

การลดการอุดตันเยื่อกรองนาโนจากสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำในน้ำทิ้งด้วย  
กระบวนการรวมตะกอนและกรองแบบไมโคร

MITIGATION OF SMP FOULING ON NANOFILTRATION  
MEMBRANE USING COAGULATION AND MICROFILTRATION

ทัศนีย์วรรณ ชมอินทร์  
TASSANEewan CHOM-IN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2550

การลดการอุดตันเยื่อกรองนาโนจากสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำในน้ำทิ้งด้วย  
กระบวนการรวมตะกอนและกรองแบบไมโคร

MITIGATION OF SMP FOULING ON NANOFILTRATION  
MEMBRANE USING COAGULATION AND MICROFILTRATION

ทัศนีย์วรรณ ชมอินทร์

TASSANEewan CHOM-IN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**MITIGATION OF SMP FOULING ON NANOFILTRATION  
MEMBRANE USING COAGULATION AND MICROFILTRATION**

**TASSANEewan CHOM-IN**

**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**

**2007**

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดการอุดตันเยื่อกรองนาโนจากสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ ในน้ำทิ้งด้วยกระบวนการรวมตะกอนและกรองแบบไมโคร
นักศึกษา	นางสาวทัศนีย์วรรณ ชมอินทร์
รหัสประจำตัว	47064008
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นเพื่อลดการอุดตันเยื่อกรองนาโน จากสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำในน้ำทิ้งจากระบบเอสปีอาร์ วิธีการบำบัดเบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษามี 3 วิธีคือ 1) การรวมตะกอนทางเคมีด้วยสารรวมตะกอน ได้แก่ อลูมิเนียมซัลเฟต เฟอร์ริกคลอไรด์ และ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ 2) การกรองผ่านแท่งกรองไมโครขนาด 0.4 ไมครอน และ 3) การรวมตะกอนร่วมกับการกรองผ่านแท่งกรอง จากการทดลองพบว่า การรวมตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ให้ค่าการลดลงของฟลักซ์ (Flux Decline) ต่ำที่สุดเท่ากับ 63 เปอร์เซ็นต์, ค่าการกักกันสารอินทรีย์เท่ากับ 42 เปอร์เซ็นต์และมีค่า MFI-NF ลดลงจากที่ไม่ได้รับการบำบัดเบื้องต้นจาก 0.0083 เหลือ 0.0017 min/ml<sup>2</sup> การบำบัดด้วยการกรองผ่านแท่งกรองทำให้ค่าการลดลงของฟลักซ์มีค่าเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์ ค่าการกักกันสารอินทรีย์เท่ากับ 42 เปอร์เซ็นต์ และ ค่า MFI-NF เท่ากับ 0.0013 min/ml<sup>2</sup> ส่วนการบำบัดด้วยการรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการกรอง ให้ค่าการลดลงของฟลักซ์ต่ำที่สุดคือ 46 เปอร์เซ็นต์ ค่าการกักกันสารอินทรีย์ 42 เปอร์เซ็นต์ และค่า MFI-NF เท่ากับ 0.0006 min/ml<sup>2</sup> การศึกษาแบบจำลองการอุดตัน พบว่าน้ำที่ไม่ได้รับการบำบัดเบื้องต้นทำให้เกิดการอุดตันเยื่อกรองนาโนในลักษณะการเกิดชั้นเค้ก (Cake formation) เมื่อผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนทางเคมีและการกรองพบว่ารูปแบบการอุดตันเปลี่ยนไปเป็นลักษณะการอุดตันรูพรุน Complete pore blocking) แสดงให้เห็นว่าการบำบัดเบื้องต้นสามารถลดสาร SMP ที่เป็นสาเหตุหนึ่งของการอุดตันเยื่อกรองนาโนได้ ผลการวิเคราะห์การอุดตันด้วยภาพถ่าย SEM สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการอุดตัน การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารอุดตันเยื่อกรองนาโนด้วยเครื่อง FTIR พบว่าสารที่อุดตันเยื่อกรองส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่มโพลีแซคคาไรด์ซึ่งอาจเกิดจากผนังเซลล์ของจุลินทรีย์

**คำสำคัญ :** การกรองไมโคร การเกิดชั้นเค้ก การรวมตะกอนทางเคมี การอุดตันรูพรุน ดัชนีชี้วัดการอุดตัน สารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ

<b>Thesis Title</b>	Mitigation of SMP Fouling on Nanofiltration Membrane Using Coagulation and Microfiltration.
<b>Student</b>	Miss Tasaneewan Chom-in
<b>Student ID.</b>	47064008
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Environmental Chemistry
<b>Year</b>	2007
<b>Thesis Advisor</b>	Dr.Chalor Jarusutthirak

### ABSTRACT

This research studied comparative pretreatment methods to reduce fouling of nanofiltration (NF) membrane by soluble microbial products (SMP) in SBR effluents. Pretreatment methods including 1) coagulation and flocculation using aluminium sulphate ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), ferric chloride ( $\text{FeCl}_3$ ), polyaluminium chloride (PACl) ; 2) microfiltration with 0.4  $\mu\text{m}$  cartridge filter ; and 3) combination of coagulation/flocculation and microfiltration, were investigated. The results showed that  $\text{FeCl}_3$  as a coagulant provided lowest flux decline at 63%, and TOC rejection of 42%. The value of MFI-NF reduced from 0.0083 to 0.0017  $\text{min/ml}^2$  when compared with no pretreatment. Pretreatment with 0.4  $\mu\text{m}$  filter exhibited 79% flux decline, 42% TOC rejection, and MFI-NF of 0.0013  $\text{min/ml}^2$ . Combination of coagulation/flocculation and microfiltration provided 46% flux decline, 42% TOC rejection, and MFI-NF of 0.0006  $\text{min/ml}^2$ . Mathematical fouling model indicated that fouling by SMP feed water fit well with cake formation model, while the fouling characteristic was transformed to complete pore blocking when pretreatment of SMP-feed water using coagulant and microfiltration were applied. It can be explained that the SMP possible caused of NF fouling. Analysis of fouling by SEM illustrated an accumulation of SMP on membrane surface as a cake formation. This evidence was corresponding to the result from mathematical fouling model. Functional groups of SMP fouling on NF membrane were investigated using FTIR. It was found that main composition of the foulant was polysaccharides, possibly caused by microbial lysed cell.

**Keywords:** Cake formation, Coagulation, Microfiltration, Modified fouling index, Pore blocking, Soluble Microbial Products,

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุพัฒน์พงษ์ มัตราช อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้คำแนะนำ และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาของวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว รวมทั้งเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจตลอดในการทำวิทยานิพนธ์

นางสาวทัศนีย์วรรณ ชมอินทร์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XI
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 สารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ.....	5
2.1.1 การเกิดลักษณะของสาร SMP .....	7
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของเซลล์จุลินทรีย์.....	10
2.2 ระบบเอสบีอาร์.....	10
2.3 วิธีการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้น (Pretreatment methods).....	11
2.3.1 การรวมตะกอนทางเคมี (Coagulation and Flocculation).....	12
2.3.2 การกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน .....	13
2.4 นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration Process).....	14
2.4.1 หลักการกรองผ่านเยื่อกรอง.....	14
2.4.1.1 การละลายและการแพร่.....	15
2.4.1.2 การไหลผ่านรูพรุน.....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 ความสามารถในการกรองด้วยเยื่อกรองนาโน.....	16
2.4.3 ลักษณะการเดินระบบเยื่อกรอง.....	17
2.4.4 การอุดตันเยื่อกรอง.....	17
2.4.4.1 กลไกการอุดตันบนเยื่อกรอง.....	18
2.4.4.2 ลักษณะการเกิดการอุดตันเยื่อกรอง.....	20
2.4.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันเยื่อกรอง.....	22
2.4.4.4 ดัชนีชี้วัดการอุดตัน (Modified Fouling Index, MFI).....	24
2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอุดตันเยื่อกรอง.....	23
2.5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการอุดตันบนเยื่อกรอง.....	23
2.5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับความต้านทานของการอุดตัน แบบอนุกรม .....	25 27
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>31</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2.1 อุปกรณ์.....	32
3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์.....	33
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	35
3.4 การเตรียมน้ำป้อนเข้าสู่ระบบเยื่อกรองนาโน.....	35
3.4.1 การติดตั้งและเดินระบบของระบบเอสปีอาร์.....	37
3.4.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	37
3.5 การบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้น.....	37
3.5.1 การสร้างและรวมตะกอนทางเคมี.....	38
3.5.2 การกรองผ่านแท่งกรองไมโครฟิลเตรชัน.....	39
3.6 การเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโน.....	39

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6.1 เชื้อกรองที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.6.2 การทำความสะอาดเชื้อกรอง.....	40
3.6.3 การติดตั้งระบบทดสอบเชื้อกรองแบบอัตโนมัติ.....	41
3.6.4 การทดสอบการทำงานของระบบเชื้อกรองนาโน.....	41
3.6.4.1 ขั้นตอนการเดินระบบเชื้อกรองแบบนาโน.....	41
3.6.4.2 การทดสอบความแม่นยำของระบบ (Reproducibility).....	42
3.7 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตัน.....	43
3.8 การวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	43
3.8.1 น้ำตัวอย่าง.....	43
3.8.2 การทดสอบค่าดัชนีบ่งชี้การอุดตัน (Modified fouling index, MFI).....	43
3.8.3 การพิสูจน์การอุดตันบนเชื้อกรอง.....	43
3.9 การวิเคราะห์แบบจำลองการอุดตันเชื้อกรอง.....	44
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....</b>	<b>45</b>
4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง.....	45
4.2 การทดสอบความแม่นยำระบบ (Reproducibility).....	47
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์.....	48
4.3.1 ผลของสภาวะการเติมอากาศในระบบเอสบีอาร์ (SBR).....	48
4.3.2 ผลของค่าพีเอช.....	49
4.3.3 การศึกษาวิธีบำบัดเบื้องต้นเพื่อลดการอุดตันเชื้อกรองนาโน.....	51
4.3.3.1 การรวมตะกอนทางเคมี.....	51
4.3.3.2 การกรองเบื้องต้นด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน.....	55
4.3.3.3 การรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการกรองด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน.....	56
4.4 การศึกษาการอุดตันบนเชื้อกรองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการวิเคราะห์การดูดซับบนเยื่อกรองนาโน.....	62
4.5.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR.....	62
4.5.2 ผลการวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM).....	64
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>67</b>
เอกสารอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงผลการเดินระบบเยื่อกรองนาโนในสถานะต่างๆ .....	72
ภาคผนวก ข. ตารางแสดงผลการทำจาร์เทสต์ (Jar Test) ของน้ำทิ้ง.....	95
ภาคผนวก ค. ตารางแสดงผลวิเคราะห์แบบจำลองการดูดซับ.....	97
ภาคผนวก ง. วิธีการทำจาร์เทสต์และการคำนวณค่า MFI-NF.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	103

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ความต้านทานแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนเยื่อกรองนาโน.....26
3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบเอสปีอาร์..... 35
3.2	ตารางแสดงขั้นตอนต่าง ๆ ในการทำงานของระบบเอสปีอาร์.....36
3.3	ปัจจัยควบคุมและปัจจัยที่ศึกษาในระบบเอสปีอาร์.....36
3.4	ปริมาณสารอาหารของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการเดินระบบเอสปีอาร์.....37
3.5	ปริมาณของสารตกตะกอนชนิดต่าง ๆ และค่าพีเอชที่ศึกษา.....38
3.6	คุณลักษณะต่าง ๆ ของเยื่อกรองนาโนที่ใช้ในงานวิจัย.....40
3.7	ตารางสรุปการศึกษาการบำบัดเบื้องต้นเพื่อลดการอุดตันเยื่อกรองนาโน.....42
3.8	พารามิเตอร์ที่ศึกษาและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....43
3.9	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาตัวอย่างเยื่อกรองแบบนาโน.....43
3.10	รูปแบบการอุดตันแบบต่าง ๆ และสมการที่เกี่ยวข้อง.....44
4.1	คุณลักษณะของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....45
4.2	ปริมาณและพีเอชที่เหมาะสมในการใช้สารรวมตะกอนกำจัดความขุ่นของน้ำทั้งสองสถานะ การเติมอากาศ.....52
4.3	เปอร์เซ็นต์การกำจัดสารอินทรีย์และค่าการนำไฟฟ้าเมื่อรวมตะกอนด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน54
4.4	ตารางแสดงการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยวิธีการบำบัดแบบต่าง ๆ.....58
4.5	ตารางแสดงการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยวิธีการบำบัดแบบต่าง ๆ.....59
ก-1	ค่าฟลักซ์ของการทดสอบความแม่นยำของระบบ (Reproducibility).....73
ก-2	การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสถานะ 3:5 พีเอชที่ 4 ไม่มีการบำบัดเบื้องต้น..... 75
ก-3	การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสถานะ 3:5 พีเอชที่ 7 ไม่มีการบำบัดเบื้องต้น..... 76
ก-4	การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสถานะ 3:5 พีเอชที่ 9 ไม่มีการบำบัดเบื้องต้น..... 77
ก-5	การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสถานะ 5:3 พีเอชที่ 4 ไม่มีการบำบัดเบื้องต้น..... 78
ก-6	การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสถานะ 5:3 พีเอชที่ 7 ไม่มีการบำบัดเบื้องต้น..... 79
ก-7	การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสถานะ 5:3 พีเอชที่ 9 ไม่มีการบำบัดเบื้องต้น..... 80
ก-8	การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสถานะ 3:5 พีเอชที่ 4 บำบัดเบื้องต้นด้วยแท่งกรอง ขนาด 0.4 ไมครอน..... 81

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-9 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 พีเอชที่ 7 บำบัดเบื้องต้นด้วยแท่งกรอง ขนาด 0.4 ไมครอน.....	82
ก-10 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 พีเอชที่ 9 บำบัดเบื้องต้นด้วยแท่งกรอง ขนาด 0.4 ไมครอน.....	83
ก-11 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 พีเอชที่ 4 บำบัดเบื้องต้นด้วยแท่งกรอง ขนาด 0.4 ไมครอน.....	84
ก-12 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 พีเอชที่ 7 บำบัดเบื้องต้นด้วยแท่งกรอง ขนาด 0.4 ไมครอน.....	85
ก-13 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 พีเอชที่ 9 บำบัดเบื้องต้นด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน.....	86
ก-14 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 บำบัดเบื้องต้นโดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย อลูมิเนียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 70ppm.....	87
ก-15 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 บำบัดเบื้องต้นโดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย อลูมิเนียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 3 ppm.....	88
ก-16 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 บำบัดเบื้องต้นโดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย $FeCl_3$ ที่ความเข้มข้น 150 ppm.....	89
ก-17 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 บำบัดเบื้องต้นโดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย $FeCl_3$ ที่ความเข้มข้น 100 ppm.....	90
ก-18 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 บำบัดเบื้องต้นโดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย PACl ความเข้มข้น 0.2 ppm.....	91
ก-19 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 บำบัดเบื้องต้นโดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย PACl ที่ความเข้มข้น 0.4 ppm.....	92
ก-20 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 บำบัดเบื้องต้นโดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย $FeCl_3$ ที่ความเข้มข้น 150 ppm และกรองผ่านแท่งกรอง 0.4 $\mu m$ .....	93

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-21 การเดินระบบเชื้อกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 บำบัดเบื้องต้นโดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย $\text{FeCl}_3$ ที่ความเข้มข้น 100 ppm และกรองผ่านแท่งกรอง 0.4 $\mu\text{m}$ .....	94
ข-1 การหาปริมาณการเติมสารรวมตะกอนที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เทสต์ (Jar test) ของน้ำทิ้ง สภาวะการเติมอากาศ : หยดเติมอากาศ 3:5 และ 5:3 ชั่วโมง.....	96
ค-1 ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอุดตันเชื้อกรองนาโนของน้ำสภาวะ 3:5.....	98
ค-2 ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอุดตันเชื้อกรองนาโนของน้ำสภาวะ 5:3.....	99

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างของน้ำตาล C 6 อะตอม และ C 5 อะตอม.....	7
2.2 สูตรโครงสร้างอย่างง่ายของ (a) triacylglycerol และ (b) phospholipids.....	8
2.3 นิวคลีโอไทด์ของ (a) DNA และ (b) RNA.....	9
2.4 พันธะเปปไทด์ในโปรตีน.....	9
2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์.....	10
2.6 กระบวนการออสโมซิสและออสโมซิสผันกลับ.....	14
2.7 การกรองบนเยื่อกรองแบบอัดตัว (Dead-end filtration).....	16
2.8 การกรองบนเยื่อกรองแบบไหลขวาง (Crossflow filtration).....	16
2.9 ลักษณะการเกิด Hydrophobic Interaction.....	17
2.10 การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน.....	18
2.11 การเกิดชั้นเจลบนเยื่อกรอง.....	19
2.12 การเกิดการอุดตันรูพรุนของเยื่อที่มีรูพรุนขนาดต่าง ๆ เทียบกับขนาดตัวถูกละลาย.....	20
2.13 อัตราส่วนระหว่างเวลาที่ใช้กรองและปริมาตรที่กรองได้ (t/V) เทียบกับ ปริมาตรที่กรองได้(V).....	23
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	34
3.2 การทำงานของถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์.....	35
3.3 แท่งกรองไมโครที่ใช้ในการบำบัดน้ำเบื้องต้น (ก) 5 $\mu\text{m}$ (ข) 0.40 $\mu\text{m}$ .....	38
3.4 แผนภาพแสดงการติดตั้งตัวกรองแบบไมโคร.....	39
3.5 แผนภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโนฟิลเตรชันที่เดินระบบแบบกรองอัดตัว.....	40
4.1 ผลการทดสอบความแม่นยำของระบบเยื่อกรองนาโน.....	47
4.2 การลดลงของค่าฟลักซ์จากน้ำทิ้งที่สภาวะการเติมอากาศไม่เท่ากัน เมื่อเทียบกับฟลักซ์ของน้ำกลั่น.....	48
4.3 เปรี่เซนต์การกักกันสารอินทรีย์ และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่สภาวะ 3:5 และ 5:3.....	49
4.4 การลดลงของค่าฟลักซ์ที่พีเอช 4, 7 และ 9 ของน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดแบบ SBR ที่สภาวะการเติมอากาศ:หยุดเติมอากาศ (ก) 3:5 (ข) 5:3.....	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.5	ดัชนีชี้วัดการอุดตัน (MFI-NF) ของน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดที่สภาวะการเติมอากาศ 3:5 และ 5:3 ชั่วโมง.....	51
4.6	การลดลงของค่าฟลักซ์เมื่อใช้สารเคมีชนิดต่าง ๆ ในการรวมตะกอนทางเคมีที่สภาวะการเติมอากาศ : หยุดเติมอากาศทั้งสองแบบ (ก) สภาวะ 3:5 (ข) สภาวะ 5:3.....	53
4.7	การเปรียบเทียบค่า MFI-NF ของสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดเทียบกับน้ำที่ไม่ได้รับการบำบัด.....	54
4.8	การลดลงของค่าฟลักซ์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยการกรองด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน (ก) สภาวะ 3:5 (ข) สภาวะ 5:3.....	55
4.9	การเปรียบเทียบค่า MFI-NF ของน้ำทั้งสองสภาวะระหว่างน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นและกรองผ่านแท่งกรอง 0.4 ไมครอน.....	56
4.10	การเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ในการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นด้วยวิธีต่าง ๆ.....	57
4.11	การเปรียบเทียบค่า MFI-NF ของน้ำทิ้งสภาวะ 3:5 และเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าฟลักซ์... ..	58
4.12	แบบจำลองการอุดตันของน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น.....	60
4.13	แบบจำลองการอุดตันของน้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนทางเคมีด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์.....	60
4.14	แบบจำลองการอุดตันของน้ำที่บำบัดด้วยการกรองผ่านแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน.....	61
4.15	แบบจำลองการอุดตันของน้ำที่ผ่านการบำบัดร่วมกันระหว่างการรวมตะกอนทางเคมีด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ และการกรองผ่านแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน.....	62
4.16	สเปกตรัม FT-IR แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารที่ทำให้เกิดการอุดตันบนเยื่อกรองนาโน .....	63
4.17	ภาพถ่าย SEM แสดงการสะสมตัวของสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันของน้ำสภาวะ 3:5 ที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น.....	64
4.18	ภาพถ่าย SEM แสดงการสะสมตัวของสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันของน้ำสภาวะ 5:3 ที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดเบื้องต้น .....	65
ง-1	กราฟแสดงค่าดัชนีชี้วัดการอุดตันของน้ำที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์.....	102

# รายการคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
BAP	Biomass Associated Products
FT-IR	ฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
MF	เยื่อกรองแบบไมโคร
MFI	ดัชนีชี้วัดการอุดตัน
NF	เยื่อกรองนาโน
NTU	Nephelometric Turbidity Unit (หน่วยวัดความขุ่น)
PACl	โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์
SBR	ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเอสบีอาร์
SEM	สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป
SMP	สารชีวภัณฑ์ละลายน้ำได้
SUVA	ค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะ
TOC	สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด
UV <sub>254</sub>	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร
UAP	Utilisation Associated Products
$C_f$	ความเข้มข้นของน้ำเข้าระบบ
$C_p$	ความเข้มข้นของเพอร์มีเอท
$C_r$	ความเข้มข้นของรีเทนเทท
$J_v$	อัตราการซึมผ่านของน้ำผ่านเยื่อกรอง
$J_0$	ค่าฟลักซ์เริ่มต้นของน้ำกลั่น
$L_p$	สัมประสิทธิ์ของการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรอง
$\Delta P$	ค่าความแตกต่างของแรงดัน
$Q_p$	อัตราการไหลของเพอร์มีเอท
$\Delta \pi$	ค่าความแตกต่างของแรงดันออสโมติก
$\sigma$	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันออสโมติก
$\mu$	ค่าความหนืดของน้ำ
$\mu m$	ไมโครเมตร
$\mu S.cm^{-1}$	ไมโครซีเมนต่อเซนติเมตร

