. 2003)

น้ำผิวดินที่มักมีสีส่วนใหญ่เป็นแหล่งน้ำนิ่งในห้วย หนอง บึง หรืออ่างเก็บน้ำ มีการทับถมและเน่าเปื่อยของพืชพรรณานาชนิด น้ำใต้ดินมักไม่มีสี แหล่งน้ำที่มีการไหล เช่น แม่น้ำ ลำคลอง ก็มักไม่มีสี นอกจากนี้ได้รับน้ำเสียที่มีสีจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ เยื่อกระดาษและอื่น ๆ โดยทั่วไปสารอินทรีย์ทางธรรมชาติต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำผิวดิน มีปริมาณความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ (ไม่ถึง 5 mg.L⁻¹ วัดในรูปของดีไอซี) แหล่งน้ำที่ดีจะไม่พบสารอินทรีย์ธรรมชาติ หรือมีน้อยมาก

สารอินทรีย์ที่มีอยู่ตามแหล่งน้ำธรรมชาติในแต่ละบริเวณคุณลักษณะที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของแหล่งน้ำธรรมชาติตามสถานที่ต่าง ๆ

พารามิเตอร์	น้ำผิวดิน			น้ำใต้ดิน	
	HT-SW ⁽¹⁾	W-S-SW ⁽²⁾	Twitchell ⁽²⁾	OC-GW ⁽¹⁾	OCWD ⁽³⁾
ประเภทของแหล่งน้ำ					
พีเอช (pH)	6.7	6.2	7	8.1	8.4
สารคาร์บอนทั้งหมด (TOC)	3.12	2	48.8	6.78	4
การดูดกลืนแสง (UV ₂₅₄)	0.092	0.048	1.769	0.405	0.22
การดูดกลืนแสงจำเพาะ (SUVA)	3	0.024	0.037	6	5.5
การนำไฟฟ้า (Conductivity)	58	21	1066	534	370

หมายเหตุ (1) Cho *et al.* (2000)

(2) Cho *et al.* (1999)

(3) Song *et al.* (2004)

2.1.2 ผลกระทบของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีต่อระบบบำบัดน้ำ

สารอินทรีย์ทางธรรมชาติมีผลต่อระบบบำบัดน้ำอย่างมาก โดยเฉพาะในกระบวนการหลัก ๆ ของการบำบัดน้ำดังต่อไปนี้ (www.waterquality.crc.org.au/nom/index.htm)

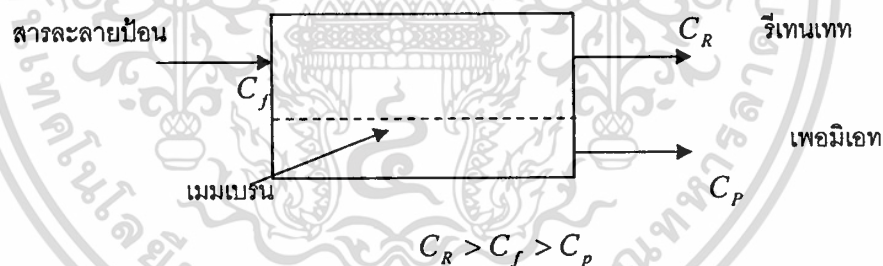
1. กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation/ flocculation) พบว่าสารอินทรีย์ทางธรรมชาติทำให้ต้องใช้ปริมาณสารเคมีจำนวนมากขึ้นในการบำบัดน้ำ เพราะฉะนั้นจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนในการผลิตน้ำประปา
2. กระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ โดยปกติจะใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มีขนาดเล็กถ้ามีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในน้ำมาก จะทำให้อายุของถ่านกัมมันต์สั้นลง ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการซื้อถ่านกัมมันต์ใหม่ นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ก็จะลดลง
3. กระบวนการฆ่าเชื้อโรค สารอินทรีย์ทางธรรมชาติจะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับคลอรีนที่อยู่ในน้ำ ทำให้ต้องใช้สารเคมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดสารก่อมะเร็ง
4. กระบวนการกรองโดยใช้แผ่นเยื่อกรอง สารอินทรีย์ทางธรรมชาติจะทำให้เกิดการอุดตัน ทำให้อัตราซึมผ่านเยื่อกรองลดลง ทำให้อายุการใช้งานของเยื่อกรอง ซึ่งมีราคาแพงมีระยะเวลาสั้นลง
5. กระบวนการส่งน้ำ สารอินทรีย์ทางธรรมชาติจะเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตในระบบ ทำให้น้ำประปามีคุณภาพไม่ดี

2.1.3 วิธีการบำบัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (NOM Treatment)

ในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาตินั้น โดยทั่วไปนิยมใช้กระบวนการสร้างและรวมตะกอน กระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ และกระบวนการกรองโดยใช้แผ่นเยื่อกรอง โดยเฉพาะในกระบวนการกรองน้ำโดยใช้เยื่อกรองนั้น ถือว่ามีความสำคัญมากเนื่องจากกระบวนการกรองในระดับนาโน (Nanofiltration, NF) นั้นสามารถกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติได้อย่างสมบูรณ์แบบ ถ้าหากว่าแผ่นเยื่อกรองของกระบวนการกรองในระดับนาโนไม่เกิดการอุดตันของเยื่อกรองอันเป็นผลมาจากสารอินทรีย์ธรรมชาติ

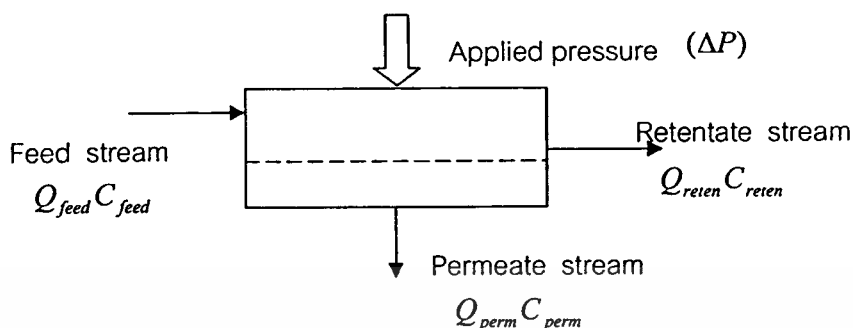
2.2 หลักการกรองผ่านเยื่อกรอง

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



รูปที่ 2.1 หลักการของกระบวนการของเยื่อกรอง (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

จากรูปที่ 2.1 หลักการและตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการออสโมซิสผันกลับคือ สารละลายที่เข้าสู่กระบวนการออสโมซิสผันกลับจะมีความเข้มข้นด้านเข้าระบบ (C_f) เมื่อผ่านเยื่อกรอง ค่าความเข้มข้นจะลดลงต่ำมากเมื่อออกจากระบบ โดยปกติจะเรียกว่า เพอเมเตท (C_p) ส่วนความเข้มข้นอีกส่วนหนึ่งที่มีค่าสูงมาก ๆ อยู่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง ส่วนนี้จะถูกระบายออกจากระบบ เรียกว่า รีเทนเนท (C_R) จากการพิจารณาสมดุลมวลของระบบเพื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลอง และเป็นการพิจารณาระบบลักษณะอุณหพลศาสตร์ไม่ผันกลับโดยพิจารณาจากรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 มวลสมดุลในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Mattaraj and Kilduff. 2003)

จากรูปที่ 2.2 เป็นแบบจำลองการแพร่กระจายสารละลายที่อธิบายการถ่ายเทมวลสารของน้ำหรือสารละลายและตัวถูกละลายผ่านเยื่อกรอง พิจารณาจากสมดุลมวลของทั้งระบบพบว่าเป็นไปตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ โดยที่ให้ความหนาแน่นของน้ำคงที่

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

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

และค่า Recovery ของระบบมีค่าดังสมการที่ 2.3

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

โดยที่

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

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

และ R คือ Recovery

จากการที่จะต้องศึกษาในส่วนของ การลดต้นของเยื่อกรอง ซึ่งดัชนีหรือตัวชี้วัดของการลดต้น นั้น ดัชนีหลักคือ การลดลงของอัตราการซึมผ่านเยื่อกรอง (Flux decline) ดังนั้นจึงได้นำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3 กระบวนการกรองแบบนาโน (Nanofiltration Process)

กระบวนการกรองแบบนาโนเป็นกระบวนการเยื่อกรองที่ใช้ความดันอยู่ระหว่างอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) และออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis, RO) โดยปกติ ออสโมซิสผันกลับจะใช้ความดันอยู่ในช่วง 1,378 – 6,893 kPa หรือ 200 – 1,000 psi โดยที่นาโนจะใช้ความดันอยู่ในช่วง 3-10 บาร์ หรือ 345-1,034 kPa หรือ 50 – 150 psi ในขณะที่ อัลตราฟิลเตรชันจะใช้ความดันอยู่ในช่วง 69-483 kPa หรือ 10-70 psi (Schafer *et al.* 1998 ; Kilduff *et al.* 2000)

กระบวนการนาโนเป็นกระบวนการที่มีหลักการเหมือนออสโมซิสผันกลับ ใช้สำหรับแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น เกลืออนินทรีย์ สารอินทรีย์ เช่น น้ำตาล กลูโคส ซูโคส กรดอินทรีย์ และสารอินทรีย์ที่เจือปนในน้ำทิ้ง การพัฒนากระบวนการแบบนาโนเกิดขึ้นหลังกระบวนการออสโมซิสผันกลับประมาณ 25 ปี เนื่องจากออสโมซิสผันกลับใช้สำหรับแยกเกลือต่าง ๆ ออกจากน้ำกร่อย น้ำทะเลเป็นหลักและความสามารถในการกักกันเกลือในรูปของ NaCl ได้สูงเกิน 98% ดังนั้น ถ้าต้องการใช้แยกตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่กว่า NaCl แต่น้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 500 กระบวนการออสโมซิสผันกลับจึงไม่เหมาะสม เพราะมีโครงสร้างแน่นเกินไป ทำให้ฟลักซ์ต่ำ จึงมีการพัฒนากระบวนการกรองแบบนาโนขึ้น สำหรับการใช้งานที่ไม่ได้เน้นการแยกเกลือจากน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล (รัตนา จิระรัตนานนท์. 2541) กระบวนการนาโน สามารถที่จะกรองสารอินทรีย์ที่มีไอออนบวกแบบประจุคู่ได้ และสามารถแยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติออกจากน้ำได้ด้วย (Conlon and McClellan. 1989 ; Duranceau *et al.* 1992)

สารอินทรีย์ทางธรรมชาติในแหล่งน้ำมีความสำคัญอย่างมากต่อการบำบัดน้ำ โดยปกติในแหล่งน้ำธรรมชาติผิวดินมักจะมีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของกรดฮิวมิก (Humic Acid) และกรดฟูลวิก (Fulvic Acid) ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดสีในแหล่งน้ำ (มันสิน ตันสุลเวศน์. 2539)

จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการกรองแบบนาโนในด้านการกรอง Total organic carbon (TOC), สาร Trihalomethane (THM₅), ความกระด้าง, สี และสารละลายไอออนประจุเดียว คิดเป็น 90-95 %, 91-98 %, 85-95 %, 90-97 % และมากกว่า 70 % ตามลำดับ (Watson and

Hornburg. 1989 ; Duranceau *et al.* 1992 ; Kabsch-Korbutowicz *et al.* 1994 ; Mattaraj and Chian. 1997)

2.4 กลไกการอุดตันเยื่อกรอง (Fouling Mechanisms)

การกรองแบบนาโนนั้นมีความเสียหายอันเนื่องมาจากการอุดตันสูงมาก เมื่อเกิดการอุดตันอันเนื่องมาจากการเกาะติดค้างบนผิวของเยื่อกรอง อัตราการกรอง (Permeate flux) จะลดลง นอกจากนี้ การสะสมความเข้มข้นของตัวถูกละลายบริเวณผิวของเยื่อกรอง จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและการอุดตันของเยื่อกรองเช่นกัน ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองประกอบด้วยประเด็นหลัก ๆ ดังนี้

2.4.1 ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization, CP) คือ การสะสมความเข้มข้นของสารถูกละลายบริเวณผิวของเยื่อกรองภายในชั้น Boundary Layer ซึ่งเป็นชั้นที่ใกล้ผิวหน้าของเยื่อกรอง Boundary Layer จะอยู่เป็นอิสระและขัดขวางการไหลผ่านเยื่อกรอง โดยทั่วไปจะมีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นปกติหลายเท่า CP ก่อผลเสียดังต่อไปนี้

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

จากกลไกการกำจัดเกลือแร่และกลไกในการกำจัดสารอินทรีย์ คุณลักษณะของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (เช่น น้ำหนักโมเลกุล และ Hydrophobicity) มีผลต่อการลดลงของอัตราการกรองผ่านเยื่อกรองในการกรองที่ใช้ระยะเวลาสั้น (Nilson and Digiano. 1996 ; Cho *et al.* 1999) ดังนั้น น้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติเป็นประเด็นหลักของคุณสมบัติของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในการที่จะใช้ทดลองสังเกตการลดลงของอัตราการกรองผ่านเยื่อกรอง

สารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการอุดตันบน Polysulfone NF membrane ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่า จะทำให้เกิดแรงตึงผิวมากขึ้น ด้วยเช่นกัน (Nilson and Digiano. 1996) ความเสียหายของเยื่อกรองแบบนาโนนั้นนอกจากน้ำหนักโมเลกุลแล้วยังสามารถเกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของอนุภาคและจากขนาดของอนุภาคเนื่องจากการเกิดขึ้นของตะกอนอนุภาคบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน (Lin *et al.* 2000)

การลดลงของผลกระทบจากขนาดน้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ทางธรรมชาตินั้น ขึ้นอยู่กับ pH และ ionic strength ของสารละลาย ซึ่ง Watson ได้ศึกษาว่าอัตราการรวมตัวกันของอนุภาค Humic Acid ลดลงเมื่อทำการเพิ่มระดับ pH และจากการเพิ่ม Ionic repulsion forces ระหว่างอะตอม Humic Acid (Watson and Hornburg. 1989)

2.4.2 การเกิดชั้นเจล (Gel layer) คือชั้นของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ที่สะสมอยู่ในบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองซึ่งพบมากในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งมีการเกิดชั้นดังต่อไปนี้ คือหากว่าความเข้มข้นของตัวที่ถูกละลายในบริเวณใกล้กับผิวหน้าของเยื่อกรองมีค่าที่สูงมากจนถึงขีดจำกัดของสารที่จะละลายได้ ($C_g = \text{Gel concentration}$) ของสารตัวนั้นๆ ตัวถูกละลายอาจมีลักษณะคล้ายกับเจลเกิดขึ้นในบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง ซึ่งจะเป็นเหตุทำให้ความต้านทานอัตราการไหลนั้นสูงขึ้นมากกว่าเดิม อัตราการไหลของสารละลายจึงมีค่าที่ลดลงจากค่าเดิม และชั้นของเจลนี้ยังอาจจะทำให้ค่าการ Recovery ของเยื่อกรองเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของชั้นเจลที่มีการเกิดขึ้นที่บริเวณหน้าผิวของระบบ ถ้าตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็กจะสามารถที่จะเคลื่อนที่ผ่านในชั้นของเจลได้เร็วกว่าในเยื่อกรอง ดังนั้น จะทำให้ค่าการ Recovery ของตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็กจะลดลง แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าตัวถูกละลายนั้นสามารถที่จะเคลื่อนที่ภายในชั้นของเจลได้ช้า หรือเป็นเพราะว่ารูพรุนภายในชั้นของเจลเล็กและแน่นกว่าเยื่อกรองจะทำให้โอกาสที่ตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นของเจลเข้าสู่ชั้นของแผ่นเยื่อกรองเดิมย่อมเป็นไปได้ยากกว่า จึงทำให้ค่าการ Recovery ของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น

2.4.3 การเกิดชั้นเค้ก (Cake Formation) การเกิดขึ้นของเค้กนั้นมักเกิดจากความใกล้เคียงกันกับกระบวนการการเกิดของเจลแต่ชั้นของการเกิดเค้กนั้นเป็นการที่เกิดจากระดับของอนุภาคซึ่งสามารถที่จะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

1. ถ้าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรอง อนุภาคจะถูกสะสมและเกิดการรวมตัวกันเกิดขึ้นเป็นเค้กชั้นที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง

2. ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ผสมกันอยู่ อนุภาคขนาดเล็กจะสามารถถูกสะสมอยู่ในรูพรุนของเยื่อกรองก่อนจนแน่นและเต็ม ต่อจากนั้นไปจะเกิดการสะสมตัวของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ตามมาแล้วเกิดเป็นเค้กชั้นที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองในที่สุด

เยื่อกรองนั้นสามารถที่จะดูดซับโมเลกุลหรืออนุภาคที่มีขนาดเล็กไว้เกิดเป็นชั้นของบางๆบริเวณบนผิวหน้าของเยื่อกรอง (ในกรณีที่เป็นโมเลกุลจะถูกเรียกว่า เจล และในกรณีที่เป็น

อนุภาคจะถูกเรียกว่า เด็ก) คำว่าเด็กนั้นเป็นคำที่รู้จักกันเป็นอย่างดีเมื่อมีการกล่าวถึงการกรองในระดับของอนุภาค ซึ่งความแตกต่างระหว่างเจลและเด็กนั้น สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

การสะสมตัวของตัวถูกละลาย เจลนั้นจะเป็นการสะสมตัวของสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ส่วนในเด็กนั้นจะเป็นการสะสมตัวที่เป็นชั้นของอนุภาคหรือสารแขวนลอย

จากความหนา โดยที่ชั้นความหนาของเจลนั้นมีความหนาที่เกิดขึ้นจะอยู่ในระดับของหน่วยไมครอน แต่ในขณะที่ยังมีความหนาของเด็กซึ่งอาจจะทำการวัดได้นั้น จะมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

2.4.4 การอุดตันรูพรุน (Pore Blockage) คือการอุดตันรูพรุนของเยื่อกรอง ซึ่งได้แสดงลักษณะของการเกิดการอุดตันของแผ่นเยื่อกรองที่มีรูพรุนขนาดต่าง ๆ เมื่อทำการเทียบกับตัวถูกละลาย

1. สำหรับเยื่อกรองที่มีขนาดของรูพรุนที่แน่นและมีขนาดเล็กกว่าตัวถูกละลาย จะทำให้เกิดการอุดตันที่บนบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง

2. สำหรับในกรณีที่มีขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่กว่าตัวที่ถูกละลายเล็กน้อย จะทำให้เกิดการอุดตันในรูพรุนก่อน ต่อจากนั้นจะเริ่มมีการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง ซึ่งจะมีการอุดตันบนบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองเป็นส่วนใหญ่

3. สำหรับในกรณีที่มีขนาดของรูพรุนของเยื่อกรองห่างกันและมีขนาดใหญ่กว่าตัวถูกละลายมาก จะทำให้เกิดการอุดตันบริเวณภายในรูพรุนก่อน ต่อจากนั้นจะเริ่มมีการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรอง

คุณภาพของน้ำหรือสารละลายที่ผ่านกระบวนการกรอง รวมทั้งอายุการใช้งานของเยื่อกรองขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยประกอบด้วย ส่วนประกอบของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration) ความแรงของประจุ (Ionic strength) pH ของสารละลาย และลักษณะการไหลเข้าที่เรียกว่า Cross flow velocity (Mattaraj and Chian. 1997)

จากการศึกษาของนักวิจัยอีกหลายท่าน ได้มีการศึกษาซึ่งสามารถรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองที่เกิดจากสารอินทรีย์ทางธรรมชาติจะพบว่ามีปัจจัยหลักดังนี้

- ลักษณะ Hydrophobicity ของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
- ขนาดน้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

- ความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration)
- ความแรงของประจุ (Ionic strength)
- pH ของสารละลาย
- สภาพทำงาน (Operating condition)

ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยของสารละลายอินทรีย์ทางธรรมชาติ ต่อการดูดซับของเยื่อกรอง ในกระบวนการกรองแบบนาโน

2.5.1 คุณลักษณะของเยื่อกรอง

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

ขนาดใหญ่ : ขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร

ขนาดกลาง : ขนาดของรูพรุนอยู่ระหว่าง 2 นาโนเมตร ถึง 50 นาโนเมตร

ขนาดเล็ก : ขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร

โดยขนาดของรูพรุน หมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดความกว้างของรูพรุน ดังนั้น เยื่อกรองแบบไมโครฟิลเตรชันจัดว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ และสำหรับอัลตราฟิลเตรชันเป็นขนาดกลาง ถ้าขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร นิยมเรียกว่า เยื่อกรองแบบแน่นมากกว่าที่จะเรียกว่ามีรูพรุนขนาดเล็ก

2. Hydrophobicity โดยทั่วไป โพลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อกรองสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. ถ้าต้องการที่จะทำการแยกน้ำ (ซึ่งอาจจะมียูในปริมาณที่น้อย) ออกจากสารละลายอินทรีย์ โดยโพลิเมอร์ที่จะใช้ในการผลิตเยื่อกรองต้องมีคุณสมบัติที่ชอบน้ำ

2. ถ้าต้องการที่จะทำการแยกสารอินทรีย์ (ซึ่งอาจจะมียูในปริมาณที่น้อย) ออกจากสารละลายเจือจาง โดยโพลิเมอร์ที่จะใช้ในการผลิตเยื่อกรองต้องมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ แต่ยังไม่มีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างจริงจัง

3. ประจุหรือความมีขั้วของเยื่อกรอง จากการที่อัตราการไหลและการ Recovery ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างเยื่อกรองและตัวถูกละลาย ทำให้ผู้ใช้ต้องมีความเข้าใจและสามารถที่จะเลือกเยื่อกรองให้เหมาะสมกับตัวถูกละลายที่ต้องการจะทำการแยก เช่น เซลลูโลสอะซิเตดและโพลีเอไมด์จะแสดงความเป็นขั้วลบเล็กน้อย ในขณะที่โพลีเมอร์อื่น ๆ อาจจะมีคุณสมบัติที่เป็นกลาง แต่ยังมีโพลีเมอร์อีกพวกหนึ่งซึ่งเรียกว่า โพลีอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งหมายถึง โพลีเมอร์ที่ประกอบด้วยกลุ่มที่มี

ประจวบกับที่ ซึ่งสามารถที่จะดึงดูดอยู่กับไอออนเคลื่อนที่ที่มีประจุตรงข้ามเมื่อโพลิเมอร์ชนิดนี้อยู่ในน้ำ (ตัวทำละลายที่มีขั้ว) จะทำให้สามารถแตกตัวได้โพลิอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งใช้ในการผลิตเยื่อกรองสำหรับกระบวนการที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อนในการที่จะแยก เช่น อิเล็กโตรไดอะไลซิส และยังผลิตเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ, อัลตราฟิลเตรชัน และนาโนอีกด้วย

สำหรับเยื่อกรองแบบนาโนส่วนใหญ่จะเป็นเยื่อเชิงประกอบซึ่งบริเวณผิวหน้าผลิตมาจากโพลิเมอร์ได้หลายชนิด และโดยส่วนใหญ่จะมีประจุที่บริเวณผิวหน้าเป็นลบ ดังนั้นจึงมีค่า Recovery สูงกับตัวถูกละลายที่มีประจุเดียวกันกับเยื่อกรอง

2.5.2 ขนาดน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight)

ขนาดน้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ เป็นปัจจัยหนึ่งที่จะใช้ทำการศึกษถึงการอุดตันของเยื่อกรอง โดยจะสังเกตการลดลงของอัตราการกรองผ่านเยื่อกรอง

Nilson and Digiano (1996) ได้ค้นพบว่าสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่ จะทำให้เกิดการอุดตันบนเยื่อกรองนาโนแบบ Polysulfone ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่า จะทำให้เกิดแรงดึงดูดมากขึ้นด้วยเช่นกัน

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

2.5.3 ความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration)

ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ มีผลต่อความเสียหายของแผ่นเยื่อกรองเป็นอย่างมาก ถือได้ว่าเป็นปัจจัยหลัก เนื่องจากในระบบไฮโดรไดนามิกใด ๆ รวมทั้งระบบออสโมซิสผันกลับจะมีชั้นน้ำที่เรียกว่า Boundary Layer อยู่ติดกับผิวหน้าของเยื่อกรอง ชั้นน้ำดังกล่าวนี้จะอยู่เป็นอิสระไม่ผสมกับน้ำที่อยู่ภายนอกของชั้นความหนาของ Boundary Layer ซึ่งแปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำและความปั่นป่วน น้ำสะอาดจะถูกบังคับออกจากชั้นนี้และกระจายซึมผ่านเยื่อกรองออกไปภายนอก ทำให้มีการสะสมตัวของสารละลายต่าง ๆ เกิดขึ้นภายใน Boundary Layer จนกระทั่งมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำดิบหลายเท่า ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิด Concentration Polarization ระดับการเกิด Concentration Polarization อาจแสดงได้ด้วยอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นสูงสุดของสารละลายใน Boundary Layer และความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำดิบ

2.5.4 ความแรงของประจุ (Ionic Strength)

ความแรงของประจุก็มีผลต่อการเกิดขึ้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนผิวหน้าของเยื่อกรองด้วยเหมือนกัน

Hong and Elimelech (1997) ได้ทำการศึกษาความเสียหายของเยื่อกรองในกระบวนการนาโน อันเนื่องมาจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ที่มาจากแหล่งน้ำ 3 แหล่ง พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จะส่งผลให้เกิดการสะสมของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนผิวของเยื่อกรอง ผลการศึกษาของ Hong and Elimelech (1997) พบว่าความแรงของประจุมีผลต่ออัตราการซึมผ่านเยื่อกรอง ทั้งนี้เพราะที่ความแรงของประจุสูงจะทำให้ประจุที่บริเวณผิวของเยื่อกรองและโมเลกุลของอิมิกจะลดลง เนื่องมาจากการที่ชั้น Double Layer ถูกบีบอัดให้แน่น ทำให้ชั้นมีความหนาลดลง ส่งผลต่อการลดลงของแรงผลักระหว่างผิวของเยื่อกรองกับสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ทำให้สารอินทรีย์ทางธรรมชาติมีโอกาสที่จะเข้าสู่ผิวและติดค้างตามกลไกได้มากขึ้น และย่อมจะส่งผลเสียได้มากขึ้นด้วย

2.5.5 พีเอชและอุณหภูมิ (pH and Temperature)

การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแต่ละองศาในช่วง 15-30 องศาเซลเซียส ช่วยให้อัตราการซึมผ่านเยื่อกรองมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ การที่เยื่อกรองเป็นสารอินทรีย์เอสเตอร์ ซึ่งสามารถสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส อุณหภูมิและค่าพีเอชของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติจึงมีบทบาทสำคัญ โดยอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะแปรตามอุณหภูมิของน้ำและจะช้าที่สุดเมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4-5 ด้วยเหตุนี้ถ้าต้องการให้เยื่อกรองมีอายุยืนนานควรรักษาระดับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 3-7 และไม่ใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูง (มันสิน ตันทุลเวศน์. 2539)

2.5.6 สภาพการทำงาน (Operating Conditions)

สภาพการทำงานในที่นี้หมายถึง อุณหภูมิ ความดัน แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากสภาพการทำงาน อุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของสารละลาย แต่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาปัจจัยสำคัญของสภาพการทำงาน คือ ความดันและแรงเฉือน เนื่องจากมีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองมากกว่าปัจจัยอื่น

2.6 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์โดยเยื่อกรองแบบนาโน

2.6.1 กลไกการคัดแยกโดยใช้ขนาด (Size Exclusion) เนื่องจากว่าเยื่อกรองแบบนาโนมีขนาดรูที่เล็กคือ มีขนาดประมาณ 150 – 300 ดาลตัน ทำให้สารที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพุนของเยื่อกรองไม่สามารถที่จะผ่านออกมาได้ เช่น กระบวนการนาโนสามารถที่จะกรอง Total organic carbon (TOC), สาร Trihalomethane (THM), ความกระด้าง, สี และสารละลายไอออนประจุเดียว คิดเป็น 90-95 %, 91-98 %, 85-95 %, 90-97 % และมากกว่า 70 % ตามลำดับ (Watson and Hornburg. 1989 ; Duranceau *et al.* 1992 ; Kabsch-Korbutowicz *et al.* 1994 ; Mattaraj and Chian. 1997)

2.6.2 ความแตกต่างของประจุ (Charge Interaction) เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองจะมีประจุที่เกิดจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตในแต่ละชนิด แต่โดยส่วนใหญ่แล้ว จะมีประจุที่เป็นลบ ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกัน และยังมีค่าประจุที่มากก็จะทำให้เกิดแรงผลักรวมมากขึ้น อย่างไรก็ตามแรงผลักรวมไม่มีผลมากเพราะว่าเยื่อกรองแบบนาโนมีการใช้แรงดันที่สูงจะทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำออกมาจึงทำให้อาจจะมีความเข้มข้นของเกลือที่สูงอยู่ได้

2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเยื่อกรอง

2.7.1 อัตราการไหลของกระบวนการออสโมซิสผันกลับ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั่วไปในการศึกษากระบวนการออสโมซิสผันกลับพบว่า อัตราการซึมของน้ำผ่านเยื่อเมมเบรนของ Lonsdale (Water Flux, J_v) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.4

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

โดยที่

J_v คือ อัตราการซึมของน้ำผ่านเยื่อกรอง หรือ Water Flux ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)

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

ΔP คือ ความแตกต่างระหว่างแรงดันของน้ำที่อยู่คนละด้านของเยื่อกรอง (kPa)

$\Delta \pi$ คือ ความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมติกของน้ำที่อยู่คนละข้างของเยื่อกรอง (kPa)

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

2.7.2 การกรองสารอินทรีย์ทางธรรมชาติด้วยเยื่อกรองแบบนาโน

จากการศึกษาของ Mattaraj and Kilduff (2003) เกี่ยวข้องกับความเสียหายของเยื่อกรองอันเป็นผลมาจากสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในกระบวนการกรองแบบนาโนซึ่งมีความสอดคล้องกับแผนการวิจัยในครั้งนี้ ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการซึมผ่านเยื่อกรองดังสมการที่ 2.5

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

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

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

ΔP คือ ค่าความแตกต่างของความดันเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ

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

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

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

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

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

ส่วนการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ (Rejection) โดยการกรองผ่านเยื่อกรองจะสกัดเอาสารละลายต่าง ๆ ออกจากน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.7 - 2.9

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

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

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

โดยที่ R คือ อัตราการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ (%)
 C_{mem} คือ ความเข้มข้นที่ผิวของเยื่อกรอง (mg.L^{-1})
 C_{reten} คือ ความเข้มข้นของรีเทนเทท (mg.L^{-1}) (Mattaraj and Kilduff, 2003)

2.7.3 อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลและการเคลื่อนที่กลับของโมเลกุล

ที่ค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของน้ำและการเคลื่อนที่กลับของโมเลกุลของตัวถูกละลาย (J/k) มีความสัมพันธ์กับการอุดตันบนเยื่อกรองคือ ค่า J/k มากแสดงถึงอัตราการไหลของน้ำที่สูง ในขณะที่เดียวกันมีการเคลื่อนที่กลับของตัวถูกละลายต่ำ ทำให้มีโอกาสเกิดการอุดตันได้สูง ส่วนค่า J/k ที่ต่ำแสดงถึงอัตราการไหลของน้ำที่น้อย ประกอบกับการเคลื่อนที่กลับของตัวถูกละลายที่สูง นั่นคือโอกาสของการเกิดการอุดตันต่ำ

ค่า J_v คือ ค่าอัตราการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรองต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โดยสามารถที่จะหาได้ด้วย Darcy's Law ในสมการที่ 2.10

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

โดยที่ ΔP คือ ค่าของความดันที่ลดลง (kPa)

μ คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s)

r_m คือ ค่าความต้านทานของเยื่อกรองแผ่นใหม่ (m^{-1})

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

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

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

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

d_h คือ ขนาดของโมเลกุล (m)

L คือ ความยาวของการไหลในแนวขวาง (m)

โดยค่า D สามารถที่จะหาได้จากสมการที่ 2.12 ดังนี้

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

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

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

μ คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s)

r_p คือ รัศมีของอนุภาค (m)

2.7.4 แบบจำลองความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม (Resistance-in-series Model)