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
$\text{cm}^{-1}$	หนึ่งต่อเซนติเมตร
$kPa$	กิโลปาสคาล
$kDa$	กิโลดาลตัน
$L \cdot \text{min}^{-1}$	ลิตรต่อนาที
LMH	ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง
$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง
LMH	ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง
$r_m$	ค่าความต้านทานที่เกิดจากเยื่อกรอง
$r_t$	ค่าความต้านทานรวม
$r_c$	ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นเค้ก
$r_g$	ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นเจล
$r_a$	ค่าความต้านทานที่ไม่สามารถล้างออกได้
m	เมตร
$m^{-1}$	หนึ่งต่อเมตร
$\text{mg} \cdot L^{-1}$	มิลลิกรัมต่อลิตร
$\text{mg}^{-1} \cdot m^{-1}$	หนึ่งต่อมิลลิกรัมต่อเมตร
$\text{psi}$	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการขาดแคลนน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในปัจจุบัน ไม่เพียงแต่จะพบในชนบท ในช่วงฤดูแล้งเท่านั้น แม้แต่ในเมืองใหญ่ และเขตอุตสาหกรรมบางพื้นที่ก็ประสบปัญหาดังกล่าวเช่นกัน แนวคิดหนึ่งในการแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำ ได้แก่ การนำน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัด กลับมาใช้ประโยชน์ (Wastewater reclamation) โดยน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถถูกนำมาใช้ใหม่ในกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การรดน้ำต้นไม้ การล้างพื้น หรือในทางอุตสาหกรรม มีการนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วมาใช้ในกระบวนการหล่อเย็น (Cooling water) เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) ในแต่ละวัตถุประสงค์ของการนำกลับมาใช้ใหม่นั้นจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งที่เหมาะสมก่อนการนำกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการขั้นสูงในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Advanced water treatment) นับเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการผลิตน้ำที่มีคุณภาพสูง มีหลายวิธีการขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำทิ้ง และวัตถุประสงค์การใช้งานของน้ำที่นำกลับมาใช้ประโยชน์นั้น ๆ เช่น การดูดซับด้วยถ่าน (Carbon adsorption) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) การออกซิเดชันด้วยสารเคมี/แสงอัลตราไวโอเลต/ใช้โอโซน (Chemical oxidation/Ultraviolet/Ozone oxidation) รวมทั้งกระบวนการกรองผ่านเยื่อกรอง (Membrane process) เช่น เยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane) เยื่อกรองแบบอัลตรา (Ultrafiltration membrane) เป็นต้น เยื่อกรองแบบนาโนนับได้ว่าเป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากสามารถบำบัดมลพิษได้เป็นอย่างดี สามารถกักกันสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก แบคทีเรีย จุลินทรีย์ รวมถึงเกลืออนินทรีย์บางตัวที่เป็นเกลือไดวาเลนต์ไอออนด้วย น้ำที่ได้เป็นน้ำที่มีคุณภาพดีสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมได้นอกจากนี้การใช้เยื่อกรองแบบนาโนยังเป็นการลดการใช้พลังงานและสารเคมีอีกด้วย (จันทอง, 2545)

ข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้งานของเยื่อกรองแบบนาโนสำหรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ คือการอุดตันบนเยื่อกรอง (Membrane Fouling) ซึ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ผลิตได้ลดลง อาจส่งผลต่อการคัดแยกมลพิษต่าง ๆ รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดและการเปลี่ยนเยื่อกรองสูงขึ้น นักวิจัยหลายคนพบว่าสารอินทรีย์มีบทบาทสำคัญในการอุดตันบนเยื่อกรอง ได้แก่สารอินทรีย์ในน้ำหลังผ่านการบำบัด (Effluent organic matter, EfOM) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ (Soluble Microbial Product ; SMP) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Jarusutthirak *et al.* 2002) การลดปริมาณสารอินทรีย์ดังกล่าวด้วยกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้น (Pretreatment) ก่อนการกรองด้วยเยื่อกรองนาโนเพื่อลดการอุดตันเยื่อกรองเป็นวิธีการ

หนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของเยื่อกรอง ปีต่ออายุการทำงานและรักษาอัตราการผลิตน้ำที่ได้จากเยื่อกรอง วิธีการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นก่อนการกรองมีหลายวิธี เช่น การดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ (Powder activated carbon, PAC) การสร้างและรวมตะกอนด้วยสารเคมีต่างๆ (Coagulation/Flocculation) การใช้ตัวกรองทางชีวภาพ (Biofilter) เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การรวมตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์สามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) ได้ร้อยละ 58 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดได้ร้อยละ 68 เมื่อนำวิธีรวมตะกอนตามด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดได้ถึงร้อยละ 90 (Shon *et al.* 2004a) นอกจากนี้การสร้างและรวมตะกอนสามารถกำจัดปริมาณของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 80-90 กำจัด BOD<sub>5</sub> ได้ร้อยละ 40-70 (Tchobanoglous *et al.*, 1991)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาวิธีการบำบัดเบื้องต้นเพื่อลดปริมาณ SMP ในน้ำทิ้งจากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพซึ่งมีส่วนในการทำให้เกิดการอุดตันเยื่อกรองแบบนาโนโดยวิธีทางเคมี ได้แก่ การสร้างและรวมตะกอนทางเคมี (Coagulation and flocculation) ด้วยสารส้ม (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl<sub>3</sub>) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACI) และวิธีการทางกายภาพ ได้แก่ การกรองด้วยแท่งกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อกรองนาโนในการกรองน้ำที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น ด้วยการทดสอบการลดลงของค่าฟลักซ์ (Flux decline) ค่าดัชนีชี้วัดการอุดตัน (Modified Fouling Index ; MFI) และค่าการกักกันสารอินทรีย์คาร์บอนของเยื่อกรอง (TOC Rejection) นอกจากนี้ยังทำการศึกษาวิเคราะห์การอุดตันเยื่อกรองด้วยวิธี FT-IR และศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอุดตัน เพื่อใช้ทำนายลักษณะการอุดตันเยื่อกรองนาโน ผลที่ได้จากการวิจัยสามารถใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการนำน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแล้วกลับมาใช้ประโยชน์ได้ และเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำด้วยระบบเยื่อกรองแบบนาโน อันจะนำไปสู่การแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำได้ต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะที่เหมาะสมของน้ำทิ้งก่อนการเดินระบบด้วยเยื่อกรองแบบนาโน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการลดการอุดตันบนเยื่อกรองแบบนาโนด้วยวิธีการบำบัดเบื้องต้น
- 1.2.3 เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายกลไกการอุดตันที่เกิดขึ้นบนเยื่อกรองแบบนาโน

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 น้ำทิ้งที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำทิ้งที่มีสาร SMP ซึ่งเกิดจากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor, SBR) ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้น้ำตาลซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอน

1.3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ ศึกษาลักษณะของน้ำทิ้ง ได้แก่ ค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon, TOC), ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร, ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity), ค่าพีเอช (pH), และดัชนีชี้วัดการอุดตัน (Modified Fouling Index, MFI)

1.3.3 วิธีการบำบัดเบื้องต้นที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ

1) วิธีทางเคมี ได้แก่ การสร้างและการรวมตะกอนทางเคมี เคมี (Coagulation and Flocculation) ด้วยสารส้ม ( $Al_2(SO_4)_3$ ) เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) และ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACI)

2) วิธีทางกายภาพ ได้แก่ การกรองด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน

1.3.4 เยื่อกรองแบบนาโนที่ใช้ในการทดสอบ จากบริษัท Dow Chemical รุ่น NF 90 - 400 ประเภท Thin film composite membrane ชนิด Polyamide ระบบการทดสอบเยื่อกรองแบบนาโนเป็นการกรองแบบอัดตัว (Dead-end stirred cell filtration) ความดันสูงสุดที่ใช้ในการเดินระบบ (Maximum operating pressure) คือ 75 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) หรือ 5.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( $kg/cm^2$ )

1.3.5 ประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อกรองนาโน ทดสอบด้วยการวัดการลดลงของค่าฟลักซ์ (Flux decline) และค่าการกักกันสารอินทรีย์คาร์บอน (TOC rejection)

1.3.6 การวิเคราะห์การอุดตันเยื่อกรองโดยการ ทดสอบห่มู่ฟังก์ชันของสารบนผิวเยื่อกรองด้วยเครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

1.3.7 การวิเคราะห์พื้นผิวของเยื่อกรองทั้งก่อนและหลังการอุดตันด้วยเครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM)

1.3.8 การศึกษาลักษณะการอุดตันของเยื่อกรองนาโน ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอุดตัน เพื่อใช้ในการอธิบายกลไกการอุดตันของเยื่อกรองนาโน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงลักษณะน้ำทิ้งที่เหมาะสมก่อนป้อนเข้าสู่ระบบด้วยเยื่อกรองนาโน

1.4.2 ทราบถึงวิธีการบำบัดน้ำเบื้องต้นก่อนนำมาเดินระบบเยื่อกรองนาโนเพื่อลดการอุดตันเยื่อกรองนาโนได้

1.4.3 สามารถอธิบายกลไกการอุดตันที่เกิดขึ้นที่เยื่อกรองนาโนได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ (Soluble Microbial Product, SMP)

สารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ คือกลุ่มของสารอินทรีย์ที่ถูกปล่อยในรูปแบบของสารละลายจากกระบวนการเมตาบอลิซึมซึ่งเกิดจากการเจริญเติบโต และการย่อยสลายของสารชีวมวลที่อยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Barker and Stuckey, 1999) สารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง (Effluent organic matters, EfOM) ที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ละลายน้ำได้พบในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ประกอบไปด้วย 2 กลุ่มใหญ่ คือสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (Natural organic matters, NOM) พบในแหล่งน้ำธรรมชาติและสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ (Soluble microbial products, SMP) ซึ่งเกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Jarusutthirak *et al.* 2002) โดยทั่วไปจุลินทรีย์ในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดทางชีวภาพทำหน้าที่หลายอย่างไม่ว่าจะเป็นจากการย่อยสลายทางชีวภาพของตัวเซลล์จุลินทรีย์เอง หรือการนำสารอาหารที่มาจากน้ำที่ป้อนเข้าระบบบำบัดซึ่งจุลินทรีย์นำไปใช้ในการเจริญเติบโต

#### 2.1.1 การเกิดและลักษณะของสาร SMP

สาร SMP ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการบำบัดทางชีวภาพเกิดขึ้นได้ ดังนี้

- (1) การขั้บถ่ายของเสียของจุลินทรีย์จะมีการปล่อยสารอินทรีย์ออกมา
- (2) การเผาผลาญสารอาหารภายในเซลล์ของจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโต จะมีสารอินทรีย์เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย (Final Products) และสารมั้ชยัน (Intermediates)
- (3) สารอินทรีย์ที่เกิดจากจุลินทรีย์ที่หมดอายุเกิดการแตกตัว (cell lysis) และการสลายตัวของจุลินทรีย์

สาร SMP สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ตามลักษณะการเกิด (Namkung and Rittmann, 1986) คือ

(1) Utilisation Associated Products (UAP) คือ สาร SMP ที่เกิดจากการเผาผลาญสารอาหารที่ใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่งจะเปลี่ยนรูปเป็นสารที่อาจจะเป็นอนุพันธ์กับสารอาหารตั้งต้นไปใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งอัตราการผลิตสาร UAP นี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการใช้สารอาหาร

(2) Biomass Associated Products (BAP) คือ สาร SMP ที่เกิดจากการแตกสลายของเซลล์ การขั้บถ่ายของเสีย ซึ่งอัตราการเกิด BAP เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของชีวมวล (Biomass)

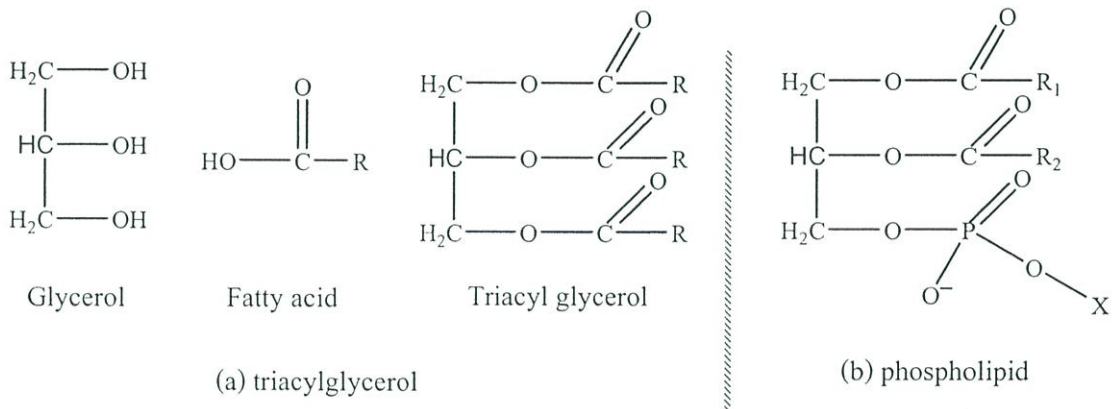
จากที่กล่าวไปแล้วสาร SMP คือกลุ่มของสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบหลากหลาย เช่น กลุ่มน้ำตาล โปรตีน กรดนิวคลีอิก กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน กลุ่มกรดไขมัน และกลุ่มเอนไซม์นอกเซลล์ (extracellular enzyme) มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงกว้างจากน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (<0.5 kDa) จนถึงน้ำหนักโมเลกุลสูง (>100 kDa) จากการศึกษาของ Boero *et al.* (1996) ซึ่งศึกษาการใช้ฟีนอลและกลูโคสเป็นสารตั้งต้น โดยศึกษาจาก  $^{14}\text{C}$  เพื่อแยกความแตกต่างระหว่างสาร SMP ในกลุ่ม UAP และ BAP ผลของการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล พบว่า UAP ที่มีสารตั้งต้นเป็นฟีนอลและกลูโคส มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 1 kDa คิดเป็นร้อยละ 86 และ 76 ตามลำดับ ส่วนสาร SMP ในกลุ่ม BAP ส่วนใหญ่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยพบว่า มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 10 kDa คิดเป็นร้อยละ 47 สำหรับสารตั้งต้นที่เป็นฟีนอล และร้อยละ 52 สำหรับสารตั้งต้นที่เป็นกลูโคส

ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะทางเคมีและองค์ประกอบของสาร SMP มีหลายประการ ได้แก่ อายุตะกอน, ระยะเวลาการกักกั้นน้ำ, สภาพอากาศ, ชนิดของสารตั้งต้น, ความเข้มข้นของสารชีวมวล, อุณหภูมิ และลักษณะของถังปฏิกรณ์ (Barker and Stuckey, 1999) Kuo *et al.* (1996) ทำการศึกษาในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ โดยการป้อนกลูโคสและอะซิเตทเข้าสู่ระบบบำบัด และเพิ่มอายุตะกอนจุลินทรีย์จาก 15 วัน เป็น 56 วัน พบว่ามีการเพิ่มปริมาณสาร SMP มากขึ้น Pribyl *et al.* (1997) ทำการศึกษาผลของอายุตะกอนจุลินทรีย์ต่อการเกิดสาร SMP ในระบบ SBR โดยป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ระบบ พบว่าเมื่อเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบจาก 0.3 ถึง 0.6 kgCOD-kg<sup>-1</sup> MLSS<sup>-1</sup> และเพิ่มอายุตะกอนจุลินทรีย์จาก 5 วัน เป็น 15 วัน พบว่ามีปริมาณการเกิดสาร SMP ที่มากขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มากเกินไปส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ลดลง Barker *et al.* (1999) พบว่าวิธีการบำบัดน้ำเสียมีผลต่อการเกิดสาร SMP โดยศึกษาระบบไม่ใช้อากาศแบบ Anaerobic baffled reactor (ABR) โดยมีค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์สูง และค่า VSS มากพบว่าสาร SMP มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งเป็นผลมาจากการแตกตัวของเซลล์

การศึกษาเกี่ยวกับผลของสาร SMP ต่อการอุดตันเยื่อกรอง ของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (Membrane Bioreactor, MBR) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันเยื่อกรอง ได้แก่ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) โดยพบว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำสูงทำให้อัตราการอุดตันลดลง เนื่องจากค่าความต้านทานของการเกิดชั้นเค้กลดลง (Kang *et al.* 2003 ; Kim *et al.* 2006) หรือลดจำนวนฟล็อกขนาดเล็กลง (Jin *et al.* 2006) ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง มีการเพิ่มอายุตะกอนจุลินทรีย์ (SRT) จาก 30 วัน เป็น 100 วัน ส่งผลให้การอุดตันบนเยื่อกรองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดการสะสมของสารที่ทำให้เกิดการอุดตัน และเพิ่มค่าความหนืดของตะกอนจุลินทรีย์ (Han *et al.* 2005) ระยะเวลาการกักกั้นทางชลศาสตร์ (HRT) ที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน โดยพบว่า การลด HRT ลงทำให้ความเข้มข้นของสารในกลุ่ม



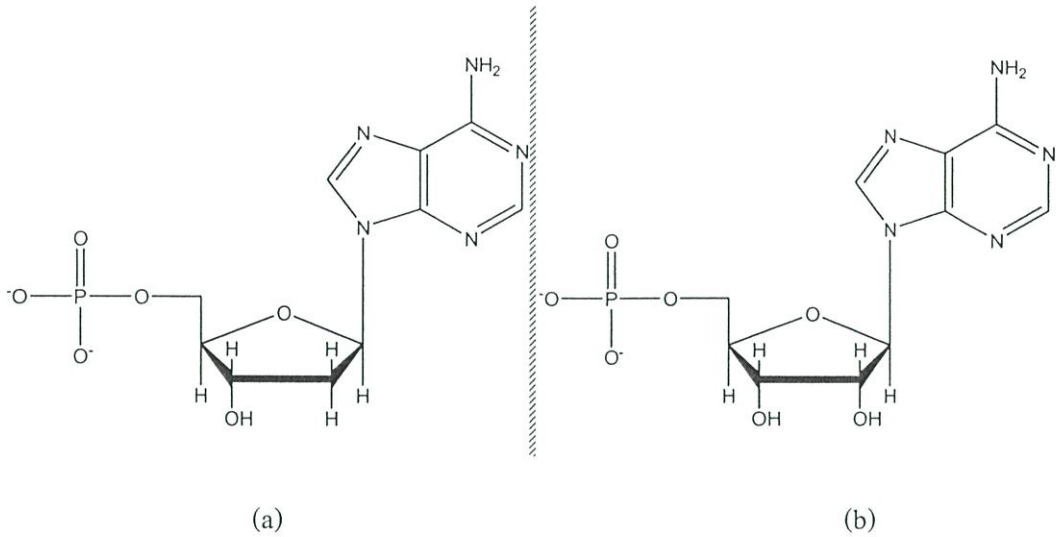
(2) ลิพิดและกรดไขมัน กรดไขมัน เป็นองค์ประกอบของลิพิด ซึ่งมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ลิพิดบางชนิดประกอบไปด้วยคาร์บอน 3 ตัวที่มาจากแอลกอฮอล์ (Glycerol) ลิพิดทั่วไปเรียกว่าไตรกลีเซอไรด์ เพราะว่ามีกรดไขมัน 3 ตัวเชื่อมกันกับโมเลกุลกลีเซอรอล ซึ่งลิพิดเชิงซ้อนบางตัวประกอบไปด้วยฟอสเฟต ไนโตรเจน หรือซัลเฟอร์หรือกลุ่มไฮโดรฟิลิกคาร์บอนสายสั้น ๆ เช่น น้ำตาล โคเลสเตอรอล หรือเอทานอลามีน เป็นต้น ฟอสโฟลิพิดมีความสำคัญเพราะเป็นส่วนสำคัญในโครงสร้างของไซโทพลาสมิก เมมเบรน ซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวกั้นระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ ซึ่งสูตรโครงสร้างของไตรกลีเซอรอลและฟอสโฟลิพิด ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สูตร โครงสร้างอย่างง่ายของ (a) triacylglycerol และ (b) phospholipids

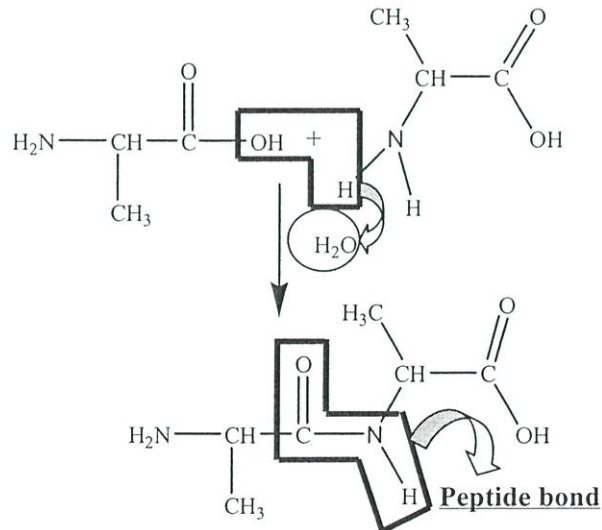
(Madigan *et al.* 1997)

(3) นิวคลีโอไทด์และกรดนิวคลีอิก กรดคือออกซีไรโบนิวคลีอิก (DNA) และ กรดไรโบนิวคลีอิก (RNA) เป็นพอลิเมอร์ของกลุ่มมอนอเมอร์ที่เรียกว่า นิวคลีโอไทด์ ซึ่งนิวคลีโอไทด์แต่ละชนิดประกอบไปด้วย 3 หน่วย คือ น้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 ตัว คือน้ำตาลไรโบส (ใน RNA) หรือดีออกซีไรโบส (ใน DNA), ไนโตรเจนเบส, และโมเลกุลของฟอสเฟต นิวคลีโอไทด์มีบทบาทสำคัญในเซลล์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อะดีโนซีน ไตรฟอสเฟต (Adenosine Triphosphate, ATP) เป็นตัวนำพลังงานเคมีที่เป็นปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์ ส่วนนิวคลีโอไทด์ชนิดอื่น ๆ หรืออนุพันธ์ของนิวคลีโอไทด์มีหน้าที่ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันภายในเซลล์ สูตรโครงสร้างของกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (DNA) และ กรดไรโบนิวคลีอิก (RNA) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 นิวคลีโอไทด์ของ (a) DNA และ (b) RNA

(4) กรดอะมิโนและโปรตีน กรดอะมิโนเป็นหน่วยย่อยของโปรตีนซึ่งกรดอะมิโนประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) และหมู่อะมิโน (-NH<sub>2</sub>) ซึ่งโปรตีนคือ พอลิเมอร์สายยาวที่มีกรดอะมิโนเรียงต่อกันและยึดด้วยพันธะเปปไทด์ บทบาทของโปรตีนที่ทำหน้าที่ในเซลล์มี 2 หน้าที่หลักคือเป็น เอนไซม์ (catalytic protein, enzymes) ในปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์และโปรตีนที่เป็นส่วนของโครงสร้าง (structural protein) จะอยู่ในส่วนของผนังเซลล์, ในเซลล์เมมเบรน และเป็นองค์ประกอบของไซโทพลาสซึม กรดอะมิโนในโปรตีนถูกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่เรียกว่าพันธะเปปไทด์ ดังรูปที่ 2.4

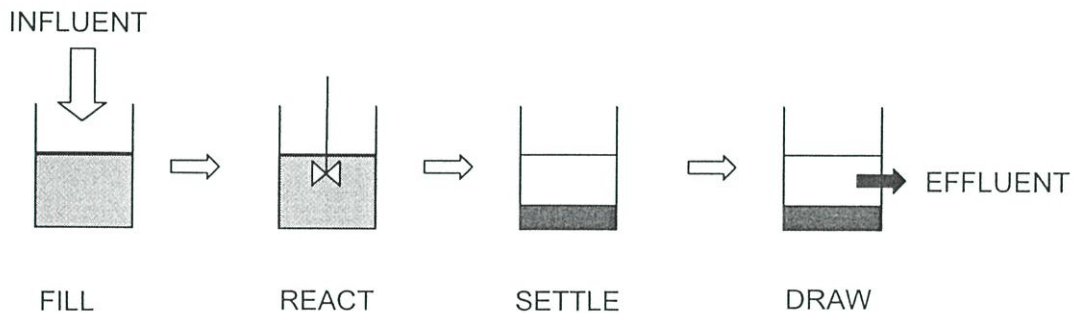


รูปที่ 2.4 พันธะเปปไทด์ในโปรตีน

## 2.2 ระบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch reactor, SBR)

ระบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch reactor, SBR) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพอีกวิธีหนึ่งโดยอาศัยหลักการของระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge, AS) ลักษณะสำคัญของระบบเอสบีอาร์นี้คือ เป็นระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบเติมเข้า-ถ่ายออก (Fill-and-Draw Activated Sludge) โดยมีขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียต่างจากระบบตะกอนเร่งแบบอื่น ๆ คือ การเติมอากาศ (Aeration) และการตกตะกอน (Sedimentation) จะดำเนินการเป็นไปตามลำดับภายในถังปฏิกริยาเดียวกัน โดยการเดินระบบบำบัดน้ำเสียเอสบีอาร์ 1 รอบการทำงานมี 4 ช่วงตามลำดับ (Grady *et al.* 1999) ดังรูปที่ 2.5

- 1) ช่วงเติมน้ำเสีย (Fill) นำน้ำเสียเข้าระบบ
- 2) ช่วงทำปฏิกริยา (React) เป็นการลดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (BOD)
- 3) ช่วงตกตะกอน (Settle) ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ตกลงก้นถังปฏิกริยา
- 4) ช่วงระบายน้ำทิ้ง (Draw) ระบายน้ำที่ผ่านการบำบัด



รูปที่ 2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (Grady *et al.*, 1999)

ในการเดินระบบ SBR ควรพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของระบบ (Metcalf and Eddy, 2004) ดังนี้

1) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ต้องไม่ต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าต่ำกว่านี้ทำให้เกิดแบคทีเรียชนิดเส้น ทำให้ตะกอนเกาะกันยาก

2) สารอาหาร จะต้องมีอาหารเสริมสร้างพอเพียงที่สำคัญได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในอัตราส่วน บีไอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 100:5:1 นอกจากนี้ยังต้องมีแร่ธาตุอื่นอีกเช่น แคลเซียมโปแตสเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก ซึ่งทำให้จุลินทรีย์ที่สร้างฟลอกได้ดีไม่เกิดจุลินทรีย์แบบเส้นใย (Filamentous)

3) อายุตะกอนจุลินทรีย์ การควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์ ทำได้โดยการนำตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินไปทิ้งหากนำไปทิ้งมากค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์ก็จะลดลงและหากนำไปทิ้งน้อยลง ค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์ก็จะเพิ่มมากขึ้น จุลินทรีย์จะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงขึ้น

- 4) ค่าพีเอช ค่าพีเอชที่ต่ำเกินไปทำให้เกิดรามมากขึ้น ควรให้มีค่าพีเอชไม่ต่ำกว่า 6.5 และสูงไม่เกิน 9 เพราะอาจทำให้อัตราการย่อยสลายของจุลินทรีย์ลดลง
- 5) อุณหภูมิ มีผลต่อค่าบีโอดี เพราะการลดลงของค่าบีโอดีจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและควรควบคุมไม่ให้เกิน 40 องศาเซลเซียส
- 6) การกวน ควรมีการปั่นกวนอย่างทั่วถึงเพื่อให้น้ำเสียได้สัมผัสกับจุลินทรีย์ และไม่เกิดการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์
- 7) ระยะเวลาในการบำบัด การบำบัดน้ำต้องใช้เวลาเพียงพอที่ให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารต่าง ๆ หากน้อยเกินไปทำให้ค่าบีโอดีเหลือในน้ำเสียมาก

### 2.3 วิธีการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้น (Pretreatment methods)

การบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นก่อนนำมาผ่านการกรองด้วยเยื่อกรองนาโนเป็นการลดการเกิดปัญหาการอุดตันบนเยื่อกรองนาโน ถึงแม้ว่าจะมีการทำความสะอาดเยื่อกรองมากกว่าเดือนละหนึ่งครั้ง ดังนั้นหากต้องการให้เยื่อกรองนาโนมีอายุการใช้งานยาวนานและเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ การบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นก่อนนำมาผ่านการกรองด้วยเยื่อกรองนาโน 2 วิธีคือ

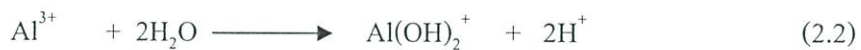
#### 2.3.1 การรวมตะกอนทางเคมี (Coagulation and Flocculation)

สารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ (Soluble microbial products, SMP) พบในน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งจะเป็นสารแขวนลอยและคอลลอยด์ละลายอยู่ในน้ำ โดยไม่สามารถแยกออกจากน้ำโดยวิธีตกตะกอนธรรมดาได้ วิธีที่ใช้แยกอนุภาคละเอียดและคอลลอยด์ออกจากน้ำเสียคือ การสร้างตะกอนรวม (coagulation) ทางเคมี เป็นกระบวนการที่ใส่สารเคมีลงไป ในน้ำเสียเพื่อทำลายแรงผลักระหว่างอนุภาคเล็ก ๆ ในน้ำ ทำให้อนุภาคสามารถเข้าใกล้กันและจับตัวกันได้ อนุภาคเหล่านี้เมื่อรวมตัวกันจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่าฟล็อก (floc) จนมีน้ำหนักจะมากพอที่จะจมลงและแยกตัวออกจากน้ำได้ในที่สุดซึ่งเป็นการทำให้คอลลอยด์ไม่แขวนลอยในน้ำได้ด้วยการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (Destabilization) (มันสิน, 2539) ซึ่งทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

1) การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layer) โดยการทำให้ชั้นประจุรอบอนุภาค คอลลอยด์อัดแน่นและแคบลง โดยการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่ง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เติมได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) และเกลือ ของแคลเซียม แมกนีเซียม อลูมิเนียม และเกลือเฟอร์ริก

2) การดูดซับและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Charge neutralization) เป็นการช่วยลดแรงผลักระหว่างตะกอนหากน้ำเสียประกอบไปด้วยคอลลอยด์ที่มีประจุลบ การเติม counter-ion ที่มีประจุสูง เช่น โลหะอลูมิเนียม (Al<sup>3+</sup>), โลหะแคลเซียม (Ca<sup>2+</sup>), โลหะเหล็ก (Fe<sup>3+</sup>) แทนโลหะโซเดียม (Na<sup>+</sup>) นอกจากจะช่วยลดระยะของ diffuse layer แล้วประจุที่ใส่ช่วยเพิ่มแรงดึงดูดให้อนุภาคคอลลอยด์เข้าใกล้มากจนเอาชนะพลังงานกีดขวางทำให้คอลลอยด์เกาะรวมกันอยู่ ได้

3) การใช้ผลิตภัณฑ์อินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ เป็นการเพิ่มการ ดักจับอนุภาคคอลลอยด์ระหว่างการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งโลหะอลูมิเนียม (Al<sup>3+</sup>)หรือเหล็ก (Fe<sup>3+</sup>) สามารถรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) และจมตัวลงมาพร้อมกับพา อนุภาคคอลลอยด์ลงไปด้วยกัน เมื่อละลายเกลืออลูมิเนียมในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ดังสมการ ที่ (2.1) – (2.4)



4) การใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ โดยโพลิเมอร์ ทำหน้าที่เป็นสะพานระหว่างอนุภาค ซึ่งโพลิเมอร์เป็นสารโมเลกุลใหญ่สามารถนำมาใช้รวม ตะกอนทางเคมีได้เรียกว่า โพลีอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) ซึ่งอาจเป็นโพลิเมอร์ที่มาจาก ธรรมชาติ เช่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแป้ง กลูโคส และสาหร่าย หรือโพลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ขึ้น (synthetic polymer) ได้แก่ โพลีอะคริลลาไมด์ (polyacrylamide) โดเดซิลแอมโมเนียมไอออน (dodecylammonium inon) เป็นต้น

### 2.3.2 การกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)

กระบวนการไมโครฟิลเตรชันเป็นกระบวนการการแยกโดยแยกอนุภาคคอลลอยด์ และ ของแข็งแขวนลอย ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าหรือเท่ากับ 0.1 ไมครอนและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง

กว่าหรือเท่ากับ 500 kDa ออกจากของเหลว ซึ่งจะต้องใช้เวลานานหากจะทำการตกตะกอนทั้งอนุภาคคอลลอยด์ และของแข็งที่แขวนลอยในน้ำทิ้ง

เยื่อกรองแบบไมโครฟิลเตรชันแบ่งออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะ โครงสร้างของรู คือ Screen filter มีโครงสร้างของรูเป็นทรงกระบอกตรง (Capillary-types pores) และ Depth filter มีโครงสร้างของรูบิดไปบิดมา (Tortuous-type pore) โดยกลไกการกักกันอนุภาคของเยื่อกรองแบบไมโครนั้น มี 2 ลักษณะดังนี้ (จันทร์ทอง, 2547)

(1) ถ้าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือเท่ากับขนาดรูของ Screen filter อนุภาคจะถูกกักไว้โดยตรงบนผิวหน้าของเยื่อกรอง ส่วนอนุภาคขนาดเล็กกว่าขนาดรูจะผ่านเยื่อกรองออกไปได้ถ้าไม่มีการอัดติดเนื่องจากความเฉื่อย (Initial impaction) และการซึมซาบ (Diffusion) ของอนุภาค

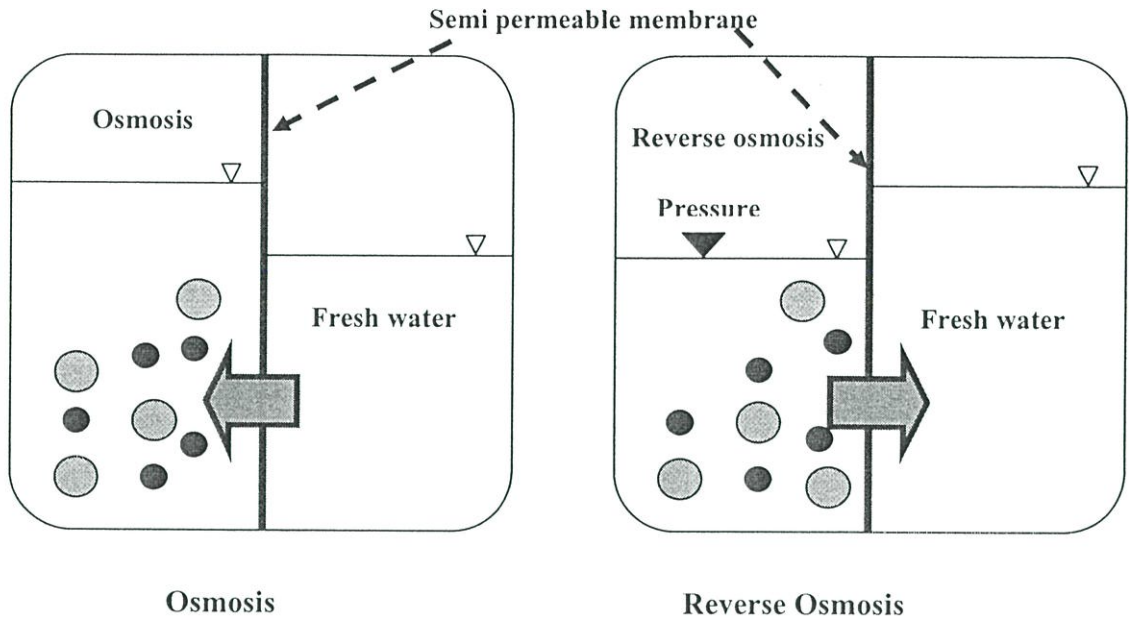
(2) การกักกันอนุภาคของ Depth filter จะเป็นลักษณะการดูดซับ (Adsorption) และการอุดติด (Entrapment) ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กจะถูกจับไว้ภายในช่องของเยื่อกรอง ยกเว้นขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากการกักกันอนุภาคของ Depth filter จะขึ้นอยู่กับความคดเคี้ยวของเส้นทางการไหล จึงสามารถกักกันอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนได้อีกด้วย

การประยุกต์ใช้งานในการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันนั้น ใช้นำงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เนื่องจากการที่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเยื่อกรองชนิดอื่น ๆ จึงนำมาใช้ในงานแยกโปรตีนขนาดใหญ่ แยกจุลินทรีย์ทั้งไวรัส แบคทีเรีย ใช้ในการกรองเบียร์หรือไวน์ และแยกของแข็งแขวนลอยที่เป็นสาเหตุของความขุ่นในน้ำ

## 2.4 นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration Process)

### 2.4.1 หลักการกรองผ่านเยื่อกรอง

หลักการกรองผ่านเยื่อกรองนั้น ได้มีการศึกษาจากหลักการของการออสโมซิสผันกลับ ซึ่งอาศัยสมบัติการแพร่ โดยปกติสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าจะแพร่ไปหาสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่า นั่นคือ น้ำหรือสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยจะแพร่ซึมผ่านเยื่อเลือกผ่าน (semipermeable membrane) ไปอีกด้านที่มีความเข้มข้นมากกว่าเพื่อทำให้เกิดความสมดุล เรียกว่ากระบวนการออสโมซิส (Osmosis) และเกิดแรงดันออสโมติกเกิดขึ้น เมื่อป้อนแรงดันที่เอาชนะแรงดันออสโมติก ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่สวนทางกันกับกระบวนการออสโมซิส และสามารถกักกันสารที่มีความเข้มข้นมากกว่าเพื่อแยกน้ำออกมา จึงเรียกว่ากระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการออสโมซิสและออสโมซิสผันทกลับ (รัตนนา, 2543)

การกรองผ่านเยื่อกรองอาศัยหลักการดังนี้

1) การละลายและการแพร่ อัตราการซึมของน้ำผ่านเยื่อกรองของ Londale (1965) ศึกษาการทำงานของระบบออสโมซิสผันทกลับ โดยอธิบายว่าตัวถูกละลายและตัวทำละลาย (น้ำ) ต่างก็ละลายเข้าไปในเยื่อกรองและเกิดการแพร่โดยผลต่างของความดันคร่อมเยื่อกรองเป็นแรงขับเคลื่อน (หรือเกิดจากอันตรกิริยาบางอย่าง เช่น การดูดซับ) และแพร่ผ่านเยื่อแผ่นต่างกัน ทำให้เกิดการแยกตัวถูกละลายและน้ำออกจากกัน การที่ตัวถูกละลายถูกกักกันโดยเยื่อกรอง แสดงว่าตัวถูกละลายสามารถละลายในเยื่อกรองได้จำกัด (รัตนนา, 2543) สมการที่ใช้คำนวณค่าฟลักซ์ แสดงดังสมการที่ 2.5

$$J_v = L_p (\Delta P - \Delta \pi) \tag{2.5}$$

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

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

$\Delta P$  คือ ความแตกต่างระหว่างแรงดันของน้ำที่อยู่คนละด้านของเยื่อกรอง (kPa) ซึ่งค่า  $\Delta P$

หาได้จาก 
$$\frac{(P_f - P_r)}{2} - P_p$$

$\Delta \pi$  คือความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมติกของน้ำที่อยู่คนละด้านกับเยื่อกรอง (kPa)

หาได้จาก 
$$\pi_{membrane} - \pi_{perm}$$

2) การไหลผ่านรูพรุน โดยให้ความเข้มข้นของตัวทำละลายและตัวถูกละลายภายในเยื่อกรองเท่ากันตลอด สารละลายจะผ่านเยื่อกรองได้ส่วนหนึ่งต้องอาศัยขนาดรูพรุนของเยื่อกรองเป็นตัวกักกันสารละลาย หากสารละลายมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนจะสามารถไหลผ่านรูพรุนตามอัตราการไหลแต่หากสารละลายมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองจะไม่สามารถไหลผ่านเยื่อกรองได้ทำให้สารนั้นติดค้างบนผิวหน้าเยื่อกรอง

#### 2.4.2 ความสามารถในการกรองด้วยเยื่อกรองนาโน

กระบวนการกรองด้วยเยื่อกรองแบบนาโนเป็นกระบวนการแยกที่ใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการถ่ายโอนมวลสาร ซึ่งสารป้อนและเพอร์มิเอตที่ได้เป็นของเหลว ความดันที่ใช้อยู่ในช่วง 3-10 บาร์ หรือ 500-1400 kPa หรือ 50-200 psi (Kilduff *et al.* 2000) กระบวนการกรองด้วยเยื่อกรองแบบนาโนคล้ายกับกระบวนการออสโมซิสผันกลับมาก แต่แตกต่างกันตรงที่ความสามารถในการแยกไอออนวาเลนซ์หนึ่ง (Monovalent ions) เช่น คลอไรด์ นั้น เยื่อกรองแบบนาโนมีความสามารถในการกักกันเพียง 50-90 % เท่านั้น โดยเยื่อกรองแบบนาโนจะยอมให้สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 200 ดัลตันผ่านไปได้ จึงยอมให้สารพวกน้ำ ไอออนวาเลนซ์หนึ่ง และสารอินทรีย์โมเลกุลต่ำ เช่น เมทานอลผ่านได้ แต่กักกันสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 ดัลตันขึ้นไป เช่น เกลืออนินทรีย์บางตัวที่เป็นไดวาเลนซ์ไอออน (Divalent ion) สารอินทรีย์พวกน้ำตาลกลูโคส ซูโครส กรดอินทรีย์ และสารอินทรีย์ที่เจอปนในน้ำทิ้ง จึงมีการพัฒนานำกระบวนการนาโนฟิลเตรชันมาใช้ในการแยกสารที่ไม่ได้เน้นการแยกเกลือออกจากสารที่ต้องการแยกความสามารถของเยื่อกรองนาโนในการกักกันสารเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อกรองแบบอาร์โอ (RO) และเยื่อกรองแบบอัลตรา (UF) แสดงในตารางที่ 2.1

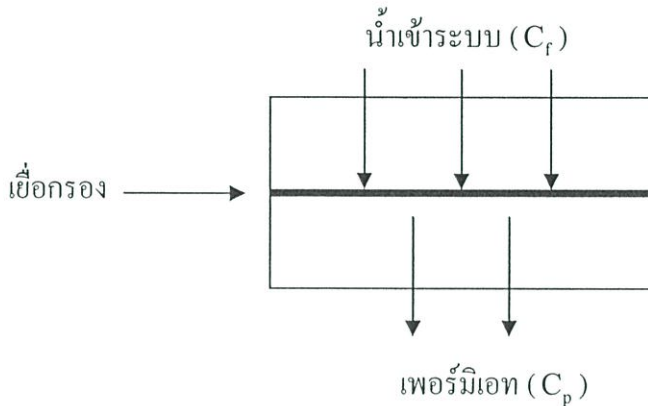
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการกักกันโดยเยื่อกรองแบบอาร์โอ เยื่อกรองแบบนาโน และเยื่อกรองแบบอัลตรา (จันทอง, 2547)

ประเภทของสาร	RO	Loose RO	NF	UF
โซเดียมคลอไรด์, NaCl	99%	70-95%	0-50%	0%
แคลเซียมคลอไรด์, CaCl <sub>2</sub>	99%	80-95%	0-60%	0%
แมกนีเซียมซัลเฟต, MgSO <sub>4</sub>	>99%	95-98%	>99%	0%
กรดไฮโดรคลอริก, HCl	90%	70-85%	0%	0%
น้ำตาลฟรุกโตส,	>99%	>99%	>99%	0%
น้ำตาลซูโครส	>99%	>99%	>99%	0%
กรดฮิวมิก	>99%	>99%	>99%	0%
ไวรัส	99.99%	99.99%	99.99%	99%
โปรตีน	99.99%	99.99%	99.99%	99%

### 2.4.3 ลักษณะการเดินระบบเยื่อกรอง

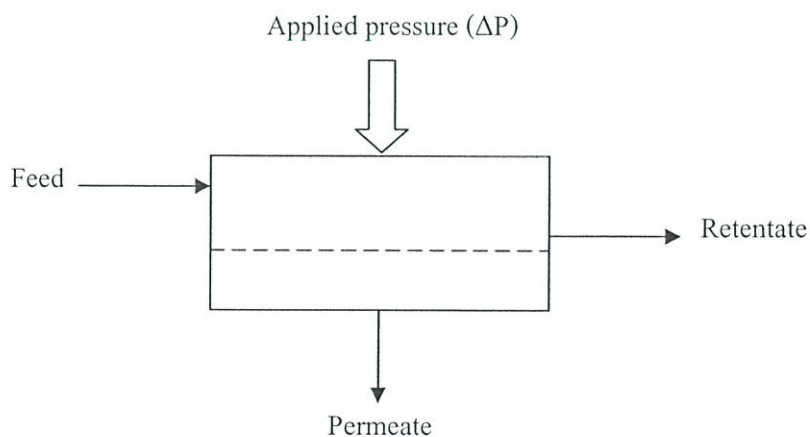
ลักษณะการเดินระบบเยื่อกรอง แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1) การกรองแบบอัดตัว (Dead-end Filtration) เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางที่ตั้งฉากกับเยื่อกรองทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อกรอง ที่เรียกว่าเค้ก (cake) การสะสมของเค้กส่งผลให้ความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้น และฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ลักษณะการเดินระบบแบบนี้ควรใช้เมื่อสารละลายประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก และมีความเข้มข้นต่ำ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การกรองบนเยื่อกรองแบบอัดตัว (Dead-end filtration)

2) การกรองไหลขวาง (Crossflow Filtration) เป็นการป้อนสารละลายขนานกับเยื่อกรอง หรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอร์มิเอต การป้อนสารละลายแบบไหลขวางมีผลของแรงเฉือน ทำให้สารละลายกวาดอนุภาคออกจากผิวหน้าเยื่อกรอง มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์ไม่มากเท่าการกรองแบบอัดตัว ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การกรองบนเยื่อกรองแบบไหลขวาง (Crossflow filtration)

## 2.4.4 การอุดตันเยื่อกรอง

การอุดตันบนเยื่อกรองมีผลต่อการกรองเป็นอย่างมาก โดยส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกรอง ทำให้ค่าฟลักซ์ที่ผ่านเยื่อกรองลดลง (Flux decline) กลไกการอุดตัน และลักษณะการอุดตันเยื่อกรองสามารถอธิบายได้ ดังนี้