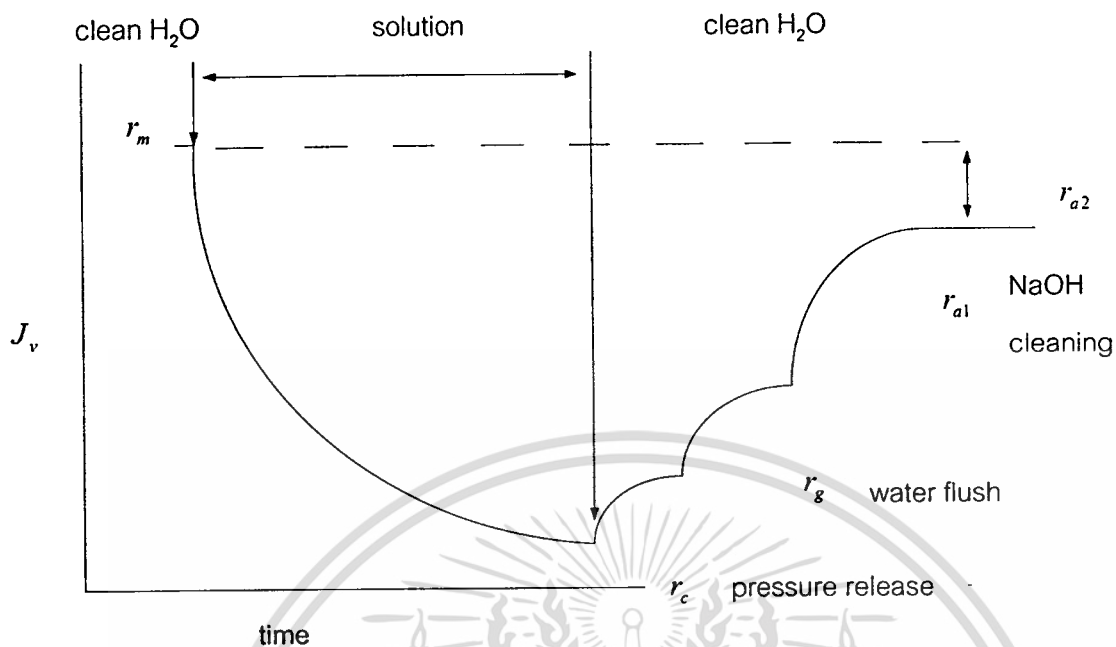
จากสมการของ Darcy's Law ที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 2.10 ในส่วนของค่าความต้านทานของเยื่อกรองนั้น เมื่อมีการใช้งานจนเกิดการอุดตันที่ผิวของเยื่อกรอง ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจะไม่ได้มีเฉพาะความต้านทานของเยื่อกรองเท่านั้น แต่จะมีความต้านทานอันเกิด

จากการลดต้นเพิ่มขึ้นมาด้วย ซึ่งค่าความต้านทานที่มีจะเปลี่ยนเป็นค่าความต้านทานรวมที่เกิดขึ้นจากการลดต้นบริเวณผิวเยื่อกรอง จากการศึกษาของ Cho *et al.* (2000) พบว่าอัตราการไหลที่ลดลงและการดูดซับบนผิวเยื่อกรองซึ่งค่าความต้านทานรวมที่เกิดขึ้นนั้นมีลำดับขั้นตอนการเกิดขึ้นดังนี้

1. ใช้น้ำปราศจากไอออนเดินระบบจนมีอัตราการไหลของน้ำสะอาดที่คงตัว
2. เปลี่ยนมาใช้น้ำตัวอย่างที่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติและทำการวัดอัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จนครบเวลา
3. หลังจากที่ได้ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ผลิตได้ลดลงคงที่อันเนื่องมาจากการลดต้นที่เกิดขึ้น จึงใช้น้ำกลั่นเข้าไปไล่ จะทำให้ส่วนของชั้นสารละลายที่มีความเข้มข้นที่สูงออกมา
4. ทำการล้างด้วยน้ำกลั่นเป็นรอบที่สองซึ่งจะใช้อัตราการไหลที่สูงกว่าในการทดลองจะเป็นผลทำให้ชั้นของเจลที่เกิดขึ้นหลุดออกมาด้วย
5. ทำการล้างด้วยสารละลายเบส (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร สิ่งที่สารละลายล้างออกมาได้จะเป็นส่วนของสารที่เกิดการดูดซับที่บริเวณผิวของเยื่อกรอง ซึ่งสามารถที่จะหลุดออกมาได้

จากขั้นตอนที่กล่าวมาจะทำให้ทราบว่าเกิดค่าความต้านทานประเภทใดขึ้นมาบ้าง ดังต่อไปนี้

1. ค่าความต้านทานที่เกิดจากตัวเยื่อกรองเอง (r_m) เกิดขึ้นจากเยื่อกรองแต่ละตัวนั้นมีขนาดรูพรุนที่ใช้ในการคัดแยกสารที่แตกต่างกัน ซึ่งขนาดของรูพรุนที่ได้กล่าวถึงจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดความต้านทานขึ้นมา
 2. ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของ Concentration Polarization (r_c) เกิดขึ้นจากตัวอย่างสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ เมื่อทำการทดลองความเข้มข้นที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรองจะมีความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติออกจากน้ำ
 3. ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของเจล (r_g) เกิดขึ้นจากเมื่อบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองมีความเข้มข้นที่สูงขึ้น จนมีค่าเกินขีดจำกัดของการละลายของสารที่มีอยู่ในน้ำ จะมีลักษณะคล้ายเจลเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง
 4. ค่าความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับอย่างอ่อน (r_{a1}) เกิดจากการดูดซับที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของเยื่อกรองซึ่งการดูดซับนี้สามารถที่จะล้างออกได้โดยใช้สารเคมี
 5. ค่าความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับอย่างถาวร (r_{a2}) เกิดจากการดูดซับอย่างถาวร ซึ่งจะติดแน่นอยู่กับเยื่อกรองดังนั้นจึงไม่สามารถทำความสะอาดด้วยสารเคมีได้
- จากขั้นตอนดังกล่าวมาเมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงค่าความต้านทานแบบอนุกรมที่เกิดขึ้นจากการอุดตัน (Cho et al. 2000)

ซึ่งพบว่าในส่วนของค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากชั้นของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง, ชั้นของเจล และชั้นที่เกิดจากการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรองนั้น เมื่อทำความสะอาดแล้วก็จะพบว่าสามารถทำความสะอาดได้ แต่ไม่เท่าระดับเดิม เนื่องจากยังมีสารที่อุดตันอยู่อย่างถาวร ซึ่งไม่สามารถทำความสะอาดได้ จากกราฟที่ได้นั้น สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่

2.13

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu(r_m + r_c + r_g + r_{a1} + r_{a2})} \quad (2.13)$$

โดยที่

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

ΔP คือ ค่าความดันที่ลดลง (KPa)

μ คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s)

r_m คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากเยื่อกรอง (m^{-1})

r_c คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของสารละลายที่มีความเข้มข้น (m^{-1})

r_g คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของเจล (m^{-1})

r_{a1} คือ ค่าความต้านทานที่การดูดซับที่สามารถล้างออกได้ (m^{-1})

r_{a2} คือ ค่าความต้านทานที่ไม่สามารถล้างออกได้ (m^{-1}) (Cho *et al.* 2000)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bowen *et al.* (1995) พบว่าอนุภาคของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ปกคลุมผิวหน้าของเยื่อกรองจะมีผลต่อการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจากการสะสมตัวที่เกิดขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติสูง จนมีลักษณะเป็นชั้นคล้ายเค้กปกคลุมที่ผิวเยื่อกรองเป็นผลให้มีความต้านทานของระบบที่เพิ่มมากขึ้น

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

Crozes *et al.* (1993) พบว่าการอุดตันของเยื่อกรองแบบอัลตราฟิวเตรชันเป็นผลมาจากการลดจำนวนและขนาดของรูเยื่อกรอง ทำให้น้ำไหลไม่สะดวก ทำให้เกิดความต้านทานที่สูงทำให้ฟลักซ์ลดลง และยังขนาดของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติมีขนาดเล็กกว่ารูเยื่อกรอง ยิ่งจะทำให้เกิดการอุดตันได้สูงและทำให้ยากแก่การทำมาสะอาด เมื่อมีการใช้งานไปเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเยื่อกรองได้ง่าย

Hong and Elimelech (1997) พบว่าลักษณะทางกายภาพและเคมีของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติมีผลต่อการเกิดการอุดตันของเยื่อกรองโดยใช้น้ำธรรมชาติจาก 3 แหล่ง โดยที่เพิ่มเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งทำให้เกิดการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ผิวหน้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้านทานเพิ่มมากขึ้น ค่าฟลักซ์ที่ได้มีค่าต่ำลง

Kilduff *et al.* (2004) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ระดับ 0 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง โดยความเข้มข้นสูง ยิ่งทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงมากขึ้น เนื่องมาจากความต้านทานจากชั้นเค้ก ความเข้มข้นของไฮเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงและความสามารถในการกำจัดเกลือลดลง และเมื่อมีการเพิ่มระดับพีเอชเป็น 10 พบว่าค่า ฟลักซ์ที่ได้ มีค่าที่ลดลงมากที่สุด

Lin *et al.* (2000) พบว่าการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน นอกจากน้ำหนักโมเลกุลแล้วยังสามารถที่จะเกิดจากการรวมกันของชั้นอนุภาคและขนาดอนุภาค เนื่องจากเกิดการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้า ทำให้มีค่าความต้านทานสูง โดยการลดลงของฟลักซ์ในเยื่อกรองแบบอัลตราฟิวเตรชัน เกิดขึ้นโดยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาด 6.5 – 22.6 KDa

Mattaraj and Kilduff (2003) พบว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติต่ำ จะเกิดกลไกการอุดตันตามแบบจำลองประเภท standard blocking และ intermediate blocking ส่วนความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติสูง จะเกิดกลไกการอุดตันแบบจำลองประเภท blocking และ cake formation ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการลดลงของฟลักซ์ โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติตั้งแต่ 5, 10, 20, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

Nilson and Digiano (1996) พบว่าสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลใหญ่สามารถจะทำให้เกิดการอุดตันบนเยื่อกรองแบบนาโน ทำให้ฟลักซ์ลดลง เนื่องมาจากน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าแรงตึงผิวมากขึ้น ทำให้ติดค้างอยู่กับเยื่อกรอง

Schafer *et al.* (1998) พบว่าถ้ามีการรวมตัวระหว่างแคลเซียมกับสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ระดับความเข้มข้นสูง จะส่งผลกระทบต่ออัตราการลดลงของฟลักซ์เป็นอย่างมาก เนื่องมาจากแคลเซียมสามารถเป็นตัวสะพานเชื่อม (Bridging) ระหว่างสารอินทรีย์ทางธรรมชาติกับผิวของเยื่อกรองทำให้เกิดการอุดตันเร็วขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าฟลักซ์ที่ได้ และการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมยังสามารถทำให้เกิดการลดลงของฟลักซ์ได้เช่นเดียวกัน

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

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

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 อุปกรณ์

1. บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. บีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร
3. บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
4. แท่งแก้วคนสาร
5. ถังผสมน้ำตัวอย่าง
6. ถังสำหรับใส่น้ำตัวอย่างที่เตรียมแล้ว
7. ช้อนตักสารเคมี
8. บีมดูดอากาศ
9. เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง
10. สายยางซิลิโคน

3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องวัดค่าพีเอช (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GMBH, ประเทศเยอรมัน)
2. เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้า (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GMBH, ประเทศเยอรมัน)
3. เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (Shimadzu Corporation รุ่น UV mini 1240, ประเทศญี่ปุ่น)
4. เครื่องวิเคราะห์ Total Organic Carbon (TOC) (Shimadzu Corporation รุ่น TOC-VCPH, ประเทศญี่ปุ่น)
5. เครื่อง Ion Chromatography (IC) (Metrohm Herisaw รุ่น 761 Compact IC, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์)
6. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และ Energy Dispersive Spectrometer (EDS) (Leo Co., Ltd รุ่น 1455VP)
7. เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) (Bruker A.G. Co., Ltd รุ่น D8 Advane)
8. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) (Model FT-IR Spectrum GX)

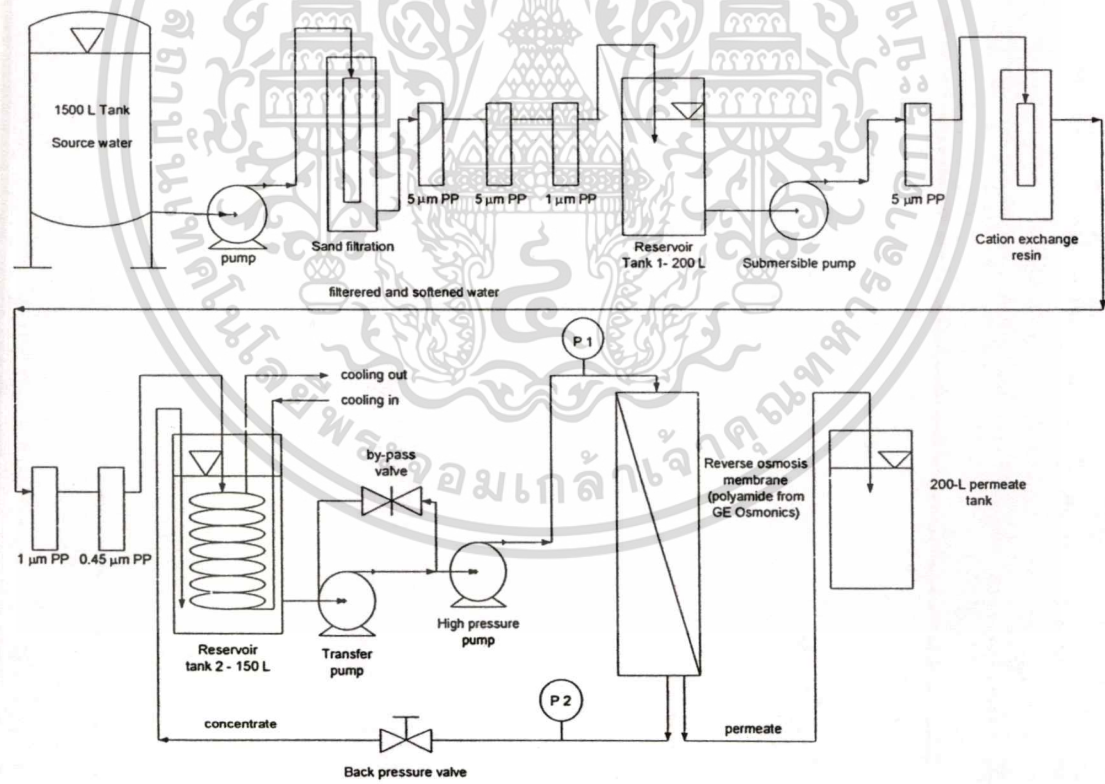
3.2.3 ระบบเยื่อกรอง

3.2.3.1. ระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis Membrane) ดังแสดงในรูป 3.1 ประกอบด้วย

- เยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ จากบริษัท GE Osmonics ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเภท Brackish Water- RO Polyamide PA Membrane ชนิด Thin-film composite (TFC) membrane รุ่น AG4040F (Spiral wound crossflow)
- ปั๊มแบบทรานสเฟอร์ปั๊ม Transfer pump (Model PL-95 M) จาก Bcelona ประเทศสเปน
- ปั๊มที่มีความดันสูงแบบ High pressure boost pump (Model 25) จาก GRUNDFOS
- ปั๊มน้ำแบบจุ่มลงในน้ำ (Submersible pump) ของ Monoflo จากประเทศออสเตรเลีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถังบรรจุ Cation exchange resin
- ถังกรองทราย
- ชุดกรองขนาด 5 ไมครอน (μm) เป็นแบบโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) ชนิด Puroxcept cartridge filters, บริษัท GE Osmonics ประเทศสหรัฐอเมริกา
- ชุดกรองขนาด 1 ไมครอน (μm) เป็นแบบโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) ชนิด Puroxcept cartridge filters, บริษัท GE Osmonics ประเทศสหรัฐอเมริกา
- ชุดกรองขนาด 0.45 ไมครอน (μm) เป็นแบบโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) ชนิด Flotrex PN pleated filters, บริษัท GE Osmonics ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องชั่งของ Kern & Sohn GMBH (Model EOB 60K50) ประเทศสหรัฐอเมริกา
- ถังน้ำสแตนเลส ขนาด 1,500 ลิตร ของ บริษัท แอล.วี.พี. กรุ๊ปโปรดักส์ ประเทศไทย
- ถังน้ำสแตนเลส ขนาด 150 ลิตร
- ถังน้ำ ขนาด 200 ลิตร



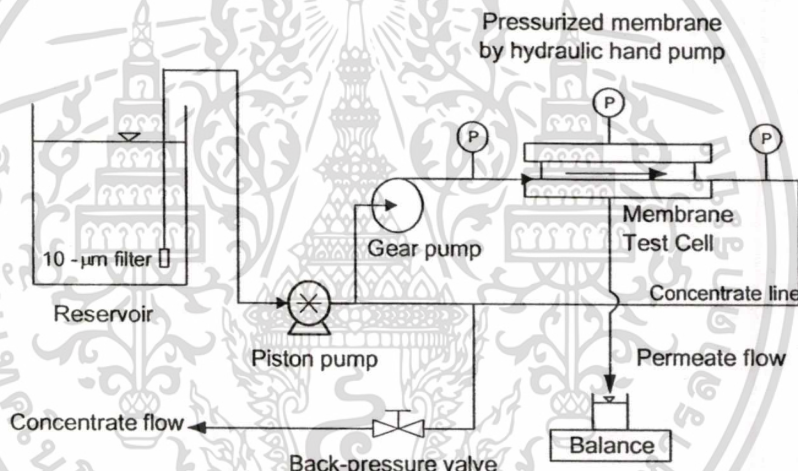
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.2. ระบบเยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration Membrane) ดังแสดงในรูป

3.2 ประกอบด้วย

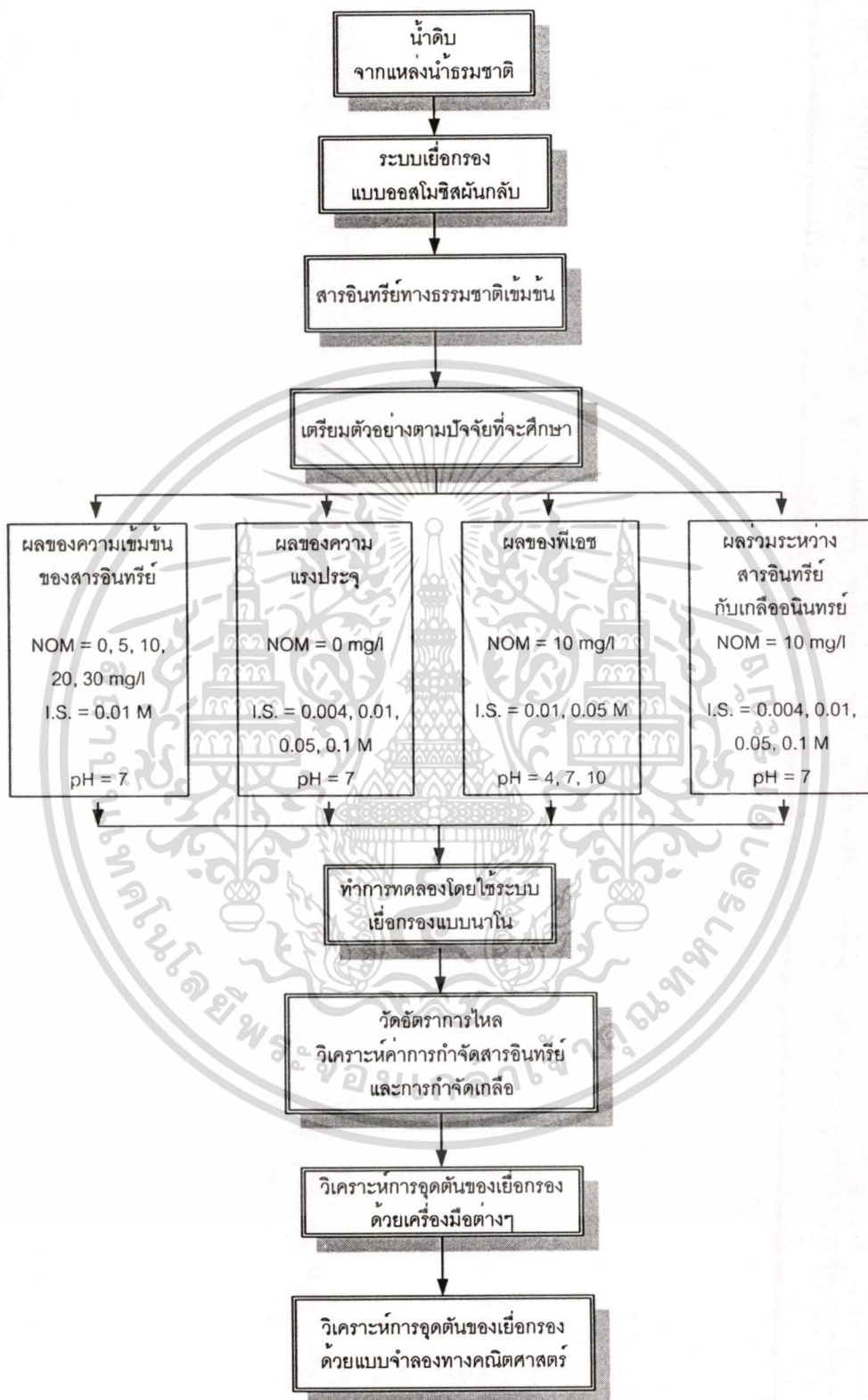
- เยื่อกรองแบบนาโนขนาดรูพรุนประมาณ 150 – 300 ดาลตัน ของ OSMONICS Model HL2540F1072 Serial 7933937 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- Digital Gear Pump ของ Cole-Parmer Instrument Company Model 75211-35 60-360 RPM ประเทศสหรัฐอเมริกา
- บั๊มขนาดเล็กของ Eldex Laboratories, Inc Model : CC-100-S-4-2CE Serial No 19351 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องชั่งของ Shimadzu รุ่น BL-2200H ผลิตในประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ ได้แก่ 1) การเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติด้วย ระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันทกลับ (Reverse osmosis membrane) และ 2) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ พีเอช สารอินทรีย์ร่วมกับเกลืออนินทรีย์ และสภาพความแรงของไอออน รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพสรุปของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ตัวอย่างน้ำและการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

3.4.1 การเก็บตัวอย่างน้ำ

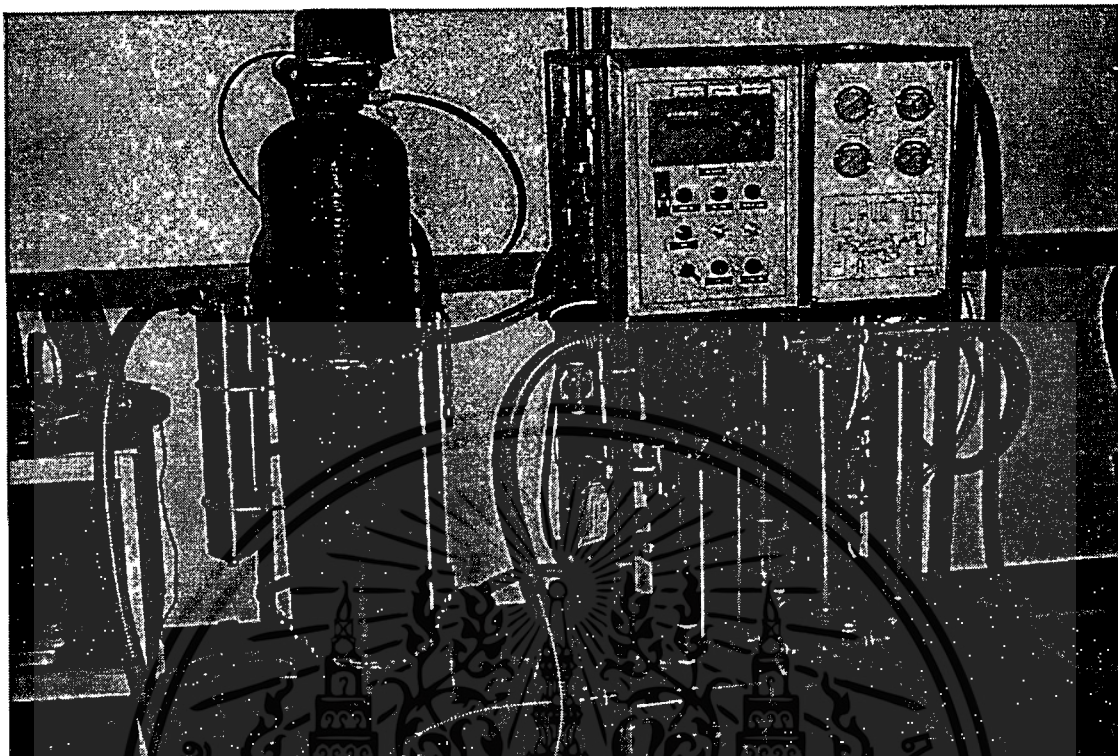
ตัวอย่างน้ำถูกนำมาจากแหล่งน้ำผิวดินธรรมชาติภายในบริเวณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งใช้เป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับกระบวนการผลิตน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคภายในมหาวิทยาลัย ตัวอย่างน้ำประมาณ 1,500 ลิตรถูกเก็บไว้ภายในถังสแตนเลส ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติเพื่อใช้ในการทดลอง น้ำตัวอย่างถูกเก็บตัวอย่างและทำการวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง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

3.4.2 การเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

ระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ เป็นระบบที่ใช้แยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในแหล่งน้ำธรรมชาติ ดังแสดงในรูป 3.4 การเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติมีขั้นตอนดังนี้

1. เก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำดิบประมาณ 1,000 ลิตร
2. ผ่านเข้าสู่กระบวนการบำบัดเบื้องต้นเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่ และกำจัดไออนที่ส่งผลต่อการเกิดตะกอนบนผิวของเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ
3. การผ่านน้ำเข้าสู่ระบบเยื่อกรองทำให้สามารถแยกน้ำออกมาได้เป็น 2 ส่วน คือน้ำที่มีผ่านระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับที่มีความสะอาดสูงหรือมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำมากเรียกส่วนนี้ว่า เพอร์มีเอท (Permeate) และน้ำที่ไม่ผ่านเยื่อกรอง เรียกว่า คอนเซนเตรท (Concentrate) ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติสูง อันเนื่องมาจากความสามารถในการกักกัน (Retention) ของเยื่อกรอง
4. ทำการเวียน (Retentate) น้ำคอนเซนเตรทกลับไปยังถังบ่อน ผสมกับน้ำดิบเพื่อบ่อนเข้าสู่ระบบเยื่อกรองตลอดเวลาที่เดินระบบ ส่วนน้ำเพอร์มีเอทที่ผลิตได้ ถือว่าเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง ถูกเก็บแยกในถังเก็บ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการล้างระบบต่อไป
5. หยุดการเดินระบบเยื่อกรอง ตามข้อ 4. เมื่อปริมาณน้ำเพอร์มีเอทที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 970 ลิตร และน้ำคอนเซนเตรทในถังบ่อน ลดลงเหลือประมาณ 30 ลิตร
6. เก็บน้ำคอนเซนเตรท ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติสูงนำไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์เพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพ และการเกิดการอุดตันของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนผิวของเยื่อกรองแบบนาโนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 ภาพแสดงระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันทกลับ

3.5 การศึกษาการทำงานระบบเยื่อกรองแบบนาโน

3.5.1 เยื่อกรองแบบนาโน

ในการวิจัย ใช้เยื่อกรองแบบนาโนของ Osmonics รุ่น HL2540F1072 นำมาตัดให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 4 * 6 นิ้ว เพื่อให้สามารถนำมาใส่ลงในชุดทดลองเยื่อกรอง สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ได้ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ถ้ายังไม่ได้มีการใช้งานในทันที จะเก็บรักษาโดยแช่ไว้ในสารละลาย Sodium metabisulphite ความเข้มข้น 1% เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แล้วนำไปแช่ไว้ในตู้เย็นเพื่อลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่มีผลต่อผิวหน้าเยื่อกรอง โดยเยื่อกรองแบบนาโนที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเยื่อกรองแบบนาโนของ Osmonics รุ่น HL2540F1072

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

3.5.2 การทำความสะอาดเยื่อกรอง

มีขั้นตอนดังนี้

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

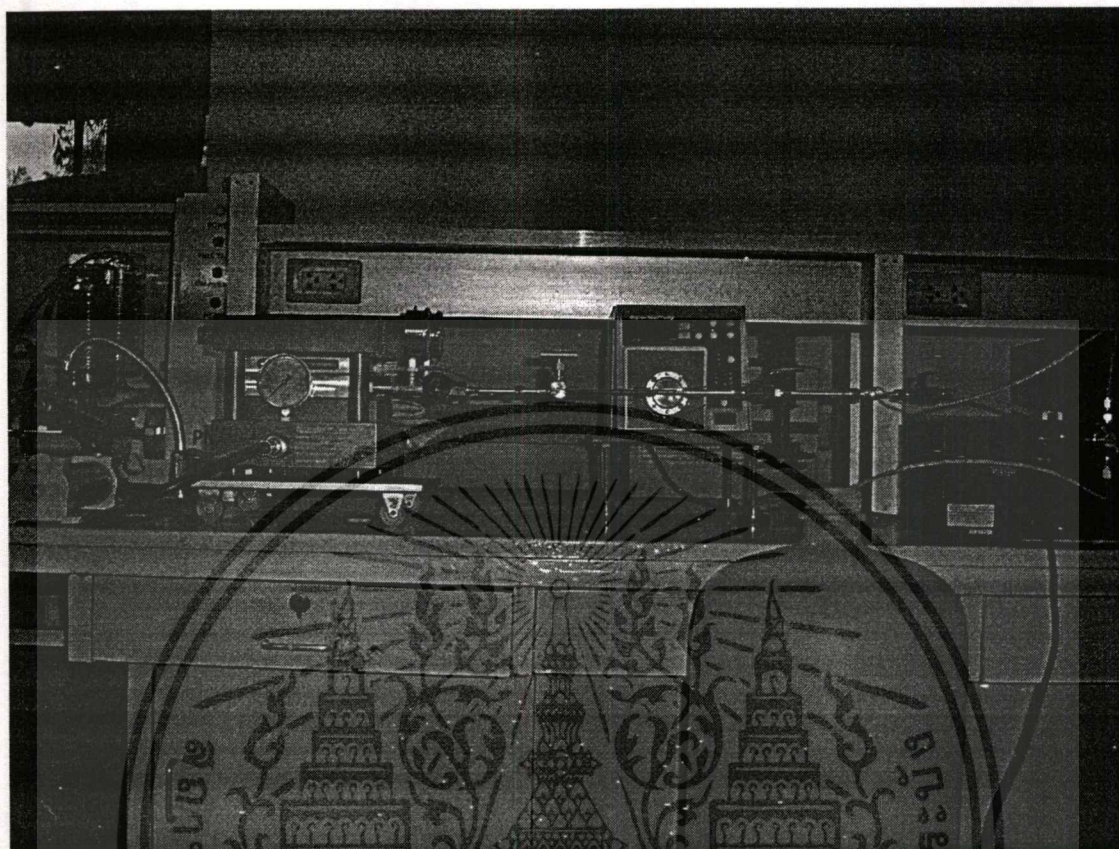
3.5.3 การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโน

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของเยื่อกรองแบบนาโน ได้แก่ ชุดทดลองเยื่อกรอง (Bench scale filtration test cell) ซึ่งเป็นระบบเยื่อกรองแบบไหลขวาง (Crossflow filtration unit) ดังรูปที่ 3.5 โดยในการทดลองด้วยระบบเยื่อกรองแบบนาโนทำการควบคุมการทำงานของระบบดังนี้

- อัตราการไหลเริ่มต้น (Initial flux) : $45 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
- ความสามารถในการผลิตน้ำ (Percent recovery) : 85 %
- อัตราเร็วที่ไหลตามขวาง (Crossflow velocity) : 0.1 m.s^{-1}
- เวลาที่ใช้ในการเดินระบบ : 500 min