### 2.4.4.1 กลไกการอุดตันบนเยื่อกรอง

การอุดตันเยื่อกรองอาจเกิดได้จากกลไก 3 ประการ คือ

#### 1) กลไกการคัดแยกขนาด (Size Exclusion)

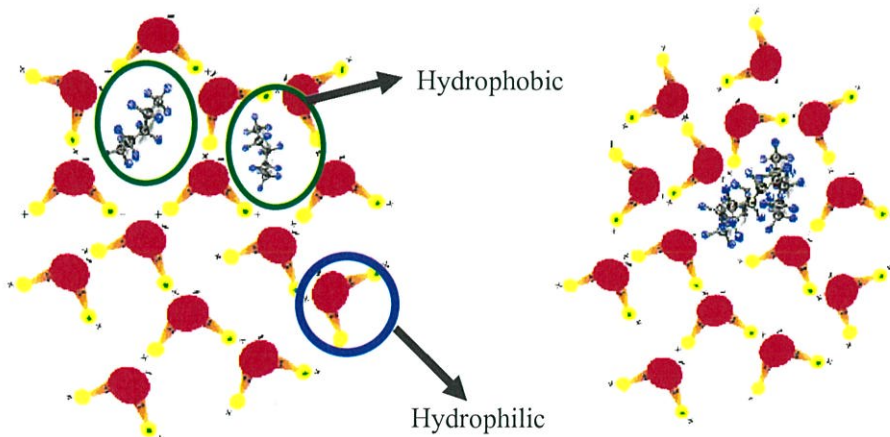
เยื่อกรองนาโนมีขนาดรูที่เล็ก ทำให้สารที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเยื่อกรองไม่สามารถที่จะผ่านออกมาได้สารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรอง อาจมีการสะสมตัวบนพื้นผิวหรือในรูพรุนของเยื่อกรองส่งผลให้ความต้านทานบนพื้นผิวเยื่อกรองสูงขึ้นและทำให้อัตราการไหลลดลง

#### 2) แรงกระทำระหว่างประจุ (Charge Interaction)

บริเวณพื้นผิวของเยื่อกรองมีประจุที่เกิดจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตในแต่ละชนิด ทำให้เกิดแรงผลักรหว่างประจุ (Electrostatic repulsion) ระหว่างตัวถูกละลายที่มีประจุชนิดเดียวกันกับพื้นผิวของเยื่อกรอง และยังมีความจุมากก็จะทำให้เกิดแรงผลักรวมกันขึ้น อย่างไรก็ตามแรงผลักรวมกันไม่มีผลมากเพราะเยื่อกรองแบบนาโนมีการใช้แรงดันที่สูง ในทางกลับกันหากประจุพื้นผิวของเยื่อกรองและตัวถูกละลายมีประจุตรงกันข้ามกัน ก็อาจเกิดการดูดติด (Electrostatic attraction) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดการอุดตันเยื่อกรองนาโนได้

#### 3) แรงไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Interaction)

แรงกระทำของส่วนที่ไม่ชอบน้ำ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การคัดแยกส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เมื่อสารที่มีขั้วล้อมรอบสารที่ไม่มีขั้ว จะเกิดแรงผลักระหว่างสารมีขั้วและสารไม่มีขั้ว โดยให้สารที่ไม่มีขั้วมารวมกันเป็นเนื้อเดียว จึงเกิดการแยกกันเกิดขึ้นระหว่างสารมีขั้วและไม่มีขั้ว แสดงดังรูปที่ 2.9



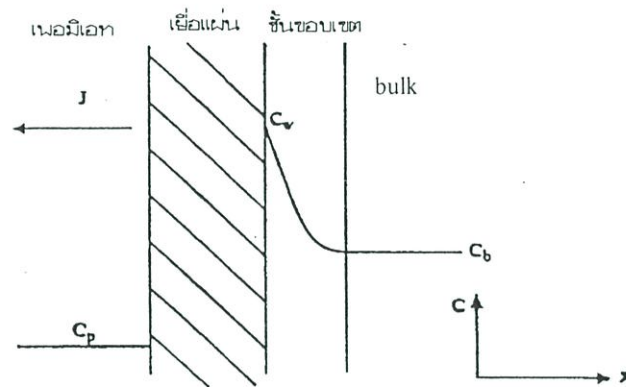
รูปที่ 2.9 ลักษณะการเกิด Hydrophobic Interaction

### 2.4.4.2 ลักษณะการเกิดการอุดตันเยื่อกรอง

การเกิดการอุดตันเยื่อกรอง อาจเกิดได้ในลักษณะดังต่อไปนี้

#### 1) ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization)

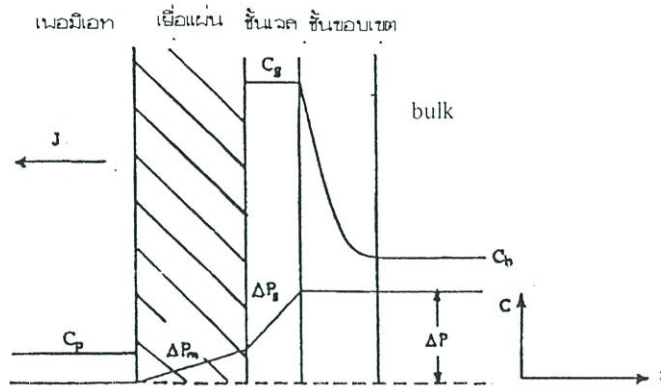
ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (CP) เป็นปรากฏการณ์ที่พบทั่วไปบนเยื่อกรอง คือ การสะสมอนุภาคและ/หรือ โมเลกุลของตัวถูกละลายที่บริเวณผิวของเยื่อกรองภายในชั้น Boundary Layer ซึ่งเป็นชั้นที่ใกล้ผิวหน้าของเยื่อกรอง โดย CP จะเกิดในสารละลายไปสิ้นสุดที่ผิวหน้าเยื่อกรอง ซึ่งในชั้นนี้จะเป็นอิสระและขาดขวางการไหลผ่านเยื่อกรอง ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง ( $C_w$ ) นี้มีความเข้มข้นสูงกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป ( $C_b$ ) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (รัตนนา, 2543)

#### 2) การเกิดชั้นเจล (Gel Layer)

ชั้นเจลเป็นชั้นของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ที่สะสมอยู่ในบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง พบมากในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ผิวหน้าเยื่อกรองสูงขึ้นอาจถึงขีดจำกัดของการละลายที่สามารถละลายได้ (Gel concentration,  $C_g$ ) ของสารตัวนั้นๆ ซึ่งตัวถูกละลายอาจมีลักษณะคล้ายกับเจลที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าเยื่อกรอง ทำให้ความต้านทานการไหลนั้นสูงขึ้นมากกว่าเดิม อัตราการไหลของสารละลายจะมีค่าลดลงจากค่าเดิม และยังทำให้ค่า Recovery สารของเยื่อกรองเปลี่ยนแปลงด้วย การเกิดชั้นเจลสามารถทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นได้โดยการเปลี่ยนสภาวะการทำงานหรือการล้างน้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้นั้นเองดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเกิดชั้นเจลบนเยื่อกรอง (รัตนา, 2543)

### 3) การเกิดชั้นเค้ก (Cake Formation)

การเกิดชั้นเค้กเป็นกลไกที่มีความใกล้เคียงกันในการเกิดของชั้นเจล แต่มีความแตกต่างกันระหว่างเค้กและเจลอยู่ที่เค้กเป็นการสะสมเป็นชั้นของอนุภาคของสารหรือสารแขวนลอย แต่เจลเป็นการสะสมของสารโมเลกุลใหญ่ ถ้าในสารมีอนุภาคที่มีขนาดเล็กและใหญ่ปนกันอยู่ อนุภาคขนาดเล็กจะถูกสะสมในรูพรุนของเยื่อกรองจนแน่น ต่อจากนั้น จะเกิดการสะสมตัวของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ตามมา แล้วเกิดเป็นเค้กที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง ซึ่งเมื่อวัดความหนาแล้วเจลจะ มีความหนาในระดับไมครอน แต่เค้กจะมีความหนาเป็นมิลลิเมตร

### 4) การอุดตันรูพรุน (Pore Blockage)

การอุดตันรูพรุนของเยื่อกรอง ส่งผลให้เกิดการอุดตันเยื่อกรอง โดยสามารถเกิดได้ในลักษณะต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.12

ถ้าเยื่อกรองมีขนาดของรูพรุนที่แน่นและมีขนาดเล็กกว่าตัวถูกละลาย ทำให้เกิดการอุดตันที่บนผิวหน้าของเยื่อกรอง (รูปที่ 2.12 (ก))

ถ้าเยื่อกรองมีขนาดของรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายเล็กน้อย ทำให้เกิดการอุดตันในรูพรุนก่อน ต่อจากนั้นจะเริ่มสะสมที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง ส่วนมากจะมีการอุดตันบนผิวหน้าเยื่อกรองเป็นส่วนใหญ่ (รูปที่ 2.12 (ข))

ถ้าเยื่อกรองมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายมาก ๆ จะทำให้เกิดการอุดตันภายในรูพรุนก่อนแล้วต่อจากนั้นจะเกิดการสะสมตัวบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง (รูปที่ 2.12 (ค))



(ก) เยื่อกรองมีขนาดรูพรุนแน่น และเล็กกว่าตัวทำละลาย



(ข) เยื่อกรองมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวทำละลายเล็กน้อย



(ค) เยื่อกรองมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายมาก ๆ

**รูปที่ 2.12** การเกิดการอุดตันรูพรุนของเยื่อที่มีรูพรุนขนาดต่าง ๆ เทียบกับขนาดตัวถูกละลาย (รัตนานา, 2543)

#### 2.4.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันเยื่อกรอง

สิ่งที่มีผลที่ก่อให้เกิดการอุดตันบนเยื่อกรอง และทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงนั้นมีหลายปัจจัยด้วยกัน ซึ่งปัจจัยเริ่มต้นมาจากคุณภาพของน้ำที่นำมาผ่านเยื่อกรอง ลักษณะของเยื่อกรอง ความดัน ความเข้มข้นของสารละลาย ความแรงประจุ (Ionic Strength) ค่าพีเอชและอุณหภูมิของสารละลาย ขนาดน้ำหนักรโมเลกุลของสาร ลักษณะการกรองผ่านเยื่อกรอง เป็นต้น โดยปัจจัยที่มีผลสามารถอธิบายได้ ดังนี้

1) **รูพรุน** ขนาดของรูพรุนหมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดความกว้างของรูพรุน ดังนั้น เยื่อกรองแบบไมโครฟิลเตรชันจัดว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ และสำหรับอัลตราฟิลเตรชันเป็นขนาดกลาง ถ้าขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร นิยมเรียกว่า เยื่อกรองแบบแน่นมากกว่าที่จะเรียกว่ามีรูพรุนขนาดเล็ก

2) **ประจุหรือความมีขั้วของเยื่อกรอง** จากการที่อัตราการไหล และค่า Recovery ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างเยื่อกรองและตัวถูกละลาย ทำให้ผู้ใช้ต้องมีความเข้าใจและสามารถที่จะเลือกเยื่อกรองให้เหมาะสมกับตัวถูกละลายที่ต้องการจะทำการแยก เช่น โพลีเอไมด์ และเซลลูโลสอะซิเตดและจะแสดงความเป็นขั้วลบเล็กน้อย ในขณะที่โพลีเมอร์อื่นๆ อาจจะมีคุณสมบัติที่เป็นกลาง สำหรับเยื่อกรองแบบนาโนส่วนใหญ่จะเป็นเยื่อเชิงประกอบซึ่งบริเวณผิวหน้าผลิตมาจากโพลีเมอร์ได้หลายชนิด และโดยส่วนใหญ่จะมีประจุที่บริเวณผิวหน้าเป็นลบ ดังนั้นจึงมีค่า Recovery สูงกับตัวถูกละลายที่มีประจุเดียวกันกับเยื่อกรอง

3) **ความดัน** สารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดใหญ่ที่สามารถเกิดเจลได้ที่มีความเข้มข้นสูง จะมีผลต่อความดันของฟลักซ์คือ ฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นกับความดันในช่วงแรกหรือก่อนเกิดเจล และในช่วงเกิดเจล แรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้ชั้นเจลอัดแน่น ฟลักซ์จึงไม่เพิ่มขึ้นแต่มีแนวโน้มคงที่ ส่วนของการกักกันจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นเจล ส่วนระบบที่ความเข้มข้นต่ำและ

ตัวถูกละลายไม่สามารถเกิดเจลได้ การเพิ่มความดันทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มมักจะช้าลงในช่วงความดันสูงขึ้น เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ Concentration polarization (CP)

#### 4) ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ (Hydrophilicity and Hydrophobicity)

เยื่อกรองที่มีสมบัติชอบน้ำจะให้มุมสัมผัส (Contact angle) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าของเยื่อกรองกับเส้นสัมผัสหยดน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0-90 องศา โดยค่ามุมสัมผัสที่ต่ำกว่า แสดงว่าสามารถทำให้เยื่อกรองเปียกน้ำได้มากขึ้น เยื่อกรองที่ชอบน้ำมาก ๆ ทำให้โมเลกุลน้ำมารวมกันเกิดเป็นชั้นน้ำบริสุทธิ์ที่ผิวหน้าของเยื่อกรอง ขณะเดียวกันจะผลักโมเลกุลของสารอื่นให้ห่างออกไปจากผิวหน้าของเยื่อกรอง จึงเกิดการถ่ายโอนเฉพาะโมเลกุลน้ำผ่านเยื่อกรองออกไปทางรูพรุน หรือในกรณีของเยื่อกรองแบบเนื้อแน่นจะเกิดการดูดซับโมเลกุลน้ำเข้าไปในเนื้อเยื่อกรองและแพร่ผ่านเยื่อกรองออกไปอีกด้านหนึ่ง ส่วนอนุภาคที่แขวนลอยในน้ำ มักมีสมบัติไม่ชอบน้ำมีแนวโน้มชอบจับตัวกันเป็นอนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particle) และชอบที่จะเข้าจับติดกับผิวเยื่อกรอง ส่งผลให้สมบัติความชอบน้ำของเยื่อกรองเสียไปทำให้เกิดการอุดตันของรูพรุนบนเยื่อกรอง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ความสกปรกของผิว” (Fouling) (จันทร์ทอง, 2545)

5) ความเข้มข้นของสารละลาย ความเข้มข้นมีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองจากการเกิด Concentration polarization ชั้นของสารที่สัมผัสผิวหน้าเยื่อกรองคือ ชั้น Boundary Layer หากสารละลายมีความเข้มข้นมากการสะสมตัวของสารละลาย เช่น สารอินทรีย์จะไปตกอยู่ในชั้นนี้ ทำให้ผิวหน้าเยื่อกรองมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงกว่าบริเวณที่ห่างจากผิวหน้าเยื่อกรองออกไป หากไม่มีความปั่นป่วนบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง จะทำให้เกิด Concentration polarization ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการอุดตันตามมา

6) ความแรงประจุ (Ionic Strength) ความแรงของประจุมิผลต่อค่าฟลักซ์ด้วยเช่นกัน จากการศึกษาผลของความแรงประจุที่มีต่อค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอทของโดยแปรค่าความแรงประจุเป็น 0.004, 0.01, 0.05 และ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ค่าพีเอช 7 พบว่า เมื่อความแรงของประจุเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทลดต่ำลง (ชฤพนธ์, 2005)

7) พีเอชและอุณหภูมิของสารละลาย การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแต่ละองศาในช่วง 15-30 องศาเซลเซียส ช่วยให้อัตราการซึมผ่านเยื่อกรองมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ประมาณร้อยละ 3-5 เพราะอุณหภูมิมิผลต่อความหนืดของน้ำ ค่าพีเอชของสารอินทรีย์ธรรมชาติ มีผลต่อค่าฟลักซ์ที่ลดลงซึ่งจากการศึกษาของ Kilduff (2004) ทำการทดลองที่ค่าพีเอช 4 7 และ 10 พบว่าค่าความดันออสโมติกที่พีเอช 4 มีค่าต่ำกว่าที่พีเอช 7 และ 10 จึงทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ด้วยอัตราที่สูงกว่า

8) ค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ถูกกักกัน (Molecular weight cutoff, MWCO) คือ ค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารที่ถูกทดสอบที่ถูกเยื่อกรองกักไม่ให้ผ่าน 90-95 % ซึ่งขนาดน้ำหนักโมเลกุลของ เป็นปัจจัยหนึ่งที่จะใช้ทำการศึกษถึงการอุดตันของเยื่อกรอง โดยจะสังเกตการลดลง

ของค่าฟลักซ์ที่ผ่านเยื่อกรอง หากสารที่นำมากรองผ่านเยื่อกรองมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนมาก ๆ ทำให้เกิดการอุดตันได้ซึ่งจากการกรองผ่านเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันด้วยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลช่วง 6.5-22.6 กิโลดาลตัน พบว่าทำให้เกิดการอุดตันอย่างรุนแรง (Lin *et al.* 2000)

#### 2.4.4.4 ดัชนีชี้วัดการอุดตัน (Modified Fouling Index, MFI)

การตกตะกอนของอนุภาค โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคคอลลอยด์ เมื่อทำการกรองผ่านเยื่อกรองจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการลดลงของค่าฟลักซ์ การใช้ดัชนีชี้วัดการอุดตัน โดยใช้เยื่อกรองแบบไมโคร (Microfiltration) ขนาด 0.45 ไมครอน ( $MFI_{0.45}$ ) เพื่อวัดขนาดอนุภาคที่มีผลต่อการอุดตันของน้ำที่เข้าสู่ระบบเยื่อกรอง อย่างไรก็ตาม  $MFI_{0.45}$  พบว่ายังไม่มีความละเอียดพอที่จะกักกันอนุภาคขนาดเล็ก ดังนั้น จึงเริ่มพัฒนา MFI โดยการใชเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) ถูกพัฒนาให้นำมาใช้ในการวัดขนาดอนุภาคที่มีผลต่อการอุดตัน เพื่อให้มีการวัดมาตรฐานของน้ำที่เข้าสู่ระบบเยื่อกรองได้มาตรฐานที่สูงขึ้น และลดการอุดตันของเยื่อกรองเพื่อยืดอายุการใช้งานของเยื่อกรองได้อีกทางหนึ่งด้วย (Boerlage *et al.* 2003)

ดัชนีชี้วัดการอุดตัน (Modified fouling index, MFI) ถูกออกแบบให้สามารถวัดอนุภาคที่มากับน้ำที่จะเข้าสู่ระบบเยื่อกรองที่มีผลต่อการอุดตันเยื่อกรอง มีพื้นฐานมาจากกลไกการเกิดเค้กซึ่งดัชนีชี้วัดการอุดตันถูกศึกษาจากเกรเดียนต์ของสมการการเกิดชั้นเค้กกับค่าคงที่ของความดันที่ถูกพลอตในรูปของ เวลา/ปริมาตร ( $t/V$ ) เทียบกับ ปริมาตร ( $V$ ) ดังสมการที่ 2.6

$$\frac{t}{V} = \frac{\eta R_m}{\Delta PA} + \underbrace{\frac{\eta \alpha C_b}{2 \Delta PA^2}}_{MFI} V \quad (2.6)$$

เมื่อ  $V$  คือ ปริมาตรที่กรองได้

$t$  คือ เวลาที่ใช้ในการกรอง

$\Delta P$  คือ ความดันที่ใช้ผ่านเยื่อกรอง (applied transmembrane pressure)

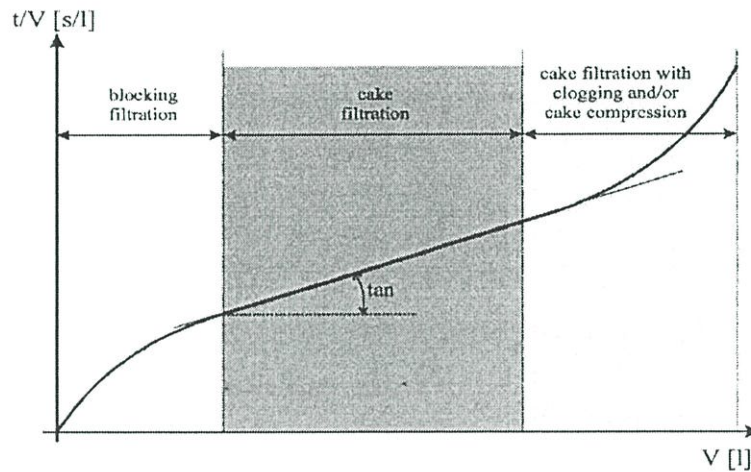
$\eta$  คือ ค่าความหนืดของน้ำ

$\alpha$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นเค้กที่เกิดการสะสม

$C_b$  คือ ค่าความเข้มข้นของอนุภาคในน้ำที่เข้าสู่ระบบเยื่อกรอง

ส่วนในการทดสอบดัชนีชี้วัดการอุดตัน โดยใช้เยื่อกรองขนาด 0.45 ไมครอน ค่า MFI-NF สามารถคำนวณได้จากค่าความชัน (tan) ที่ได้จากราฟ (รูปที่ 2.13) ซึ่งพล็อตระหว่างเวลากับปริมาตร ( $t/V$ ) เทียบกับ ปริมาตร ( $V$ ) จากราฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน

ส่วนที่ 1 กราฟจะมีความชันมาก แสดงให้เห็นว่าในช่วงนี้เกิดการอุดตันในรูพรุน  
 ส่วนที่ 2 กราฟมีความชันลดลง แสดงให้เห็นว่าในช่วงนี้เกิดการอุดตันแบบชั้นเค้ก  
 ส่วนที่ 3 เริ่มมีความชันเพิ่มขึ้น ชั้นเค้กเริ่มอัดตัวกันแน่น กลายเป็นการอุดตันแบบแน่น  
 ของชั้นเค้ก หรือเกิดชั้นเค้กเข้าไปอุดในรูพรุนและ/หรือเกิดการอัดตัวกันแน่นของชั้นเค้กบนเยื่อ  
 กรองดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 อัตราส่วนระหว่างเวลาที่ใช้กรองและปริมาตรที่กรองได้ ( $t/V$ ) เทียบกับ ปริมาตรที่กรองได้ ( $V$ ) (Boerlage *et al.* 2003)

ค่าความต้านทานของเยื่อกรอง ( $R_m$ ) มีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของเยื่อกรอง โดยขึ้นอยู่กับความหนาของเยื่อกรอง ( $\Delta x$ ) พื้นผิวของรูพรุน ( $\varepsilon$ ) รัศมีของรูพรุน ( $r_p$ ) และค่าความไค้งอ ( $\tau$ ) ดังสมการที่ 2.7

$$R_m = \frac{8\Delta x\tau}{\varepsilon r_p^2} \quad (2.7)$$

## 2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอุดตันเยื่อกรอง

### 2.5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการอุดตันเยื่อกรอง

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการอุดตันเยื่อกรองถูกพัฒนาโดย Hermia (1952) ซึ่งเสนอแบบจำลองสำหรับการกรองสารละลายที่ไม่ใช่ของไหลนิวโตเนียนเมื่อความดันคงที่และแต่ละแบบมีแนวคิดในเรื่องการอุดตันที่แตกต่างกันดังนี้

### 1) Complete pore blocking model

แสดงการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจากมีอนุภาคตกตะกอนและค้างบนผิวของเยื่อกรอง เกิดการปิดทับรูของเยื่อกรองโดยไม่ซ้อนทับกัน ทำให้จำนวนรูของเยื่อกรองลดลง ซึ่งสามารถคำนวณค่าการอุดตันดังสมการที่ 2.8 และ 2.9

$$\frac{dJ_v}{dt} = -k_A (J_v) \quad (2.8)$$

$$k_A = \frac{\alpha_{block} A_m C_{bulk} J_0}{n_0} \quad (2.9)$$

### 2) Pore constriction or standard blocking model

แสดงการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจากการกรองสารละลายขนาดเล็กกว่ารูพอร์ของเยื่อกรองมาก อนุภาคสามารถผ่านเข้าไปได้ และมีอนุภาคบางส่วนถูกคูดซับในรูพอร์ ทำให้เกิดการอุดตันภายในโครงสร้างของเยื่อกรองเท่านั้นและไม่เกิดขึ้นสะสมบนผิวหน้าของเยื่อกรอง รูพอร์ของเยื่อกรองมีปริมาตรลดลง (รัตนา, 2543) และสามารถคำนวณค่าการอุดตัน ดังสมการที่ 2.10– 2.11

$$\frac{dJ_v}{dt} = -k_B J_v^{0.5} (J_v) \quad (2.10)$$

$$k_B = \frac{2\alpha_{pore} A_m C_{bulk} J_0^{0.5}}{\pi r_0^2 \delta_m} \quad (2.11)$$

### 3) Intermediate blocking model

แสดงการลดลงของฟลักซ์คล้ายกันกับแบบ Complete pore blocking เนื่องจากเกิดการคูดซับของอนุภาคบนผิวของเยื่อกรองในช่วงระยะเวลานาน หรืออนุภาคอาจปิดบางส่วนของผิวหน้าเยื่อกรองทำให้ความหนาของการกรองเพิ่มขึ้น โมเลกุล หรืออนุภาคอาจเกิดการซ้อนทับกัน และสามารถคำนวณค่าการอุดตันได้ ดังสมการที่ 2.12 - 2.13

$$\frac{dJ_v}{dt} = -k_C J_v (J_v) \quad (2.12)$$

$$k_C = \frac{\hat{R}_C A_m C_{bulk}}{(R_m + R_C)} \quad (2.13)$$

#### 4) Cake formation model

แสดงการลดลงของฟลักซ์ที่มาจากกรองที่มีขนาดแตกต่างกันคือ ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน อนุภาคจะสะสมและเกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเยื่อกรอง แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กและใหญ่ผสมกัน อนุภาคขนาดเล็กจะถูกสะสมในรูพรุน และต่อมาจะเกิดการสะสมของอนุภาคขนาดใหญ่ เกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเยื่อกรอง จนเยื่อกรองสามารถกักโมเลกุลหรืออนุภาคที่มีขนาดเล็กไว้เกิดเป็นชั้นบางบนเยื่อกรอง (รัตนา, 2543) สามารถคำนวณค่าการอุดตันได้ ดังสมการที่ 2.14 - 2.15

$$\frac{dJ_v}{dt} = -k_D J_v^2 (J_v) \quad (2.14)$$

$$k_D = \frac{\alpha_{cake} C_{bulk}}{J_0 R_m} \quad (2.15)$$

#### 2.5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม

จากสมการตามกฎของดาร์ซี ค่าการลดลงของฟลักซ์เมื่อเดินระบบด้วยน้ำตัวอย่าง ที่มีปริมาณสารอินทรีย์จากการบำบัดน้ำทิ้งทางชีวภาพนั้นทำให้ค่าความต้านทานรวมของเยื่อกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากหลายกรณีนอกจากค่าความต้านทานของตัวเยื่อกรอง ( $r_m$ ) เองแล้ว เมื่อเริ่มต้นจากสารละลายจะเกิดจาก Concentration polarization ( $r_c$ ), ความต้านทานที่เกิดจากชั้นเค้ก และชั้นเจล ( $r_g$ ), การคูดซับที่สามารถทำความสะอาดได้ ( $r_{a1}$ ) และความต้านทานที่เกิดจากการคูดซับอย่างถาวร ( $r_{a2}$ ) ดังสมการที่ 2.16 - 2.17

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu r_m} \quad (2.16)$$

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu (r_t)} = \frac{\Delta P}{\mu (r_m + r_c + r_g + r_{a1} + r_{a2})} \quad (2.17)$$

เมื่อ $J_v$	คือ ค่าอัตราการไหล ( $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot kPa^{-1}$ )
$\Delta P$	คือ ค่าความดันที่ลดลง (kPa)
$\mu$	คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s)

$r_t$	คือ ค่าความต้านทานรวม ( $m^{-1}$ )
$r_m$	คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากเยื่อกรอง ( $m^{-1}$ )
$r_c$	คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้น Concentration Polarization ( $m^{-1}$ )
$r_g$	คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นเจล ( $m^{-1}$ )
$r_{a1}$	คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับที่สามารถล้างออกได้ ( $m^{-1}$ )
$r_{a2}$	คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับที่ไม่สามารถล้างออกได้ ( $m^{-1}$ )

จากสมการ ค่าความต้านทานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงเพราะค่าความต้านทานรวมสูงขึ้นค่าความต้านทานที่เกิดจากการกรองประกอบด้วยค่าต่าง ๆ มีลักษณะดังแสดงในตารางที่ 2.2 ดังนี้คือ

ตารางที่ 2.2 ความต้านทานแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนเยื่อกรองนาโน (ชโล, 2548)

ความต้านทาน	ลักษณะที่เกิดขึ้น
$r_m$ = ความต้านทานที่เกิดจากเยื่อกรอง	เกิดจากชนิดของเยื่อกรองแต่ละตัวซึ่งมีรูพรุนที่ใช้คัดแยกสารไม่เท่ากัน เยื่อกรองที่มีรูพรุนต่ำจะมีค่า $r_m$ สูงกว่าเยื่อกรองที่มีรูพรุนใหญ่กว่า
$r_c$ = ความต้านทานที่เกิดจากค่าคอนเซนตรชันโพลาไลเซชัน	เกิดจากการสะสมความเข้มข้นในชั้น Boundary เกิดแรงดันออสโมติกสูง หรือสารเกิดการสะสมตัว
$r_g$ = ความต้านทานที่เกิดจากชั้นเจล	เมื่อผิวหน้าเยื่อกรองมีความเข้มข้นสูงจนเกินขีดจำกัดของการละลายของสาร ในน้ำจะมีลักษณะคล้ายเจลเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง
$r_{a1}$ = ความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับอย่างอ่อน	เกิดการดูดซับบนผิวหน้าของเยื่อกรอง ล้างออกด้วยสารเคมีได้
$r_{a2}$ = ความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับอย่างถาวร	เกิดการดูดซับอย่างถาวร ติดแน่นกับเยื่อกรอง ทำความสะอาดด้วยสารเคมีไม่ได้

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Laspidou and Rittmann (2002) อธิบายเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างสารที่เป็นผลิตภัณฑ์ของจุลินทรีย์ ซึ่งมี 3 กลุ่มคือ เอนไซม์นอกเซลล์ (extracellular polymeric substance, EPS), สาร SMP , และ inert biomass สาร SMP คือกลุ่มสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด แต่ EPS อาจเกี่ยวข้องกับส่วนที่เป็นของแข็งที่เกิดจากเซลล์และไม่ละลายน้ำซึ่ง EPS แบ่งเป็น 2 แบบ คือ bound EPS คือมาจากพอลิเมอร์เซลล์, ก้อนพอลิเมอร์ที่รวมตัวแน่นเป็นเจล หรือกลุ่มพอลิเมอร์ที่เสีย

พันธะ และ soluble EPS คือมาจากส่วนที่เป็นเมือก คอลลอยด์ของเซลล์จุลินทรีย์ ส่วนมวลเฉื่อย หรือ inert biomass เป็นกลุ่มของ bound EPS ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ซึ่งเป็นกลุ่มเซลล์ที่ตายแล้ว

**Park et al. (2005)** ศึกษาถึงศักยภาพของการดูดซับทางชีวภาพบนเยื่อกรองแบบนาโนชนิดต่าง ๆ กัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับแบคทีเรียและสารชีวภัณฑ์ที่ละลายน้ำ (SMP) โดยได้ทำการสังเคราะห์ สาร SMP จากแบคทีเรียชนิด *Flavobacterium lutescens* ทำการศึกษาการแพร่ผ่านของสาร SMP บนเยื่อกรอง 2 ชนิด คือ ESNA1-LF และ HL พบว่าอัตราการกำจัด ( $R_{obs}$ ) ของเยื่อกรอง ESNA1-LF นั้นมีค่าสูงกว่าแบบ HL และในเยื่อกรองแบบ HL membrane มีความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านได้ ( $P_m = 7.53 \times 10^5$  cm/s) ซึ่งสูงกว่าแบบ ESNA1-LF ( $P_m = 6.48 \times 10^5$  cm/s)

**Huang et al. (2000)** ศึกษาเกี่ยวกับสารชีวภัณฑ์ที่ละลายน้ำที่อยู่ในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (Membrane Bioreactor; MBR) ซึ่งเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 250 วันค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์ 20 วันและใช้เวลาเก็บน้ำ 8.3 ชั่วโมง โดยติดตั้งเมมเบรนแบบจมตัว จากการศึกษาพบว่าค่าการกำจัด COD, BOD และ TOC ให้ผลที่น่าพอใจคือร้อยละ 90 95 และ 94 จากการสะสมของค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในถังปฏิกรณ์และการสลายตัวของจุลินทรีย์ หลังจากเดินระบบถูกศึกษาพบว่ามีการที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 100,000 ถึง ร้อยละ 34 และระหว่างการลดลงของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์พบว่าสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ลดลงถึงร้อยละ 14 ส่วนสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 3000 นั้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 33 เป็นร้อยละ 52 ซึ่งการสะสมของสารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic carbon) อยู่ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และมีอิทธิพลในด้านลบต่อค่าการซึมผ่านของเมมเบรนในถังปฏิกรณ์

**Shon et al. (2004)** ศึกษาวิธีการบำบัดเบื้องต้นของน้ำทิ้งที่มาจากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ วิธีการบำบัดเบื้องต้น ได้แก่ การรวมตะกอนด้วยวิธีการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ), การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Powder activated carbon, PAC), การรวมตะกอนตามด้วยการดูดซับ จากการทดลองพบว่าวิธีการที่เหมาะสมในการบำบัดเบื้องต้นคือ การรวมตะกอนแล้วตามด้วยการดูดซับ โดยสามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดได้ถึง 90 % และเมื่อนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีรวมตะกอนแล้วตามด้วยการดูดซับไปกรองผ่านเยื่อกรองแบบ UF รุ่น NTR 7410 พบว่า ค่า contact angle ของเยื่อกรองที่เดินระบบด้วยน้ำที่ทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีนี้มีค่าใกล้เคียงกับเยื่อกรองที่สะอาด คือมีค่าเท่ากับ 64 (เยื่อกรองสะอาดมีค่า contact angle เท่ากับ 69) แสดงถึงการลดลงของสารดูดซับ โดยการบำบัดเบื้องต้น

**Kim et al. (2005)** ศึกษาเกี่ยวกับความเข้มข้นของอนุภาคนิวเคลียสที่ใช้ในการรวมตะกอนทางเคมีที่มีความเข้มข้น 1, 10 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของอนุภาคเช่นขนาด มีขนาดใหญ่ขึ้น (280  $\mu m$ ) และค่า zeta potential เท่ากับ -13.5 แต่เปอร์เซ็นต์การกำจัดสารอินทรีย์เมื่อดูจากค่าที่ไอซิงยังไม่ให้ผลดีเท่าที่ควร (-10%) ที่ความเข้มข้น 10 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้น

คิดเป็น 64 และ 83 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ลักษณะของอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลง คือมีขนาดใหญ่ขึ้น (415 และ 734  $\mu\text{m}$ ) ค่า zeta potential เท่ากับ -12.2 และ 1.7 ตามลำดับ ซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นเค้กมีค่าเท่ากับ 25.4, 6.25 และ 1.84 ตามลำดับ ( $\times 10^{13} \text{ kg m}^{-1}$ )

**Abdessemed *et al.* (2000)** ศึกษาวิธีการบำบัดเบื้องต้นของน้ำเสียชุมชนก่อนนำมาผ่านการกรองด้วยเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันด้วยการรวมตะกอนร่วมกับการดูดซับ โดยใช้เฟอรัริคคลอไรด์ 40 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นสารรวมตะกอนและผงถ่านกัมมันต์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นตัวดูดซับพบว่า พบว่ามีค่าความขุ่นเพียง 3.50 NTU เมื่อนำไปผ่านเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันพบว่ามีค่าความขุ่นเหลือเพียง 0.50 NTU

**Boerlage *et al.* (2002)** ศึกษาเปรียบเทียบเพื่อหาเยื่อกรองอ้างอิงที่เหมาะสมในการทดสอบดัชนีชี้วัดการอุดตัน (MFI-UF) โดยใช้โพลีซัลโฟน (PS) กับ โพลีอะคริโลไนไตรท์ (PAN) ทดสอบที่ค่า MWCO 1-100 kDa กับน้ำประปาซึ่งพบว่า PAN ที่ 13 kDa ทำให้เห็นกลไกของลำดับการกรองซึ่งเมื่อทดลองไปได้ประมาณ 15 h เกิดการอุดตันแบบ intermediate blocking หลังจากนั้นจึงเกิดแบบ cake filtration ที่เวลา 20 h ซึ่งการเกิดแค่นั้นถูกพิสูจน์ให้เห็นว่าเมื่อพลอตกราฟระหว่าง เวลา/ปริมาตร กับปริมาตรนั้นได้กราฟที่เป็นเส้นตรง สามารถทำความเข้าใจครั้งเดียวด้วยไซเคิลไฮโปคลอไรด์ ส่วน PS นั้นเมื่อทำการทดลองแล้วไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าเกิดกลไกแบบเค้กเมื่อทำการทดลองไปแล้ว 60-100 ชั่วโมง และการทำความเข้าใจสารเคมีบ้างหลาย ๆ ครั้ง

**Dong *et al.* (2006)** ศึกษาเกี่ยวกับผลของค่าพีเอชที่มีต่อการอุดตันบนเยื่อกรองแบบอัลตรา โดยทำการบำบัดน้ำจากแม่น้ำเบื้องต้นก่อนที่จะกรองผ่านเยื่อกรองแบบอัลตราโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต 4 มิลลิกรัมต่อลิตรใช้ในการรวมตะกอน และศึกษาที่ค่าพีเอช 7.5, 6.5 และ 5.5 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าน้ำที่รวมตะกอนที่พีเอช 7.5 สามารถกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติได้ 27.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อลดพีเอชต่ำลงที่ 5.5 สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ 44.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถลดการอุดตันแบบถาวรได้ แต่ที่พีเอชต่ำก็ทำให้เกิดการอุดตันได้จากการทดลองพบว่าที่พีเอชต่ำลงจาก 7.5, 6.5 และ 5.5 ทำให้ค่าความต้านทานรวมต่อความต้านทานเยื่อกรอง ( $R_t/R_m$ ) เพิ่มขึ้นจาก 1.92, 2.44 และ 2.78 ตามลำดับ

**Chen *et al.* (2007)** ศึกษาเกี่ยวกับผลของการบำบัดน้ำจากแม่น้ำธรรมชาติด้วยการรวมตะกอนทางเคมีที่มีผลต่อการอุดตันบนเยื่อกรองแบบอัลตรา โดยทำการรวมตะกอนทางเคมีด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต 4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการบำบัดน้ำเบื้องต้นด้วยการตกตะกอนจะเลือกกำจัดส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ออกไปจากส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ของกลุ่มสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (NOM) และยังศึกษาเกี่ยวกับน้ำหนักโมเลกุลของส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำที่แยกได้จากสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ พบว่า ส่วนที่ชอบน้ำมีน้ำหนักโมเลกุลที่เล็กกว่า คือน้อยกว่า 1 kDa และส่วนที่ไม่ชอบน้ำพบว่าจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10-30 kDa

**Nuengjamnong (2005)** ศึกษาบทบาทของสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำได้ (สาร SMP) ในการเกิดการอุดตันบนเยื่อกรอง โดยศึกษาจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่จมน้ำ จำนวน 3 ถัง ที่ระยะเวลาการกักเก็บของแข็งที่แตกต่างกันที่ 8 วัน, 20 วัน, และ 80 วัน เพื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ สาร SMP ในรูปของสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำได้ (DOC) และโปรตีน ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของ สาร SMP ในรูปสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำได้ (DOC) ไม่ขึ้นกับระยะเวลาการกักเก็บของแข็ง แต่ส่วนประกอบของโปรตีนใน สาร SMP มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการกักเก็บของแข็งเพิ่มขึ้น และจากการหาค่าความต้านทานของเค้กจำเพาะ (Specific cake resistance) ของชั้นที่เกิดการอุดตันทั้งจากตะกอนของเหลวในถังปฏิกรณ์เมื่อปฏิกิริยาครั้งที่ และจากตะกอนของเหลวที่นำมาล้างด้วยสารละลายบัฟเฟอร์สองครั้ง พบว่าความต้านทานประมาณครึ่งหนึ่งของค่าความต้านทานทั้งหมดเกิดจาก สาร SMP ซึ่งพบว่า สาร SMP เป็นส่วนประกอบหลักในตะกอนของเหลวและแผ่นฟิล์มชีวภาพ ดังนั้น สาร SMP จึงมีบทบาทสำคัญต่อการอุดตันบนเยื่อกรอง

**Jiang (2007)** ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ(SMP) ทั้งสองแบบ (UAP และ BAP) ที่ได้จากถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน จากการวิเคราะห์ลักษณะของ สาร SMP แบบ UAP ก่อนผ่านการกรองและหลังการกรอง มีสารในกลุ่มโปรตีนและน้ำตาลคิดเป็น 14.6, 10.1 และ 12.3, 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วน สาร SMP แบบ BAP ก่อนผ่านการกรองและหลังการกรอง มีสารในกลุ่มโปรตีนและน้ำตาลคิดเป็น 22.8, 93.4 และ 13.9, 62.4 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า สาร SMP ในกลุ่ม UAP ก่อนผ่านการกรองประกอบด้วยสารในกลุ่มโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ และกลุ่ม BAP เป็นสารในกลุ่มน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่

**Jarusutthirak et al. (2007)** ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของสารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีผลต่อการอุดตันบนเยื่อกรองนาโน พบว่าขึ้นอยู่กับจำนวนของเลขไอออน (ประจุเดี่ยว และประจุคู่) ซึ่งรูปแบบการอุดตันที่ศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแคลเซียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความแรงประจุ 0.01 และ 0.05 โมลาร์ ค่าฟลักซ์ของแคลเซียมลดลง 43 และ 43.9 เปอร์เซ็นต์ และค่าฟลักซ์ของแมกนีเซียมมีค่าฟลักซ์ลดลง 40.9 และ 41.8 เปอร์เซ็นต์ ให้รูปแบบการอุดตันเป็นแบบ pore blocking หรือการอุดตันที่ปิดบนรูเยื่อกรอง ทำให้จำนวนเยื่อกรองลดลงเนื่องจากเกิดการตกตะกอนบนผิวเยื่อกรอง นอกจากนี้การศึกษาถึงอิทธิพลของประจุลบของฟอสเฟต ( $PO_4^{3-}$ ), คลอไรด์ ( $Cl^-$ ), คาร์บอเนต ( $CO_3^{2-}$ ) และ ซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) ที่มีผลต่อการอุดตันโดยใช้ประจุบวกตัวเดียวกันคือแคลเซียม พบว่าฟอสเฟตมีค่าฟลักซ์ลดลงมากที่สุดคือ 51.1 เปอร์เซ็นต์ซึ่งฟอสเฟตมีค่าการละลายที่ต่ำมากมีผลต่อการอุดตันบนเยื่อกรองนาโน

**Jarusutthirak and Amy (2007)** ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดสาร SMP ระหว่างการย่อยสลายทางชีวภาพของสารประกอบทางอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (SBR) โดยใช้เครื่อง HPLC-HPSEC ในการวิเคราะห์หาลักษณะของสาร ผลแสดงให้เห็นว่าสารประกอบคาร์บอนที่ป้อนให้แก่ระบบใน

รูปกลูโคส ซึ่งพบว่าใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมงในการย่อยสลายกลูโคส เปลี่ยนรูปเป็นสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ซึ่งถูกเรียกว่า biomass-associated products (BAP) สาร SMP ในกลุ่ม BAP จากน้ำทิ้งของระบบเอสปีอาร์ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ ซึ่งอาจมาจากการแตกตัวของเซลล์จุลินทรีย์ (Cell lysis) สารในกลุ่มนี้มีค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะ (SUVA) ต่ำ และมีลักษณะมีขี้ว (Hydrophilic)

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) น้ำตาลทราย ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ), เกรดทางการค้า
- 2) กรดซिटริกแอซิดโมโนไฮเดรต ( $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ ), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem
- 3) กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl), เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK
- 4) แคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$  anhydrous), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fluka chemika
- 5) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab Scan
- 6) ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $Na_2HPO_4$ ), เกรดทางการค้า
- 7) โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $KH_2PO_4$ ), เกรดทางการค้า
- 8) โพลีออลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl), เกรดทางการค้า บริษัท An ISO 9001 Factory
- 9) เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba reagent
- 10) แมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem
- 11) อลูมิเนียมซัลเฟต ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$ ), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem
- 12) แอมโมเนียมซัลเฟต ( $(NH_4)_2SO_4$ ), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba reagent

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.2.1 อุปกรณ์

- 1) ชุดทดสอบระบบนาโนฟิลเตรชัน ปริมาตร 200 มิลลิลิตร รุ่น Amicon 8200 บริษัท Millipore
- 2) เยื่อกรองนาโนรุ่น NF 90-4040 บริษัท Dow Chemical
- 3) แท่งกรองขนาด 5 ไมครอนชนิด Polypropylene ยี่ห้อ Water quality
- 4) แท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอนชนิด Polypropylene ยี่ห้อ KARE-I รุ่น AP-04-250-DOE
- 5) ถังสแตนเลสทนความดันสำหรับเก็บน้ำ ปริมาตร 10 ลิตร
- 6) ตัวบรรจุแท่งกรอง (Housing Filter)
- 7) เครื่องปั่นกวน (Stirer)
- 8) เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง
- 9) นาฬิกาจับเวลา

- 10) เทอร์โมมิเตอร์
- 11) สายยางซิลิโคน
- 12) กระดาษกรอง เบอร์ 5C บริษัท Toyo Roshi Kaisha
- 13) เครื่องแก้วต่างๆ