ขั้นตอนการเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโน ดังนี้

1. ติดตั้งเยื่อกรองในระบบ และทำความสะอาดเยื่อกรอง ดังได้กล่าวมาแล้วในข้อ 3.5.1 และ 3.5.2
2. หลังจากทำความสะอาดเยื่อกรองก่อนใช้งานแล้ว เดินระบบด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง วัดอัตราการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรอง (Pure water permeability) ปรับสภาวะการทำงานของระบบดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น
3. ผ่านน้ำตัวอย่างที่ต้องการศึกษา เริ่มจับเวลานับตั้งแต่ น้ำตัวอย่างผ่านเข้าสู่ระบบเยื่อกรอง
4. วัดอัตราการไหล ทุก 10 นาทีในช่วง 1 ชั่วโมงแรกและทุก 20 นาทีหลังจากนั้น ตลอดการเดินระบบ เพื่อศึกษาการทดลองของอัตราการไหลอันเนื่องมาจากการอุดตัน การวัดอัตราการไหล โดยใช้บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร รองน้ำที่ผ่านออกมาทางเพอร์มิเอท เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (เนื่องจากต้องการความแม่นยำจึงต้องใช้การชั่งน้ำหนัก) เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของเพอร์มิเอท



รูปที่ 3.5 ภาพระบบเยื่อกรองแบบนาโน

5. เก็บตัวอย่างน้ำและนำไปวิเคราะห์ค่าพีเอช สภาพการนำไฟฟ้า ค่าการดูดกลืนแสง สารอินทรีย์ทั้งหมด เพื่อทดสอบความสามารถของเยื่อกรองในการกักสาร โดยเก็บตัวอย่างทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ที่เวลาเดินระบบ 30, 60, 120, 210, 300, 380 และ 500 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างทั้งรีเทนเทท และเพอร์มีเอท

6. ทำความสะอาดเยื่อกรองด้วยน้ำปราศจากไอออนเมื่อเดินระบบครบเวลาที่กำหนด โดยแบ่งการทำความสะอาดเป็น 2 ครั้ง คือครั้งที่ 1 โดยการใช้น้ำปราศจากไอออนไล่สารอินทรีย์ทางธรรมชาติในระบบออกมาก่อน โดยใช้น้ำประมาณ 200 มิลลิลิตร และในครั้งที่ 2 ใช้น้ำประมาณ 1,000 มิลลิลิตร เป็นการทำความสะอาดสารอินทรีย์ที่เกาะอยู่บนผิวหน้าเยื่อกรองโดยใช้เวลาประมาณ 20 นาที วัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอท ด้วยการผ่านน้ำปราศจากไอออน

7. ทำความสะอาดเยื่อกรองด้วยด่าง โดยผ่านด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร ประมาณ 20 นาที เพื่อทำความสะอาดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ถูกดูดซับ

และอุดตันเยื่อกรองที่ยังเหลืออยู่หลังจากทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้ว วัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มิเอท ด้วยการผ่านน้ำปราศจากไอออน

8. ล้างเยื่อกรองด้วยน้ำปราศจากไอออนอีกครั้ง และเก็บเยื่อกรองที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์หาหลักฐานการอุดตันต่อไป

3.6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันเยื่อกรองแบบนาโนสามารถที่จะสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางสรุปการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

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

3.6.1 ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

1. เจือจางสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นสูง ด้วยน้ำปราศจากไอออน (D.I Water) โดยแปรค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมของคาร์บอนต่อลิตร

2. ปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 7 โดยการใช้น้ำ HCl ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร หรือ NaOH ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

3. วัดค่าการนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับค่าความแรงของประจุ (Ionic Strength)

4. ปรับค่าความแรงของประจุ โดยใช้ NaCl ให้มีค่าเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร

5. ดูดอากาศออกด้วยปั๊มดูดอากาศ (Vacuum pump) เพื่อลดฟองอากาศที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

6. ทำการเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโนตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.5

3.6.2 ผลของความแรงของประจุ (Ionic Strength)

1. ใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นน้ำตัวอย่าง

2. ปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 7 โดยการใช้น้ำ HCl ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร หรือ NaOH ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

3. วัดค่าการนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับค่าความแรงของประจุ (Ionic Strength)

4. ปรับค่าความแรงของประจุ โดยใช้ NaCl โดยแปรค่าความแรงของประจุเท่ากับ 0.004, 0.01, 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตร

5. ดูดอากาศออกด้วยปั๊มดูดอากาศ เพื่อลดฟองอากาศที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

6. ทำการเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโนตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.5

3.6.3 ผลของค่าพีเอช

1. เจือจางสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นสูง ด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีค่าความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมของคาร์บอนต่อลิตร

2. ปรับพีเอช โดยแปรค่าพีเอช ที่ 4, 7 และ 10 โดยใช้น้ำ HCl เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร หรือ NaOH เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

3. วัดค่าการนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับค่าความแรงของประจุ (Ionic Strength)

4. ปรับค่าความแรงของประจุ โดยใช้ NaCl ให้มีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.05 โมลต่อลิตร

5. ดูดอากาศออกด้วยปั๊มดูดอากาศ เพื่อลดฟองอากาศที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

6. ทำการเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโนตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.5

3.6.4 ผลร่วมระหว่างสารอินทรีย์ทางธรรมชาติกับเกลืออนินทรีย์

1. เจือจางสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นสูง ด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีค่าความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมของคาร์บอนต่อลิตร
2. ปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 7 โดยการใช้น้ำ HCl ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร หรือ NaOH ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
3. วัดค่าการนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับค่าความแรงของประจุ (Ionic Strength)
4. ปรับค่าความแรงของประจุ โดยใช้เกลืออนินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ดังนี้
 - NaCl ให้มีค่าเท่ากับ 0.004, 0.01, 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตร
 - CaCl₂ ให้มีค่าเท่ากับ 0.004, 0.01, 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตร
 - CaCO₃ ให้มีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.05 โมลต่อลิตร
 - CaSO₄ ให้มีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.05 โมลต่อลิตร
 - Ca₃(PO₄)₂·2H₂O ให้มีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.05 โมลต่อลิตร
 - MgSO₄·7H₂O ให้มีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.05 โมลต่อลิตร
5. ดูดอากาศออกด้วยปั๊มดูดอากาศ เพื่อลดฟองอากาศที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
6. ทำการเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโนตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.5

3.7 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.7.1 ตัวอย่างน้ำ

ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ จากการเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโน นำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ศึกษาและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 ตัวอย่างเยื่อกรอง

วิเคราะห์ตัวอย่างเยื่อกรองแบบนาโน ทั้งที่ไม่ได้ผ่านการทดลองและผ่านการทดลองด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เพื่อให้ทราบถึงสารที่อุดตันอยู่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาตัวอย่างเยื่อกรองแบบนาโน

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

3.8 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองความต้านทานแบบอนุกรม

อัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอทที่ผลิตได้มีการลดลง มีสาเหตุมาจากการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง ซึ่งการอุดตันที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าความต้านรวมของเยื่อกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นนี้มีหลายสาเหตุด้วยกัน คือ เกิดจาก Concentration Polarization และชั้นเค้ก (r_c), การดูดซับที่สามารถทำความสะอาดด้วยสารละลายต่างได้ (r_g) และการดูดซับอย่างถาวร (r_a) โดยความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ตามกฎของ Darcy และแบบจำลองความต้านทานแบบอนุกรม ดังนี้

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

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

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

ΔP คือ ค่าความดันที่ลดลง (kPa)

μ คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r_m คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากเยื่อกรอง (m^{-1})

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

r_g คือ ค่าความต้านทานของชั้นเจลการดูดซับที่สามารถล้างออกได้ (m^{-1})

r_d คือ ค่าความต้านทานของการดูดซับอย่างถาวร (m^{-1})

(Cho et al. 1999)

ในการทดลองเพื่อหาความต้านทานแบบอนุกรม มีขั้นตอนปฏิบัติดังนี้

1. ทำความสะอาดเยื่อกรองด้วยสารละลายกรดและสารละลายเบส แล้วทำการเดินระบบด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. ปรับอัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอทให้มีค่าประมาณ 45 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง บันทึกความดัน และอัตราการไหลเริ่มต้น เพื่อใช้หาความต้านทานของเยื่อกรองแบบนาโน (r_m)
3. เดินระบบด้วยน้ำตัวอย่างที่เตรียมไว้เป็นเวลา 500 นาที โดยการรักษาความดันให้มีค่าคงที่ ตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ค่าอัตราการไหลที่ลดลงในช่วงเวลาสิ้นสุดการทดลองที่เกิดจากความต้านทานประเภทต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว บันทึกค่าความดันและอัตราการไหลเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เพื่อใช้หาความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับบนเยื่อกรองแบบนาโน ($r_m + r_c + r_g + r_d$)
4. ป้อนน้ำปราศจากไอออนเข้าในระบบ โดยเพิ่มความเร็วของอัตราการไหลตามขวาง ปรับความดันให้มีค่าเท่ากับความดันที่ใช้ในการทดลองและวัดอัตราการไหลของน้ำ ค่าความต้านทานของเยื่อกรองที่หายไปจากการดำเนินการขั้นตอนนี้ ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และเค้ก (r_c)
5. ป้อนด้วยสารละลาย NaOH เข้าระบบ เป็นเวลา 20 นาที ตามด้วยน้ำปราศจากไอออน ปรับความดันให้มีค่าที่เท่ากับความดันที่ใช้ในการทดลองตัวอย่างนั้น วัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอท ความต้านทานที่หายไปจากการดำเนินการขั้นนี้ ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดจากชั้นเจล (r_g) และความต้านทานที่ยังคงติดค้างบนเยื่อกรอง ได้แก่ r_d

จากขั้นตอนดังกล่าว ทำให้สามารถทราบค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากสาเหตุต่าง ๆ และถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การดูดซับบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง

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

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของน้ำผิวดินที่ใช้ในการทดลอง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

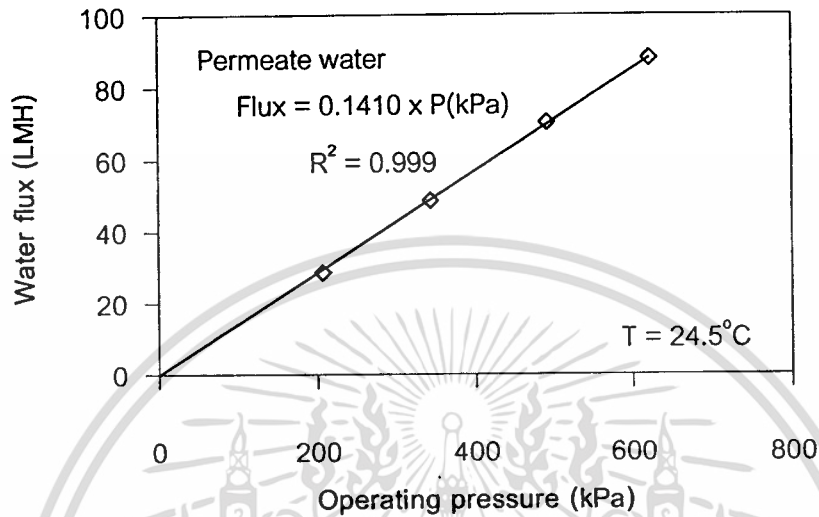
จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความเข้มข้นของคาร์บอนทั้งหมด (TOC) มีค่าประมาณ 4.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่สามารถพบได้โดยทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าของความเข้มข้นในช่วงกว้างตามประเภทและแหล่งกำเนิดของแหล่งน้ำนั้นๆ โดยมีค่าอยู่ในระหว่าง 1 – 27 มิลลิกรัมต่อลิตร (Krasner et al. 1998 ; Tseng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

4.2 ผลการทดสอบระบบเยื่อกรองแบบนาโน

4.2.1 ผลของความดันที่มีต่อฟลักซ์ของระบบเยื่อกรองแบบนาโน

ก่อนการทดลองระบบเยื่อกรองแบบนาโนในการแยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ได้ทำการทดสอบผลของความดันที่มีต่ออัตราการไหลของน้ำที่ผลิตได้ โดยการใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นน้ำตัวอย่างในการทดสอบ ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มิเอทที่ผ่านออกมาจากระบบเยื่อกรองแบบนาโนต่อพื้นที่กรองน้ำของระบบ หรือเรียกว่าค่าฟลักซ์ของน้ำ (Water flux) ที่ความดันต่าง ๆ

ตั้งแต่ 30 Psi (206 kPa) ถึง 90 Psi (620.38 kPa) พบว่า ค่าฟลักซ์นี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าของความดันที่ให้กับระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ตารางที่ ก.1 ในภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.1 ผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ของระบบเยื่อกรองแบบนาโน

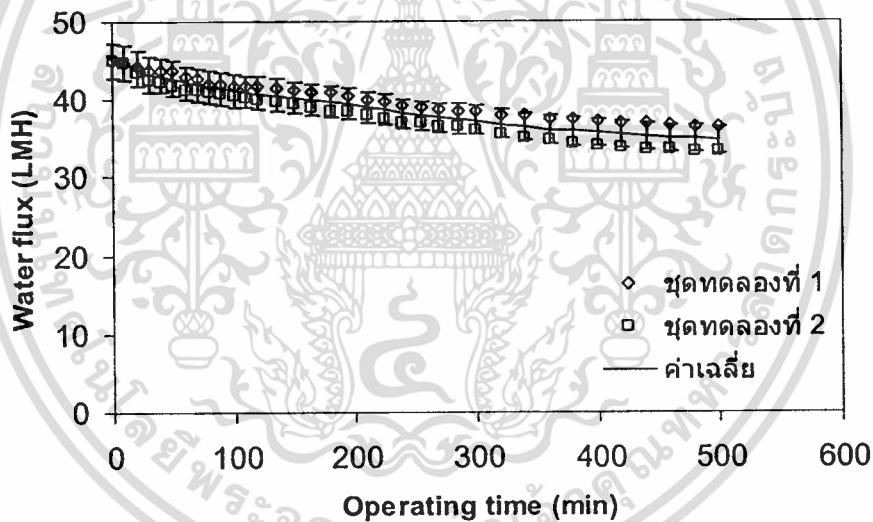
จากการทดสอบพบว่าค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของความดันที่ปรับเพิ่มขึ้น โดยที่มีค่าความสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.999 ค่าการซึมผ่านของน้ำเพอร์มีเอท (ความชัน) สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ที่เกิดขึ้นต่อค่าความดันในการเดินระบบโดยที่ไม่คิดผลของความดันออสโมติก เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่วัดได้มีค่าประมาณ $3 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ดังสมการ

$$J_v = L_p (\Delta P - \sigma \Delta \pi) = \frac{Q_{perm}}{A}$$

โดยที่ค่า J_v เท่ากับฟลักซ์ของการไหลผ่านของน้ำ (LMH, $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), L_p เท่ากับค่าการซึมผ่านของเยื่อกรอง ($\text{LMH} \cdot \text{kPa}^{-1}$, $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$), ΔP ค่าความดันในการดำเนินระบบ (kPa), σ เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ของออสโมติก, $\Delta \pi$ ค่าความดันของออสโมติกจากเกลือ (kPa), Q_{perm} เท่ากับอัตราการไหลของเพอร์มีเอท ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$), A เท่ากับพื้นที่ของระบบเยื่อกรอง (m^2) จากสมการดังกล่าวสามารถคำนวณหาค่าการซึมผ่านของน้ำเพอร์มีเอท ได้เท่ากับ $0.141 \text{ LMH} \cdot \text{kPa}^{-1}$

4.2.2 การทดสอบความแม่นยำของระบบ (Reproducibility)

ในการทดสอบระบบการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน ได้ทำการทดสอบซ้ำ (Reproducibility Test) เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของระบบที่ใช้ในการทดลอง โดยทำการทดสอบในสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชเป็น 7 และความแรงของประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ทดสอบกับระบบเยื่อกรองนาโน โดยทำการทดสอบด้วยสภาวะเช่นเดียวกันอย่างน้อย 2 ครั้ง และนำผลที่ได้มาทำการคำนวณความแม่นยำของระบบทางสถิติ จากรูป 4.2 ซึ่งแสดงพลักร์ของน้ำเพอร์มีเอทในช่วงเวลาต่างๆ พบว่า การทดลองครั้งที่ 1 และ 2 (ตารางที่ ก.2 ในภาคผนวก ก) ให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกันเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ผลการทดลองที่ได้ไม่มีผลที่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับ 95% ดังนั้นจึงพบว่าระบบมีความแม่นยำถึง 95%



รูปที่ 4.2 ค่าพลักร์ของเพอร์มีเอทช่วงเวลาต่าง ๆ

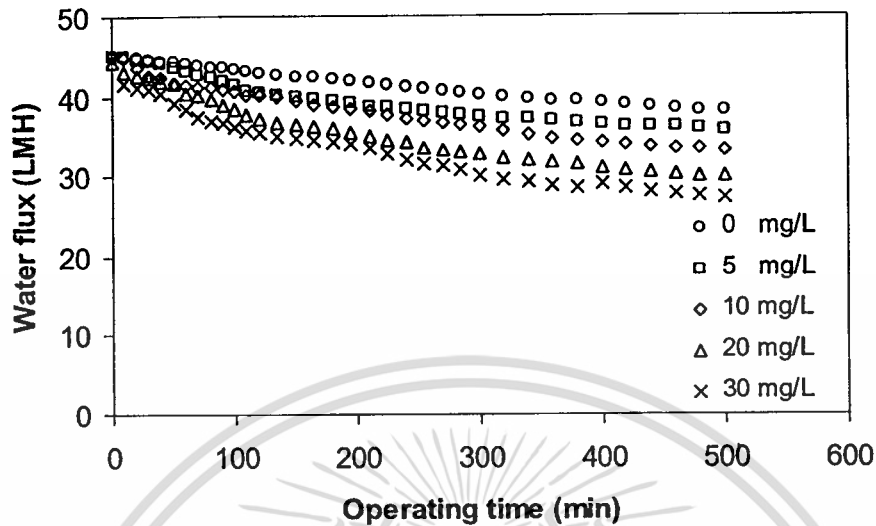
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อค่าฟลักซ์และความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

4.3.1 ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ได้ทำการแปรค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติเป็น 0, 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยควบคุมค่า พีเอชที่ 7 และความแรงประจุที่ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ รูปที่ 4.3 แสดงผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์ (ตารางที่ ก.3 – ก.6 และ ก.8 ในภาคผนวก ก) จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ เป็นผลให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทลดลง เนื่องจากสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ถูกกักกัน โดยเยื่อกรองแบบนาโน อาจมีการสะสมตัวภายในรูพรุนหรือผิวหน้าเยื่อกรองแบบนาโน โดยลักษณะการอุดตันอาจจะเกิดขึ้นได้ในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ การกีดขวางรูพรุน (Pore blocking) การหดตัวของรูพรุน (Pore constriction) ผลที่เกิดจากการปิดกั้น (Intermediate blocking) และการเกิดเค้ก (Cake formation) (Kilduff *et al.* 2004) การเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติเป็นการเพิ่มมวลของสารที่ถูกกักกันในระบบเยื่อกรองแบบนาโน โดยการอุดตันที่พบจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติมักเป็นการอุดตันแบบการเกิดเค้ก (Kilduff *et al.* 2004) ซึ่งการอุดตันดังกล่าวทำให้ค่าความต้านทานของเยื่อกรองสูงขึ้นและค่าอัตราการไหลของเพอร์มีเอท ลดลงสอดคล้องกับสมการตามกฎของ Darcy

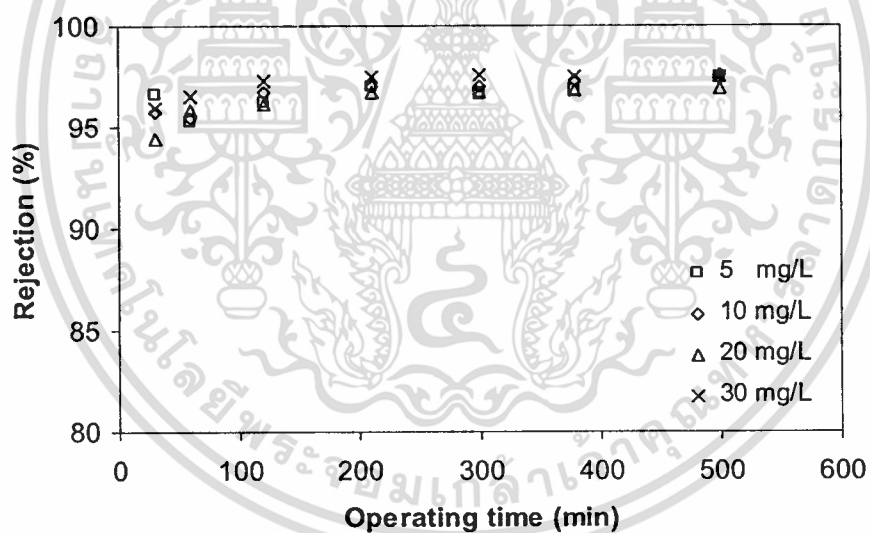
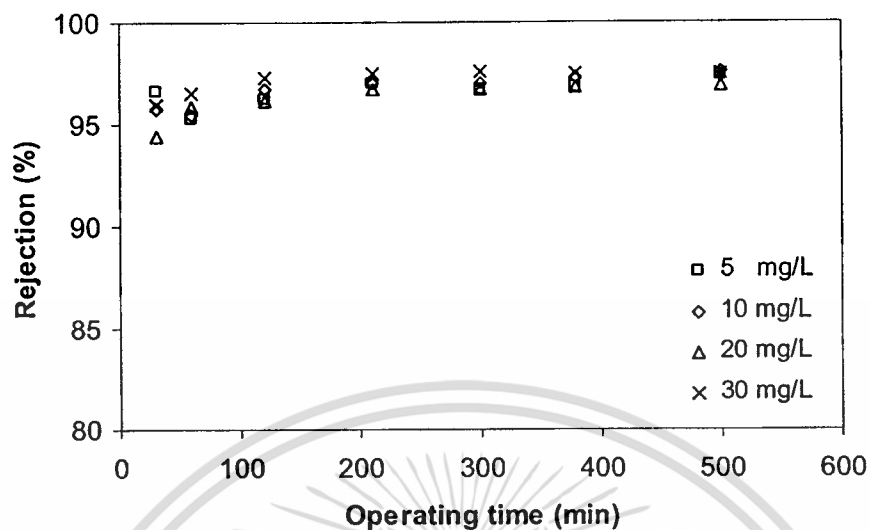
$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu r_m}$$

โดยที่ค่า J_v คือ ค่าอัตราการไหล (LMH, $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$), ΔP คือ ค่าความดันที่คงที่ (kPa), μ คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s), r_m คือ ค่าความต้านทานรวมของเยื่อกรอง (m^{-1}) (Cho *et al.* 1999)



รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์

ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในสารละลายที่มีความเข้มข้น 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยเยื่อกรองแบบนาโน สามารถพิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร และค่าปริมาณ TOC ในสารละลาย รูปที่ 4.4 (ก) แสดงผลการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติของสารละลายตัวอย่าง (ตารางที่ ข.1 – ข.4 ในภาคผนวก ข) ซึ่งวัดด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร พบว่า ที่ทุกความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติมีค่าการกำจัดใกล้เคียงกันในช่วงร้อยละ 94 – 97 แสดงถึงความสามารถของเยื่อกรองแบบนาโนในการกักกันสารที่มีพันธะคู่ของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งได้แก่ สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ รูปที่ 4.4 (ข) แสดงผลการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่วัดจากค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในสารละลายด้วยเครื่อง TOC (ตารางที่ ข.1 – ข.4 ในภาคผนวก ข) พบว่า ค่าการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 94 – 97 ซึ่งสอดคล้องกับค่าการกำจัดที่วัดได้จากค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงค่าการกำจัดที่สูงกว่าความเข้มข้นอื่น ๆ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ เป็นผลให้สารอินทรีย์ทางธรรมชาติมีโอกาสที่จะเกิดการอุดตันได้ง่ายขึ้น เป็นผลทำให้ขนาดของรูพรุนของเยื่อกรองแบบนาโนลดลง จึงทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติถูกกักกันได้มากขึ้น



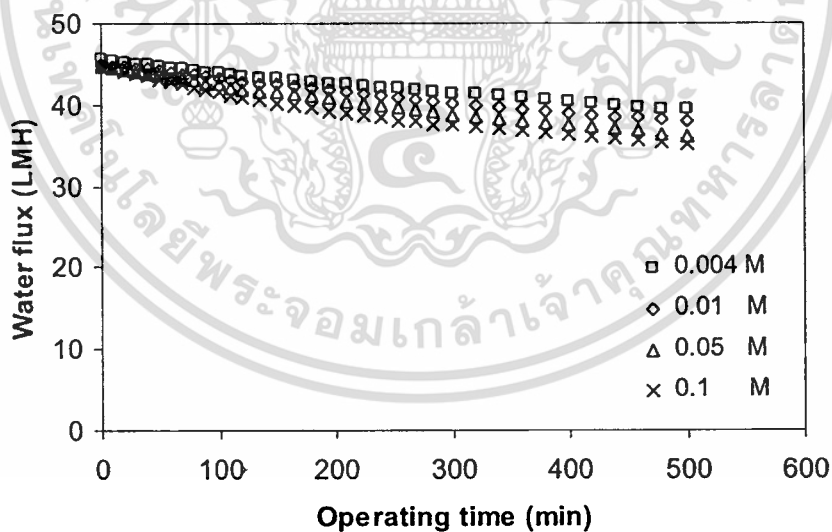
(ข)

รูปที่ 4.4 ผลของค่าการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติต่าง ๆ (ก) พิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสง (ข) พิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

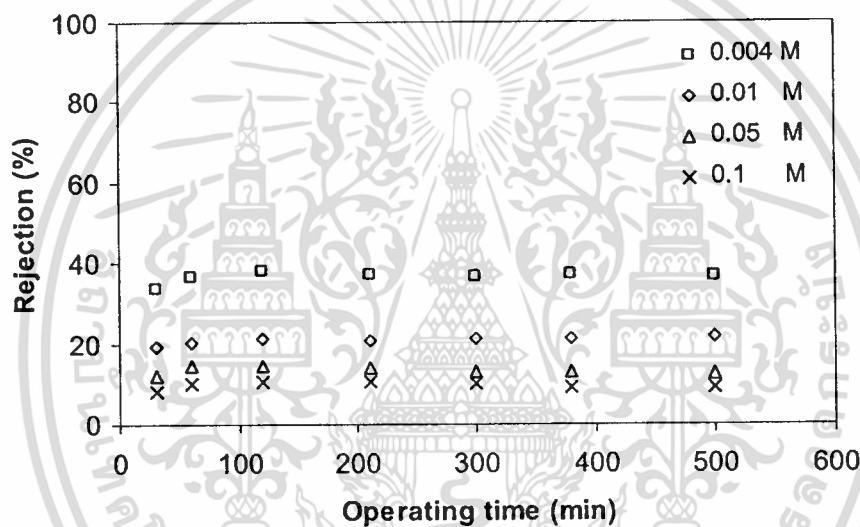
4.3.2 ผลของความแรงประจุ

ในการทดสอบผลของความแรงประจุต่อค่าเพอร์มิเอทีฟลิกซ์ โดยทดลองที่ความแรงประจุต่าง ๆ ซึ่งปรับความแรงประจุด้วยโซเดียมคลอไรด์ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการอินทรีย์ทางธรรมชาติและกรณีที่มีการอินทรีย์ทางธรรมชาติ ในขั้นแรกใช้สารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติปรับพีเอชเท่ากับ 7 แปรค่าความแรงของประจุเป็น 0.004, 0.01, 0.05 และ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดสอบการลดลงของฟลักซ์ แสดงในรูปที่ 4.5 (ตารางที่ ก.7 – ก.10 ในภาคผนวก ก) จากการทดลองพบว่าค่าความแรงของประจุที่สูงขึ้น มีผลทำให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอทีฟลิกซ์ลดลง การเพิ่มความแรงประจุเป็นการเพิ่มโซเดียมคลอไรด์ให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้มีการสะสมตัวของโซเดียมคลอไรด์ที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองแบบนาโน ความเข้มข้นของเกลือที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้แรงดันออสโมติกมีค่าสูงขึ้น แต่เนื่องจากระหว่างการทดลองมีการควบคุมความดันให้มีค่าคงที่ตลอด จึงทำให้ผลต่างของแรงดันที่ จะเอาชนะแรงดันออสโมติกที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าต่ำลง เป็นผลให้ฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอทีฟลิกซ์ที่ได้มีค่าที่ลดลง โดยปรากฏการดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยความสัมพันธ์ของ Londeale ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้ $J_v = L_p (\Delta P - \Delta \pi)$ โดยที่ J_v คือ ฟลักซ์ของน้ำที่ได้ ($\text{ml.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$), L_p คือ ค่าคงตัวการไหลของน้ำ ($\text{ml.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{kPa}$), ΔP คือ แรงดันน้ำ (kPa) และ $\Delta \pi$ คือ แรงดันออสโมติก (kPa)



รูปที่ 4.5 ผลของความแรงประจุต่อการลดลงของฟลักซ์

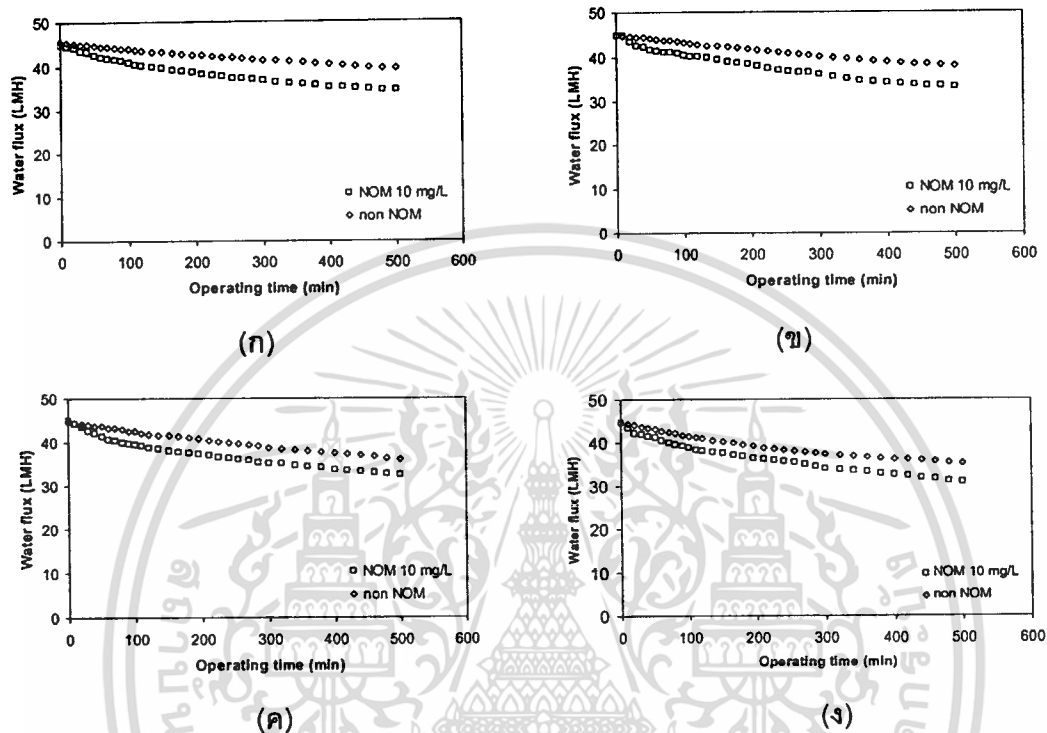
ความสามารถในการกำจัดเกลือของเยื่อกรองแบบนาโนที่ทดลองเพิ่มความแรงประจุ เป็น 0.004, 0.01, 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า ความสามารถในการกำจัดเกลือของเยื่อกรองแบบนาโน มีค่าการกำจัดเกลือลดลงเมื่อเพิ่มความแรง ของประจุหรือเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากความสามารถในการ กำจัดเกลือของเยื่อกรองแบบนาโนที่คงที่ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เข้าสู่ระบบ ในขณะที่ระบบมีความสามารถในการกำจัดเกลือเท่าเดิม ผลเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดเกลือของระบบจึงมีค่า ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ตารางที่ ข.5 – ข.8 ในภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.6 ความสามารถในการกำจัดเกลือของเยื่อกรองแบบนาโนจากสารละลาย ที่มี ความแรงประจุค่าต่าง ๆ