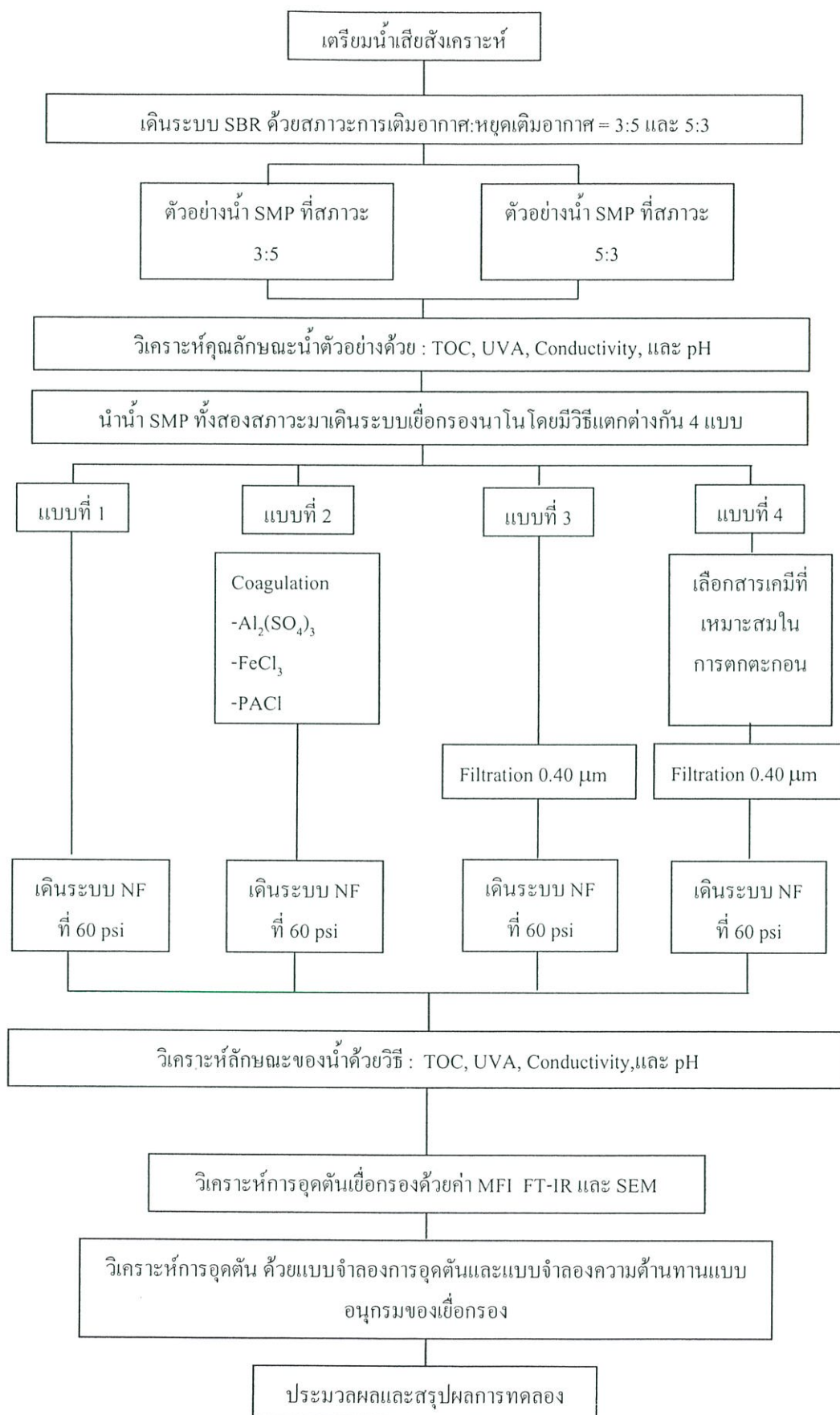
### 3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์

- 1) เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) บริษัท Denver Instrument รุ่น 215 ประเทศอังกฤษ
- 2) เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) ยี่ห้อ InoLab บริษัท WTW ประเทศเยอรมัน
- 3) เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer รุ่น Heλios α (Double beam) บริษัท Thermo Electron Coporation
- 4) เครื่องวัดความขุ่น (Turbidimeter) บริษัท Wissenschaftlich-Technische Werkstätten ประเทศเยอรมัน
- 5) เครื่องวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์รวม (Total organic carbon, TOC) รุ่น TOC-V<sub>CSH</sub> บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
- 6) เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) รุ่น Spectrum GX บริษัท Perkin Elmer ประเทศอังกฤษ
- 7) เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ Leo รุ่น 1450VP ประเทศเยอรมัน

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนในการศึกษาการบำบัดสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำในน้ำทิ้งเพื่อลดการอุดตันเยื่อกรองนาโนมีดังนี้ คือ (รูปที่ 3.1)

1. การเดินระบบ SBR ในสภาวะการเติมอากาศ : หยุดเติมอากาศ ที่ 3:5 ชั่วโมงและ 5:3 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบ SBR ด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่า TOC, ค่าการดูดกลืนแสง (UVA), ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity), พีเอช, และค่าดัชนีบ่งชี้การอุดตัน (Modified Fouling Index, MFI)
2. การศึกษาการทำงานของเยื่อกรองด้วยระบบการกรองแบบอัดตัว (Dead-end filtration unit) โดยใช้ความดันที่ 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความเร็วในการหมุนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อกรองนาโน โดยทดสอบการลดลงของค่าฟลักซ์ และความสามารถในการกักกันสารอินทรีย์
3. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดเบื้องต้นต่อประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อกรองนาโนโดยทำการบำบัดเบื้องต้น 3 วิธี ได้แก่
  - การรวมตะกอนทางเคมีเพียงอย่างเดียว ด้วยสารรวมตะกอนชนิดต่าง ๆ ได้แก่ อลูมิเนียมซัลเฟต, เฟอร์ริกคลอไรด์, โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์
  - การกรองด้วยตัวกรองไมโครขนาด 0.4  $\mu\text{m}$  เท่านั้น
  - การรวมตะกอนทางเคมีควบคู่ไปกับการกรองด้วยตัวกรองไมโครขนาด 0.4  $\mu\text{m}$
4. การวิเคราะห์การอุดตันเยื่อกรองด้วย FT-IR และ SEM และการวิเคราะห์การอุดตันด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายลักษณะการอุดตัน และเปรียบเทียบผลของการบำบัดเบื้องต้นต่อการลดการอุดตันเยื่อกรอง



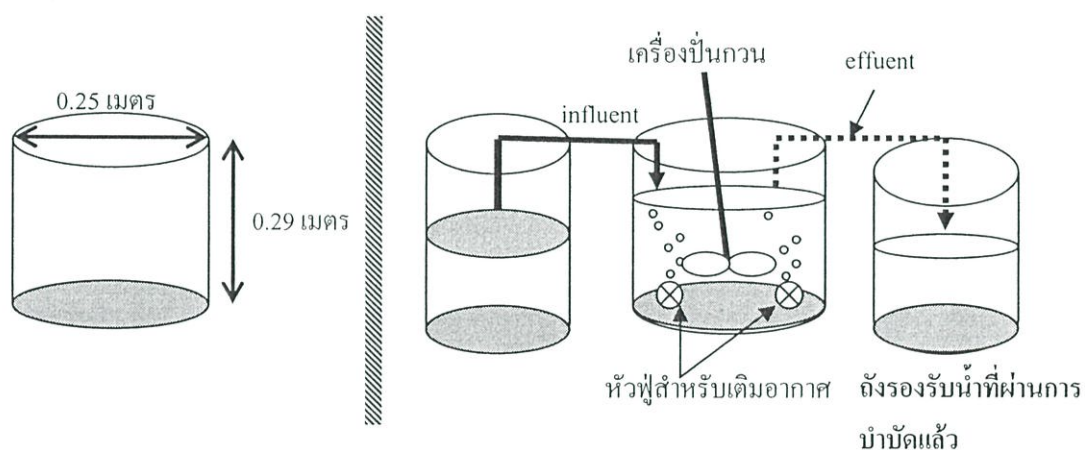
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.4 การเตรียมน้ำป้อนระบบเยื่อกรองนาโน

น้ำป้อนระบบเยื่อกรองนาโนได้จากน้ำทิ้งจากระบบเอสปีอาร์ ซึ่งมีสาร SMP จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเป็นองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ น้ำทิ้งนี้เป็นตัวแทนน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียที่เข้าสู่กระบวนการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่โดยการบำบัดด้วยเยื่อกรองนาโน ขั้นตอนการเตรียมน้ำป้อนระบบเยื่อกรองนาโน มีดังนี้

#### 3.4.1 การติดตั้งและการเดินระบบของระบบเอสปีอาร์

ระบบเอสปีอาร์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่นำมาศึกษาในครั้งนี้เป็นระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 เมตร สูง 0.29 เมตร ความจุน้ำ 14 ลิตร ภายในถังมีระบบเติมอากาศ และระบบปั่นกวน น้ำเสียจะเข้าสู่ระบบทางด้านบนของถัง โดยสูบจากถังเก็บน้ำเสียและถูกสูบออกจากระบบด้วยปั๊มคูดน้ำออก ดังรูปที่ 3.2 และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งระบบเอสปีอาร์ สรุปได้ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 การทำงานของถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบเอสปีอาร์

อุปกรณ์ที่ใช้	ขนาด, จำนวนที่ใช้
ถังพักจ่ายน้ำเสีย	80 ลิตร 1 ถัง
ถังเก็บน้ำที่บำบัดแล้ว	60 ลิตร 2 ถัง
เครื่องเติมอากาศ และเครื่องปั่นกวน	อย่างละ 2 เครื่อง
ชุดหัวจ่ายอากาศ	4 หัว
อุปกรณ์ตั้งเวลาอัตโนมัติ	5 เครื่อง
ปั๊มสำหรับจ่ายน้ำเข้าระบบ	1 เครื่อง
ปั๊มสำหรับคูดน้ำที่บำบัดแล้วออกจากระบบ	1 เครื่อง

การทำงานของระบบเอสปีอาร์มีลักษณะการทำงานแบบสลับเป็นกะ (Sequencing Batch Reactor) โดยทำงานรอบละ 8 ชั่วโมง และทำงาน 3 รอบต่อวัน ในการศึกษาที่กำหนดระยะเวลาในการเติมอากาศและหยุดเติมอากาศเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ ระยะเวลาเติมอากาศ : หยุดเติมอากาศเท่ากับ 3:5 และ 5:3 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงขั้นตอนการทำงานของระบบเอสปีอาร์

ขั้นตอนการทำงาน	ปริมาตร (ลิตร)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	
		สภาวะที่ 1 (3:5 ชั่วโมง)	สภาวะที่ 2 (5:3 ชั่วโมง)
เติมน้ำเสียเข้าระบบ (Feed)	5	0.15	0.15
เติมอากาศ (Aeration)	10	3	5
ตกตะกอน (Settle)	10	5	3
สูบน้ำส่วนใส่ออก (Draw)	5	0.15	0.15

ปัจจัยที่ศึกษาในการเดินระบบ คือระยะเวลาที่เติมอากาศและหยุดเติมอากาศ ซึ่งอาจมีผลต่อปริมาณและลักษณะของ SMP และส่งผลต่อการอุดตันของเข็กรอง ตารางที่ 3.3 แสดงปัจจัยที่ศึกษาและปัจจัยควบคุมในการเดินระบบเอสปีอาร์ น้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบเอสปีอาร์ถูกกรองด้วยกระดาษกรองซึ่งขนาดรูพรุน 2.5 ไมครอน ก่อนนำไปใช้เป็นน้ำป้อนสำหรับระบบเข็กรองนาโนเพื่อศึกษาการอุดตันเข็กรอง และการบำบัดเบื้องต้นต่อไป พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะน้ำทิ้งจากระบบเอสปีอาร์ ได้แก่ ค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC), ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ( $UV_{254}$ ) ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้า

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยควบคุมและปัจจัยที่ศึกษาในระบบเอสปีอาร์

ปัจจัยควบคุม	ปัจจัยที่ทำการศึกษา
อายุตะกอนจุลินทรีย์ (SRT) : 10 วัน	ระยะเวลาการเติมอากาศ:ระยะเวลา หยุดเติมอากาศ เท่ากับ 3:5 ชั่วโมง และ 5:3 ชั่วโมง
COD : N : P : 150 :5 :1	
ค่าพีเอช : 6.5-8.5	
ค่าออกซิเจนละลาย : 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร	
อุณหภูมิ : อุณหภูมิห้อง	
เวลากักน้ำต่อรอบ (HRT) : 8 ชั่วโมง	
ค่าความเข้มข้นของตะกอน จุลินทรีย์ (MLSS) : 2,000–3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	

### 3.4.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับระบบเอสบีอาร์

น้ำเสียสังเคราะห์ถูกเตรียมขึ้นโดยใช้น้ำตาลซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอนให้แก่จุลินทรีย์ โดยกำหนดค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ที่ 374.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเทียบเท่ากับค่าซีโอดีเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสซึ่งใช้เป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เตรียมจากแอมโมเนียมคลอไรด์ โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต โดยควบคุมให้ค่า COD:N:P เท่ากับ 150 : 5 : 1 ซึ่งสารอาหารที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.4 (Lee *et al.* 2003)

ตารางที่ 3.4 ปริมาณสารอาหารของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการเดินระบบเอสบีอาร์

สารเคมี	น้ำหนักโมเลกุล (กรัม/โมล)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม/ลิตร)
Sucrose (C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub> )	342.0	0.891
Ammonium Sulfate (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	53.5	0.167
Calcium chloride (CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O)	147.0	0.019
Magnesium sulfate (MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O)	246.5	0.017
Sodium hydrogenphosphate (Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> )	142.0	0.227
Potassium dihydrogen phosphate (KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	136.0	0.231

## 3.5 การบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้น (Pretreatment)

### 3.5.1 การรวมตะกอนทางเคมี (Coagulation and flocculation)

ทำการศึกษาหาปริมาณสารเคมีที่ใช้และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้น โดยใช้วิธีจาร์เทสต์ (Jar test) (ซึ่งแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ง) สารเคมีที่ใช้ในการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีในงานวิจัยนี้คือ อลูมิเนียมซัลเฟต (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>), เฟอริกคลอไรด์ (FeCl<sub>3</sub>) และ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) โดยปริมาณสารเคมีที่ใช้และค่าพีเอชสำหรับการทดสอบจาร์เทสต์ ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ปริมาณของสารตกตะกอนชนิดต่าง ๆ และค่าพีเอชที่ศึกษา

สารเคมี	ปริมาณสารที่ศึกษา (มิลลิกรัมต่อลิตร)
อลูมิเนียมซัลเฟต (Al-Malack and Anderson, 1996)	0, 20, 40, 60, 80, 100
เฟอร์ริกคลอไรด์ (Shon <i>et al.</i> , 2004b)	0, 50, 100, 150, 200, 250
โพสทีอูมิเนียมคลอไรด์	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0

### 3.5.2 การกรองผ่านแท่งกรองไมโครฟิลเตรชัน

น้ำที่ผ่านระบบบำบัดแล้ว นำมากรองก่อนผ่านเข้าสู่เยื่อกรองนาโนเพื่อแยกสารแขวนลอยและสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยใช้ตัวกรองดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แท่งกรองไมโครที่ใช้ในการบำบัดน้ำเบื้องต้น (ก) 5  $\mu\text{m}$  (ข) 0.40  $\mu\text{m}$

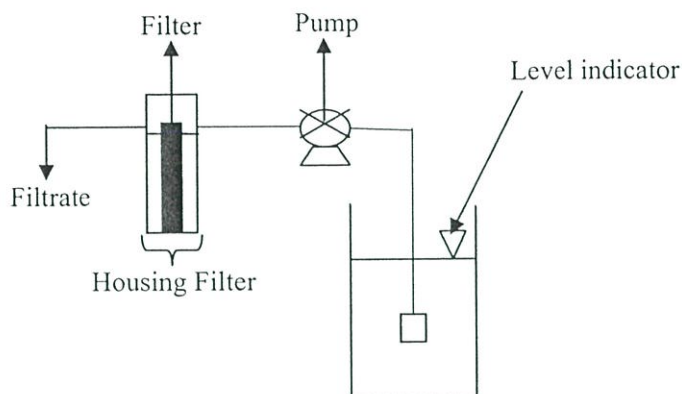
แท่งกรองไมโครขนาด 0.4 ไมครอน ทำจากวัสดุโพลีพรไพลีน ใช้ในการศึกษาวิธีการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อนป้อนเข้าระบบเยื่อกรองนาโน ซึ่งก่อนจะทำการใช้ต้องนำน้ำทิ้งจากระบบเอสปีอาร์กรองผ่านแท่งกรองไมโครขนาดใหญ่ก่อนกรองผ่านขนาด 0.4 ไมครอน โดยใช้ขนาด 5 ไมครอนเพื่อกรองอนุภาคขนาดใหญ่ จะช่วยลดการอุดตันแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอนให้ใช้ได้นานขึ้น

ระบบการกรองแบบไมโคร ประกอบไปด้วย

1) การติดตั้งตัวกรองแบบไมโคร โดยใช้ตัวกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว ยาว 10 นิ้วในตัวบรรจุแท่งกรองซึ่งมีปริมาตร 2 ลิตร และมีปั๊มสำหรับดูดน้ำจากถังเก็บน้ำ (reservoir) เข้า ตัวบรรจุแท่งกรองและผ่านตัวกรองดังรูปที่ 3.4

2) การทำความสะอาดและเก็บรักษาตัวกรอง เมื่อใช้งานระบบการกรองแบบไมโครเสร็จแล้วทำการล้างสิ่งสกปรกออกให้ได้มากที่สุดโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 โมลาร์ ปริมาตร 2 ลิตร เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ติดค้างตามผิวตัวกรอง ล้างด้วยน้ำกลั่นซ้ำเป็นครั้งสุดท้าย

เก็บใส่ถุงพลาสติกปิดให้มิดชิดเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งตัวกรองมีอายุการใช้งานประมาณ 2-3 เดือน



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการติดตั้งตัวกรองแบบไมโคร

### 3.6 การเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane)

#### 3.6.1 เยื่อกรองที่ใช้ในการทดลอง

เยื่อกรองที่ใช้เป็นเยื่อกรองแบบนาโน ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical รุ่น Filmtec NF 90-400 Nanofiltration ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อกรองแสดงในตารางที่ 3.6

ก่อนการเดินระบบ นำเยื่อกรองนาโนมาตัดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตร เก็บรักษาในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) 1% w/v เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันบนผิวเยื่อกรองซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อกรองลดลงเมื่อถูกออกซิไดซ์ไปแล้ว เช่น อาจทำให้เยื่อกรองแผ่นนั้นเกิดการอุดตันก่อนนำมาใช้งาน และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

#### 3.6.2 การทำความสะอาดเยื่อกรอง

การทำความสะอาดเยื่อกรองนาโนก่อนนำมาใช้งานมีขั้นตอนดังนี้คือ

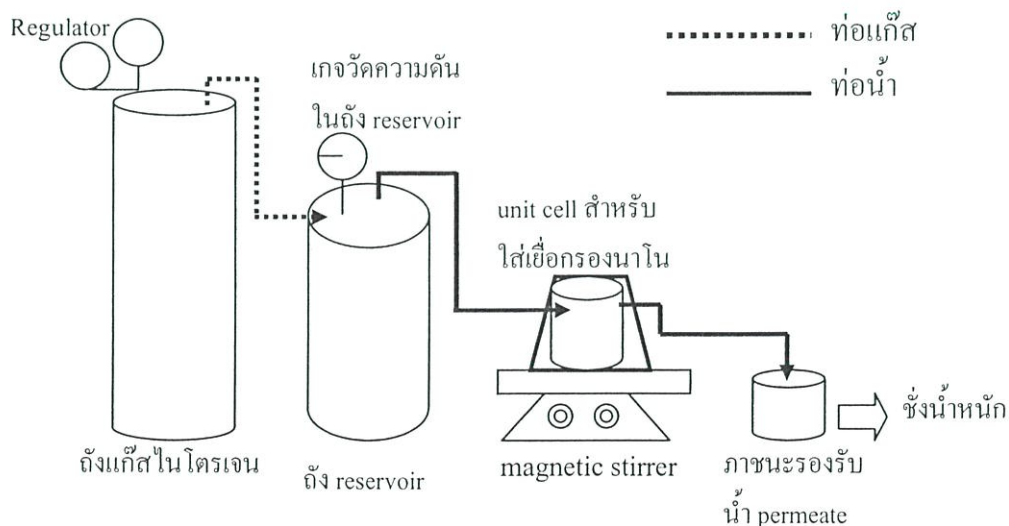
- 1) นำเยื่อกรองที่เก็บรักษาในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์มาล้างให้สะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 150 มิลลิลิตร
- 2) ล้างด้วยกรดโดยแช่ในสารละลายกรดซิตริก ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ความเข้มข้น 0.0001 โมลาร์ ปริมาตร 150 มิลลิลิตรเป็นเวลา 30 นาที
- 3) ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนอีกครั้งแล้วนำมาล้างด้วยเบสโดยการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ ปริมาตร 150 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที
- 4) ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนอีกครั้ง ปริมาตร 150 มิลลิลิตร

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อกรองนาโนที่ใช้ในงานวิจัย (www.appliedmembrane.com)

คุณลักษณะ	ข้อมูล
ประเภทของเยื่อกรอง	Thin-Film Composite
วัสดุที่ใช้ทำเยื่อกรอง	Polyamide
ขนาดครุพูน	150-300 ดาลตัน
อุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้	113° F (45°C)
ความดันสูงสุดที่ทนได้	600 psig (41 bar)
ความดันของการดำเนินการ	70-300 psi (483-2069 kPa)
ช่วงพีเอชของการดำเนินการ	3-10
ช่วงพีเอชที่ใช้ทำความสะอาด (30 นาที)	1-12
ความทนทานต่อคลอรีน	< 0.1 ppm
ค่า SDI สูงสุดของน้ำป้อนระบบ	SDI 5

### 3.6.3 การติดตั้งระบบทดสอบเยื่อกรองแบบอัดตัว

การทำงานของเยื่อกรองแบบนาโนที่เดินระบบเยื่อกรองอัดตัว (Dead-end filtration) ใช้หน่วยทดสอบเป็น Dead-end stirred cell ขนาด 200 มิลลิลิตร สามารถทนแรงดันสูงสุด 75 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ภายในมีแกนแม่เหล็กสำหรับปั่นกวน ต่อหน่วยทดสอบเข้ากับถังเก็บน้ำทิ้ง (Reservoir) ที่ใช้ในการเดินระบบซึ่งถังนี้ทำจากสแตนเลสสตีล มีปริมาตร 10 ลิตร มีเกจวัดความดันภายในถังใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซที่ให้แรงดันแก่ระบบ โดยต่อเข้าสู่ถังเก็บน้ำเสียด้วยท่อที่สามารถทนความดันสูงได้ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโนฟิลเตรชันที่เดินระบบแบบกรองอัดตัว

### 3.6.4 การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโน

การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโนใช้ชุดทดสอบเยื่อกรองซึ่งเป็นระบบกรองแบบอัดตัว (Dead-end filtration test cell) โดยมีขั้นตอนในการเดินระบบดังนี้

#### 3.6.4.1 ขั้นตอนการเดินระบบเยื่อกรองแบบนาโน

- 1) ทำความสะอาดและติดตั้งเยื่อกรองตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.6.2 และ 3.6.3
- 2) นำน้ำกลั่นทำการเดินระบบอย่างน้อย 1 ชั่วโมง วัดอัตราการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรอง เพื่อหาค่าฟลักซ์ที่คงที่ของน้ำกลั่น (Pure water permeability,  $J_0$ )
- 3) นำน้ำตัวอย่างที่ต้องการศึกษาเข้าสู่ระบบ เริ่มจับเวลาตั้งแต่ น้ำตัวอย่างผ่านเข้าสู่ระบบเยื่อกรอง
- 4) วัดอัตราการไหล 5 นาทีแรก และเก็บอย่างทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทุกๆ 20 นาทีจนถึงสิ้นสุดการเดินระบบ เพื่อศึกษาหาค่าฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการอุดตัน การเก็บตัวอย่างทำโดยใช้บีกเกอร์เก็บตัวอย่างตามเวลาที่กล่าวไปแล้ว และนำไปชั่งน้ำหนัก (เนื่องจากต้องการความแม่นยำจึงต้องชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของเพอร์มิเอท และนำไปคำนวณหาค่าฟลักซ์ ( $J_t$ ))
- 5) เก็บตัวอย่างน้ำและนำไปวิเคราะห์ค่าพีเอช สภาพการนำไฟฟ้า ค่าการดูดกลืนแสง ค่าปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด เพื่อทดสอบความสามารถของเยื่อกรองในการกักกันสาร และเก็บตัวอย่างทั้งหมด ที่เวลาเดินระบบ 0, 30, 60, 120, 180, 240 นาทีโดยเก็บตัวอย่างเพอร์มิเอทและรีเทนเทท
- 6) เก็บเยื่อกรองที่ใช้งานแล้วไปวิเคราะห์หาหลักฐานการอุดตันด้วยเครื่องมือ FT-IR และ SEM ต่อไป
- 7) การทำแบลนค์ (Blank) ให้ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่างในการเดินระบบ

#### 3.6.4.2 การทดสอบความแม่นยำของระบบ (Reproducibility)

การทดสอบความแม่นยำและความเที่ยงตรงของระบบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการทดสอบกับระบบเยื่อกรองนาโนโดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทดสอบ ทำซ้ำ 3 ครั้ง วัดค่าฟลักซ์การไหลในหน่วยลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง (LMH) นำผลที่ได้มาทำการคำนวณความแม่นยำของระบบทางสถิติที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์

### 3.7 การศึกษาการบำบัดเบื้องต้นเพื่อลดการอุดตันเยื่อกรองนาโน

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันเยื่อกรองแบบนาโน โดยใช้น้ำจากระบบ SBR ที่สภาวะการเติมอากาศ : หยุดเติมอากาศที่ 5:3 และ 3:5 ชั่วโมงมาศึกษาการบำบัดเบื้องต้นเพื่อลดการอุดตันของเยื่อกรองนาโน การศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นเพื่อลดการอุดตันแสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ตารางสรุปการศึกษาการบำบัดเบื้องต้นเพื่อลดการอุดตันเยื่อกรองนาโน

ปัจจัยที่ศึกษา	ค่าที่ศึกษา	ปัจจัยควบคุม
1. สภาวะการเติมอากาศ	สภาวะการเติมอากาศ : หยุดเติมอากาศ ที่ -3:5 ชั่วโมง -5:3 ชั่วโมง	-SRT=10 วัน -ความดัน=60 psi -ความเร็วในการปั่นกววน 300 รอบ ต่อนาที -พีเอช 4, 7 และ 9
2. ค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากระบบ เอสบีอาร์	ที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 9	-SRT=10 วัน -ความดัน=60 psi -ความเร็วในการปั่นกววน 300 รอบ ต่อนาที
3. วิธีการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้น	1. การรวมตะกอนทางเคมี ศึกษาสาร รวมตะกอน 3 ชนิด คือ -อลูมิเนียมซัลเฟต ( $Al_2(SO_4)_3$ ) ความเข้มข้น : 0, 20, 40, 60, 80, 100 ppm -เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) ความเข้มข้น : 0, 50, 100, 150, 200, 250 ppm -โพลลิอูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ความเข้มข้น : 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 ppm 2. การกรองผ่านแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน 3. การรวมตะกอนร่วมกับการกรอง - เมื่อเลือกสารเคมีที่เหมาะสมได้แล้ว ทำร่วมกับการกรองขนาด 0.4 ไมครอน	-SRT=10 วัน -ความดัน=60 psi -ความเร็วในการปั่นกววน 300 รอบ ต่อนาที

### 3.8 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

#### 3.8.1 น้ำตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพโดยใช้ระบบเอสบีอาร์ ทั้งก่อนและหลังการเดินระบบรวมทั้งน้ำที่ใช้ในการศึกษาการบำบัดเบื้องต้นและการอุดตันเชิงกรองนาโน ถูกวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์และเครื่องมือต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

พารามิเตอร์	เครื่องมือ
ค่าพีเอช	pH meter
สภาพการนำไฟฟ้า	Conductivity meter
ค่าการดูดกลืนแสง	UV-Visible spectrophotometer
ค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด	Total organic carbon analyzer (TOC)
ค่าความขุ่นของน้ำ	Turbidimeter

#### 3.8.2 การทดสอบค่าดัชนีบ่งชี้การอุดตัน (Modified fouling index, MFI)

ทำการเดินระบบเชิงกรองดังกล่าวในหัวข้อที่ 3.7 นำค่าเพอร์มิเอทที่ได้มาคำนวณหาปริมาตรสะสม (Filtrate volume, V) และคำนวณหาอัตราส่วนระหว่าง เวลา ต่อ ปริมาตรสะสม (time/filtrate volume, t/V ในหน่วย นาทีต่อมิลลิลิตร) ต่อจากนั้นนำปริมาตรสะสม (V) และ เวลา ต่อปริมาตรสะสม (t/V) มาพลอตกราฟ เพื่อหาความชัน ค่าดัชนีบ่งชี้การอุดตัน (Modified Fouling Index, MFI) ได้มาจากความชัน ดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4.3.3 (Boerlage *et al.* 2002)

#### 3.8.3 การพิสูจน์การอุดตันบนเยื่อกรอง

การพิสูจน์เยื่อกรองนาโนที่ใช้ในงานวิจัย ทั้งแบบที่ใช้แล้วและยังไม่ได้ใช้ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการอุดตันบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง ใช้เครื่องมือดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 พารามิเตอร์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การอุดตันเยื่อกรองแบบนาโน

พารามิเตอร์	เครื่องมือ
สารอินทรีย์ที่ติดค้างบนเยื่อกรอง	Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)
ภาพถ่ายและสารที่ติดอยู่บนผิวเยื่อกรอง	Scanning Electron Microscope (SEM)

### 3.9 การวิเคราะห์แบบจำลองการอุดตันเยื่อกรอง

ค่าการลดลงของฟลักซ์เมื่อเดินระบบด้วยน้ำตัวอย่าง ที่มีปริมาณสารอินทรีย์ที่มาจาก การบำบัดน้ำทิ้งทางชีวภาพนั้นทำให้เกิดการอุดตันในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งการลดลงของค่าฟลักซ์อาจเกิด จากกลไกการอุดตันเพียงแบบเดียว หรือหลาย ๆ แบบรวมกันดังตารางที่ 3.10

ในการวิเคราะห์การอุดตัน ทำได้โดยนำค่าฟลักซ์ที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะมา ทำการคำนวณจากสมการ ที่แสดงในตารางที่ 3.10 โดยใช้โปรแกรมโซลเวอร์ (Solver) ช่วยในการ ทำนายผลและคำนวณหาค่าผลรวมกำลังสอง (Sum square error, SSE) ซึ่งจะให้ค่าความถูกต้องที่ ใกล้เคียงและมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งแสดงถึงการอุดตันของการเดินระบบด้วยน้ำที่มีสารอินทรีย์นั้นเกิดการ อุดตันใกล้เคียงกับแบบจำลองชนิดใดมากที่สุด

ตารางที่ 3.10 รูปแบบการอุดตันแบบต่าง ๆ และสมการที่เกี่ยวข้อง (ชโล และคณะ, 2548)

รูปแบบการอุดตัน	สมการที่เกี่ยวข้อง	
Complete pore blocking model	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_A (J_v)$	$k_A = \frac{\alpha_{block} A_m C_{bulk} J_0}{n_0}$
Pore constriction or standard blocking model	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_B J_v^{0.5} (J_v)$	$k_B = \frac{2\alpha_{pore} A_m C_{bulk} J_0^{0.5}}{\pi r_0^2 \delta_m}$
Intermediate blocking model	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_C J_v (J_v)$	$k_C = \frac{\hat{R}_C A_m C_{bulk}}{(R_m + R_C)}$
Cake formation model	$\frac{dJ_v}{dt} = -k_D J_v^2 (J_v)$	$k_D = \frac{\alpha_{cake} C_{bulk}}{J_0 R_m}$

เมื่อทำการทดลองเสร็จแล้วนำค่าฟลักซ์ที่ได้แต่ละปัจจัยมาคำนวณด้วยสมการในตารางที่ 3.10 นำผลไปวิเคราะห์การอุดตันบนเยื่อกรองนาโน โดยใช้โปรแกรมโซลเวอร์ (Solver) ช่วยในการ ทำนายผลและคำนวณหาค่าผลรวมความผิดพลาดกำลังสอง (Sum square error, SSE) สมการที่ให้ ค่าความถูกต้องใกล้เคียงและมีค่า SSE ต่ำที่สุด แสดงถึงลักษณะการอุดตันเยื่อกรองมีความใกล้เคียง กับแบบจำลองนั้นมากที่สุด

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ ศึกษาการป้องกันการอุดตันบนเยื่อกรองแบบนาโนจากสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ ด้วยการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นวิธีต่าง ๆ ได้แก่ การรวมตะกอนทางเคมีด้วย  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $FeCl_3$  และ PACl รวมทั้งการกรองด้วยตัวกรองไมโครขนาด 0.4 ไมครอน ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานเยื่อกรองนาโน โดยศึกษาการลดลงของค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอท การกักกันสารอินทรีย์ ศึกษาดัชนีชี้วัดการอุดตันบนเยื่อกรองนาโน (MFI-NF) ของน้ำตัวอย่างที่ไม่ผ่าน และผ่านการบำบัดเบื้องต้น รวมทั้งศึกษาลักษณะการอุดตันเยื่อกรองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### 4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง

ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา ได้มาจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้แหล่งคาร์บอนที่มาจากน้ำตาลซูโครส โดยมีค่าซีโอดีเริ่มต้นประมาณ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร และผ่านการบำบัดโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch reactor, SBR) ระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีสภาวะการเติมอากาศ ต่อ หยุดเติมอากาศที่ 3 : 5 และ 5 : 3 ชั่วโมง ซึ่งในที่นี้ใช้คำว่า “สภาวะ 3:5” และ “สภาวะ 5:3” ตามลำดับแทนสภาวะดังกล่าว ตารางที่ 4.1 แสดงคุณลักษณะของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา เพื่อนำไปทดสอบกับเยื่อกรองแบบนาโน

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	สภาวะ 3:5			สภาวะ 5:3		
	ค่าที่วัดได้	เฉลี่ย	SD	ค่าที่วัดได้	เฉลี่ย	SD
พีเอช	6.40-6.90	6.50	0.18	6.50-7.15	6.85	0.45
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity, $\mu S/cm$ )	753-1565	1102	225	753-1370	1093	249
สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC, mg/L)	8.54-26.04	14.82	5.55	6.86-19.88	10.30	3.52
ค่าการดูดกลืนแสง UV <sub>254nm</sub>	0.089-0.445	0.230	0.218	0.079-0.340	0.156	0.12
ค่าความขุ่น (Turbidity, NTU)	6.30-14.57	12.30	2.30	3.00-7.31	5.50	2.10
ค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะ (SUVA, $L \cdot mg^{-1} \cdot m^{-1}$ )	1.15-3.80	1.63	1.07	1.04-4.3	1.50	0.79

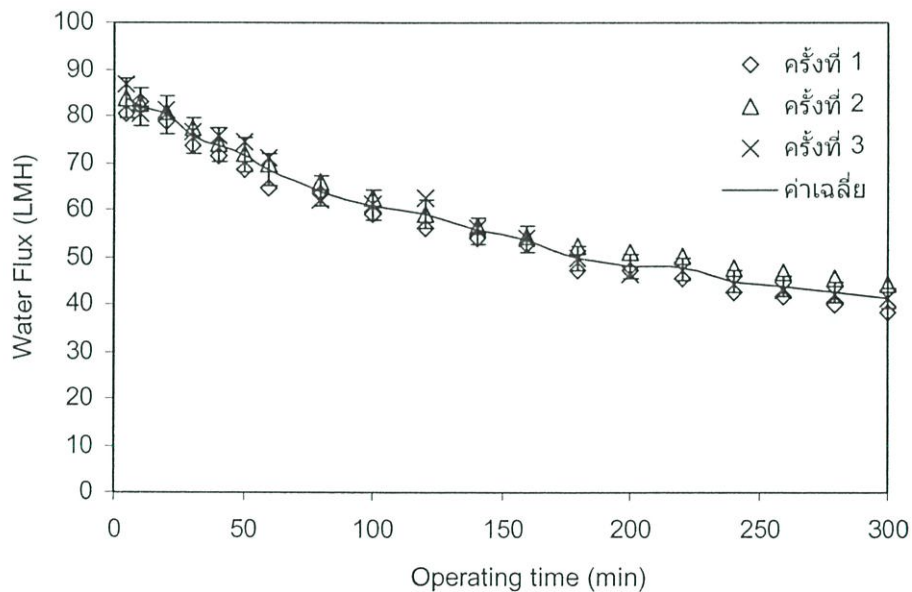
จากตารางที่ 4.1 ลักษณะของน้ำตัวอย่างซึ่งเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพในสภาวะการเติมอากาศทั้งสองแบบ พบว่าค่าที่ได้มีค่าไม่คงที่ซึ่งอาจมีผลต่อการเดินระบบด้วยเข็กรองนาโน จากค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน (TOC) และค่าความขุ่นของน้ำทิ้งจากระบบเอสปีอาร์ทั้งสองที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงผลของการบำบัดน้ำที่เวลาการเติมอากาศไม่เท่ากัน ซึ่งสภาวะ 3:5 น้ำทิ้งที่ออกจากระบบมีค่าที่ไอซี เฉลี่ยเท่ากับ 14.12 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความขุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 12.30 NTU ในขณะที่สภาวะ 5:3 มีค่าที่ไอซีเฉลี่ยเท่ากับ 10.30 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความขุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 5.50 NTU การที่ค่าที่ไอซีของน้ำทิ้งสองสภาวะมีความแตกต่างกันอาจเป็นผลจากการเติมอากาศที่แตกต่างกัน ในสภาวะ 3:5 มีการเติมอากาศเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้แก่ น้ำตาลซูโครสซึ่งพบว่าน้ำตาลซูโครสเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายและถูกย่อยสลายหมดได้ในสภาวะเติมอากาศภายในเวลา 2 ชั่วโมง (Jarusutthirak and Amy, 2007) โดยในช่วงเวลาเติมอากาศนั้นมีการเกิดเซลล์ใหม่เพิ่มขึ้นหลังจากได้รับสารอินทรีย์ เมื่อหยุดเติมอากาศ ปริมาณออกซิเจนและสารอินทรีย์ในระบบลดลง จุลินทรีย์ในระบบเกิดการขาดอาหาร เกิดภาวะเซลล์แตกตัว (Cell lysis) ทำให้สารอินทรีย์ภายในเซลล์รวมทั้งส่วนประกอบต่าง ๆ ของเซลล์ เช่น ผนังเซลล์ และเซลล์เมมเบรน ปะปนในน้ำทิ้งซึ่งเรียกว่าสาร SMP ในกลุ่ม BAP (Barker and Stuckey, 1999) สาร SMP ตรวจวัดในรูปค่าที่ไอซี ดังนั้นการที่ระบบในสภาวะ 3:5 มีค่าที่ไอซีสูงกว่าสภาวะ 5:3 อาจเกิดจากการแตกสลายของเซลล์ในสภาวะการขาดอาหาร และขาดอากาศที่ยาวนานกว่านั่นเอง ในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่ในระดับที่ต่ำเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ จึงควรทำการควบคุมการเดินระบบ ปริมาณการเติมอากาศอย่างเหมาะสมให้แก่ระบบ

น้ำทิ้งจากระบบเอสปีอาร์ทั้งสองระบบมีค่าที่ไอซี, พีเอชและ ค่าความขุ่นเฉลี่ยแตกต่างกัน โดยสภาวะ 3:5 มีค่าที่ไอซีเท่ากับ  $14.12 \pm 4.89$  มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ  $6.5 \pm 0.18$  และค่าความขุ่นเท่ากับ  $12.3 \pm 2.3$  NTU ในสภาวะ 5:3 ชั่วโมง มีค่าที่ไอซีเท่ากับ  $10.30 \pm 3.52$  มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ  $6.85 \pm 0.45$  และค่าความขุ่นเท่ากับ  $5.50 \pm 2.1$  NTU เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Kim *et al.* (2002) พบว่าน้ำทิ้งชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดขั้นที่สองมีค่าที่ไอซีอยู่ในช่วง 12.1-44.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าที่ไอซีอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างกว้างกว่าที่ทำการทดลอง เนื่องจากลักษณะของน้ำเสียที่ทำการทดลองมีซูโครสเป็นแหล่งที่ให้คาร์บอนเพียงอย่างเดียว และมีสาร SMP ในกลุ่ม BAP แต่จากการศึกษาของ Kim *et al.* (2002) สาร SMP ในกลุ่ม UAP ซึ่งเป็นกลุ่มสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนรูปเป็นสารอนุพันธ์ต่าง ๆ จากสารตั้งต้นที่จุลินทรีย์ใช้เป็นอาหารอาจย่อยสลายได้ยาก ทำให้มีค่าที่ไอซีในช่วงที่กว้างกว่า และจากการศึกษาของ Shon *et al.* (2004) พบว่าน้ำทิ้งในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมีค่าที่ไอซีอยู่ในช่วง 6.5-10.4 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งใกล้เคียงกับการทดลอง และในการทดลองพบว่ามีค่า SUVA เท่ากับ  $1.63 \pm 1.07 \text{ L.mg}^{-1} \text{ m}^{-1}$  ของสภาวะ 3:5

และ  $1.5 \pm 0.79 \text{ L.mg}^{-1} \text{ m}^{-1}$  ของสภาวะ 5:3 ซึ่งสอดคล้องกับ Shon *et al.* (2004) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันคือ  $1.66 \text{ L.mg}^{-1} \text{ m}^{-1}$

#### 4.2 การทดสอบความแม่นยำของระบบ (Reproducibility)

ก่อนการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโนในการกรองน้ำทิ้งจากระบบได้มีการทดสอบการทำซ้ำ (Reproducibility Test) เพื่อทดสอบความแม่นยำของระบบที่ใช้ในการทดลอง โดยทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งกับน้ำกลั่นที่มีค่าพีเอชเป็น 7 และนำผลที่ได้มาคำนวณค่าความแม่นยำทางสถิติ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ค่าพลักซ์ของเพอร์มีเอทที่ได้ในช่วงเวลาต่างๆ จากผลการทดสอบความแม่นยำของระบบ พบว่าการเดินระบบเยื่อกรองนาโนแต่ละครั้งที่สภาวะเดียวกันให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน โดยให้ผลที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ก-1 ภาคผนวก ก)

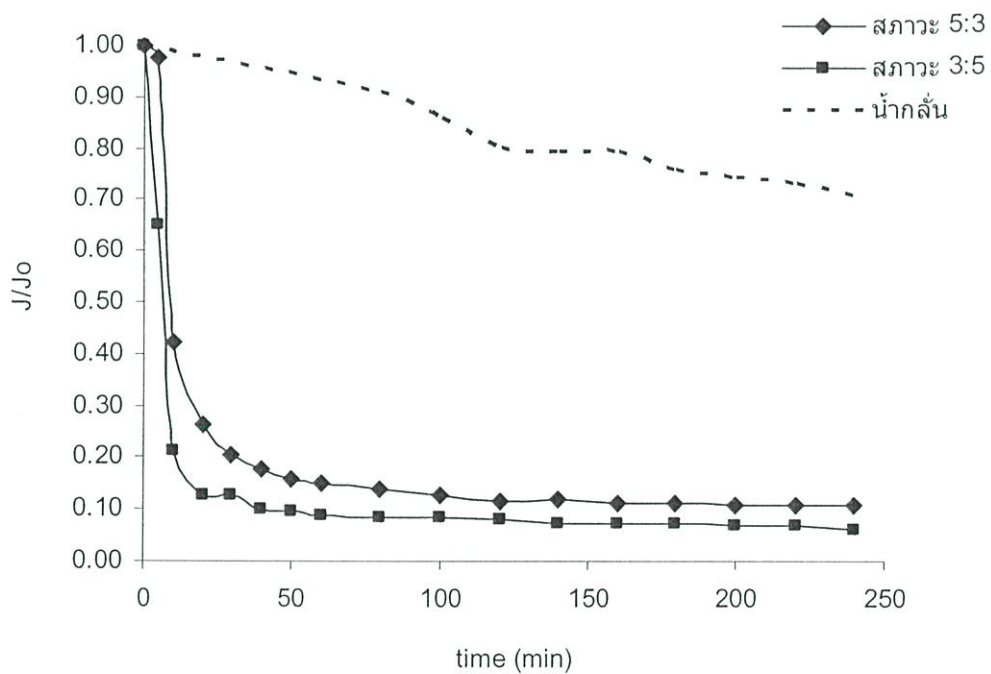


รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบความแม่นยำของระบบเยื่อกรองนาโน

### 4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์

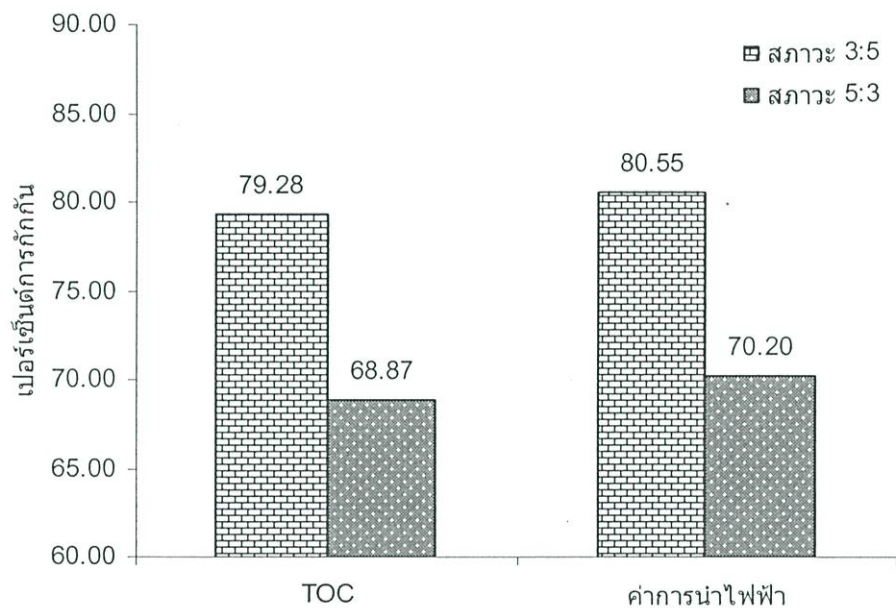
#### 4.3.1 ผลของสภาวะการเติมอากาศในระบบ SBR