การทดลองการลดลงของเพอร์มิเอทฟลักซ์ในกรณีนี้ที่สารละลายมีความเข้มข้นของ สารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชที่ 7 และปรับค่าความแรงประจุด้วย โซเดียมคลอไรด์ แสดงในรูปที่ 4.7 (ตารางที่ ก.4 และ ก.7 – ก.13 ในภาคผนวก ก) พบว่า เพอร์มิเอท ฟลักซ์ของน้ำตัวอย่างที่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ มีค่าลดลงมากกว่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ของน้ำตัวอย่างที่ ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ เพราะนอกจากสาร อินทรีย์จะมีส่วนทำให้ค่าความดันออสโมติกของ ระบบมีค่าสูงขึ้นแล้ว สารอินทรีย์ทางธรรมชาติยังมีส่วนร่วมในการอุดตัน ดังนั้น ผลของการลดลง

ของอัตราการไหลของเพอร์มีเอทในกรณีนี้ จึงเกิดจากผลร่วระหว่างการอุดตันของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติและค่าความแรงของประจุ ซึ่งเป็นคุณลักษณะของน้ำประการหนึ่ง

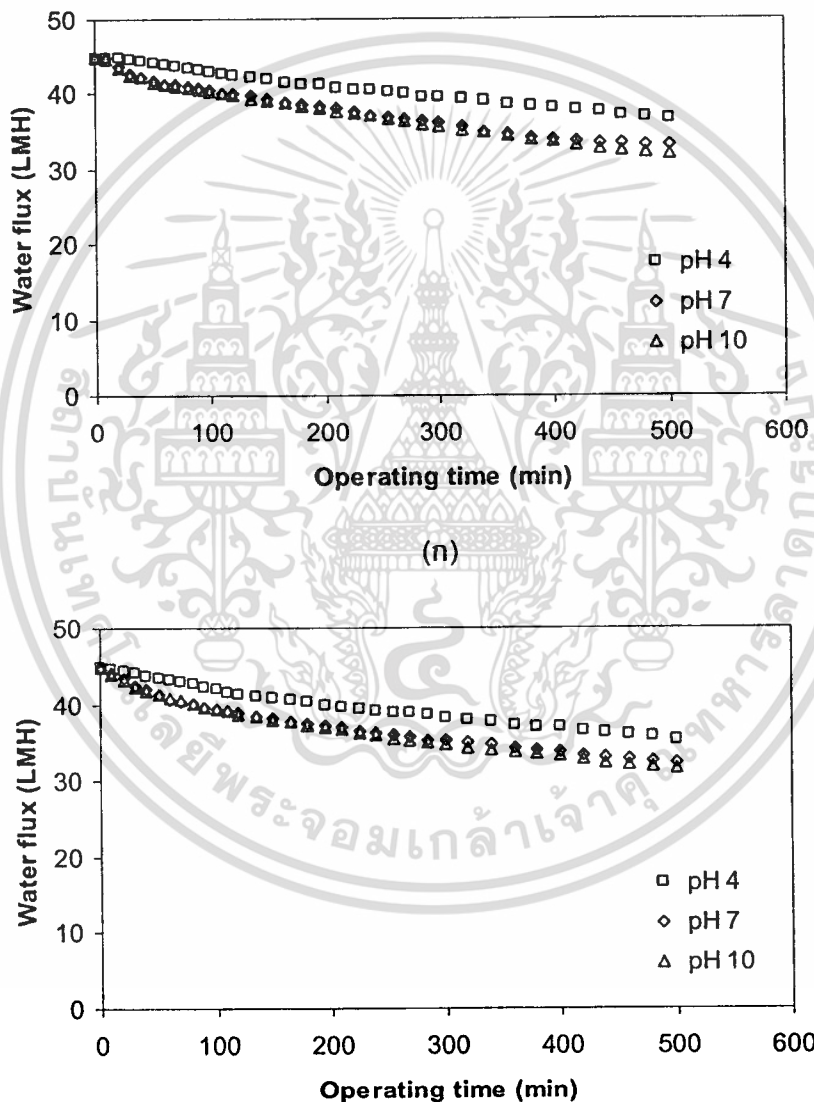


รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลการลดลงของอัตราการไหลจากการกรองของน้ำตัวอย่างที่มี NOM กับไม่มี NOM ที่ปรับความแรงประจุเป็น (ก) 0.004 ไมลต่อลิตร (ข) 0.01 ไมลต่อลิตร (ค) 0.05 ไมลต่อลิตร และ (ง) 0.1 ไมลต่อลิตร

4.3.3 ผลของค่าพีเอช

ในการทดลองผลของค่าพีเอชต่อการลดลงของเพอร์มีเอทฟลักซ์ ใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 4, 7 และ 10 ปรับค่าความแรงประจุเป็น 0.01 และ 0.05 ไมลต่อลิตรด้วยโซเดียมคลอไรด์ รูปที่ 4.8 แสดงผลของพีเอชที่มีต่อการลดลงของฟลักซ์ โดยรูปที่ 4.8 (ก) มีความแรงประจุ 0.01 ไมลต่อลิตร รูป 4.8 (ข) มีความแรงของประจุ 0.05 ไมลต่อลิตร (ตารางที่ ก.2 ก.12 และ ก.18 – ก.21 ในภาคผนวก ก) จากผลการทดลองพบว่า ฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของทั้งสองค่าความแรงประจุ มีลักษณะการลดลงในรูปแบบเดียวกัน กล่าวคือ ที่ค่าพีเอช 7 และ 10 ค่าฟลักซ์ที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าที่ค่าพีเอช 4 ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Kilduff *et al.* (2004) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากที่พีเอช 4 มีปริมาณของไฮโดรเจน

ไอออนในน้ำตัวอย่างมีปริมาณสูงกว่าที่พีเอช 7 และ 10 ซึ่งไฮโดรเจนไอออนนี้ มีผลทำให้ความหนาของชั้น Double layer ของผิวหน้าเยื่อกรองลดลง โพลีเมอร์คลอไรด์ที่สะสมตัวอยู่ผิวหน้าเยื่อกรองสามารถเลื่อนเข้าใกล้เยื่อกรองได้มากขึ้น เป็นผลให้เกิดการซึมผ่านออกมาได้ง่ายกว่าความเข้มข้นของโพลีเมอร์คลอไรด์ที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองจึงมีความเข้มข้นน้อยกว่าที่พีเอช 7 และ 10 ค่าความดันออสโมติกเหนือผิวหน้าเยื่อกรอง ที่พีเอช 4 มีค่าต่ำกว่าที่พีเอช 7 และ 10 จึงทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ด้วยอัตราที่สูงกว่า (Kilduff et al. 2004)



(ข)

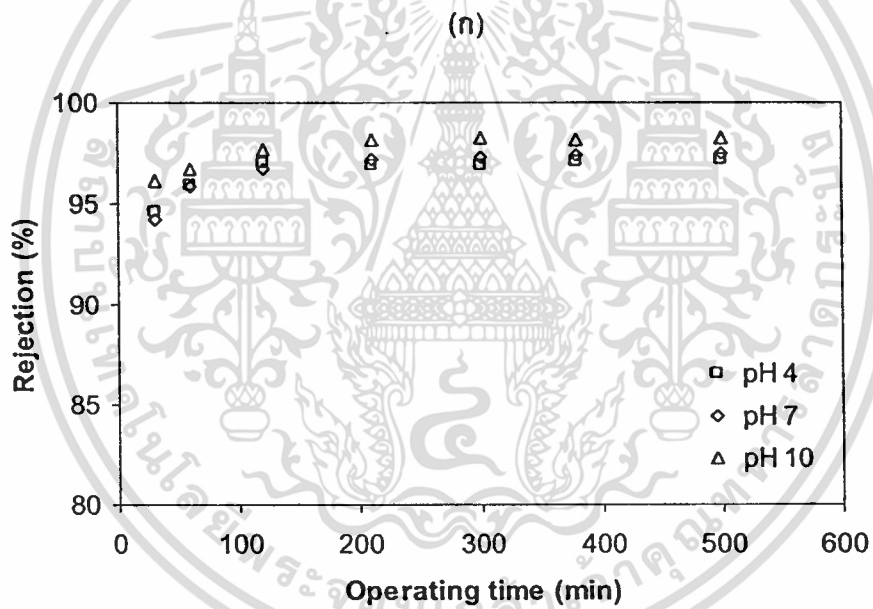
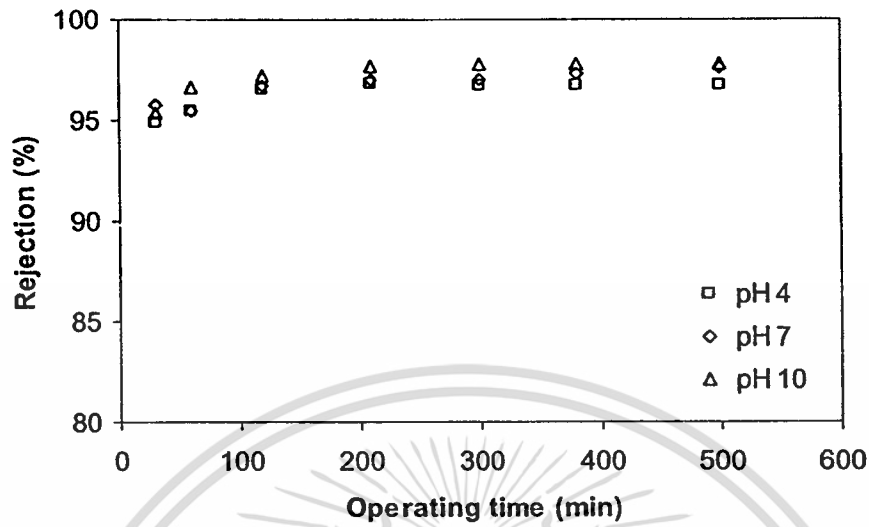
รูปที่ 4.8 ผลของพีเอชต่อการลดลงของฟลักซ์ที่ความแรงประจุ

(ก) 0.01 โมลต่อลิตร (ข) 0.05 โมลต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

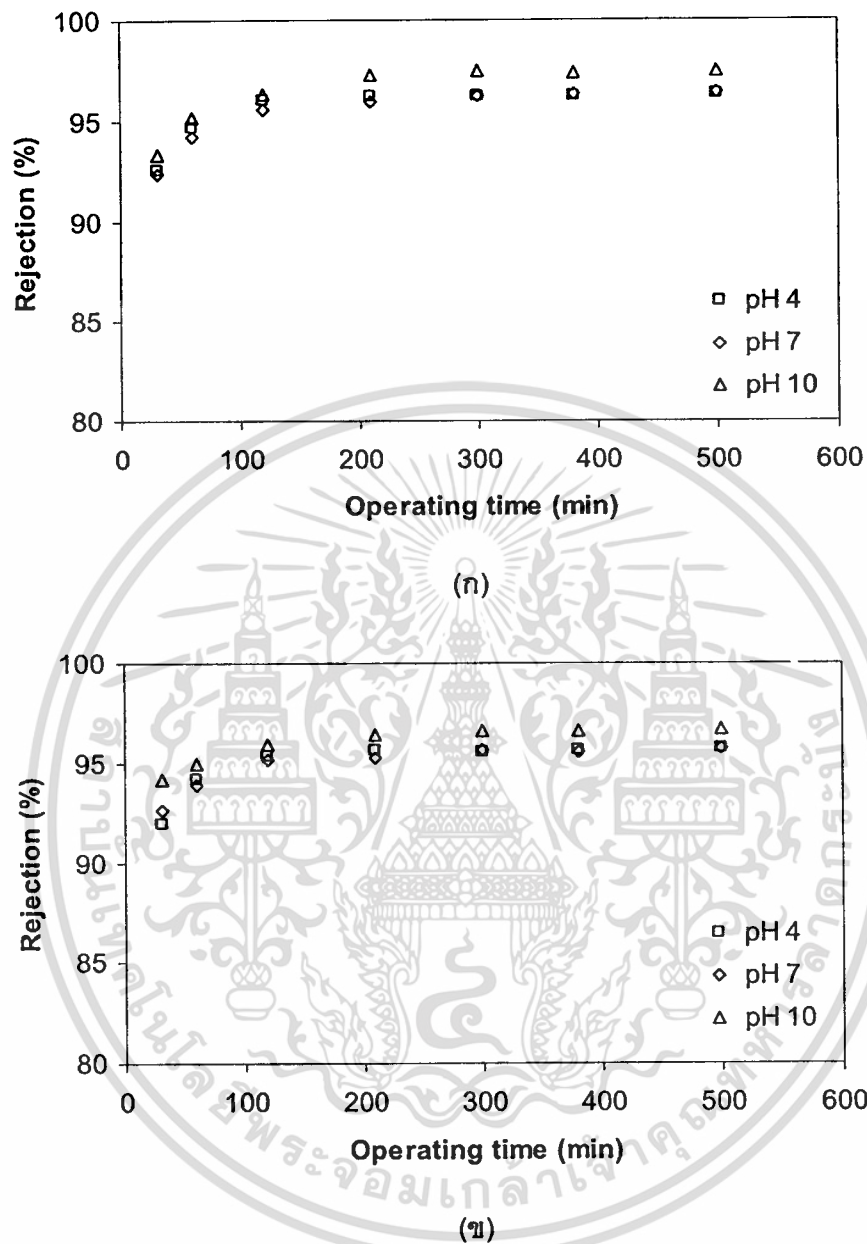
สำหรับความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติของสารละลายที่มีค่าพีเอช 4.7 และ 10 รูปที่ 4.9 (ก) และ (ข) แสดงการผลของค่าการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติของสารตัวอย่าง(ตารางที่ ข.2 ข.10 และ ข.16 – ข.19 ในภาคผนวก ข) โดยพิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ที่ความแรงประจุ 0.01 และ 0.05 โมลต่อลิตร ตามลำดับ ประมาณ 96-97 % รูปที่ 4.10 (ก) และ(ข) แสดงการผลของค่าการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่พิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์ (ตารางที่ ข.2 ข.10 และ ข.16 – ข.19 ในภาคผนวก ข) ที่ความแรงประจุ 0.01 และ 0.05 โมลต่อลิตร ตามลำดับ พบว่า มีค่าอยู่ที่ประมาณ 95 - 97 % ซึ่งทุกค่าพีเอช ให้ผลการทดลองที่มีใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองดังกล่าว เห็นว่าพีเอชที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์แต่มีผลกับอัตราการไหล กลไกการผลึกกันของประจุไม่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยเยื่อกรองแบบนาโน อย่างไรก็ตาม Cho *et al.* (2000) พบว่าการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติเป็นกลไกการคัดแยกขนาด (Size Exclusion) มากกว่ากลไกการผลึกกันของประจุ (Charge Repulsion)





รูปที่ 4.9 ผลของพีเอชต่อการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติพิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ค่าความแรงประจุ (ก) 0.01 มิลลิลิตร (ข) 0.05 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



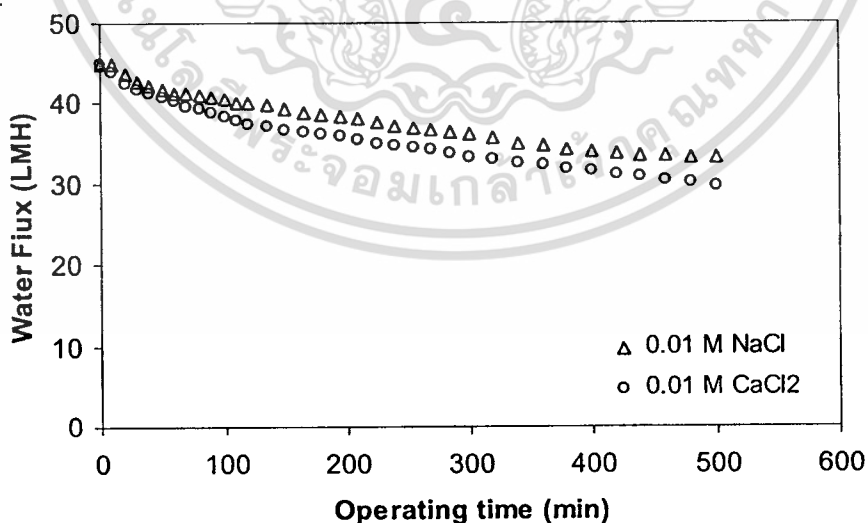
รูปที่ 4.10 ผลของพีเอชต่อการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติพิจารณาจากปริมาณคาร์บอน ที่ความแรงประจุ(ก) 0.01 โมลต่อลิตร (ข) 0.05 โมลต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลของเกลืออนินทรีย์

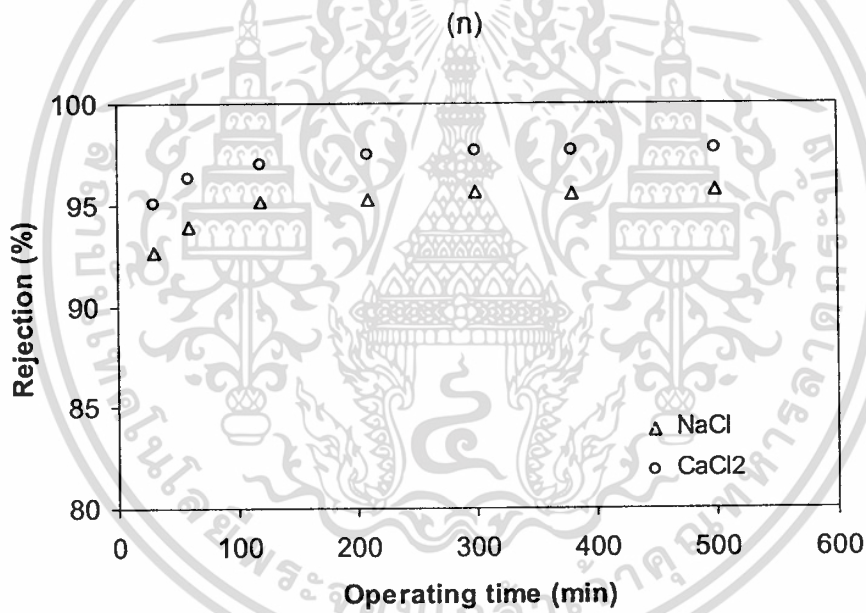
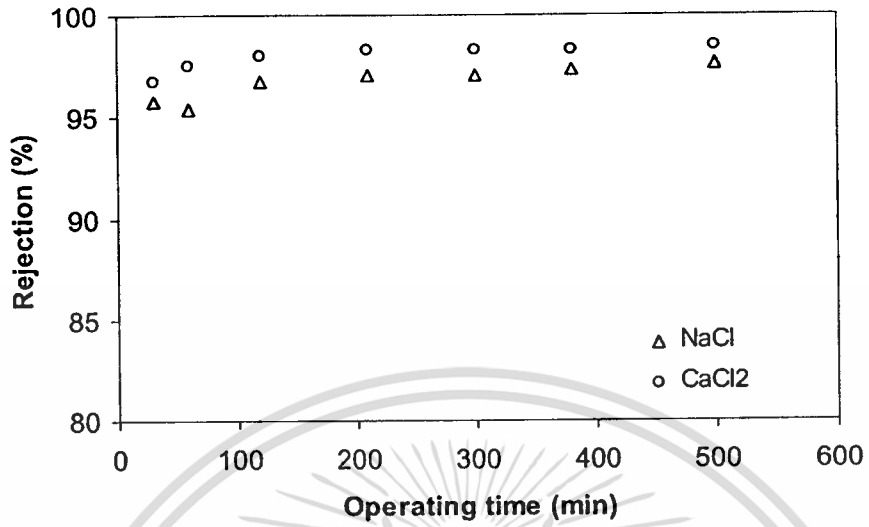
4.3.4.1. ผลของไอออนไอออนประจุบวก

ไอออนประจุบวกที่พบได้โดยทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น แคลเซียม ไอออน แมกนีเซียมไอออน และโซเดียมไอออน มีผลต่อการลดลงของเพอร์มิเอฟลักซ์ ในการกรองน้ำ ด้วยเยื่อกรองแบบนาโน รูปที่ 4.11 แสดงผลของประจุบวกที่ต่างกันต่อการลดลงของฟลักซ์ (ตารางที่ ก.4 และ ก.15 ในภาคผนวก ก) โดยใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยเกลืออนินทรีย์ต่างชนิดกัน ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ และ แคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งสารทั้งสองตัวขนาดของประจุบวกแตกต่างกัน ผลจากการทดลองพบว่า สารละลายสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีแคลเซียมคลอไรด์ มีค่าฟลักซ์ที่ลดลงมากกว่าสารละลายสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีโซเดียมคลอไรด์ ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมมีไอออนเป็นไอออนบวกที่มีประจุเท่ากับบวกสอง (Divalent cation) ในขณะที่โซเดียมไอออนเป็นไอออนที่มีประจุบวกหนึ่ง (Monovalent cation) ไอออนของแคลเซียมสองบวก (Ca^{2+}) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างสารอินทรีย์ทางธรรมชาติกับเยื่อกรองแบบนาโนซึ่งมีประจุลบ ด้วยกลไกที่เรียกว่าสะพานเชื่อม (bridging effect) ทำให้สารอินทรีย์ทางธรรมชาติติดอยู่ที่ผิวของเยื่อกรองได้มากกว่าสารละลายที่มีไอออนบวกหนึ่ง เป็นผลให้ค่าฟลักซ์มีค่าที่ลดลงมากกว่า (Schafer *et al.* 1998)



รูปที่ 4.11 ผลของประจุบวกที่ต่างกันต่อการลดลงของฟลักซ์

ผลจากการจับกันได้มากขึ้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติกับเยื่อกรองแบบนาโนทำให้ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติมีค่าที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ตารางที่ ข.2 และ ข.13 ในภาคผนวก ข) (ก) ซึ่งแสดงค่าการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติพิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร จากรูปพบว่าความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่วัดด้วย UV จากน้ำตัวอย่างที่มีไซโตคลอโรไฟด์ มีค่า 96.72 % ส่วนในตัวอย่างที่มีแคลเซียมคลอไรด์ มีค่า 97.93 % สอดคล้องกับในรูปที่ 4.12 (ข) ซึ่งแสดงผลของการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติพิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน โดยพบว่า น้ำตัวอย่างที่มีไซโตคลอโรไฟด์ มีค่าการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติเท่ากับ 94.87 % ต่ำกว่าค่าการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในตัวอย่างที่มีแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งมีค่า 97.03 % ผลการทดลองสามารถอธิบายถึงการจับยัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติของไอออนประจุสองบวก ด้วยกลไกการเกิดสะพานเชื่อมระหว่างประจุลบของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติกับประจุบบนผิวของเยื่อกรองแบบนาโน อย่างไรก็ตาม ผลของการทดลองนี้ยังไม่สามารถแสดงถึงกลไกการเกิดสะพานเชื่อมได้ชัดเจนนัก เนื่องจากกลไกการกำจัดสารอินทรีย์ โดยส่วนใหญ่เกิดจากการคัดแยกด้วยขนาดของเยื่อกรองนาโน

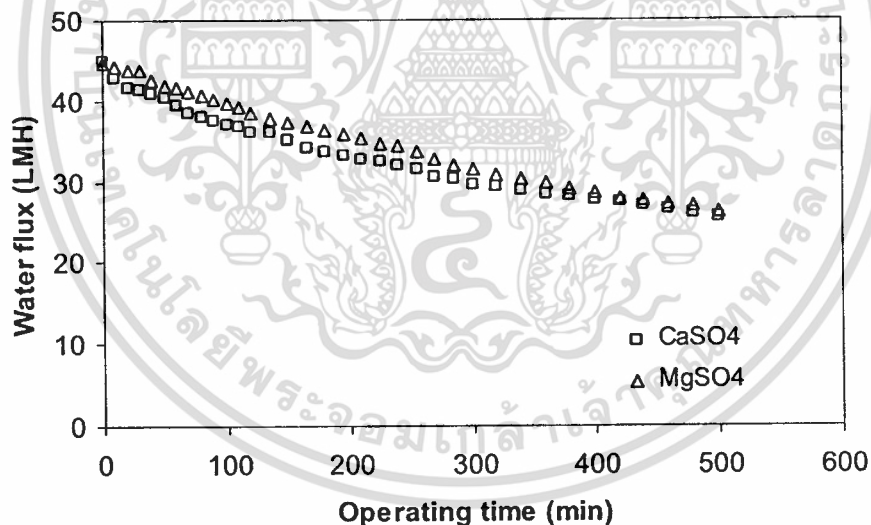


(ข)

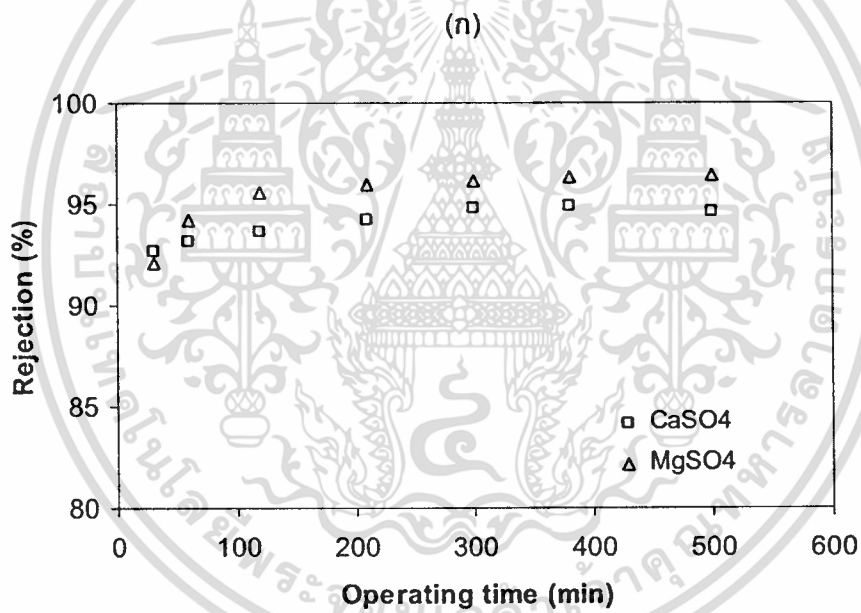
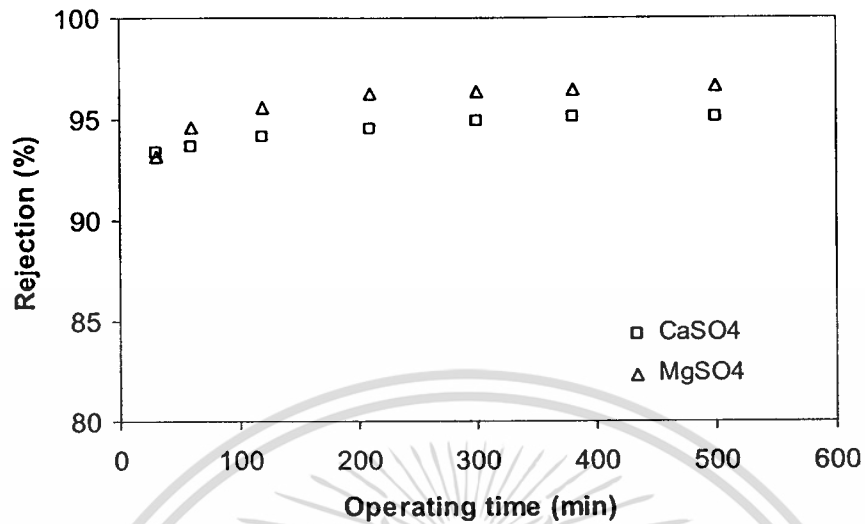
รูปที่ 4.12 ผลของไอออนประจุวขนาดต่างๆ ต่อการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
(ก) พิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสง (ข) พิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 7 ปรับความแรงประจุที่ 0.01 โมลต่อลิตรด้วยสารที่มีไอออนประจุบวกขนาดเดียวกัน ได้แก่ แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) พบว่าค่าฟลักซ์ที่ลดลงจากตัวอย่างทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ตารางที่ ก.24 และ ก.28 ในภาคผนวก ก) อาจจะเป็นไปได้ว่ามีจำนวนประจุไอออนบวกที่เท่ากันทำให้ค่าลดลงของฟลักซ์ที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ฟลักซ์ที่ลดลงมีค่ามากกว่าสารละลายที่มีแคลเซียมคลอไรด์ อาจมีผลมาจากความสามารถในการละลายน้ำที่ต่ำกว่าแคลเซียมคลอไรด์จึงเกิดการตกตะกอนได้ง่ายเป็นผลให้ฟลักซ์ลดลง นอกจากนี้ค่าการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติยังมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณร้อยละ 94 - 95 ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่าสารละลายที่มีแคลเซียมคลอไรด์ซึ่งมีค่าการกำจัดประมาณร้อยละ 97 อาจเกิดจากการตกตะกอนเป็นผลให้เกิดกลไกสะพานเชื่อมของไอออนประจุสองบวกน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก) และ(ข) ซึ่งแสดงผลการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่พิจารณาค่าการดูดกลืนแสง UV และค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนตามลำดับ (ตารางที่ ข.22 และ ข.26 ในภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.13 ผลของเกลือไอออนประจุบวกสองต่อการลดลงของฟลักซ์



รูปที่ 4.14 ผลของไอออนประจุบวกสองต่อการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

(ก) พิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสง (ข) พิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน

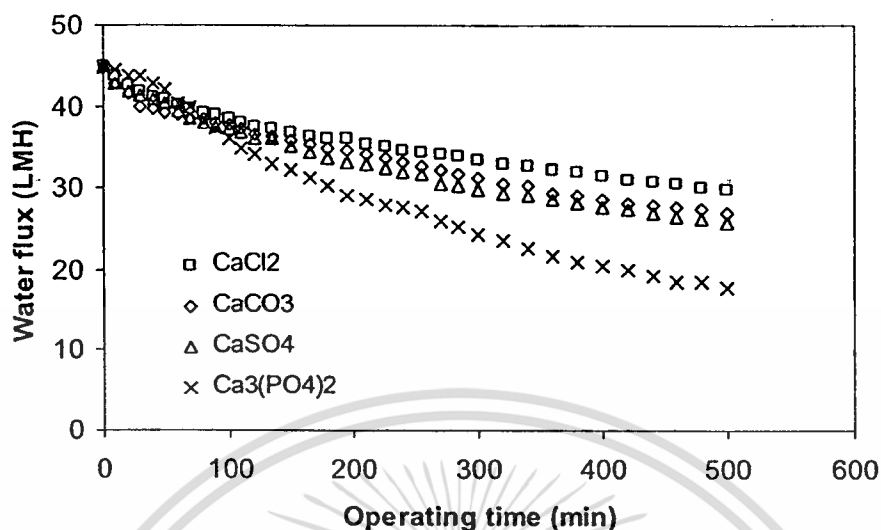
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4.2. ผลของไอออนประจุลบ

สารละลายที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 7 ค่าความแรงของประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยเกลืออนินทรีย์ประเภทต่างๆ ได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) และ แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) รูปที่ 4.15 แสดงผลของเกลืออนินทรีย์ประเภทต่างๆ ต่อการลดลงของ ฟลักซ์ (ตารางที่ ก.15 ก.20 ก.24 และ ก.26 ในภาคผนวก ก) ผลจากการทดลองในหัวข้อ 4.3.4 พบว่า ประจุของแคลเซียมบวกสอง (Ca^{2+}) นั้นสามารถทำให้ ฟลักซ์ลดลงได้อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อใช้สารที่มี ประจุบวกชนิดเดียวกันทั้งหมดแต่มีประจุลบที่ต่างกัน ค่าฟลักซ์ที่ได้มีค่าที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากความสามารถในการละลายน้ำของสารแต่ละชนิด เมื่อเกลืออนินทรีย์ที่ละลายในน้ำตัวอย่างถูก กักกันด้วยเยื่อกรองแบบนาโน ความเข้มข้นของไอออนบนผิวหน้าของเยื่อกรองเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ โดยปรากฏการณ์ Concentration Polarization การสะสมตัวที่สูงขึ้นของไอออนของสารอนินทรีย์ที่ บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง หากค่าความเข้มข้นของไอออนสูงขึ้นจน เป็นผลให้ผลคูณของการละลายมี ค่าที่สูงกว่าค่าคงที่ของการละลาย (K_{sp}) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ทำให้เกิดการตกตะกอนของเกลือ และตะกอนที่เกิดขึ้นอาจเคลือบอยู่บนผิวหน้าหรือในรูพรุนของเยื่อกรองในลักษณะของตะกอน (Inorganic scalant) (Sawyer and McCarty, 1994) เป็นการเพิ่มความต้านทาน ส่งผลให้ฟลักซ์ ลดลง ดังนั้น สารประกอบที่มีค่าคงที่ของการละลายต่ำในที่นี้ ได้แก่ แคลเซียมฟอสเฟต ย่อมมีโอกาส เกิดตะกอนได้สูง ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงมากกว่าสารที่มีค่าคงที่ของการละลายสูงกว่าหรือสารที่มี ความสามารถในการละลายน้ำได้สูงกว่า ซึ่งได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์

ตารางที่ 4.2 ค่าคงตัวของสารละลาย (K_{sp}) ของสารอนินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง (Sawyer and McCarty, 1994)

สารเคมี	ค่าคงที่ของการละลาย (K_{sp}) ที่ 25°C
CaCl_2	-
CaCO_3	5×10^{-9}
CaSO_4	2×10^{-5}
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	1×10^{-27}

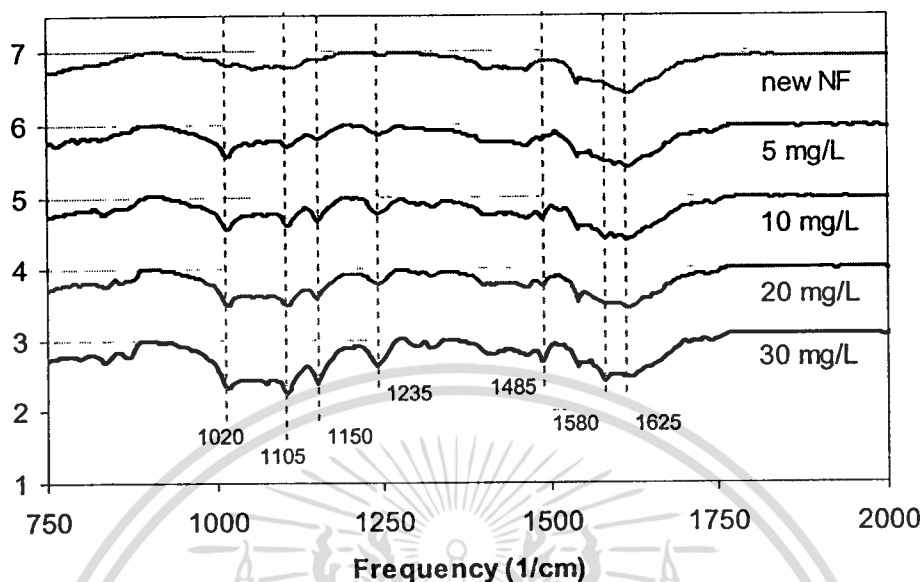


รูปที่ 4.15 ผลของเกลืออนินทรีย์ที่มีประจุลบต่างกันต่อการลดลงของฟลักซ์

4.4 การวิเคราะห์การอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

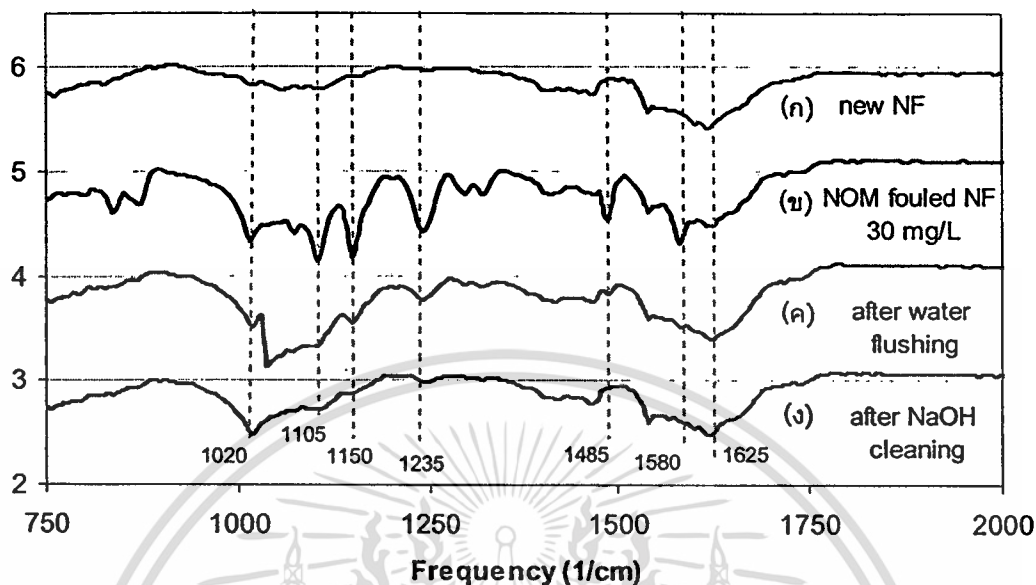
4.4.1 ผลการทดสอบด้วย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

การทดสอบเยื่อกรองแบบนาโนด้วย FTIR ใช้ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนผิวเยื่อกรอง รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมของอินฟราเรดซึ่งเปรียบเทียบระหว่างเยื่อกรองสะอาดที่ยังไม่ใช้งานกับเยื่อกรองที่อุดตันด้วยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จากการทดสอบพบว่า เยื่อกรองแบบนาโนที่ยังไม่ได้ใช้งาน พบหมู่ฟังก์ชันของ N – H bending ที่ความถี่ 1540 cm^{-1} และ C=O Stretching ที่ความถี่ 1625 cm^{-1} ซึ่งสองหมู่ฟังก์ชันนี้แสดงถึงโครงสร้างโมเลกุลของ โพลีเอไมด์ (Polyamide) ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำเยื่อกรอง เมื่อเยื่อกรองผ่านการอุดตันด้วยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ สเปกตรัม FTIR แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารที่ทำให้เกิดการอุดตันบนเยื่อกรอง โดยพบ พันธะ C – O ที่ความถี่ 1020 และ 1105 cm^{-1} ที่อาจพบได้ในอีเทอร์, กรดคาร์บอกซิลิก และโพลีแซคคาไรด์ (Shon *et al.* 2004 และ Cho *et al.* 1998) พันธะ C – O Stretching ในแอลกอฮอล์ ที่ความถี่ 1150 cm^{-1} (แมน อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. 2535) พันธะ C – O Stretching ในหมู่คาร์บอกซิลิก ที่ความถี่ 1235 cm^{-1} (Song *et al.* 2004) และพันธะ C=C Stretching ในหมู่อะโรมาติก ที่ความถี่ 1485 และ 1580 cm^{-1} (Kilduff *et al.* 2000) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่พบนี้ เป็นหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างโมเลกุลของสารชีวโมเลกุล (Song *et al.* 2004) การเพิ่มขึ้นของค่าที่ที่มีความสัมพันธ์กับการลดลงของเพอร์มิเอตฟลักซ์ จากการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ



รูปที่ 4.16 สเปกตรัม FTIR แสดงการเปรียบเทียบการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ต่อการเกิดการดูดตันของเยื่อกรองแบบนาโน

เมื่อนำเยื่อกรองที่มีการดูดตันด้วยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติไปทำความสะอาด ดังรูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมของอินฟราเรดของเยื่อกรองที่ผ่านการทำความสะอาด พบว่า สเปกตรัมอินฟราเรดของเยื่อกรองที่มีการดูดตัน (ข) จะพบพันธะ C – O ที่ความถี่ 1,020 และ 1,105 cm^{-1} ที่อาจพบได้ในอีเทอร์, กรดคาร์บอกซิลิก และโพลีแซคคาไรด์ พันธะ C – O Stretching ในแอลกอฮอล์ ที่ความถี่ 1,150 cm^{-1} พันธะ C – O Stretching ในหมู่คาร์บอกซิลิก ที่ความถี่ 1,235 cm^{-1} และพันธะ C=C Stretching ในหมู่อะโรมาติก ที่ความถี่ 1,485 และ 1,580 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของสารชีวโมเลกุล ที่พบในสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสเปกตรัมอินฟราเรดของเยื่อกรองที่สะอาด (ก) เมื่อมีการทำความสะอาดด้วยน้ำดังแสดงในสเปกตรัมของอินฟราเรด (ค) พบว่า พิกที่ช่วงความถี่ 1,150 และ 1,235 cm^{-1} หายไป แสดงถึงความสามารถในการละลายน้ำของสารที่มีหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว แต่ยังพบพิกที่ช่วงความถี่ 1,020, 1,105, 1,485 และ 1,580 cm^{-1} และเมื่อทำความสะอาดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังแสดงในสเปกตรัมของอินฟราเรด (ง) พิกที่ช่วงความถี่ 1,485 และ 1,580 cm^{-1} ซึ่งส่วนใหญ่เป็นหมู่ฟังก์ชันของ ไฮโดรฟอบิกไม่สามารถละลายน้ำได้หายไป แต่ยังพบพิกของอีเทอร์ที่ความถี่ 1,020 และ 1,105 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของเยื่อกรองที่สะอาด (ก) แสดงถึงสารที่มีหมู่ฟังก์ชันนี้สามารถดูดซับอยู่บนเยื่อกรองได้ดีส่งผลให้เกิดการดูดตันบนเยื่อกรองแบบนาโนอย่างถาวร

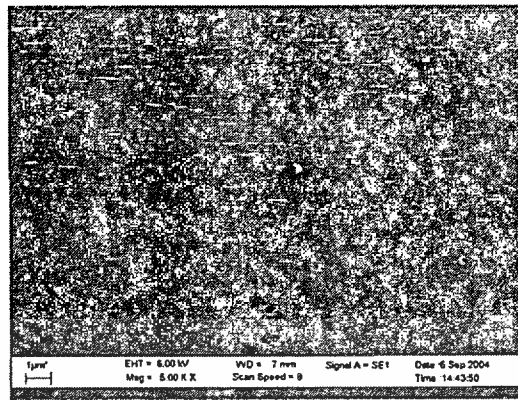


รูปที่ 4.17 สเปกตรัม FTIR แสดงการเปรียบเทียบการทำความสะอาดเยื่อกรองแบบนาโน

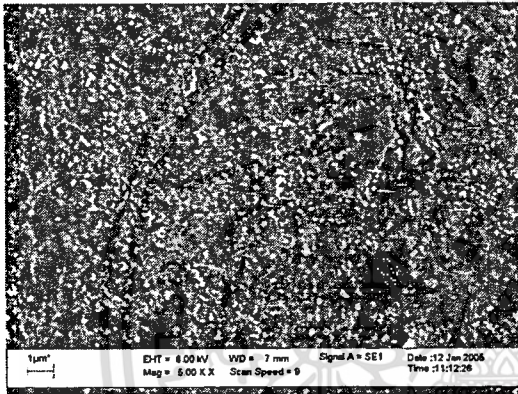
4.4.2 ภาพถ่ายเยื่อกรองด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

จากภาพถ่าย Scanning Electron Microscope กำลังขยาย 5,000 เท่า ซึ่งทำการเปรียบเทียบลักษณะของผิวหน้าเยื่อกรองแบบนาโนในสถานะที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และเยื่อกรองที่ผ่านอุดตันด้วยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ดังรูปที่ 4.18 แสดงถึงการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนเยื่อกรองแบบนาโน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ รูปที่ได้บ่งชี้ถึงการสะสมตัวของสารอินทรีย์ที่มากขึ้นในลักษณะการเกิดเค้ก

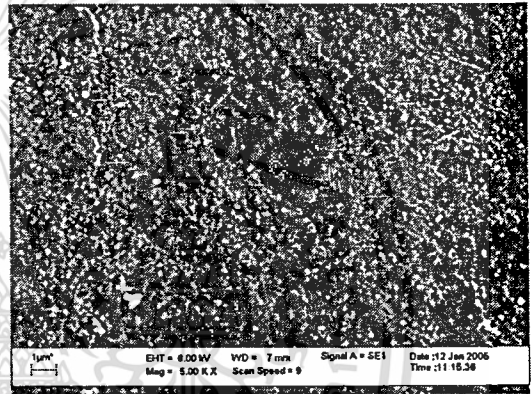
รูปที่ 4.19 แสดงภาพถ่าย SEM ของเยื่อกรองสะอาดเปรียบเทียบกับเยื่อกรองนาโนที่ผ่านการกรองสารละลายสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีเกลืออนินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า จากการทดสอบไม่พบผลึกของเกลือจาก โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมซัลเฟต บนเยื่อกรองแบบนาโนเนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำของเกลือทั้งสามชนิด แต่จากรูป 4.19 (ข) – 4.19 (ง) แสดงผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมฟอสเฟต ตามลำดับ ซึ่งภาพดังกล่าว มีความสัมพันธ์กับการลดลงของฟลักซ์เนื่องจากผลของการอุดตันของการเกิดตะกอน (Scale formation) ร่วมกับการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ



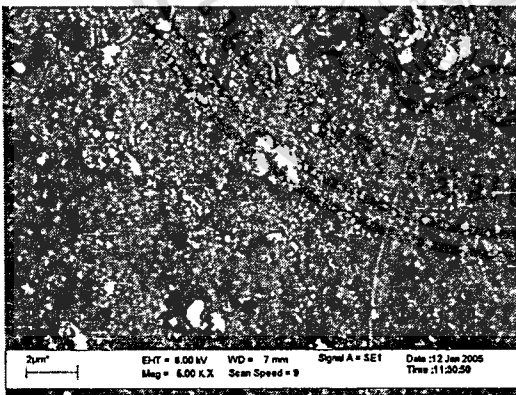
(ก) เยื่อกรองสะอาด



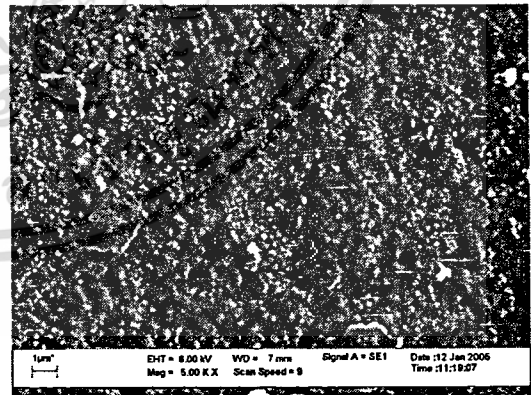
(ข) ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ค) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

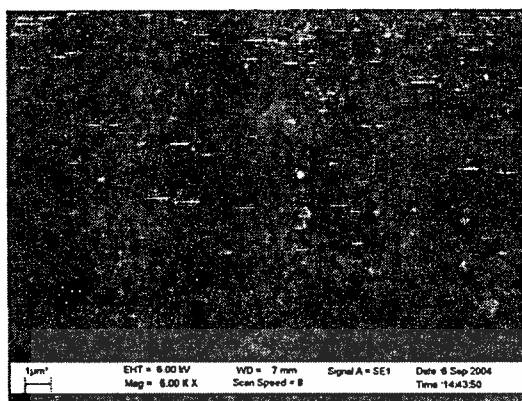


(ง) ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

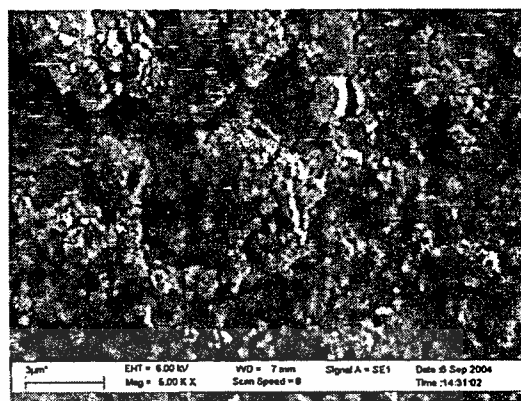


(จ) ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

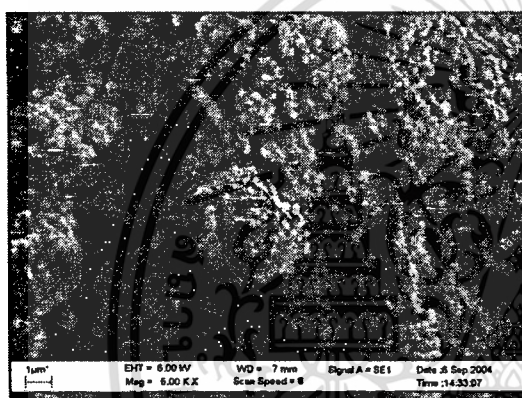
รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM แสดงการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนเยื่อกรองแบบนาโน
เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



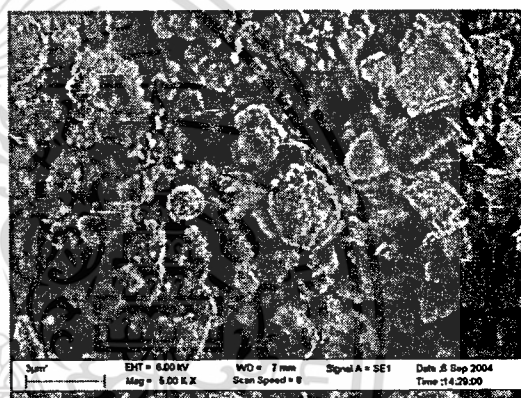
(ก) เยื่อกรองสะอาด



(ข) แคลเซียมคาร์บอเนต



(ค) แคลเซียมซิลิเฟต



(ง) แคลเซียมฟอสเฟต

รูปที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM แสดงการเปรียบเทียบการกัดบนเยื่อกรองนาโนด้วยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติร่วมเกลืออนินทรีย์เป็นส่วนประกอบที่กำลัขยาย 5,000 เท่า

4.4.3 การตรวจวิเคราะห์ด้วย Energy Dispersive Spectrometer (EDS)

การทดสอบด้วย Energy Dispersive Spectrometer แสดงถึงธาตุที่พบบนผิวเยื่อกรอง รูปที่ 4.20 (ก) แสดงกราฟของเยื่อกรองนาโนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งพบธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของเยื่อกรอง คือ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) สำหรับในรูปที่ 4.20 (ข)-(ง) แสดงผลของ EDS สำหรับเยื่อกรองแบบนาโนที่ผ่านการกรองสารละลายที่มีความเข้มข้นของ จากภาพพบธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก คือ คาร์บอน ออกซิเจน เช่นเดียวกับบนเยื่อกรองที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และยังพบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเกลืออนินทรีย์ที่ใช้ปรับความแรงประจุ โดยที่เกลืออนินทรีย์ที่มีค่าคงที่ของการละลายต่ำ (ละลายน้ำได้น้อย) ตรวจพบได้มากกว่าเกลือที่ละลายน้ำได้ เช่น แคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งบ่งชี้ถึงการสะสมตัวของผลึกดังกล่าวบนเยื่อกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

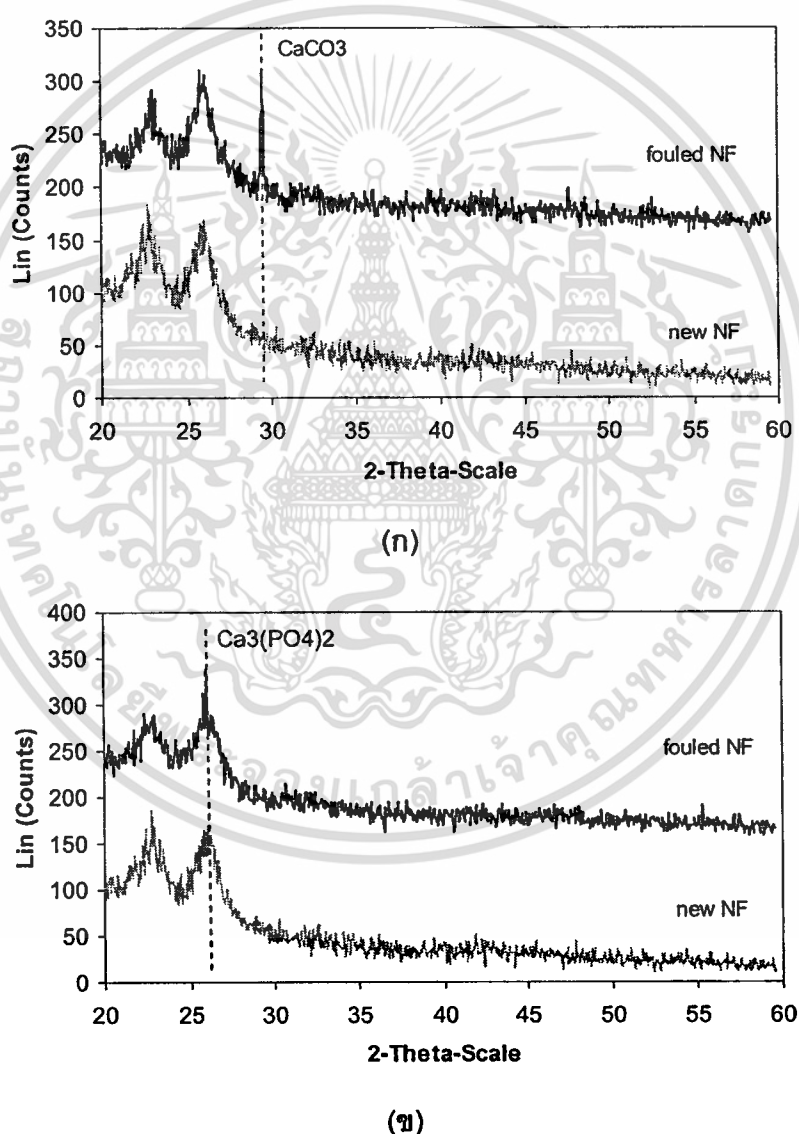


รูปที่ 4.20 ผลการการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS แสดงการสะสมตัวของธาตุนบนเยื่อกรองแบบนาโน (ก) เยื่อกรองสะอาด (ข)-(ฉ) เยื่อกรองที่อุดตันโดยการปรับความแรงประจุด้วย NaCl, CaCl₂, CaCO₃, CaSO₄ และ Ca₃(PO₄)₂ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X – Ray Diffractometer

การวิเคราะห์ด้วย X – Ray Diffractometer ใช้ในการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารอนินทรีย์ที่อยู่บนผิวเยื่อกรองแบบนาโน รูปที่ 4.21 แสดงกราฟที่ได้จากการทดสอบเยื่อกรองแบบนาโนที่สะอาดเปรียบเทียบกับที่ได้จากการทดสอบเยื่อกรองแบบนาโนโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมฟอสเฟตปรับความแรงประจุ พบว่าเกิดฟิสิกของ CaCO_3 และ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ บนเยื่อกรองแบบนาโนที่ปรับความแรงประจุด้วย CaCO_3 และ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ดังนั้นสามารถยืนยันผลการลดลงของฟลักซ์ เกิดมาจากการตกผลึกของสารอนินทรีย์



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง XRD แสดงถึงการตกผลึกของสารบนเยื่อกรองแบบนาโน
(ก) สารละลายที่มี CaCO_3 และ (ข) สารละลายที่มี $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาด้วยแบบจำลองความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม

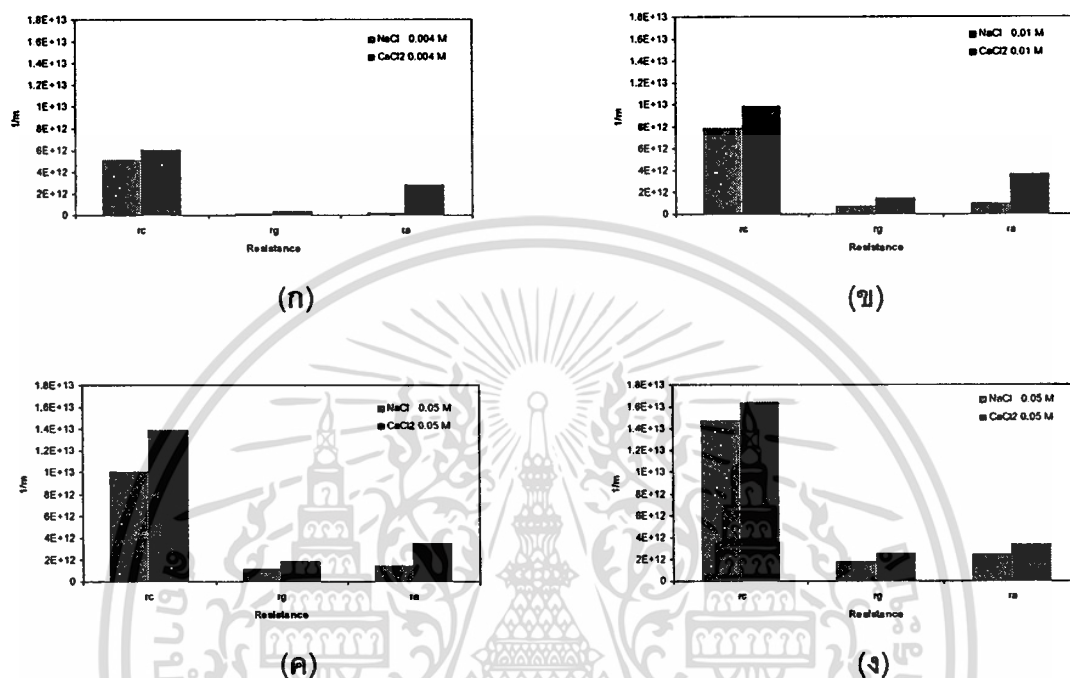
จากการคำนวณหาความต้านทานของเยื่อกรอง ตามกฎของ Darcy โดยใช้สมการที่ 3.1 พบว่า ค่าความต้านทานที่เกิดจากเยื่อกรองแบบนาโนสะอาดมีค่าโดยเฉลี่ย $2.75 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ เนื่องจากการอุดตันบนเยื่อกรองทำให้ความต้านทานของเยื่อกรองเพิ่มสูงขึ้น ผลจากการคำนวณค่าความต้านทานด้วยแบบจำลองความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม ดังรูป 4.22 (ตารางที่ ค.1 ในภาคผนวก ค) ซึ่งแสดงผลการอุดตันแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยการเพิ่มความเข้มข้นสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ พบว่า ความต้านทานที่เกิดจากชั้นเค้ก (r_c) ซึ่งมีความสำคัญและอิทธิพลต่อการเกิดการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโนเป็นอย่างมาก แสดงถึงการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนผิวเยื่อกรอง ผลจากการวิเคราะห์ยังพบว่า ส่งผลให้ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นเค้กมีค่าสูงขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ



รูปที่ 4.22 ความต้านทานของการอุดตันรูปแบบต่างๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

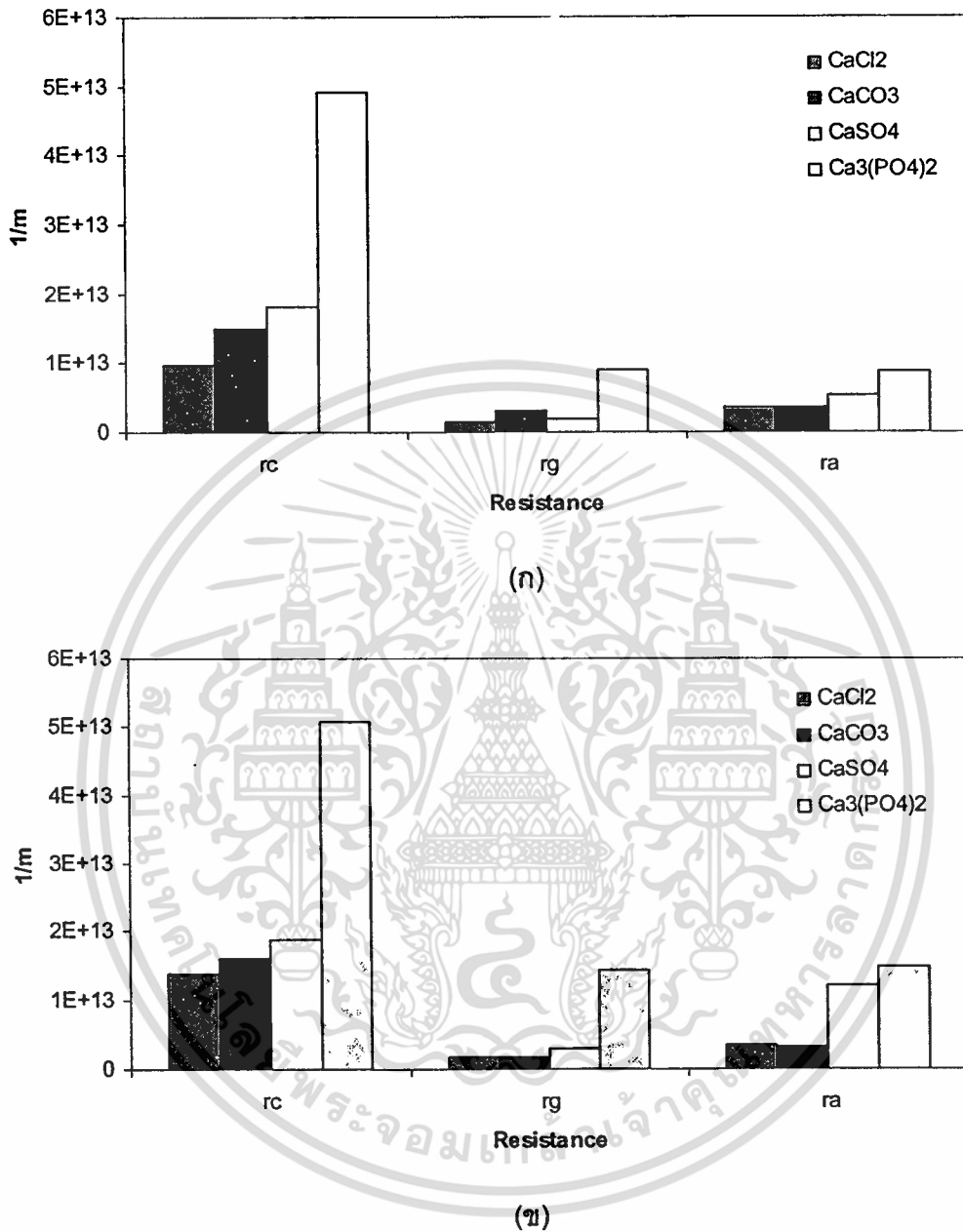
เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง สารละลายสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ปรับค่าความแรงประจุด้วย โซเดียมคลอไรด์กับแคลเซียมคลอไรด์ จากรูปที่ 4.23 (ตารางที่ ค.2 – ค.3 ในภาคผนวก ค) พบว่า ความต้านทานที่เกิดจากชั้นเค้ก (r_c) มีความสัมพันธ์ต่อการลดลงของเพอร์มิเอฟลักซ์ เนื่องจากการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ จากการจับตัวกับไอออนบวกสองของแคลเซียมคลอไรด์ ด้วยกลไกสะพานเชื่อม ทำให้มีค่าความต้านทานที่สูงกว่าสารละลายที่มีไอออนบวกหนึ่งของโซเดียมคลอไรด์ และเมื่อความแรงของประจุเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความต้านทานของระบบเพิ่มขึ้นด้วย อัน

เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มความแรงของประจุเป็นผลให้ความเข้มข้นของสารที่ใช้ปรับค่าความแรงประจุเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความต้านทานที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.23 ความต้านทานของการอุดตันเปรียบเทียบระหว่างสารละลายที่มีโซเดียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความแรงประจุ (ก) 0.004 M (ข) 0.01 M (ค) 0.05 M และ(ง) 0.1 M

เมื่อเปรียบเทียบการลดลงของเพอร์มิเอทฟลักซ์ เนื่องจากความแตกต่างของไอออนประจุ พบว่า ความต้านทานที่ทำให้ฟลักซ์ลดลงเกิดจากการสะสมตัวของชั้นเด็กหรือตะกอนบนผิวหน้าเยื่อกรอง ดังรูปที่ 4.24 (ตารางที่ ค.4 – ค.5 ในภาคผนวก ค) แสดงผลการความต้านทานที่เกิดจากการใช้เกลืออนินทรีย์ประเภทต่างๆปรับค่าความแรงของประจุ ได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมฟอสเฟต พบว่า แคลเซียมฟอสเฟตมีค่าความต้านทานของการอุดตันแบบการเกิดเค้ก (r_c) ที่สูง ซึ่งเกิดจากการสะสมตัวในรูพรุนหรือเคลือบติดแน่นผิวหน้าในลักษณะของการเกิดเจล ส่วนความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันอย่างถาวร (r_a) ที่มีปริมาณที่สูงเนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่างไม่สามารถที่ละลายตะกอนได้



รูปที่ 4.24 ความต้านทานของการดูดซับเปรียบเทียบระหว่างสารละลายที่มีแคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมฟอสเฟต ที่ความแรงประจุ (ก) 0.01 โมลต่อลิตร และ(ข) 0.05 โมลต่อลิตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ในการดูดตันของเยื่อกรองแบบนาโน สามารถเกิดขึ้นได้จากปัจจัยต่าง ๆ โดยสรุปดังนี้

- ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ พบว่า เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ จะทำให้เพอร์มีเอทฟลักซ์ลดลง โดยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นผลให้เกิดการดูดตันสูงสุดและทำให้ผลของเพอร์มีเอทฟลักซ์ลดลงมากที่สุด

- ความแรงประจุ พบว่า เมื่อมีการเพิ่มความแรงของประจุเป็นผลให้เพอร์มีเอทฟลักซ์ที่ได้มีค่าลดลง โดยค่าความแรงประจุที่ 0.1 โมลต่อลิตรทำให้เพอร์มีเอทฟลักซ์ลดลงมากที่สุด เนื่องมาจากการเพิ่มความแรงของประจุ ทำได้โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มมากขึ้น

- ค่าพีเอช พบว่า เมื่อปรับระดับพีเอชเป็น 4 ทำให้เพอร์มีเอทฟลักซ์ที่ได้มีค่าลดลงน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่พีเอช 7 และ 10

- เกลืออนินทรีย์ที่มีไอออนบวกแตกต่างกัน มีผลต่อค่าการลดลงของเพอร์มีเอทฟลักซ์ โดยพบว่า แคลเซียมที่มีไอออนบวกสองทำให้การลดลงของเพอร์มีเอทฟลักซ์มากกว่าโซเดียมที่มีไอออนบวกหนึ่งเป็นผลมาจากการทำตัวเป็นสะพานเชื่อมระหว่างสารอินทรีย์ทางธรรมชาติกับเยื่อกรองแบบนาโน ในส่วนของไอออนประจุลบ การลดลงของฟลักซ์เกิดจากค่าความสามารถในการละลายของเกลืออนินทรีย์ โดยค่าคงตัวของการละลายต่ำเป็นผลให้เพอร์มีเอทฟลักซ์ที่ได้มีค่าที่ลดลงมากกว่าเกลืออนินทรีย์ที่มีค่าของการละลายสูง

2. ผลการวิเคราะห์การดูดตันของเยื่อกรองแบบนาโนด้วยเครื่อง FTIR พบว่าพันธะ C – O ที่ความถี่ 1020 และ 1105 cm^{-1} ที่อาจพบได้ในอีเทอร์, กรด คาร์บอกซิลิก และโพลีแซคคาไรด์ พันธะ C – O Stretching ในแอลกอฮอล์ ที่ความถี่ 1150 cm^{-1} พันธะ C – O Stretching ในหมู่คาร์บอกซิลิก ที่ความถี่ 1235 cm^{-1} และพันธะ C=C Stretching ในหมู่อะโรมาติก ที่ความถี่ 1485 และ 1580 cm^{-1} จากการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ซึ่งแสดงถึงการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนเยื่อกรองแบบนาโน

3. ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM, EDS และ XRD แสดงถึงการสะสมตัวของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ รวมทั้งผลึกของเกลืออนินทรีย์ ซึ่งส่งผลร่วมกันกับสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในการเกิดการอุดตันและลดลงของฟลักซ์

4. ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม พบว่า ความต้านทานที่เกิดจากชั้นของเค้ก (r_c) มีผลทำให้เพอร์มีเอทฟลักซ์ลดลงมากกว่าความต้านทานของชั้นเจล (r_g) และความต้านทานแบบถาวร (r_o) โดยที่ความต้านทานของชั้นเค้กเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ และค่าความต้านทานของชั้นเค้กยังแสดงถึงการอุดตันโดยเกลืออนินทรีย์และการเกิดตะกอน

5. การทำความสะอาดเยื่อกรองโดยใช้ความเร็วของน้ำ จะลดชั้นของเค้กสะสมอยู่ให้น้อยลงได้ ส่วนการใช้ต่างทำความสะอาด จะลดชั้นของเจลที่เกิดขึ้นได้ แต่ไม่สามารถที่จะทำความสะอาดการอุดตันที่เกิดจากตะกอนได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาเยื่อกรองประเภทต่าง ๆ ที่ร่วมด้วยเพื่อจะได้มีการเปรียบเทียบผลของการทดลองทำให้สามารถนำไปใช้งานให้เกิดประโยชน์มากที่สุด
2. ควรศึกษาถึงคุณลักษณะของเยื่อกรองที่จะใช้ เพื่อใช้อธิบายกลไกของการอุดตันได้ดีขึ้น เช่น วัสดุที่ใช้ในการผลิต ขนาดรูพรุนของเยื่อกรอง และชนิดของประจุที่ผิวหน้าเยื่อกรอง
3. ควรพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายกลไกการอุดตัน
4. ในการทดสอบความแม่นยำของระบบ ควรจะใช้จำนวนครั้งในการทดสอบที่มากกว่าในการวิจัยครั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- มันสิน ตันฑุลเวศน์. 2539. *วิศวกรรมการประปา*. เล่ม2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- แมน อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. 2535. *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. 2543. *กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ไทยเส็ง.
- Bowen, W. R., Calvo, J. I. and Hernandez, A. 1995. "Steps of Membrane Blocking in Flux Decline During Protein Microfiltration." *J. Membr. Sci.* 101 : 153-165.
- Cho, J., Amy, G., Pellegrino, J. and Yoon, Y. 1998. "Characterization of Clean and Natural Organic Matter (NOM) Fouled NF and UF Membranes, and the Foulants Characterization." *Desalination*. 118 : 101– 108.
- Cho, J., Amy, G. and Pellegrino, J. 1999. "Membrane Filtration of Natural Organic Matter : Initial Comparison of Rejection and Flux Decline Characteristics with Ultrafiltration and Nanofiltration Membrane." *Wat. Res.* 33(11) : 2517-2526.
- Cho, J., Amy, G. and Pellegrino, J. 2000. "Membrane Filtration of Natural Organic Matter: Comparison of Flux Decline, NOM Rejection, and Foulants During Filtration with Three UF Membranes." *Desalination*. 127 : 283-298.
- Collins, M.R., Amy, G.L. and King, P.H. 1985. "Removal of Organic Matter in Water Treatment." *J. Environ. Eng.* 111(6) : 850-864.
- Conlon, W.J. and McClellan. 1989. "Membrane Softening : A Treatment Process Comes of Age." *J. AWWA*. 81(11) ; 47-51.
- Crozes, G., Anselme, C. and Mallevalle, J. 1993. "Effect of Adsorption of Organic Matter on Fouling of Ultrafiltration Membranes." *J. Membr. Sci.* 84 : 61-77.
- Duranceau, S.J., Taylor, J.S. and Mulford, L.A. 1992. "SOC Removal in a Membrane Softening Process." *J. AWWA*. 84(1) : 68-78.

- Escobar, I.C. and Randall, A.A. 1999. "Influence of NF on Distribution System on Distribution System biostability." *J. AWWA*. 91(6) : 76-89.
- 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.
- Kabsch-Korbutowicz, M., Pozniak, G., Trochimczuk, W. and Winnicki, T. 1994. "Separation of Humic Substances by Porous Ion-Exchange Membranes From Sulfonated Polysulfone." *Sep. Sci. Technol.* 29(17) : 2345-2358.
- Kaiya, Y., Itoh, Y., Fujita, K. and Takizawa, S. 1996. "Study on Fouling Materials in the Membrane Treatment Process for Potable Water." *Desalination*. 106 : 71-77.
- Kilduff, J.E., Mattaraj, S. and Georyes B. 2004. "Flux Decline During NanoFiltration of Naturally-Occurring Dissolved Organic Matter Effects of Osmotic Pressure, Membrane Permeability, and Cake Formation." *J. Membrane. Sci.* 239 : 39-53.
- Kilduff, J.E., Mattaraj, S., Pieracci, J.P. and Belfort, G. 2000. "Photochemical Modification of Polyethersulfone and Sulfonated Polysulfone Nanofiltration Membranes for Control of Fouling by Natural Organic Matter." *Desalination*. 132 : 133-142.
- Krasner, S.W., Westrick, J.J. and Wiley, J. 1998. "Applied Regression Analysis : An Introduction to Nonlinear Estimation." NY USA : John Wiley.
- Lin, C-F., Lin, T-Y. and Hao, O.J. 2000. "Effect of Humic Substances Characteristics on UF Performance." *Wat. Res.* 34(4) : 1097-1106.
- Mattaraj, S. and Kilduff, J.E. 2003. "Effect of Natural Organic Matter Properties on Nanofiltration Fouling." 1051-1060. *The Fourth Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering*. Bangkok : Kasetsart University.
- Mattaraj, S. and Chian, E.S.K. 1997. "Removal of Hardness and Dissolved Organic Matter Using Nanofiltration Membrane." *Ransselaer Polytechnic Institute Troy*. New York.
- Nilson, J.A. and DiGiano, F.A. 1996. "Influence of NOM Composition on Nanofiltration." *J. AWWA*. 88(5) : 53-66.

- Rodriguez, M.J. and Sadiq,R. 2004. "Disinfection by-products(DBP_s) in Drinking Water Predictive Model for Their Occurrence A Review." *Science of the Total Environment*. 321 : 21-46.
- Sawyer, C.N. and McCarty, P.C. 1994. "Chemistry for Environmental Engineering". , 3rd ed. McGraw-Hill, Singapore
- Schafer, A.I., Fane, A.G. and Waite, T.D. 1998. "Nanofiltration of Natural Organic Matter : Removal, Fouling and the Influence of Multivalent Ions." *Desalinatn*. 118 : 109-122.
- Shon, H.K., Vigneswaran, S., Kim, I.S., Cho, J. and Ngo, H.H. 2004. "Effect of Pretreatment on The Fouling of Membranes: Application in Biologically Treated Sewage Effluent." *J. Membr. Sci*. 234 : 111-120.
- Song, W., Ravindran V, Bruce E.K. and Massoud P. 2004 "Nanofiltration of Natural Organic Matter with H₂O₂/UV Pretreatment : Fouling Mitigation and Membrane Surface Characterization." *J. Membr. Sci*. 241 : 143-160.
- Swietli, J., Dabrowska, A., Raczyk-Stanistraviak, U. and Nawrocki, J. 2004. "Reactivity of Natural Organic Matter Fractions with Chlorine Dioxide and Ozonè." *Wat. Res*. 38 : 574-558.
- Tseng, T. and Edwards, M. 1999. "Predicting Full-Scale TOC Removal." *J. AWWA*. 91(4) : 159-170.
- Watson, B.M., and Hornburg, C.D. 1989. "Low-Energy Membrane Nanofiltration For Removal of Color, Organics and Hardness from Drinking Water Supplies." *Desalinatn*. 72 : 11-22.
- www.waterquality.crc.org.au/nom/index.htm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ของระบบเยื่อกรองแบบนาโน

Pressure (kPa)	Flux(L/m ² /h)	Kw (L/m ² /h/kPa)
206.795	28.733	0.1389
344.658	48.398	0.1404
492.861	70.467	0.1429
620.385	87.923	0.1417



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงผลลัพธ์ของการทดสอบความแม่นยำของระบบโดยตัวอย่างสารละลายที่มี
ความเข้มข้นของอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรง
ประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ครั้งที่ 1 และ 2

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	46.5	10.49	1.96	84.257	44.957	
10	46.5	10.47	1.66	86.315	44.871	
20	46.5	10.18	1.61	86.344	43.629	
30	46.5	9.95	1.56	86.447	42.643	P1,C1 (30)
40	46.5	9.88	1.75	84.953	42.343	
50	46.5	9.73	1.66	85.426	41.700	
60	46.5	9.65	1.59	85.854	41.357	P2,C2 (60)
70	46.5	9.62	1.74	84.683	41.229	
80	46.5	9.59	1.48	86.631	41.100	
90	46.5	9.54	1.66	85.179	40.886	
100	46.5	9.46	1.53	86.078	40.543	
110	46.5	9.38	1.66	84.964	40.200	
120	46.5	9.36	1.56	85.714	40.114	P3,C3 (120)
135	46.5	9.31	1.62	85.178	39.900	
150	46.5	9.21	1.61	85.120	39.471	
165	46.5	9.10	1.59	85.126	39.000	
180	46.5	9.02	1.58	85.094	38.657	
195	46.5	8.98	1.56	85.199	38.486	
210	46.5	8.9	1.62	84.601	38.143	P4,C4 (210)
225	46.5	8.79	1.55	85.010	37.671	
240	46.5	8.67	1.49	85.335	37.157	
255	46.5	8.62	1.55	84.759	36.943	
270	46.5	8.54	1.48	85.230	36.600	
285	46.5	8.52	1.51	84.945	36.514	
300	46.5	8.44	1.44	85.425	36.171	P5,C5 (300)
320	46.5	8.32	1.44	85.246	35.657	
340	46.5	8.19	1.40	85.401	35.100	
360	46.5	8.10	1.44	84.906	34.714	
380	46.5	8.03	1.41	85.064	34.414	P6,C6 (380)
400	46.5	7.96	1.46	84.501	34.114	
420	46.5	7.91	1.38	85.145	33.900	
440	46.5	7.86	1.39	84.973	33.686	
460	46.5	7.81	1.38	84.984	33.471	
480	46.5	7.79	1.38	84.951	33.386	
500	46.5	7.75	1.41	84.607	33.214	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	47	10.48	1.84	85.065	44.914	
10	47	10.43	1.72	85.844	44.700	
20	47	10.35	1.47	87.563	44.357	
30	47	10.24	1.58	86.633	43.886	P1,C1 (30)
40	47	10.24	1.62	86.341	43.886	
50	47	10.23	1.71	85.678	43.843	
60	47	10.06	1.64	85.983	43.114	P2,C2 (60)
70	47	9.97	1.57	86.395	42.729	
80	47	9.83	1.51	86.684	42.129	
90	47	9.82	1.51	86.673	42.086	
100	47	9.77	1.86	84.007	41.871	
110	47	9.77	1.77	84.662	41.871	
120	47	9.73	1.79	84.462	41.700	P3,C3 (120)
135	47	9.67	1.76	84.602	41.443	
150	47	9.63	1.66	85.297	41.271	
165	47	9.58	1.64	85.383	41.057	
180	47	9.58	1.47	86.697	41.057	
195	47	9.49	1.42	86.984	40.671	
210	47	9.33	1.47	86.389	39.986	P4,C4 (210)
225	47	9.31	1.69	84.636	39.900	
240	47	9.17	1.62	84.986	39.300	
255	47	9.12	1.45	86.282	39.086	
270	47	9.08	1.49	85.904	38.914	
285	47	9.01	1.42	86.385	38.614	
300	47	8.99	1.7	84.097	38.529	P5,C5 (300)
320	47	8.88	1.58	84.895	38.057	
340	47	8.87	1.67	84.156	38.014	
360	47	8.79	1.47	85.673	37.671	
380	47	8.77	1.35	86.660	37.586	P6,C6 (380)
400	47	8.73	1.32	86.866	37.414	
420	47	8.67	1.3	86.961	37.157	
440	47	8.64	1.37	86.314	37.029	
460	47	8.59	1.33	86.593	36.814	
480	47	8.54	1.29	86.877	36.600	
500	47	8.51	1.3	86.748	36.471	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 5
 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย
 โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	44.5	10.53	1.95	84.375	45.129	
10	44.5	10.49	1.73	85.843	44.957	
20	44.5	10.42	1.7	85.974	44.657	
30	44.5	10.36	1.61	86.550	44.400	P1,C1 (30)
40	44.5	10.28	1.64	86.242	44.057	
50	44.5	10.18	1.61	86.344	43.629	
60	44.5	10.06	1.55	86.649	43.114	P2,C2 (60)
70	44.5	9.94	1.60	86.135	42.600	
80	44.5	9.89	1.64	85.776	42.386	
90	44.5	9.76	1.6	85.915	41.829	
100	44.5	9.65	1.72	84.872	41.357	
110	44.5	9.48	1.65	85.175	40.629	
120	44.5	9.42	1.78	84.107	40.371	P3,C3 (120)
135	44.5	9.38	1.47	86.452	40.200	
150	44.5	9.32	1.57	85.583	39.943	
165	44.5	9.25	1.62	85.097	39.643	
180	44.5	9.19	1.61	85.093	39.386	
195	44.5	9.11	1.61	84.981	39.043	
210	44.5	9.04	1.59	85.042	38.743	P4,C4 (210)
225	44.5	9.00	1.62	84.746	38.571	
240	44.5	8.94	1.55	85.224	38.314	
255	44.5	8.90	1.56	85.086	38.143	
270	44.5	8.86	1.50	85.521	37.971	
285	44.5	8.80	1.51	85.354	37.714	
300	44.5	8.75	1.47	85.616	37.500	P5,C5 (300)
320	44.5	8.69	1.54	84.946	37.243	
340	44.5	8.65	1.46	85.559	37.071	
360	44.5	8.60	1.49	85.233	36.857	
380	44.5	8.56	1.50	85.089	36.686	P6,C6 (380)
400	44.5	8.51	1.52	84.845	36.471	
420	44.5	8.45	1.51	84.839	36.214	
440	44.5	8.43	1.48	85.066	36.129	
460	44.5	8.45	1.48	85.096	36.214	
480	44.5	8.40	1.49	84.934	36.000	
500	44.5	8.35	1.61	83.835	35.786	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย
โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	46.5	10.49	1.96	84.257	44.957	
10	46.5	10.47	1.66	86.315	44.871	
20	46.5	10.18	1.61	86.344	43.629	
30	46.5	9.95	1.56	86.447	42.643	P1,C1 (30)
40	46.5	9.88	1.75	84.953	42.343	
50	46.5	9.73	1.66	85.426	41.700	
60	46.5	9.65	1.59	85.854	41.357	P2,C2 (60)
70	46.5	9.62	1.74	84.683	41.229	
80	46.5	9.59	1.48	86.631	41.100	
90	46.5	9.54	1.66	85.179	40.886	
100	46.5	9.46	1.53	86.078	40.543	
110	46.5	9.38	1.66	84.964	40.200	
120	46.5	9.36	1.56	85.714	40.114	P3,C3 (120)
135	46.5	9.31	1.62	85.178	39.900	
150	46.5	9.21	1.61	85.120	39.471	
165	46.5	9.10	1.59	85.126	39.000	
180	46.5	9.02	1.58	85.094	38.657	
195	46.5	8.98	1.56	85.199	38.486	
210	46.5	8.9	1.62	84.601	38.143	P4,C4 (210)
225	46.5	8.79	1.55	85.010	37.671	
240	46.5	8.67	1.49	85.335	37.157	
255	46.5	8.62	1.55	84.759	36.943	
270	46.5	8.54	1.48	85.230	36.600	
285	46.5	8.52	1.51	84.945	36.514	
300	46.5	8.44	1.44	85.425	36.171	P5,C5 (300)
320	46.5	8.32	1.44	85.246	35.657	
340	46.5	8.19	1.40	85.401	35.100	
360	46.5	8.10	1.44	84.906	34.714	
380	46.5	8.03	1.41	85.064	34.414	P6,C6 (380)
400	46.5	7.96	1.46	84.501	34.114	
420	46.5	7.91	1.38	85.145	33.900	
440	46.5	7.86	1.39	84.973	33.686	
460	46.5	7.81	1.38	84.984	33.471	
480	46.5	7.79	1.38	84.951	33.386	
500	46.5	7.75	1.41	84.607	33.214	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ตารางแสดงผลลัพธ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย
โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	51	10.36	1.82	85.057	44.400	
10	51	10.08	1.71	85.496	43.200	
20	51	9.97	1.59	86.246	42.729	
30	51	9.86	1.57	86.264	42.257	P1,C1 (30)
40	51	9.79	1.54	86.408	41.957	
50	51	9.69	1.65	85.450	41.529	
60	51	9.43	1.66	85.032	40.414	P2,C2 (60)
70	51	9.37	1.62	85.259	40.157	
80	51	9.24	1.55	85.635	39.600	
90	51	9.10	1.53	85.607	39.000	
100	51	8.96	1.49	85.742	38.400	
110	51	8.81	1.48	85.617	37.757	
120	51	8.70	1.53	85.044	37.286	P3,C3 (120)
135	51	8.57	1.51	85.020	36.729	
150	51	8.48	1.47	85.226	36.343	
165	51	8.43	1.49	84.980	36.129	
180	51	8.38	1.43	85.423	35.914	
195	51	8.29	1.45	85.113	35.529	
210	51	8.18	1.42	85.208	35.057	P4,C4 (210)
225	51	8.04	1.42	84.989	34.457	
240	51	7.98	1.40	85.075	34.200	
255	51	7.82	1.41	84.724	33.514	
270	51	7.75	1.38	84.885	33.214	
285	51	7.68	1.31	85.428	32.914	
300	51	7.62	1.36	84.855	32.657	P5,C5 (300)
320	51	7.55	1.39	84.452	32.357	
340	51	7.47	1.37	84.502	32.014	
360	51	7.44	1.34	84.738	31.886	
380	51	7.34	1.32	84.758	31.457	P6,C6 (380)
400	51	7.27	1.33	84.535	31.157	
420	51	7.20	1.28	84.906	30.857	
440	51	7.13	1.31	84.479	30.557	
460	51	7.09	1.33	84.204	30.386	
480	51	7.04	1.31	84.311	30.171	
500	51	7.00	1.30	84.337	30.000	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย
โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	54	10.39	1.79	85.304	44.529	
10	54	9.70	1.71	85.013	41.571	
20	54	9.57	1.63	85.446	41.014	
30	54	9.53	1.61	85.548	40.843	P1,C1 (30)
40	54	9.40	1.62	85.299	40.286	
50	54	9.13	1.60	85.089	39.129	
60	54	8.97	1.58	85.024	38.443	P2,C2 (60)
70	54	8.73	1.60	84.511	37.414	
80	54	8.63	1.31	86.821	36.986	
90	54	8.56	1.42	85.772	36.686	
100	54	8.47	1.41	85.729	36.300	
110	54	8.36	1.41	85.568	35.829	
120	54	8.29	1.42	85.376	35.529	P3,C3 (120)
135	54	8.15	1.39	85.430	34.929	
150	54	8.10	1.38	85.443	34.714	
165	54	8.03	1.36	85.517	34.414	
180	54	7.98	1.38	85.256	34.200	
195	54	7.91	1.3	85.885	33.900	
210	54	7.79	1.38	84.951	33.386	P4,C4 (210)
225	54	7.64	1.44	84.141	32.743	
240	54	7.45	1.36	84.563	31.929	
255	54	7.37	1.31	84.908	31.586	
270	54	7.31	1.37	84.217	31.329	
285	54	7.16	1.34	84.235	30.686	
300	54	7	1.36	83.732	30.000	P5,C5 (300)
320	54	6.91	1.27	84.474	29.614	
340	54	6.82	1.14	85.678	29.229	
360	54	6.75	1.23	84.586	28.929	
380	54	6.67	1.21	84.645	28.586	P6,C6 (380)
400	54	6.81	1.22	84.807	29.186	
420	54	6.68	1.16	85.204	28.629	
440	54	6.54	1.14	85.156	28.029	
460	54	6.49	1.11	85.395	27.814	
480	54	6.43	1.13	85.053	27.557	
500	54	6.38	1.1	85.294	27.343	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.004 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	39.5	10.64	1.82	85.393	45.600	
10	39.5	10.59	1.82	85.334	45.386	
20	39.5	10.56	1.78	85.575	45.257	
30	39.5	10.51	1.81	85.308	45.043	P1,C1 (30)
40	39.5	10.49	1.83	85.146	44.957	
50	39.5	10.44	1.79	85.364	44.743	
60	39.5	10.41	1.70	85.962	44.614	P2,C2 (60)
70	39.5	10.36	1.60	86.622	44.400	
80	39.5	10.33	1.59	86.661	44.271	
90	39.5	10.29	1.59	86.616	44.100	
100	39.5	10.25	1.58	86.644	43.929	
110	39.5	10.21	1.58	86.599	43.757	
120	39.5	10.17	1.60	86.406	43.586	P3,C3 (120)
135	39.5	10.13	1.61	86.286	43.414	
150	39.5	10.10	1.61	86.251	43.286	
165	39.5	10.05	1.63	86.045	43.071	
180	39.5	10.00	1.58	86.356	42.857	
195	39.5	9.95	1.58	86.297	42.643	
210	39.5	9.92	1.65	85.739	42.514	P4,C4 (210)
225	39.5	9.89	1.59	86.150	42.386	
240	39.5	9.85	1.63	85.801	42.214	
255	39.5	9.81	1.62	85.827	42.043	
270	39.5	9.76	1.61	85.840	41.829	
285	39.5	9.71	1.61	85.777	41.614	
300	39.5	9.67	1.71	84.974	41.443	P5,C5 (300)
320	39.5	9.63	1.63	85.524	41.271	
340	39.5	9.58	1.59	85.765	41.057	
360	39.5	9.53	1.65	85.242	40.843	
380	39.5	9.48	1.67	85.022	40.629	P6,C6 (380)
400	39.5	9.44	1.56	85.818	40.457	
420	39.5	9.40	1.61	85.377	40.286	
440	39.5	9.33	1.58	85.518	39.986	
460	39.5	9.28	1.54	85.767	39.771	
480	39.5	9.23	1.58	85.384	39.557	
500	39.5	9.19	1.54	85.648	39.386	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	40.5	10.48	1.70	86.043	44.914	
10	40.5	10.46	1.72	85.878	44.829	
20	40.5	10.44	1.71	85.926	44.743	
30	40.5	10.40	1.60	86.667	44.571	P1,C1 (30)
40	40.5	10.37	1.56	86.924	44.443	
50	40.5	10.32	1.63	86.360	44.229	
60	40.5	10.28	1.61	86.459	44.057	P2,C2 (60)
70	40.5	10.23	1.65	86.111	43.843	
80	40.5	10.19	1.61	86.356	43.671	
90	40.5	10.15	1.60	86.383	43.500	
100	40.5	10.11	1.50	87.080	43.329	
110	40.5	10.06	1.51	86.949	43.114	
120	40.5	10.00	1.71	85.397	42.857	P3,C3 (120)
135	40.5	9.95	1.60	86.147	42.643	
150	40.5	9.91	1.55	86.475	42.471	
165	40.5	9.87	1.52	86.655	42.300	
180	40.5	9.81	1.55	86.356	42.043	
195	40.5	9.76	1.55	86.295	41.829	
210	40.5	9.71	1.51	86.542	41.614	P4,C4 (210)
225	40.5	9.66	1.47	86.792	41.400	
240	40.5	9.60	1.61	85.638	41.143	
255	40.5	9.54	1.53	86.179	40.886	
270	40.5	9.48	1.57	85.792	40.629	
285	40.5	9.42	1.53	86.027	40.371	
300	40.5	9.36	1.59	85.479	40.114	P5,C5 (300)
320	40.5	9.32	1.54	85.820	39.943	
340	40.5	9.27	1.51	85.993	39.729	
360	40.5	9.21	1.47	86.236	39.471	
380	40.5	9.18	1.60	85.158	39.343	P6,C6 (380)
400	40.5	9.11	1.55	85.460	39.043	
420	40.5	9.06	1.49	85.877	38.829	
440	40.5	9.00	1.47	85.960	38.571	
460	40.5	8.97	1.47	85.920	38.443	
480	40.5	8.93	1.51	85.536	38.271	
500	40.5	8.89	1.50	85.563	38.100	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	44.5	10.46	1.73	85.808	44.829	
10	44.5	10.41	1.67	86.175	44.614	
20	44.5	10.33	1.65	86.227	44.271	
30	44.5	10.29	1.82	84.971	44.100	P1,C1 (30)
40	44.5	10.23	1.75	85.392	43.843	
50	44.5	10.19	1.77	85.201	43.671	
60	44.5	10.13	1.70	85.630	43.414	P2,C2 (60)
70	44.5	10.08	1.66	85.860	43.200	
80	44.5	10.02	1.61	86.156	42.943	
90	44.5	9.96	1.60	86.159	42.686	
100	44.5	9.91	1.63	85.875	42.471	
110	44.5	9.84	1.62	85.864	42.171	
120	44.5	9.79	1.64	85.652	41.957	P3,C3 (120)
135	44.5	9.73	1.49	86.720	41.700	
150	44.5	9.69	1.57	86.057	41.529	
165	44.5	9.63	1.47	86.757	41.271	
180	44.5	9.59	1.46	86.787	41.100	
195	44.5	9.52	1.43	86.941	40.800	
210	44.5	9.46	1.52	86.157	40.543	P4,C4 (210)
225	44.5	9.40	1.42	86.876	40.286	
240	44.5	9.33	1.40	86.952	39.986	
255	44.5	9.27	1.39	86.961	39.729	
270	44.5	9.22	1.50	86.007	39.514	
285	44.5	9.14	1.49	85.983	39.171	
300	44.5	9.07	1.50	85.809	38.871	P5,C5 (300)
320	44.5	9.00	1.48	85.878	38.571	
340	44.5	8.93	1.40	86.447	38.271	
360	44.5	8.89	1.47	85.811	38.100	
380	44.5	8.82	1.48	85.631	37.800	P6,C6 (380)
400	44.5	8.76	1.41	86.136	37.543	
420	44.5	8.69	1.37	86.382	37.243	
440	44.5	8.63	1.50	85.192	36.986	
460	44.5	8.58	1.52	84.950	36.771	
480	44.5	8.51	1.55	84.592	36.471	
500	44.5	8.45	1.53	84.669	36.214	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.1 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	48.5	10.44	1.76	85.574	44.743	
10	48.5	10.36	1.70	85.904	44.400	
20	48.5	10.29	1.68	85.965	44.100	
30	48.5	10.22	1.72	85.595	43.800	P1,C1 (30)
40	48.5	10.15	1.70	85.654	43.500	
50	48.5	10.07	1.62	86.142	43.157	
60	48.5	10.00	1.73	85.251	42.857	P2,C2 (60)
70	48.5	9.92	1.59	86.186	42.514	
80	48.5	9.84	1.73	85.048	42.171	
90	48.5	9.77	1.59	86.004	41.871	
100	48.5	9.69	1.52	86.441	41.529	
110	48.5	9.62	1.65	85.359	41.229	
120	48.5	9.56	1.60	85.663	40.971	P3,C3 (120)
135	48.5	9.48	1.57	85.792	40.629	
150	48.5	9.40	1.58	85.610	40.286	
165	48.5	9.33	1.55	85.754	39.986	
180	48.5	9.25	1.50	86.047	39.643	
195	48.5	9.17	1.56	85.461	39.300	
210	48.5	9.10	1.55	85.446	39.000	P4,C4 (210)
225	48.5	9.02	1.56	85.255	38.657	
240	48.5	8.96	1.49	85.742	38.400	
255	48.5	8.90	1.48	85.742	38.143	
270	48.5	8.85	1.46	85.839	37.929	
285	48.5	8.79	1.55	85.010	37.671	
300	48.5	8.74	1.52	85.185	37.457	P5,C5 (300)
320	48.5	8.70	1.53	85.044	37.286	
340	48.5	8.63	1.52	85.025	36.986	
360	48.5	8.58	1.49	85.204	36.771	
380	48.5	8.52	1.52	84.861	36.514	P6,C6 (380)
400	48.5	8.48	1.49	85.055	36.343	
420	48.5	8.43	1.48	85.066	36.129	
440	48.5	8.37	1.50	84.802	35.871	
460	48.5	8.32	1.54	84.381	35.657	
480	48.5	8.28	1.51	84.576	35.486	
500	48.5	8.23	1.53	84.324	35.271	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.004 โมลต่อลิตรปรับด้วย
โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	42.5	10.51	1.85	85.032	45.043	
10	42.5	10.41	1.72	85.820	44.614	
20	42.5	10.30	1.63	86.337	44.143	
30	42.5	10.15	1.58	86.530	43.500	P1,C1 (30)
40	42.5	10.08	1.88	84.281	43.200	
50	42.5	9.96	1.60	86.159	42.686	
60	42.5	9.85	1.58	86.177	42.214	P2,C2 (60)
70	42.5	9.78	2.09	82.393	41.914	
80	42.5	9.72	1.55	86.247	41.657	
90	42.5	9.65	1.52	86.392	41.357	
100	42.5	9.57	1.56	85.984	41.014	
110	42.5	9.43	1.59	85.572	40.414	
120	42.5	9.39	1.52	86.068	40.243	P3,C3 (120)
135	42.5	9.35	1.65	85.000	40.071	
150	42.5	9.27	1.58	85.438	39.729	
165	42.5	9.18	1.65	84.765	39.343	
180	42.5	9.10	1.56	85.366	39.000	
195	42.5	9.03	1.61	84.868	38.700	
210	42.5	8.95	1.62	84.674	38.357	P4,C4 (210)
225	42.5	8.90	1.59	84.843	38.143	
240	42.5	8.81	1.56	84.957	37.757	
255	42.5	8.73	1.51	85.254	37.414	
270	42.5	8.69	1.50	85.280	37.243	
285	42.5	8.63	1.55	84.774	36.986	
300	42.5	8.57	1.52	84.936	36.729	P5,C5 (300)
320	42.5	8.50	1.43	85.599	36.429	
340	42.5	8.42	1.49	84.965	36.086	
360	42.5	8.36	1.50	84.787	35.829	
380	42.5	8.30	1.46	85.041	35.571	P6,C6 (380)
400	42.5	8.22	1.48	84.742	35.229	
420	42.5	8.18	1.44	85.031	35.057	
440	42.5	8.13	1.46	84.776	34.843	
460	42.5	8.09	1.42	85.068	34.671	
480	42.5	8.04	1.43	84.900	34.457	
500	42.5	8.02	1.46	84.599	34.371	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.12 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย
โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² h)	Note (Sampling)
0	48.5	10.49	1.79	85.423	44.957	
10	48.5	10.30	1.85	84.774	44.143	
20	48.5	10.14	1.80	84.925	43.457	
30	48.5	9.91	1.62	85.950	42.471	P1,C1 (30)
40	48.5	9.80	1.55	86.344	42.000	
50	48.5	9.67	1.58	85.956	41.443	
60	48.5	9.49	1.47	86.588	40.671	P2,C2 (60)
70	48.5	9.42	1.56	85.792	40.371	
80	48.5	9.34	1.54	85.846	40.029	
90	48.5	9.27	1.56	85.596	39.729	
100	48.5	9.22	1.63	84.977	39.514	
110	48.5	9.13	1.44	86.377	39.129	
120	48.5	9.06	1.49	85.877	38.829	P3,C3 (120)
135	48.5	8.98	1.56	85.199	38.486	
150	48.5	8.90	1.54	85.249	38.143	
165	48.5	8.83	1.51	85.397	37.843	
180	48.5	8.76	1.54	85.049	37.543	
195	48.5	8.71	1.53	85.059	37.329	
210	48.5	8.63	1.51	85.108	36.986	P4,C4 (210)
225	48.5	8.55	1.47	85.329	36.643	
240	48.5	8.49	1.49	85.070	36.386	
255	48.5	8.44	1.43	85.512	36.171	
270	48.5	8.38	1.45	85.249	35.914	
285	48.5	8.26	1.42	85.331	35.400	
300	48.5	8.22	1.39	85.536	35.229	P5,C5 (300)
320	48.5	8.18	1.30	86.287	35.057	
340	48.5	8.11	1.27	86.461	34.757	
360	48.5	8.03	1.32	85.882	34.414	
380	48.5	7.97	1.33	85.699	34.157	P6,C6 (380)
400	48.5	7.89	1.33	85.575	33.814	
420	48.5	7.82	1.29	85.840	33.514	
440	48.5	7.76	1.37	84.995	33.257	
460	48.5	7.69	1.20	86.502	32.957	
480	48.5	7.63	1.30	85.442	32.700	
500	48.5	7.58	1.26	85.747	32.486	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.13 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.1 ไมลต่อลิตรปรับด้วย
โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	50.5	10.45	1.77	85.516	44.786	
10	50.5	10.12	1.73	85.401	43.371	
20	50.5	9.85	1.76	84.841	42.214	
30	50.5	9.81	1.71	85.156	42.043	P1,C1 (30)
40	50.5	9.68	1.59	85.892	41.486	
50	50.5	9.61	1.59	85.804	41.186	
60	50.5	9.45	1.60	85.520	40.500	P2,C2 (60)
70	50.5	9.36	1.69	84.706	40.114	
80	50.5	9.27	1.44	86.555	39.729	
90	50.5	9.18	1.46	86.278	39.343	
100	50.5	9.05	1.45	86.190	38.786	
110	50.5	8.98	1.53	85.442	38.486	
120	50.5	8.91	1.51	85.509	38.186	P3,C3 (120)
135	50.5	8.84	1.53	85.246	37.886	
150	50.5	8.78	1.65	84.180	37.629	
165	50.5	8.68	1.53	85.015	37.200	
180	50.5	8.60	1.52	84.980	36.857	
195	50.5	8.53	1.47	85.300	36.557	
210	50.5	8.48	1.44	85.484	36.343	P4,C4 (210)
225	50.5	8.42	1.46	85.223	36.086	
240	50.5	8.35	1.41	85.553	35.786	
255	50.5	8.27	1.41	85.434	35.443	
270	50.5	8.17	1.43	85.104	35.014	
285	50.5	8.08	1.41	85.142	34.629	
300	50.5	7.97	1.38	85.241	34.157	P5,C5 (300)
320	50.5	7.89	1.44	84.566	33.814	
340	50.5	7.82	1.38	85.000	33.514	
360	50.5	7.75	1.40	84.699	33.214	
380	50.5	7.68	1.35	85.050	32.914	P6,C6 (380)
400	50.5	7.61	1.29	85.506	32.614	
420	50.5	7.54	1.29	85.391	32.314	
440	50.5	7.45	1.36	84.563	31.929	
460	50.5	7.36	1.31	84.890	31.543	
480	50.5	7.28	1.32	84.651	31.200	
500	50.5	7.21	1.29	84.824	30.900	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.14 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.004 โมลต่อลิตรปรับด้วย
แคลเซียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	44.5	10.48	1.70	86.043	44.914	
10	44.5	10.28	1.64	86.242	44.057	
20	44.5	10.04	1.59	86.328	43.029	
30	44.5	9.89	1.63	85.851	42.386	P1,C1 (30)
40	44.5	9.64	1.64	85.461	41.314	
50	44.5	9.54	1.63	85.407	40.886	
60	44.5	9.43	1.59	85.572	40.414	P2,C2 (60)
70	44.5	9.38	1.56	85.740	40.200	
80	44.5	9.30	1.57	85.557	39.857	
90	44.5	9.17	1.53	85.701	39.300	
100	44.5	9.04	1.56	85.283	38.743	
110	44.5	8.95	1.54	85.319	38.357	
120	44.5	8.87	1.54	85.207	38.014	P3,C3 (120)
135	44.5	8.78	1.51	85.326	37.629	
150	44.5	8.73	1.44	85.841	37.414	
165	44.5	8.63	1.33	86.647	36.986	
180	44.5	8.54	1.35	86.350	36.600	
195	44.5	8.49	1.34	86.368	36.386	
210	44.5	8.40	1.38	85.890	36.000	P4,C4 (210)
225	44.5	8.34	1.45	85.189	35.743	
240	44.5	8.27	1.46	84.995	35.443	
255	44.5	8.23	1.43	85.197	35.271	
270	44.5	8.17	1.45	84.927	35.014	
285	44.5	8.11	1.42	85.100	34.757	
300	44.5	8.05	1.36	85.547	34.500	P5,C5 (300)
320	44.5	7.98	1.39	85.165	34.200	
340	44.5	7.90	1.40	84.946	33.857	
360	44.5	7.83	1.36	85.201	33.557	
380	44.5	7.75	1.37	84.978	33.214	P6,C6 (380)
400	44.5	7.67	1.43	84.286	32.871	
420	44.5	7.59	1.33	85.090	32.529	
440	44.5	7.51	1.34	84.859	32.186	
460	44.5	7.41	1.29	85.172	31.757	
480	44.5	7.28	1.31	84.750	31.200	
500	44.5	7.18	1.26	85.071	30.771	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.15 ตารางแสดงผลลัพธ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย
แคลเซียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	47.5	10.47	1.81	85.261	44.871	
10	47.5	10.23	1.74	85.464	43.843	
20	47.5	9.90	1.73	85.125	42.429	
30	47.5	9.76	1.76	84.722	41.829	P1,C1 (30)
40	47.5	9.61	1.74	84.670	41.186	
50	47.5	9.51	1.68	84.987	40.757	
60	47.5	9.39	1.73	84.442	40.243	P2,C2 (60)
70	47.5	9.27	1.51	85.993	39.729	
80	47.5	9.17	1.58	85.302	39.300	
90	47.5	9.07	1.55	85.405	38.871	
100	47.5	8.97	1.56	85.185	38.443	
110	47.5	8.84	1.58	84.837	37.886	
120	47.5	8.76	1.50	85.380	37.543	P3,C3 (120)
135	47.5	8.69	1.46	85.616	37.243	
150	47.5	8.57	1.38	86.131	36.729	
165	47.5	8.49	1.46	85.327	36.386	
180	47.5	8.44	1.43	85.512	36.171	
195	47.5	8.39	1.45	85.264	35.957	
210	47.5	8.27	1.36	85.877	35.443	P4,C4 (210)
225	47.5	8.17	1.38	85.550	35.014	
240	47.5	8.09	1.42	85.068	34.671	
255	47.5	8.04	1.42	84.989	34.457	
270	47.5	7.98	1.36	85.439	34.200	
285	47.5	7.89	1.34	85.482	33.814	
300	47.5	7.79	1.39	84.858	33.386	P5,C5 (300)
320	47.5	7.70	1.36	84.989	33.000	
340	47.5	7.62	1.35	84.950	32.657	
360	47.5	7.54	1.31	85.198	32.314	
380	47.5	7.45	1.32	84.949	31.929	P6,C6 (380)
400	47.5	7.36	1.30	84.988	31.543	
420	47.5	7.26	1.33	84.517	31.114	
440	47.5	7.19	1.28	84.888	30.814	
460	47.5	7.11	1.25	85.048	30.471	
480	47.5	7.02	1.22	85.194	30.086	
500	47.5	6.95	1.24	84.860	29.786	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.16 ตารางแสดงผลลัพธ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย
แคลเซียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	49.5	10.48	1.75	85.691	44.914	
10	49.5	10.16	1.68	85.811	43.543	
20	49.5	9.75	1.67	85.377	41.786	
30	49.5	9.66	1.66	85.336	41.400	P1,C1 (30)
40	49.5	9.55	1.68	85.040	40.929	
50	49.5	9.46	1.68	84.919	40.543	
60	49.5	9.33	1.66	84.895	39.986	P2,C2 (60)
70	49.5	9.23	1.64	84.913	39.557	
80	49.5	9.15	1.65	84.722	39.214	
90	49.5	9.04	1.59	85.042	38.743	
100	49.5	8.91	1.63	84.535	38.186	
110	49.5	8.80	1.55	85.024	37.714	
120	49.5	8.67	1.51	85.167	37.157	P3,C3 (120)
135	49.5	8.59	1.53	84.881	36.814	
150	49.5	8.49	1.53	84.731	36.386	
165	49.5	8.38	1.52	84.646	35.914	
180	49.5	8.23	1.50	84.584	35.271	
195	49.5	8.14	1.48	84.615	34.886	
210	49.5	8.07	1.44	84.858	34.586	P4,C4 (210)
225	49.5	7.99	1.46	84.550	34.243	
240	49.5	7.90	1.43	84.673	33.857	
255	49.5	7.85	1.39	84.957	33.643	
270	49.5	7.76	1.38	84.902	33.257	
285	49.5	7.69	1.35	85.066	32.957	
300	49.5	7.57	1.40	84.392	32.443	P5,C5 (300)
320	49.5	7.49	1.39	84.347	32.100	
340	49.5	7.42	1.35	84.607	31.800	
360	49.5	7.34	1.27	85.250	31.457	
380	49.5	7.28	1.24	85.446	31.200	P6,C6 (380)
400	49.5	7.16	1.24	85.238	30.686	
420	49.5	7.07	1.26	84.874	30.300	
440	49.5	6.98	1.18	85.539	29.914	
460	49.5	6.90	1.13	85.928	29.571	
480	49.5	6.83	1.16	85.482	29.271	
500	49.5	6.79	1.12	85.841	29.100	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.17 ตารางแสดงผลลัพธ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.1 โมลต่อลิตรปรับด้วย
แคลเซียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	52	10.46	1.79	85.388	44.829	
10	52	10.07	1.76	85.123	43.157	
20	52	9.77	1.62	85.777	41.871	
30	52	9.61	1.65	85.346	41.186	P1,C1 (30)
40	52	9.50	1.68	84.973	40.714	
50	52	9.39	1.66	84.977	40.243	
60	52	9.27	1.58	85.438	39.729	P2,C2 (60)
70	52	9.15	1.64	84.801	39.214	
80	52	9.04	1.55	85.364	38.743	
90	52	8.90	1.51	85.495	38.143	
100	52	8.81	1.50	85.451	37.757	
110	52	8.70	1.52	85.127	37.286	
120	52	8.61	1.52	84.995	36.900	P3,C3 (120)
135	52	8.51	1.45	85.442	36.471	
150	52	8.41	1.44	85.381	36.043	
165	52	8.32	1.42	85.421	35.657	
180	52	8.21	1.38	85.610	35.186	
195	52	8.08	1.43	84.963	34.629	
210	52	7.97	1.36	85.423	34.157	P4,C4 (210)
225	52	7.87	1.31	85.730	33.729	
240	52	7.76	1.33	85.369	33.257	
255	52	7.64	1.30	85.459	32.743	
270	52	7.53	1.35	84.797	32.271	
285	52	7.45	1.35	84.659	31.929	
300	52	7.39	1.27	85.335	31.671	P5,C5 (300)
320	52	7.30	1.30	84.884	31.286	
340	52	7.23	1.28	84.959	30.986	
360	52	7.17	1.26	85.053	30.729	
380	52	7.11	1.23	85.252	30.471	P6,C6 (380)
400	52	7.03	1.21	85.316	30.129	
420	52	6.95	1.16	85.697	29.786	
440	52	6.88	1.14	85.786	29.486	
460	52	6.80	1.15	85.535	29.143	
480	52	6.68	1.02	86.753	28.629	
500	52	6.61	1.13	85.401	28.329	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.18 ตารางแสดงผลลัพธ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 4 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย
โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	43.5	10.48	1.87	84.858	44.914	
10	43.5	10.49	1.86	84.939	44.957	
20	43.5	10.46	1.73	85.808	44.829	
30	43.5	10.41	1.72	85.820	44.614	P1,C1 (30)
40	43.5	10.35	1.58	86.756	44.357	
50	43.5	10.29	1.79	85.182	44.100	
60	43.5	10.24	1.63	86.268	43.886	P2,C2 (60)
70	43.5	10.21	1.75	85.368	43.757	
80	43.5	10.17	1.61	86.333	43.586	
90	43.5	10.10	1.64	86.031	43.286	
100	43.5	10.03	1.77	85.000	42.986	
110	43.5	9.98	1.63	85.960	42.771	
120	43.5	9.92	1.61	86.036	42.514	P3,C3 (120)
135	43.5	9.85	1.65	85.652	42.214	
150	43.5	9.79	1.65	85.577	41.957	
165	43.5	9.72	1.59	85.942	41.657	
180	43.5	9.66	1.59	85.867	41.400	
195	43.5	9.61	1.57	85.957	41.186	
210	43.5	9.53	1.55	86.011	40.843	P4,C4 (210)
225	43.5	9.47	1.50	86.326	40.586	
240	43.5	9.45	1.52	86.144	40.500	
255	43.5	9.41	1.49	86.330	40.329	
270	43.5	9.34	1.51	86.083	40.029	
285	43.5	9.27	1.56	85.596	39.729	
300	43.5	9.22	1.57	85.449	39.514	P5,C5 (300)
320	43.5	9.17	1.54	85.621	39.300	
340	43.5	9.11	1.51	85.782	39.043	
360	43.5	9.03	1.48	85.918	38.700	
380	43.5	8.96	1.43	85.742	38.400	P6,C6 (380)
400	43.5	8.89	1.46	85.894	38.100	
420	43.5	8.83	1.42	86.146	37.843	
440	43.5	8.77	1.46	85.728	37.586	
460	43.5	8.70	1.43	85.884	37.286	
480	43.5	8.63	1.41	85.956	36.986	
500	43.5	8.58	1.39	86.058	36.771	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.19 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 10 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย
โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	48.5	10.49	1.76	85.633	44.957	
10	48.5	10.45	1.73	85.796	44.786	
20	48.5	10.16	1.71	85.594	43.543	
30	48.5	9.92	1.64	85.813	42.514	P1,C1 (30)
40	48.5	9.84	1.63	85.789	42.171	
50	48.5	9.70	1.65	85.463	41.571	
60	48.5	9.62	1.68	85.133	41.229	P2,C2 (60)
70	48.5	9.57	1.68	85.067	41.014	
80	48.5	9.51	1.66	85.139	40.757	
90	48.5	9.49	1.64	85.265	40.671	
100	48.5	9.39	1.54	85.910	40.243	
110	48.5	9.34	1.56	85.688	40.029	
120	48.5	9.28	1.55	85.688	39.771	P3,C3 (120)
135	48.5	9.21	1.56	85.515	39.471	
150	48.5	9.13	1.48	86.051	39.129	
165	48.5	9.06	1.54	85.472	38.829	
180	48.5	8.97	1.52	85.510	38.443	
195	48.5	8.90	1.44	86.074	38.143	
210	48.5	8.82	1.42	86.133	37.800	P4,C4 (210)
225	48.5	8.73	1.44	85.841	37.414	
240	48.5	8.66	1.54	84.902	37.114	
255	48.5	8.57	1.38	86.131	36.729	
270	48.5	8.49	1.34	86.368	36.386	
285	48.5	8.42	1.35	86.182	36.086	
300	48.5	8.34	1.41	85.538	35.743	P5,C5 (300)
320	48.5	8.24	1.46	84.948	35.314	
340	48.5	8.15	1.45	84.896	34.929	
360	48.5	8.07	1.40	85.216	34.586	
380	48.5	7.96	1.42	84.861	34.114	P6,C6 (380)
400	48.5	7.87	1.40	84.898	33.729	
420	48.5	7.76	1.36	85.088	33.257	
440	48.5	7.68	1.29	85.619	32.914	
460	48.5	7.62	1.28	85.618	32.657	
480	48.5	7.55	1.31	85.214	32.357	
500	48.5	7.47	1.33	84.886	32.014	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.20 ตารางแสดงผลลัพธ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 4 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย
โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	45.5	10.50	1.84	85.089	45.000	
10	45.5	10.44	1.78	85.434	44.743	
20	45.5	10.38	1.82	85.082	44.486	
30	45.5	10.31	1.74	85.560	44.186	P1,C1 (30)
40	45.5	10.23	1.72	85.607	43.843	
50	45.5	10.16	1.68	85.811	43.543	
60	45.5	10.09	1.70	85.581	43.243	P2,C2 (60)
70	45.5	10.03	1.76	85.072	42.986	
80	45.5	9.96	1.71	85.347	42.686	
90	45.5	9.88	1.68	85.467	42.343	
100	45.5	9.81	1.70	85.230	42.043	
110	45.5	9.73	1.71	85.052	41.700	
120	45.5	9.67	1.68	85.198	41.443	P3,C3 (120)
135	45.5	9.60	1.65	85.333	41.143	
150	45.5	9.53	1.65	85.242	40.843	
165	45.5	9.46	1.65	85.149	40.543	
180	45.5	9.40	1.61	85.377	40.286	
195	45.5	9.32	1.61	85.270	39.943	
210	45.5	9.27	1.54	85.754	39.729	P4,C4 (210)
225	45.5	9.21	1.55	85.595	39.471	
240	45.5	9.15	1.57	85.354	39.214	
255	45.5	9.11	1.58	85.220	39.043	
270	45.5	9.07	1.54	85.485	38.871	
285	45.5	9.01	1.43	86.303	38.614	
300	45.5	8.93	1.43	86.197	38.271	P5,C5 (300)
320	45.5	8.86	1.42	86.187	37.971	
340	45.5	8.78	1.54	85.078	37.629	
360	45.5	8.72	1.44	85.827	37.371	
380	45.5	8.66	1.38	86.255	37.114	P6,C6 (380)
400	45.5	8.61	1.41	85.928	36.900	
420	45.5	8.53	1.43	85.643	36.557	
440	45.5	8.47	1.41	85.729	36.300	
460	45.5	8.41	1.36	86.080	36.043	
480	45.5	8.36	1.39	85.744	35.829	
500	45.5	8.24	1.37	85.744	35.314	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.21 ตารางแสดงพลักร์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 10 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย
โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	49.5	10.48	1.86	84.927	44.914	
10	49.5	10.28	1.79	85.170	44.057	
20	49.5	10.12	1.70	85.618	43.371	
30	49.5	9.87	1.71	85.233	42.300	P1,C1 (30)
40	49.5	9.74	1.66	85.439	41.743	
50	49.5	9.65	1.58	85.931	41.357	
60	49.5	9.56	1.70	84.902	40.971	P2,C2 (60)
70	49.5	9.47	1.59	85.624	40.586	
80	49.5	9.39	1.66	84.977	40.243	
90	49.5	9.27	1.58	85.438	39.729	
100	49.5	9.19	1.56	85.488	39.386	
110	49.5	9.12	1.48	86.038	39.086	
120	49.5	9.04	1.50	85.769	38.743	P3,C3 (120)
135	49.5	8.95	1.56	85.157	38.357	
150	49.5	8.89	1.52	85.399	38.100	
165	49.5	8.80	1.54	85.106	37.714	
180	49.5	8.71	1.51	85.225	37.329	
195	49.5	8.63	1.46	85.530	36.986	
210	49.5	8.56	1.43	85.686	36.686	P4,C4 (210)
225	49.5	8.47	1.46	85.297	36.300	
240	49.5	8.41	1.42	85.554	36.043	
255	49.5	8.32	1.40	85.597	35.657	
270	49.5	8.25	1.38	85.670	35.357	
285	49.5	8.18	1.43	85.120	35.057	
300	49.5	8.11	1.37	85.549	34.757	P5,C5 (300)
320	49.5	8.03	1.45	84.705	34.414	
340	49.5	7.98	1.39	85.165	34.200	
360	49.5	7.92	1.40	84.979	33.943	
380	49.5	7.86	1.36	85.249	33.686	P6,C6 (380)
400	49.5	7.78	1.35	85.214	33.343	
420	49.5	7.66	1.36	84.922	32.829	
440	49.5	7.59	1.33	85.090	32.529	
460	49.5	7.52	1.25	85.747	32.229	
480	49.5	7.44	1.29	85.223	31.886	
500	49.5	7.38	1.27	85.318	31.629	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.22 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย
แคลเซียมคาร์บอเนต

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	49.5	10.46	1.62	86.589	44.829	
10	49.5	10.00	1.64	85.911	42.857	
20	49.5	9.68	1.72	84.912	41.486	
30	49.5	9.33	1.67	84.818	39.986	P1,C1 (30)
40	49.5	9.25	1.40	86.854	39.643	
50	49.5	9.17	1.68	84.516	39.300	
60	49.5	9.09	1.41	86.571	38.957	P2,C2 (60)
70	49.5	9.00	1.60	84.906	38.571	
80	49.5	8.98	1.59	84.957	38.486	
90	49.5	8.87	1.55	85.125	38.014	
100	49.5	8.79	1.53	85.174	37.671	
110	49.5	8.70	1.53	85.044	37.286	
120	49.5	8.53	1.49	85.130	36.557	P3,C3 (120)
135	49.5	8.48	1.47	85.226	36.343	
150	49.5	8.38	1.50	84.818	35.914	
165	49.5	8.24	1.48	84.774	35.314	
180	49.5	8.16	1.41	85.266	34.971	
195	49.5	8.06	1.38	85.381	34.543	
210	49.5	7.99	1.31	85.914	34.243	P4,C4 (210)
225	49.5	7.84	1.32	85.590	33.600	
240	49.5	7.73	1.23	86.272	33.129	
255	49.5	7.64	1.19	86.523	32.743	
270	49.5	7.54	1.15	86.766	32.314	
285	49.5	7.41	1.19	86.163	31.757	
300	49.5	7.31	1.11	86.817	31.329	P5,C5 (300)
320	49.5	7.13	1.13	86.320	30.557	
340	49.5	7.05	1.16	85.871	30.214	
360	49.5	6.85	1.08	86.381	29.357	
380	49.5	6.78	1.03	86.812	29.057	P6,C6 (380)
400	49.5	6.68	1.02	86.753	28.629	
420	49.5	6.59	0.95	87.401	28.243	
440	49.5	6.51	0.99	86.800	27.900	
460	49.5	6.44	0.91	87.619	27.600	
480	49.5	6.37	0.91	87.500	27.300	
500	49.5	6.28	0.95	86.860	26.914	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.23 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย
แคลเซียมคาร์บอเนต

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	51	10.36	1.79	85.267	44.400	
10	51	9.96	1.71	85.347	42.686	
20	51	9.63	1.66	85.297	41.271	
30	51	9.28	1.62	85.138	39.771	P1,C1 (30)
40	51	9.20	1.55	85.581	39.429	
50	51	9.04	1.50	85.769	38.743	
60	51	9.00	1.48	85.878	38.571	P2,C2 (60)
70	51	8.87	1.46	85.866	38.014	
80	51	8.81	1.47	85.700	37.757	
90	51	8.68	1.44	85.771	37.200	
100	51	8.58	1.49	85.204	36.771	
110	51	8.50	1.47	85.256	36.429	
120	51	8.34	1.49	84.842	35.743	P3,C3 (120)
135	51	8.30	1.39	85.655	35.571	
150	51	8.15	1.37	85.609	34.929	
165	51	8.09	1.35	85.699	34.671	
180	51	8.07	1.36	85.578	34.586	
195	51	7.96	1.35	85.499	34.114	
210	51	7.89	1.33	85.575	33.814	P4,C4 (210)
225	51	7.75	1.32	85.447	33.214	
240	51	7.68	1.31	85.428	32.914	
255	51	7.59	1.33	85.090	32.529	
270	51	7.51	1.28	85.438	32.186	
285	51	7.38	1.29	85.121	31.629	
300	51	7.25	1.26	85.194	31.071	P5,C5 (300)
320	51	7.10	1.20	85.542	30.429	
340	51	6.93	1.22	85.031	29.700	
360	51	6.79	1.21	84.875	29.100	
380	51	6.65	1.19	84.821	28.500	P6,C6 (380)
400	51	6.53	1.20	84.476	27.986	
420	51	6.43	1.22	84.052	27.557	
440	51	6.37	1.15	84.707	27.300	
460	51	6.30	1.07	85.482	27.000	
480	51	6.17	1.02	85.814	26.443	
500	51	6.05	0.99	85.938	25.929	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.24 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย
แคลเซียมซัลเฟต

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	50.5	10.50	1.70	86.066	45.000	
10	50.5	10.01	1.61	86.145	42.900	
20	50.5	9.74	1.68	85.289	41.743	
30	50.5	9.63	1.61	85.676	41.271	P1,C1 (30)
40	50.5	9.54	1.54	86.101	40.886	
50	50.5	9.44	1.57	85.740	40.457	
60	50.5	9.21	1.56	85.515	39.471	P2,C2 (60)
70	50.5	8.96	1.56	85.171	38.400	
80	50.5	8.85	1.50	85.507	37.929	
90	50.5	8.74	1.46	85.686	37.457	
100	50.5	8.67	1.55	84.834	37.157	
110	50.5	8.58	1.13	88.363	36.771	
120	50.5	8.43	1.61	83.964	36.129	P3,C3 (120)
135	50.5	8.41	1.38	85.904	36.043	
150	50.5	8.21	1.35	85.879	35.186	
165	50.5	8.00	1.24	86.580	34.286	
180	50.5	7.85	1.20	86.740	33.643	
195	50.5	7.76	1.25	86.127	33.257	
210	50.5	7.66	1.24	86.067	32.829	P4,C4 (210)
225	50.5	7.57	1.26	85.730	32.443	
240	50.5	7.47	1.16	86.559	32.014	
255	50.5	7.39	1.18	86.231	31.671	
270	50.5	7.15	1.21	85.526	30.643	
285	50.5	7.09	1.23	85.216	30.386	
300	50.5	6.94	1.17	85.573	29.743	P5,C5 (300)
320	50.5	6.86	1.16	85.536	29.400	
340	50.5	6.76	1.06	86.445	28.971	
360	50.5	6.65	1.18	84.930	28.500	
380	50.5	6.57	1.08	85.882	28.157	P6,C6 (380)
400	50.5	6.47	1.01	86.497	27.729	
420	50.5	6.41	0.99	86.622	27.471	
440	50.5	6.29	0.95	86.878	26.957	
460	50.5	6.17	0.94	86.779	26.443	
480	50.5	6.10	0.96	86.402	26.143	
500	50.5	5.99	0.94	86.436	25.671	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.25 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย
แคลเซียมซัลเฟต

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	52.5	10.41	1.72	85.820	44.614	
10	52.5	9.94	1.62	85.986	42.600	
20	52.5	9.68	1.52	86.429	41.486	
30	52.5	9.53	1.52	86.244	40.843	P1,C1 (30)
40	52.5	9.45	1.46	86.618	40.500	
50	52.5	9.30	1.41	86.835	39.857	
60	52.5	9.14	1.36	87.048	39.171	P2,C2 (60)
70	52.5	8.89	1.42	86.227	38.100	
80	52.5	8.77	1.39	86.319	37.586	
90	52.5	8.70	1.40	86.139	37.286	
100	52.5	8.59	1.37	86.245	36.814	
110	52.5	8.49	1.42	85.671	36.386	
120	52.5	8.37	1.41	85.583	35.871	P3,C3 (120)
135	52.5	8.25	1.43	85.227	35.357	
150	52.5	8.08	1.39	85.322	34.629	
165	52.5	7.85	1.39	84.957	33.643	
180	52.5	7.73	1.40	84.666	33.129	
195	52.5	7.64	1.34	85.078	32.743	
210	52.5	7.56	1.35	84.848	32.400	P4,C4 (210)
225	52.5	7.47	1.32	84.983	32.014	
240	52.5	7.37	1.29	85.104	31.586	
255	52.5	7.20	1.25	85.207	30.857	
270	52.5	7.04	1.21	85.333	30.171	
285	52.5	6.94	1.19	85.363	29.743	
300	52.5	6.88	1.16	85.572	29.486	P5,C5 (300)
320	52.5	6.80	1.13	85.750	29.143	
340	52.5	6.66	1.12	85.604	28.543	
360	52.5	6.56	1.08	85.864	28.114	
380	52.5	6.46	1.06	85.904	27.686	P6,C6 (380)
400	52.5	6.38	0.96	86.921	27.343	
420	52.5	6.23	0.98	86.408	26.700	
440	52.5	6.14	1.01	85.874	26.314	
460	52.5	6.05	0.98	86.060	25.929	
480	52.5	5.92	0.99	85.673	25.371	
500	52.5	5.84	0.97	85.756	25.029	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.26 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย
แคลเซียมฟอสเฟต

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	55.5	10.42	1.65	86.330	44.657	
10	55.5	10.35	1.61	86.538	44.357	
20	55.5	10.22	1.56	86.757	43.800	
30	55.5	10.19	1.72	85.558	43.671	P1,C1 (30)
40	55.5	9.96	1.86	84.264	42.686	
50	55.5	9.79	1.67	85.428	41.957	
60	55.5	9.40	1.51	86.159	40.286	P2,C2 (60)
70	55.5	9.31	1.47	86.364	39.900	
80	55.5	8.88	1.71	83.853	38.057	
90	55.5	8.67	1.57	84.668	37.157	
100	55.5	8.44	1.47	85.166	36.171	
110	55.5	8.15	1.49	84.544	34.929	
120	55.5	7.99	1.52	84.017	34.243	P3,C3 (120)
135	55.5	7.71	1.45	84.170	33.043	
150	55.5	7.50	1.40	84.270	32.143	
165	55.5	7.30	1.44	83.524	31.286	
180	55.5	7.09	1.44	83.118	30.386	
195	55.5	6.77	1.28	84.099	29.014	
210	55.5	6.65	1.27	83.965	28.500	P4,C4 (210)
225	55.5	6.52	1.22	84.238	27.943	
240	55.5	6.44	1.20	84.293	27.600	
255	55.5	6.35	1.16	84.554	27.214	
270	55.5	6.05	1.08	84.853	25.929	
285	55.5	5.88	1.07	84.604	25.200	
300	55.5	5.68	1.08	84.024	24.343	P5,C5 (300)
320	55.5	5.51	0.96	85.162	23.614	
340	55.5	5.27	0.88	85.691	22.586	
360	55.5	5.06	0.83	85.908	21.686	
380	55.5	4.90	0.73	87.034	21.000	P6,C6 (380)
400	55.5	4.79	0.80	85.689	20.529	
420	55.5	4.65	0.76	85.952	19.929	
440	55.5	4.50	0.75	85.714	19.286	
460	55.5	4.34	0.60	87.854	18.600	
480	55.5	4.30	0.59	87.935	18.429	
500	55.5	4.16	0.58	87.764	17.829	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.27 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย
แคลเซียมฟอสเฟต

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	58	10.35	1.78	85.326	44.357	
10	58	10.05	1.64	85.971	43.071	
20	58	9.80	1.55	86.344	42.000	
30	58	9.42	1.56	85.792	40.371	P1,C1 (30)
40	58	9.24	1.56	85.556	39.600	
50	58	9.00	1.50	85.714	38.571	
60	58	8.73	1.52	85.171	37.414	P2,C2 (60)
70	58	8.53	1.50	85.045	36.557	
80	58	8.34	1.45	85.189	35.743	
90	58	8.15	1.45	84.896	34.929	
100	58	7.96	1.49	84.233	34.114	
110	58	7.73	1.45	84.205	33.129	
120	58	7.54	1.43	84.058	32.314	P3,C3 (120)
135	58	7.24	1.28	84.977	31.029	
150	58	6.93	1.21	85.135	29.700	
165	58	6.73	1.21	84.761	28.843	
180	58	6.53	1.11	85.471	27.986	
195	58	6.31	0.98	86.557	27.043	
210	58	6.10	0.96	86.402	26.143	P4,C4 (210)
225	58	5.81	0.98	85.567	24.900	
240	58	5.64	0.96	85.455	24.171	
255	58	5.45	0.94	85.290	23.357	
270	58	5.30	0.91	85.346	22.714	
285	58	5.10	0.89	85.142	21.857	
300	58	4.96	0.83	85.665	21.257	P5,C5 (300)
320	58	4.73	0.82	85.225	20.271	
340	58	4.55	0.78	85.366	19.500	
360	58	4.20	0.77	84.507	18.000	
380	58	4.05	0.70	85.263	17.357	P6,C6 (380)
400	58	3.76	0.69	84.494	16.114	
420	58	3.46	0.65	84.185	14.829	
440	58	3.20	0.54	85.561	13.714	
460	58	3.12	0.55	85.014	13.371	
480	58	2.99	0.52	85.185	12.814	
500	58	2.94	0.53	84.726	12.600	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.28 ตารางแสดงผลลัพธ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย
แมกนีเซียมซัลเฟต

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	47.5	10.42	47.27	86.045	44.657	
10	47.5	10.35	47.26	85.892	44.357	
20	47.5	10.22	47.33	86.245	43.800	
30	47.5	10.19	47.40	86.723	43.671	P1,C1 (30)
40	47.5	9.96	47.42	86.609	42.686	
50	47.5	9.79	47.40	86.256	41.957	
60	47.5	9.70	47.39	86.069	41.571	P2,C2 (60)
70	47.5	9.61	47.42	86.188	41.186	
80	47.5	9.48	47.52	86.813	40.629	
90	47.5	9.37	47.44	86.042	40.157	
100	47.5	9.24	47.46	86.034	39.600	
110	47.5	9.15	47.51	86.321	39.214	
120	47.5	8.98	47.44	85.524	38.486	P3,C3 (120)
135	47.5	8.81	47.49	85.700	37.757	
150	47.5	8.70	47.53	85.884	37.286	
165	47.5	8.60	47.61	86.432	36.857	
180	47.5	8.50	47.54	85.685	36.429	
195	47.5	8.37	47.57	85.758	35.871	
210	47.5	8.25	47.57	85.581	35.357	P4,C4 (210)
225	47.5	8.12	47.67	86.291	34.800	
240	47.5	8.04	47.70	86.452	34.457	
255	47.5	7.85	47.89	86.075	33.643	
270	47.5	7.65	47.72	86.052	32.786	
285	47.5	7.48	47.62	84.807	32.057	
300	47.5	7.36	47.56	84.018	31.543	P5,C5 (300)
320	47.5	7.21	47.60	84.131	30.900	
340	47.5	7.07	47.67	84.569	30.300	
360	47.5	6.95	47.73	84.963	29.786	
380	47.5	6.80	47.84	85.859	29.143	P6,C6 (380)
400	47.5	6.69	47.93	86.658	28.671	
420	47.5	6.53	48.06	87.887	27.986	
440	47.5	6.50	48.00	87.131	27.857	
460	47.5	6.34	47.97	86.494	27.171	
480	47.5	6.30	47.93	85.948	27.000	
500	47.5	6.16	47.99	86.396	26.400	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.28 ตารางแสดงผลลัพธ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ
10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย
แมกนีเซียมซัลเฟต

Time (min)	Pressure	Permeate Flow (mL/min)	Concentrate Flow (mL/min)	% Recovery	Flux (L/m ² /h)	Note (Sampling)
0	49.5	10.45	1.69	86.079	44.786	
10	49.5	10.29	1.69	85.893	44.100	
20	49.5	10.17	1.56	86.701	43.586	
30	49.5	10.06	1.56	86.575	43.114	P1,C1 (30)
40	49.5	10.01	1.81	84.687	42.900	
50	49.5	9.76	1.62	85.764	41.829	
60	49.5	9.69	1.51	86.518	41.529	P2,C2 (60)
70	49.5	9.53	1.55	86.011	40.843	
80	49.5	9.43	1.45	86.673	40.414	
90	49.5	9.31	1.51	86.044	39.900	
100	49.5	9.18	1.48	86.116	39.343	
110	49.5	9.03	1.50	85.755	38.700	
120	49.5	8.96	1.53	85.415	38.400	P3,C3 (120)
135	49.5	8.78	1.63	84.342	37.629	
150	49.5	8.64	1.59	84.457	37.029	
165	49.5	8.56	1.54	84.752	36.686	
180	49.5	8.47	1.56	84.447	36.300	
195	49.5	8.32	1.52	84.553	35.657	
210	49.5	8.18	1.53	84.243	35.057	P4,C4 (210)
225	49.5	8.05	1.53	84.029	34.500	
240	49.5	7.99	1.42	84.910	34.243	
255	49.5	7.78	1.54	83.476	33.343	
270	49.5	7.64	1.43	84.234	32.743	
285	49.5	7.44	1.36	84.545	31.886	
300	49.5	7.26	1.33	84.517	31.114	P5,C5 (300)
320	49.5	7.15	1.28	84.816	30.643	
340	49.5	7.03	1.15	85.941	30.129	
360	49.5	6.89	0.95	87.883	29.529	
380	49.5	6.69	1.00	86.996	28.671	P6,C6 (380)
400	49.5	6.56	1.01	86.658	28.114	
420	49.5	6.46	0.91	87.653	27.686	
440	49.5	6.37	0.93	87.260	27.300	
460	49.5	6.27	0.94	86.963	26.871	
480	49.5	6.16	1.07	85.201	26.400	
500	49.5	6.08	1.02	85.634	26.057	P7,C7 (500)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	1113.125	0.011	0.994	1475.450	0.317	13.307
60	1109.881	0.022	1.064	1494.411	0.461	17.420
120	1117.266	0.019	1.066	1522.627	0.520	19.253
210	1125.296	0.016	1.089	1527.833	0.538	20.572
300	1120.138	0.018	1.117	1532.852	0.545	21.024
380	1128.154	0.018	1.123	1537.936	0.581	22.103
500	1126.150	0.015	1.125	1542.891	0.596	22.417
Feed	1170.580	0.1358	4.389			

ตารางที่ ข.2 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	1064.707	0.0317	1.704	1413.806	0.753	23.230
60	1114.846	0.0389	1.871	1473.312	0.856	30.772
120	1115.957	0.0407	1.903	1491.075	1.261	39.211
210	1116.683	0.0403	1.923	1495.022	1.364	40.951
300	1120.608	0.0407	1.934	1498.969	1.505	44.806
380	1121.728	0.0411	2.038	1500.943	1.549	45.913
500	1120.335	0.0412	2.113	1506.742	1.719	49.991
Feed	1170.687	0.2890	8.957			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	1000.911	0.061	2.312	1109.000	1.091	34.406
60	1099.098	0.072	2.779	1310.505	1.746	50.038
120	1102.000	0.085	3.283	1429.185	2.210	62.898
210	1105.110	0.087	3.327	1464.387	2.656	74.638
300	1099.900	0.092	3.545	1488.684	2.778	81.346
380	1109.000	0.093	3.549	1497.859	2.936	78.986
500	1097.000	0.093	3.572	1515.894	3.024	80.157
Feed	1139.901	0.496	14.334			

ตารางที่ ข.4 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	1014.685	0.056	2.211	1326.190	1.896	54.840
60	1086.221	0.068	2.845	1500.321	2.759	83.268
120	1090.244	0.087	2.910	1537.677	3.669	109.373
210	1091.250	0.093	2.975	1536.801	3.979	116.934
300	1098.290	0.098	2.980	1538.813	4.134	122.480
380	1099.197	0.101	3.115	1549.876	4.225	123.050
500	1099.197	0.105	3.227	1582.040	4.787	126.948
Feed	1147.572	0.835	24.858			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการกำจัดของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ปรับพีเอชเป็น 7
ความแรงประจุ 0.004 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	396.486	-	-	597.299	-	-
60	440.477	-	-	694.025	-	-
120	441.783	-	-	712.917	-	-
210	451.689	-	-	716.894	-	-
300	455.392	-	-	718.513	-	-
380	454.529	-	-	721.491	-	-
500	456.641	-	-	723.476	-	-
Feed	483.563	-	-			

ตารางที่ ข.6 ผลการกำจัดของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ปรับพีเอชเป็น 7
ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	1141.358	-	-	1414.701	-	-
60	1165.000	-	-	1459.000	-	-
120	1171.236	-	-	1485.165	-	-
210	1177.000	-	-	1490.000	-	-
300	1180.253	-	-	1494.854	-	-
380	1182.257	-	-	1505.875	-	-
500	1184.261	-	-	1514.892	-	-
Feed	1211.438	-	-			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ผลการกำจัดของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ปรับพีเอชเป็น 7
ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	5199.853	-	-	5928.682	-	-
60	5219.930	-	-	6096.723	-	-
120	5270.121	-	-	6156.495	-	-
210	5320.313	-	-	6194.524	-	-
300	5390.581	-	-	6192.712	-	-
380	5410.328	-	-	6226.228	-	-
500	5450.000	-	-	6246.152	-	-
Feed	5529.072	-	-			

ตารางที่ ข.8 ผลการกำจัดของสารละลายที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ปรับพีเอชเป็น 7
ความแรงประจุ 0.1 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	10279.246	-	-	11190.462	-	-
60	10330.000	-	-	11524.005	-	-
120	10369.796	-	-	11585.187	-	-
210	10380.000	-	-	11604.923	-	-
300	10449.949	-	-	11634.528	-	-
380	10560.159	-	-	11654.264	-	-
500	10590.217	-	-	11664.132	-	-
Feed	10595.760	-	-			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.004 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	370.363	0.021	1.372	510.776	0.612	20.765
60	417.990	0.029	1.625	572.558	0.909	29.447
120	417.990	0.030	1.639	580.541	1.146	36.665
210	422.028	0.031	1.738	585.709	1.261	38.793
300	423.232	0.032	1.780	590.767	1.301	40.631
380	425.878	0.035	1.792	594.676	1.303	40.826
500	426.067	0.035	1.848	625.975	1.526	46.544
Feed	458.629	0.266	7.666			

ตารางที่ ข.10 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	4906.836	0.034	1.478	5583.293	0.587	19.277
60	5209.782	0.038	1.681	5685.982	0.914	29.125
120	5250.090	0.040	1.748	6168.882	1.241	39.103
210	5280.401	0.041	1.800	6197.323	1.468	44.716
300	5290.397	0.041	1.815	6237.631	1.539	47.675
380	5320.628	0.042	1.854	6257.784	1.652	50.197
500	5340.980	0.043	1.877	6350.617	1.711	52.302
Feed	5371.440	0.265	7.900			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.1 ไมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	9268.468	0.049	2.208	10217.526	0.624	21.093
60	10196.794	0.069	2.775	11432.776	0.886	26.823
120	10257.912	0.071	2.874	11430.930	1.116	34.059
210	10269.018	0.072	2.881	11528.064	1.236	37.237
300	10297.953	0.078	2.961	11469.476	1.255	37.191
380	10298.297	0.078	3.043	11479.573	1.290	39.154
500	10303.345	0.081	3.087	11467.566	1.292	39.199
Feed	10305.248	0.261	8.029			

ตารางที่ ข.12 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.004 ไมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	294.809	0.043	1.633	374.844	0.588	18.286
60	322.610	0.055	1.965	415.076	0.945	25.806
120	323.960	0.059	2.122	450.126	1.445	41.819
210	328.475	0.059	2.246	457.881	1.582	44.999
300	331.048	0.066	2.463	466.977	1.889	54.316
380	332.650	0.067	2.274	476.272	2.057	59.622
500	336.925	0.075	2.528	494.113	2.512	70.686
Feed	342.148	0.297	7.533			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	804.114	0.025	1.142	1089.107	0.790	23.309
60	837.422	0.030	1.240	1090.926	1.198	34.104
120	843.622	0.030	1.296	1103.926	1.515	43.540
210	844.591	0.032	1.316	1129.592	1.802	53.430
300	854.171	0.035	1.362	1122.987	2.004	59.753
380	861.617	0.035	1.372	1128.831	2.020	58.384
500	865.180	0.036	1.529	1148.310	2.355	69.768
Feed	885.763	0.273	7.070			

ตารางที่ ข.14 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	2965.286	0.031	1.235	4775.583	0.708	18.815
60	3288.835	0.042	1.353	5330.883	0.957	26.251
120	3345.547	0.042	1.361	5402.507	1.156	32.222
210	3336.369	0.046	1.422	5412.662	1.352	37.806
300	3375.777	0.054	1.424	5492.425	1.476	41.606
380	3395.931	0.055	1.464	5526.041	1.480	41.680
500	3459.627	0.055	1.472	5577.114	1.516	42.586
Feed	3732.624	0.273	7.716			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.1 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	5341.178	0.060	1.635	8362.110	0.687	17.421
60	6201.027	0.060	1.828	9585.106	0.913	25.684
120	6235.224	0.061	1.834	9952.999	1.214	34.711
210	6379.608	0.063	1.882	10101.433	1.315	37.860
300	6402.218	0.064	1.893	10131.974	1.552	43.779
380	6322.069	0.067	1.922	10202.097	1.695	46.544
500	6303.898	0.068	1.977	10440.278	1.783	50.290
Feed	6844.530	0.326	8.148			

ตารางที่ ข.16 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 4 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	968.511	0.030	1.419	1174.815	0.585	17.668
60	1062.713	0.041	1.570	1253.851	0.920	27.158
120	1071.589	0.042	1.657	1257.004	1.215	35.529
210	1073.555	0.044	1.665	1258.966	1.357	38.409
300	1075.469	0.044	1.706	1263.873	1.356	38.658
380	1076.451	0.044	1.743	1266.816	1.366	39.739
500	1083.319	0.047	1.807	1274.667	1.442	42.299
Feed	1098.302	0.251	7.791			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.17 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 10 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	852.356	0.028	1.049	1395.327	0.609	18.171
60	973.417	0.031	1.344	1552.221	0.903	26.558
120	992.940	0.032	1.397	1582.848	1.157	34.325
210	1002.855	0.033	1.403	1582.806	1.397	39.753
300	1014.461	0.033	1.454	1584.747	1.499	42.820
380	1017.815	0.033	1.460	1595.541	1.539	43.704
500	1022.386	0.038	1.526	1614.265	1.691	47.130
Feed	1077.609	0.269	7.551			

ตารางที่ ข.18 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 4 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	4906.836	0.031	1.275	5583.293	0.568	17.153
60	5209.782	0.037	1.404	5685.982	0.924	26.360
120	5250.090	0.038	1.475	6168.882	1.256	37.110
210	5280.401	0.042	1.507	6197.323	1.355	40.006
300	5290.397	0.043	1.559	6237.631	1.414	41.507
380	5320.628	0.043	1.616	6257.784	1.477	43.316
500	5340.980	0.045	1.736	6350.617	1.639	46.947
Feed	5371.440	0.253	7.607			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.19 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 10 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย โซเดียมคลอไรด์

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	4478.394	0.028	1.306	6227.554	0.723	19.677
60	5109.012	0.034	1.489	6338.400	1.041	30.543
120	5240.022	0.035	1.516	6959.717	1.494	41.800
210	5219.894	0.035	1.531	6910.000	1.929	55.799
300	5229.968	0.037	1.554	6959.859	2.142	61.988
380	5270.305	0.041	1.659	7110.000	2.208	63.857
500	5280.401	0.041	1.727	7205.018	2.385	69.888
Feed	5280.619	0.280	7.992			

ตารางที่ ข.20 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	137.153	0.040	1.589	272.039	1.091	31.280
60	137.874	0.044	1.611	286.642	1.381	40.355
120	139.434	0.047	1.731	296.131	1.583	46.334
210	140.731	0.047	1.741	306.585	1.699	48.899
300	143.726	0.050	1.756	329.000	1.958	57.569
380	148.433	0.054	1.880	345.000	2.444	71.251
500	149.200	0.054	1.939	354.298	2.446	71.375
Feed	158.490	0.250	8.830			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.21 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	212.190	0.040	1.112	345.341	0.952	24.470
60	228.564	0.044	1.350	388.259	1.521	38.864
120	234.552	0.047	1.719	434.660	2.331	66.308
210	238.455	0.047	2.013	485.782	3.113	90.403
300	238.545	0.050	2.235	513.021	4.050	116.481
380	239.628	0.054	2.276	523.003	4.260	126.254
500	241.080	0.054	2.356	544.960	4.825	141.587
Feed	242.555	0.610	8.273			

ตารางที่ ข.22 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมซัลเฟต

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	336.075	0.064	2.140	1044.028	0.753	19.257
60	373.151	0.074	2.247	1270.723	1.061	29.712
120	394.739	0.081	2.588	1420.863	1.380	39.913
210	402.923	0.083	2.625	1466.007	1.523	45.428
300	406.893	0.085	2.666	1619.451	1.677	50.881
380	411.076	0.086	2.705	1670.862	1.740	52.750
500	433.859	0.087	2.953	1788.925	1.794	54.700
Feed	531.243	0.279	8.511			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.23 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 ไมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมซัลเฟต

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	336.075	0.073	1.907	1044.028	1.222	22.718
60	373.151	0.082	2.452	1270.723	1.503	34.541
120	394.739	0.094	2.862	1420.863	1.531	42.467
210	402.923	0.095	2.980	1466.007	1.634	43.240
300	406.893	0.099	3.145	1619.451	1.828	51.442
380	411.076	0.110	3.567	1670.862	1.980	56.566
500	433.859	0.124	4.012	1788.925	2.204	63.316
Feed	531.245	0.340	8.189			

ตารางที่ ข.24 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 ไมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมฟอสเฟต

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	86.475	0.061	1.526	142.143	0.857	19.438
60	98.000	0.075	1.962	181.812	1.321	34.243
120	97.398	0.078	2.002	276.417	1.962	53.168
210	102.925	0.087	2.353	366.899	2.674	74.582
300	105.399	0.091	2.452	387.779	3.203	91.356
380	106.000	0.093	2.563	396.000	3.342	95.236
500	108.352	0.095	2.646	402.620	3.470	100.577
Feed	123.653	0.327	8.432			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.25 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย แคลเซียมฟอสเฟต

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	86.200	0.0525	1.687	217.000	0.797419	20.140
60	100.993	0.07015	2.145	285.908	1.309518	40.583
120	105.198	0.07115	2.979	346.339	1.892037	55.669
210	109.890	0.07405	3.134	375.848	2.641106	88.434
300	112.785	0.08495	3.827	386.785	3.190026	120.660
380	119.317	0.09565	4.584	412.425	3.181033	135.560
500	127.513	0.10075	5.145	442.620	3.475556	141.500
Feed	156.134	0.5936	8.695			

ตารางที่ ข.26 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วย แมกนีเซียมซัลเฟต

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	293.440	0.050	1.408	934.725	0.729	17.792
60	367.196	0.062	1.807	1379.203	1.160	31.435
120	401.171	0.067	1.977	1707.443	1.531	44.705
210	404.593	0.068	2.039	1782.773	1.796	50.216
300	404.818	0.071	2.069	1876.919	1.954	54.340
380	409.742	0.073	2.122	1893.314	2.046	58.688
500	412.906	0.074	2.172	1919.352	2.210	61.656
Feed	534.653	0.307	9.206			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.27 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 7 ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วย แมกนีเซียมซัลเฟต

Time (min)	Permeate			Concentrate		
	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)	Conductivity (μ S/cm)	UV (1/cm)	TOC (mg/L)
30	741.170	0.077	1.887	3104.074	0.741	18.888
60	981.380	0.084	2.544	4592.466	1.143	33.544
120	1079.816	0.088	2.744	5597.941	1.265	48.993
210	1128.537	0.093	2.908	6124.923	1.877	58.798
300	1195.849	0.098	2.928	6282.030	2.191	63.785
380	1199.710	0.101	2.936	6540.060	2.341	66.558
500	1237.276	0.103	3.006	6688.923	2.449	68.960
Feed	1892.932	0.304	9.063			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
ตารางแสดงค่าความต้านทานการดูดซับแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ตารางแสดงค่าความต้านทานแบบอนุกรมของการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ระดับ 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความต้านทานที่เกิดขึ้น	5 mg/L	10 mg/L	20 mg/L	30 mg/L
r_c	4.02E+12	7.91E+12	1.3E+13	1.95E+13
r_g	4.67E+11	7.47E+11	2.34E+12	1.58E+12
r_a	1.2E+12	9.31E+11	1.98E+12	2.6E+12

ตารางที่ ค.2 ตารางแสดงค่าความต้านทานแบบอนุกรมของการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 7 โดยปรับความแรงประจุด้วยโซเดียมคลอไรด์ระดับต่าง ๆ

ความต้านทานที่เกิดขึ้น	0.004 M	0.01 M	0.05 M	0.1 M
r_c	5.0647E+12	7.89703E+12	1.01251E+13	1.47635E+13
r_g	1.3379E+11	7.46819E+11	1.17744E+12	1.75046E+12
r_a	2.4489E+11	9.31209E+11	1.46152E+12	2.44787E+12

ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงค่าความต้านทานแบบอนุกรมของการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 7 โดยปรับความแรงประจุด้วยแคลเซียมคลอไรด์ระดับต่าง ๆ

ความต้านทานที่เกิดขึ้น	0.004 M	0.01 M	0.05 M	0.1 M
r_c	6.077E+12	9.9169E+12	1.39206E+13	1.64505E+13
r_g	3.5204E+11	1.50587E+12	1.82023E+12	2.57491E+12
r_a	2.8043E+12	3.67367E+12	3.51976E+12	3.40429E+12



ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณค่าต่าง ๆ

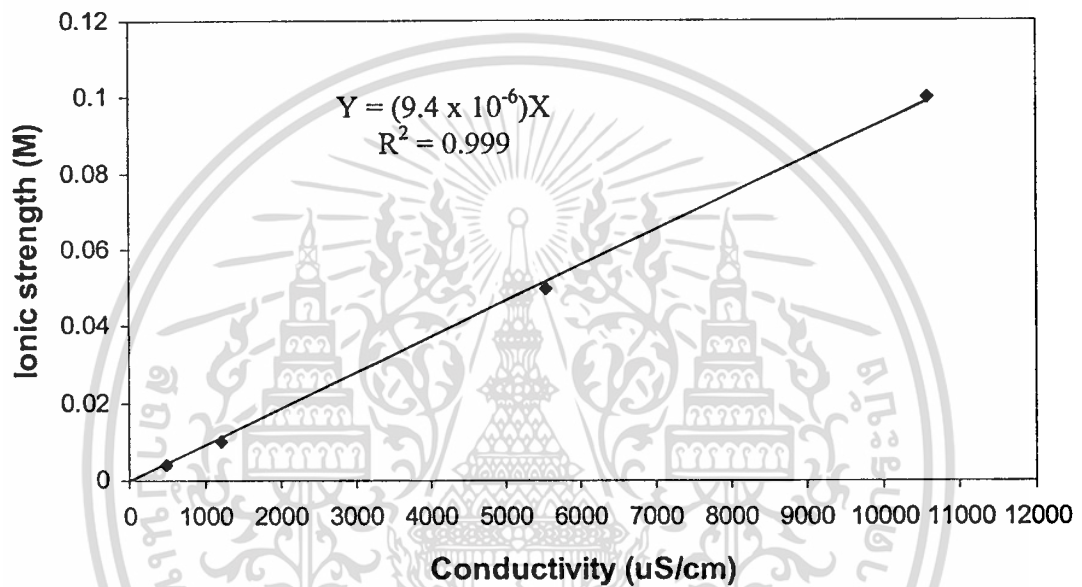
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.1 ตัวอย่างการคำนวณความแรงของประจุ

1. NaCl

$$1.1 \text{ I.S.} = 0.01 \text{ M}$$

ความเข้มข้นของ NaCl ในตัวอย่างน้ำที่มีค่าการนำไฟฟ้า $90.96 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ คำนวณให้เป็นโมลต่อลิตร โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานในรูป ง.1

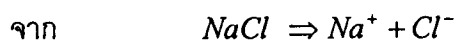


รูปที่ ง.1 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบระหว่างค่าความแรงประจุกับค่าการนำไฟฟ้า

สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$I.S. = (9.4 \times 10^{-6}) \times 90.96$$

$$= 8.55 \times 10^{-4} \text{ M}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการการคำนวณค่าความแรงประจุ

$$I.S. = \frac{1}{2} \sum Z_i^2 [i]$$

ความเข้มข้นของ NaCl ในตัวอย่างที่เตรียมเท่ากับ 0.0008 M ซึ่งคำนวณได้จาก NaCl standard ดังนั้นการคำนวณความแรงประจุแสดงได้ดังนี้

$$I.S. = \frac{1}{2} \{ (1)^2 [Na^+] + (1)^2 [Cl^-] + 0.0008 + 0.0008 \}$$

$$0.01M = \frac{1}{2} \{ x + x + 0.0008 + 0.0008 \}$$

$$x = 0.01 - 0.0008$$

$$x = 9.14 \times 10^{-3} M$$

น้ำหนักของ NaCl ที่เติมเพิ่มคำนวณได้ดังนี้

$$X = 9.14 \times 10^{-3} \text{ mol/L} \times 58.5 \text{ g/mol}$$

$$X = 0.5349 \text{ g/L}$$

$$1.2 \text{ I.S.} = 0.05 \text{ M}$$

ความเข้มข้นของ NaCl ในตัวอย่างที่เตรียมเท่ากับ 0.0008 M ซึ่งคำนวณได้จาก NaCl standard ดังนั้นการคำนวณความแรงประจุแสดงได้ดังนี้

$$I.S. = \frac{1}{2} \{ (1)^2 [Na^+] + (1)^2 [Cl^-] + 0.0008 + 0.0008 \}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0.05M = \frac{1}{2} \{x + x + 0.0008 + 0.0008\}$$

$$x = 0.05 - 0.0008$$

$$x = 4.920 \times 10^{-3} M$$

น้ำหนักของ $NaCl$ ที่เติมเพิ่มคำนวณได้ดังนี้

$$X = 4.920 \times 10^{-3} \text{ mol/L} \times 58.5 \text{ g/mol}$$

$$X = 2.8782 \text{ g/L}$$

2. $CaCl_2$

$$2.1 \text{ I.S.} = 0.01 \text{ M}$$



$$x \quad 2x$$

จากสมการการคำนวณค่าความแรงประจุ

$$I.S. = \frac{1}{2} \sum Z_i^2 [i]$$

ความเข้มข้นของ $NaCl$ ในตัวอย่างที่เตรียมเท่ากับ 0.0008 M ซึ่งคำนวณได้จาก $NaCl$ standard ดังนั้นการคำนวณความแรงประจุแสดงได้ดังนี้

$$I.S. = \frac{1}{2} \{ (2)^2 [Ca^{2+}] + (1)^2 2 [Cl^-] + (1)^2 [Na^+] + (1)^2 [Cl^-] \}$$

$$0.01M = \frac{1}{2} \{ 4x + 2x + 0.0008 + 0.0008 \}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x = \frac{(0.01 - 0.0008)}{3} = 3.067 \times 10^{-3} M$$

น้ำหนักของ $CaCl_2$ คำนวณได้ดังนี้

$$X = 3.067 \times 10^{-3} \text{ mol/L} \times 110.9 \text{ g/mol}$$

$$X = 0.3405 \text{ g/L}$$

$$2.1 \text{ I.S.} = 0.05 \text{ M}$$

จากสมการการคำนวณค่าความแรงประจุ

$$I.S. = \frac{1}{2} \sum Z_i^2 [i]$$

ความเข้มข้นของ NaCl ในตัวอย่างที่เตรียมเท่ากับ 0.0008 M ซึ่งคำนวณได้จาก NaCl standard ดังนั้นการคำนวณความแรงประจุแสดงได้ดังนี้

$$I.S. = \frac{1}{2} \{ (2)^2 [Ca^{2+}] + (1)^2 2 [Cl^-] + (1)^2 [Na^+] + (1)^2 [Cl^-] \}$$

$$0.05 M = \frac{1}{2} \{ 4x + 2x + 0.0008 + 0.0008 \}$$

$$x = \frac{(0.05 - 0.0008)}{3} = 0.0164 M$$

น้ำหนักของ $CaCl_2$ คำนวณได้ดังนี้

$$X = 0.0164 \text{ mol/L} \times 110.9 \text{ g/mol}$$

$$X = 1.819 \text{ g/L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.2 ตัวอย่างการคำนวณการกำจัดเกลือและสารอินทรีย์

1. ร้อยละการกำจัดเกลือในตัวอย่างที่ไม่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ พีเอช 7 ความแรงประจุ 0.01 ปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์

$$R_{\text{reten}} = 1 - \frac{C_{\text{perm}}}{C_{\text{reten}}}$$

ที่เวลา 30 นาที $R_{\text{reten}} = 1 - \frac{396.486}{597.299}$

$$= 0.33$$

ที่เวลา 60 นาที $R_{\text{reten}} = 1 - \frac{440.477}{694.025}$

$$= 0.36$$

ที่เวลา 120 นาที $R_{\text{reten}} = 1 - \frac{441.783}{712.917}$

$$= 0.38$$

ที่เวลา 210 นาที $R_{\text{reten}} = 1 - \frac{451.689}{716.894}$

$$= 0.37$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_c + r_g + r_a = 2.68 \times 10^{13} m^{-1} - 2.59 \times 10^{13} m^{-1}$$

$$r_c + r_g + r_a = 9.31 \times 10^{11} m^{-1} \quad (1)$$

3. เมื่อทำความสะอาดด้วยน้ำ

$$r_t = r_m + r_g + r_a$$

$$r_g + r_a = 2.68 \times 10^{13} m^{-1} - 2.59 \times 10^{13} m^{-1}$$

$$r_g + r_a = 9.31 \times 10^{11} m^{-1} \quad (2)$$

4. เมื่อทำความสะอาดด้วยด่าง (NaOH)

$$r_t = r_m + r_a$$

$$r_a = 2.68 \times 10^{13} m^{-1} - 2.59 \times 10^{13} m^{-1}$$

$$r_a = 9.31 \times 10^{11} m^{-1}$$

5. แทนค่า r_a ในสมการที่ (2)

$$r_g = 7.47 \times 10^{11} m^{-1}$$

6. แทนค่า r_a และ r_g ในสมการที่ (1)

$$r_c = 7.91 \times 10^{12} m^{-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชอุพนธ์ เจริญสุข
วัน เดือน ปีเกิด	3 มิถุนายน 2522 ที่ขอนแก่น
ที่อยู่	17 ถนนกุดยางสามัคคี ตำบลกาฬสินธุ์ อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000 โทร. 01-6622821
ประวัติการศึกษา	2544 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 2548 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้