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพที่สภาวะ 3:5 และสภาวะ 5:3 เมื่อนำมาเดินระบบเยื่อกรองนาโนให้ผลค่าฟลักซ์ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งพบว่าการลดลงของฟลักซ์ของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการเติมอากาศที่สภาวะ 3:5 และสภาวะ 5:3 ค่าพีเอชเท่ากับ 7 มีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกันดังรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-3 และ ก-6 ในภาคผนวก ก) จากการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าฟลักซ์ที่สภาวะ 3:5 มากกว่าสภาวะ 5:3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 93 และ 89 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แสดงถึงโอกาสการอุดตันเยื่อกรองมากกว่าสภาวะ 5:3 ค่าการลดลงของฟลักซ์มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนระบบโดยที่สภาวะ 3:5 มีค่าที่ไอซีเท่ากับ 2.30 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่สภาวะ 5:3 มีค่าเท่ากับ 22.00 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงสรุปได้ว่าสาร SMP ในน้ำทิ้งจากระบบเอสบีอาร์ มีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการอุดตันเยื่อกรองนาโน ซึ่งเป็นผลมาจากสภาวะการเติมอากาศที่แตกต่างกันนั่นเอง



รูปที่ 4.2 การลดลงของค่าฟลักซ์จากน้ำทิ้งที่สภาวะการเติมอากาศไม่เท่ากัน เมื่อเทียบกับฟลักซ์ของน้ำกลั่น

นอกจากนี้ค่าการลดลงของฟลักซ์ยังสัมพันธ์กับค่าการกักกันสารของเยื่อกรองนาโน โดยพบว่าเยื่อกรองนาโนสามารถกักกันสาร SMP และค่าการนำไฟฟ้าจากสภาวะ 3:5 มากกว่าสภาวะ 5:3 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-3 และ ก-6 ในภาคผนวก ก) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์การกักกันสารอินทรีย์ที่ถูกวัดในรูปค่าที่ไอซีเป็นเวลา 240 นาทีของน้ำสภาวะ 3:5 และสภาวะ 5:3 มีค่าเท่ากับ 79 และ 69 เปอร์เซ็นต์ และในขณะที่เปอร์เซ็นต์การกักกันค่าการนำไฟฟ้าที่สภาวะ 3:5 และ 5:3 มีค่าเท่ากับ 80 และ 70 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งการกักกันอนุภาคโดยเยื่อกรองนาโนทำให้เกิดการสะสมบนผิวหน้าเยื่อกรอง ทำให้เกิดการอุดตันขึ้นในรูปของการเกิดชั้นเจลหรือชั้นเค้ก ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nuengjamnong (2005)

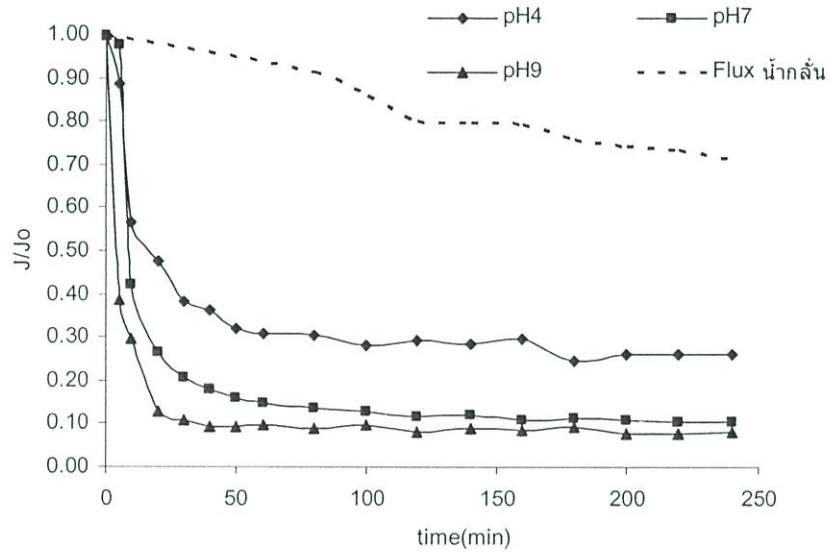


รูปที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การกักกันสารอินทรีย์ และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่สภาวะ 3:5 และ 5:3

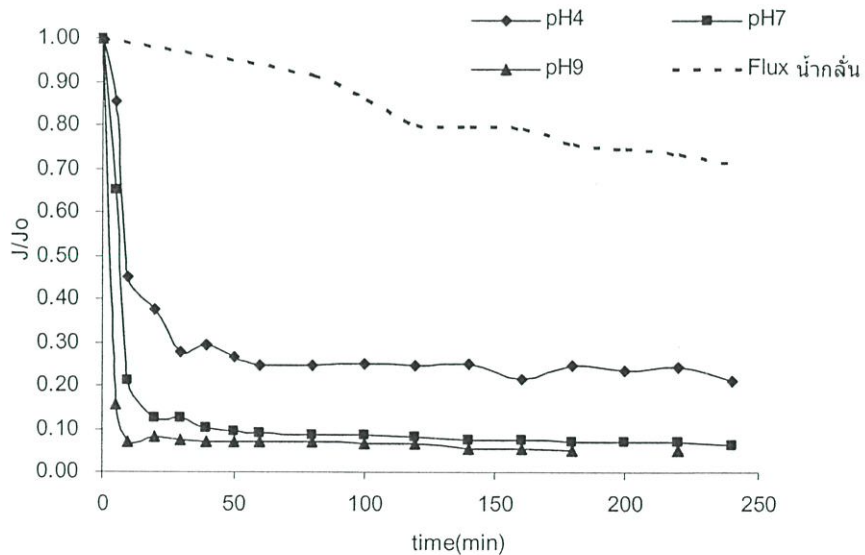
#### 4.3.2 ผลของค่าพีเอช

ในการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ โดยปรับค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 9 ดังรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) แสดงผลของค่าพีเอชต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ในสภาวะ 3:5 และสภาวะ 5:3 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดมีแนวโน้มการลดลงไปในทิศทางเดียวกัน เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าฟลักซ์ในน้ำสภาวะ 3:5 ที่พีเอช 4, 7 และ 9 มีค่าเท่ากับ 90, 93 และ 95 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และในสภาวะ 5:3 ชั่วโมง ที่พีเอช 4, 7 และ 9 มีค่าเท่ากับ 73, 89 และ 92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าน้ำป้อนระบบทั้งสองสภาวะ ที่พีเอช 4 ให้ค่าการลดลงของฟลักซ์ต่ำที่สุด ตามที่ได้กล่าวมาแล้วสาเหตุของการอุดตันของเยื่อกรองอาจเกิดจากสาร SMP และตะกอนจากสารอินทรีย์ในน้ำ ในการคัดแยกสาร SMP ซึ่งโดยส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนเยื่อ

กรองนาโน (Namkung and Rittmann, 1986) กลไกการคัดแยก เกิดจากการคัดแยกขนาด (Size Exclusion) สาร SMP ที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน เกิดการสะสมตัวบนผิวเยื่อกรองทำให้เกิดการอุดตัน ซึ่งในกรณีนี้ค่าพีเอชไม่มีผลมากเท่าใดนัก แต่ในกรณีที่การอุดตันเกิดจากตะกอนของเกลืออนินทรีย์ การที่ค่าพีเอชต่ำส่งผลให้เกลือเกิดการละลายได้ดีซึ่งเป็นผลให้ที่พีเอช 4 มีค่าการลดลงของฟลักซ์ต่ำกว่าที่พีเอช 7 และ 9 นั่นเอง



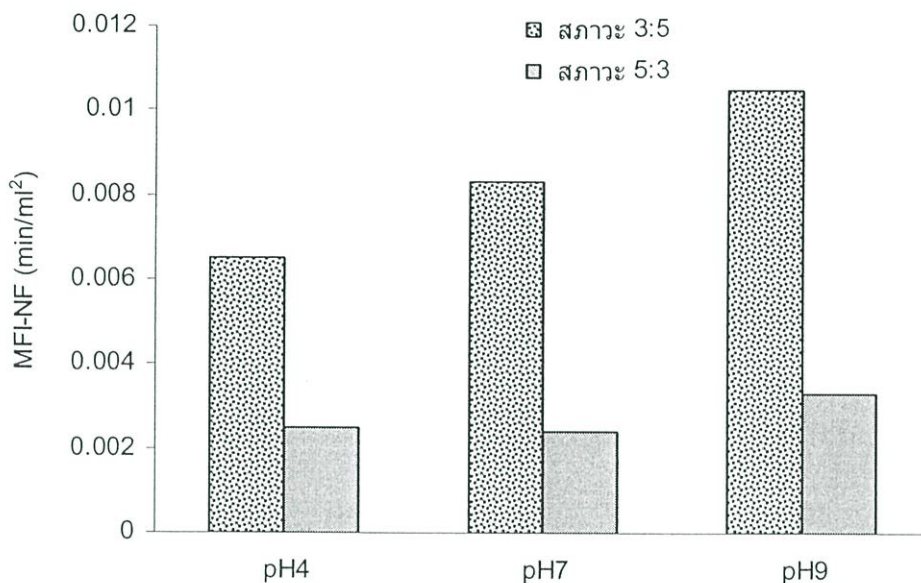
(ก) สภาวะ 3:5



(ข) สภาวะ 5:3

รูปที่ 4.4 การลดลงของค่าฟลักซ์ที่พีเอช 4, 7 และ 9 ของน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดแบบ SBR ที่สภาวะการเติมอากาศ:หยุดเติมอากาศ (ก) 3:5 (ข) 5:3

ดัชนีชี้วัดการอุดตันบนเยื่อกรองนาโน (MFI-NF) สามารถบ่งชี้โอกาสในการอุดตันเยื่อกรองนาโนได้โดยผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5 (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ก-2 ถึง ก-7 ภาคผนวก ก) พบว่าค่า MFI-NF มีความสอดคล้องกับค่าการลดลงของฟลักซ์ และที่ค่าพีเอชสูงขึ้น ค่า MFI-NF มีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้นอกจากจะเกิดจากผลของสาร SMP ที่ก่อให้เกิดการอุดตันแล้วยังอาจเกิดจากอิทธิพลของเกลืออนินทรีย์ในการเกิดตะกอน



รูปที่ 4.5 ดัชนีชี้วัดการอุดตัน (MFI-NF) ของน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดที่สภาวะการเติมอากาศ 3:5 และ 5:3 ชั่วโมง

#### 4.3.3 การศึกษาวิธีบำบัดเบื้องต้นเพื่อลดการอุดตันเยื่อกรองนาโน

##### 4.3.3.1 การรวมตะกอนทางเคมี

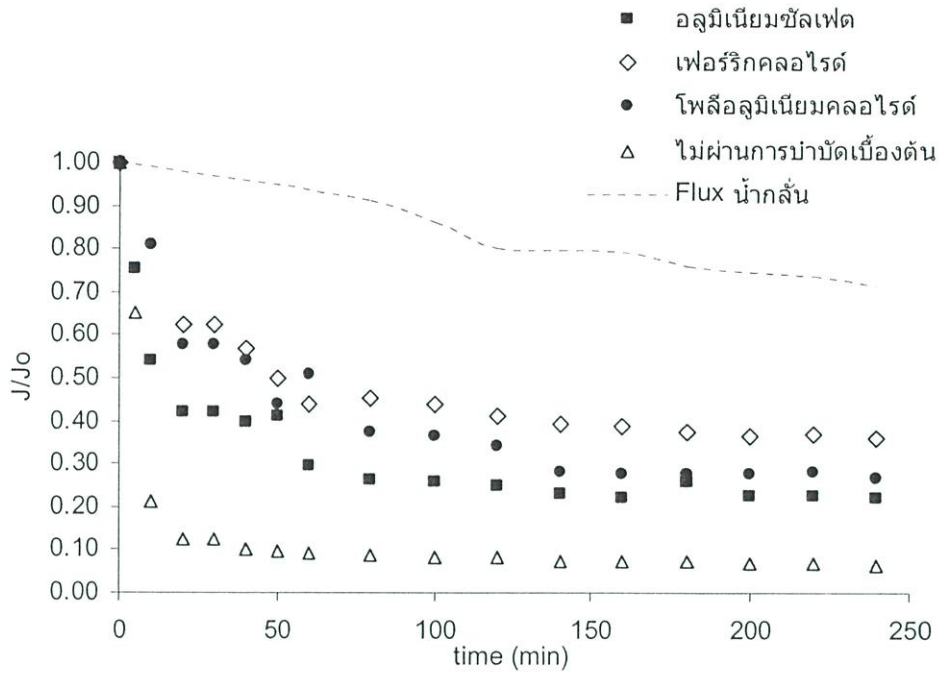
การรวมตะกอนทางเคมีทำการศึกษาสารเคมีที่นำมาใช้ในการช่วยรวมตะกอน 3 ชนิด คือ อลูมิเนียมซัลเฟต ( $Al_2(SO_4)_3$ ) เฟอริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) และ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) จากผลของการศึกษาปริมาณของสารรวมตะกอนที่ใช้ร่วมกับการวัดความขุ่นของน้ำทั้งสองสภาวะด้วยวิธีจาร์เทสต์ได้ผลปริมาณการใช้สารรวมตะกอนที่เหมาะสม รวมทั้งเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขุ่นดังสรุปในตารางที่ 4.2 (ผลการทดสอบการทำจาร์เทสต์โดยละเอียดแสดงในตารางที่ ข-1 ภาคผนวก ข) ซึ่งค่าดังกล่าวใช้ในการบำบัดเบื้องต้นสำหรับน้ำทิ้งจากระบบเอสบีอาร์ต่อไป

ตารางที่ 4.2 ปริมาณและพีเอชที่เหมาะสมในการใช้สารรวมตะกอนกำจัดความขุ่นของน้ำทั้งสองสภาวะการเติมอากาศ

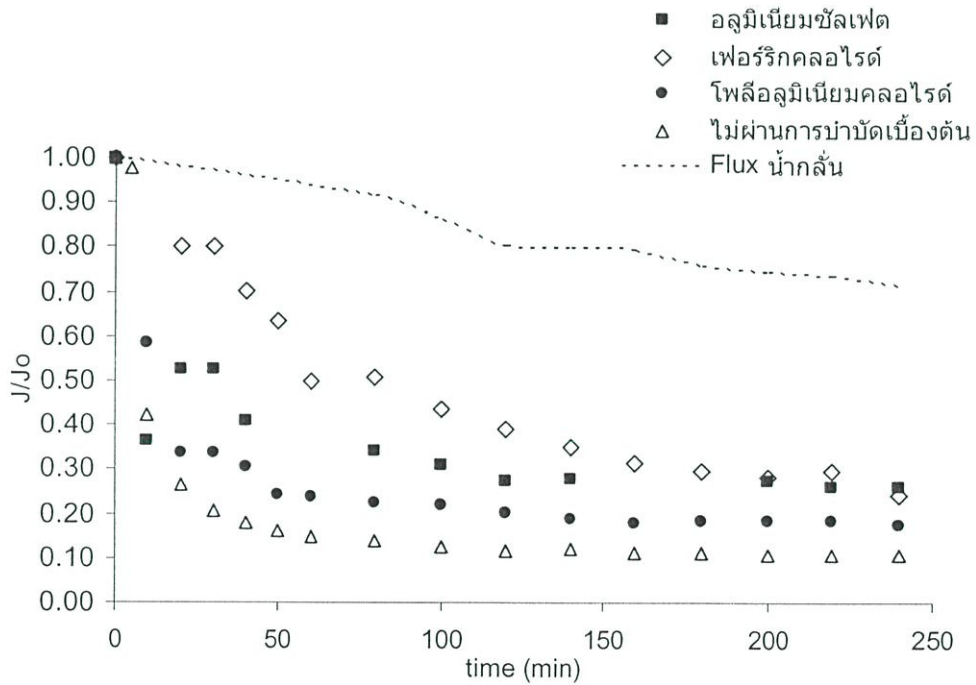
สารรวมตะกอน	น้ำทิ้งสภาวะ 3:5			น้ำทิ้งสภาวะ 5:3		
	ปริมาณที่เหมาะสม (mg/L)	พีเอชที่เหมาะสม	% การกำจัดความขุ่น	ปริมาณที่เหมาะสม	พีเอชที่เหมาะสม	% การกำจัดความขุ่น
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	70	6.36	42	3	6.90	10
FeCl <sub>3</sub>	150	4.69	63	100	5.00	18
PACl	0.2	6.58	6	0.4	6.49	23

น้ำที่ผ่านการรวมตะกอนทางเคมีด้วยสารรวมตะกอนต่าง ๆ แล้วนำมาเดินระบบเยื่อกรองนาโน พบว่าการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนทางเคมีทำให้การอุดตันเยื่อกรองนาโนลดลง รวมทั้งฟลักซ์ของน้ำมีค่าสูงขึ้นกว่าน้ำที่ไม่ได้รับการบำบัดเบื้องต้น รูปที่ 4.6 แสดงค่าการลดลงของฟลักซ์เมื่อใช้สารรวมตะกอนชนิดต่าง ๆ ในการบำบัดเบื้องต้นเพื่อป้องกันการอุดตันเยื่อกรองเปรียบเทียบกับน้ำกลั่น โดยในน้ำทิ้งสภาวะ 3:5 การรวมตะกอนโดยใช้อลูมิเนียมซัลเฟต เพอร์ริคคลอไรด์ และโพลิออลูมิเนียมคลอไรด์ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงเท่ากับ 77, 63 และ 72 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (รูปที่ 4.6 ก) ส่วนน้ำทิ้งสภาวะ 5:3 การรวมตะกอนโดยใช้อลูมิเนียมซัลเฟต, เพอร์ริคคลอไรด์ และโพลิออลูมิเนียมคลอไรด์ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงเท่ากับ 73, 70 และ 81 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.6 ข) ซึ่งค่าการลดลงของฟลักซ์ต่ำกว่าค่าฟลักซ์ของน้ำทิ้งที่ไม่ได้รับการบำบัดเบื้องต้นทั้งสภาวะ 3:5 และสภาวะ 5:3 ที่มีค่าการลดลงถึง 93 และ 89 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการบำบัดเบื้องต้น เป็นการลดปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบเยื่อกรองนาโน อันเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการอุดตันเยื่อกรอง

รูปที่ 4.7 แสดงค่า MFI-NF ของน้ำทิ้งสองสภาวะที่ยังไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นเปรียบเทียบกับน้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนทางเคมี โดยพบว่าน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีค่า MFI-NF สูง โดยน้ำสภาวะ 3:5 มีค่า MFI-NF เท่ากับ 0.0083 min/ml<sup>2</sup> ส่วนน้ำสภาวะ 5:3 มีค่า MFI-NF เท่ากับ 0.0024 min/ml<sup>2</sup> แสดงถึงโอกาสการอุดตันสูงหากนำน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นป้อนเข้าระบบเยื่อกรองนาโน เมื่อน้ำทิ้งทั้งสองสภาวะผ่านการรวมตะกอนทางเคมีด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน พบว่ามีค่า MFI-NF ลดลงเมื่อเทียบกับน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น โดยพบว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยเพอร์ริคคลอไรด์ให้ค่า MFI-NF ของน้ำสภาวะ 3:5 และ สภาวะ 5:3 ต่ำที่สุดคือเท่ากับ 0.0017 min/ml<sup>2</sup> และ 0.0005 min/ml<sup>2</sup> ตามลำดับ ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจึงเลือกใช้เพอร์ริคคลอไรด์สำหรับกระบวนการรวมตะกอนทางเคมี

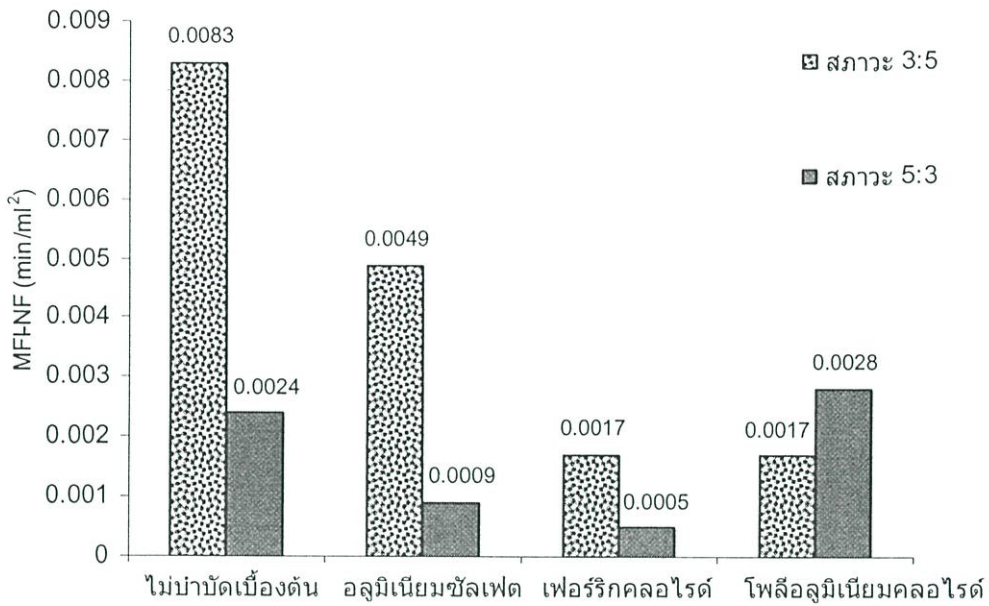


(ก) สภาวะ 3:5



(ข) สภาวะ 5:3

รูปที่ 4.6 การลดลงของค่าฟลักซ์เมื่อใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ในการรวมตะกอนทางเคมีที่สภาวะการเติมอากาศ : หยุดเติมอากาศทั้งสองแบบ (ก) สภาวะ 3:5 (ข) สภาวะ 5:3



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่า MFI-NF ของสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดเทียบกับน้ำที่ไม่ได้รับการบำบัด

การรวมตะกอนทางเคมีด้วยสารรวมตะกอนชนิดต่าง ๆ สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากระบบเอสปีอาร์ โดยแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การกักกันสารอินทรีย์ในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเฟอริกคลอไรด์ และ อลูมิเนียมซัลเฟตสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์

อย่างไรก็ตาม การรวมตะกอนทางเคมีไม่สามารถกำจัดค่าการนำไฟฟ้าให้ลดลงได้ในทางกลับกันอาจมีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการอุดตันอันเนื่องมาจากเกลืออนินทรีย์ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ก-14 ถึง ก-19 ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซนต์การกำจัดสารอินทรีย์และค่าการนำไฟฟ้าเมื่อรวมตะกอนด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน

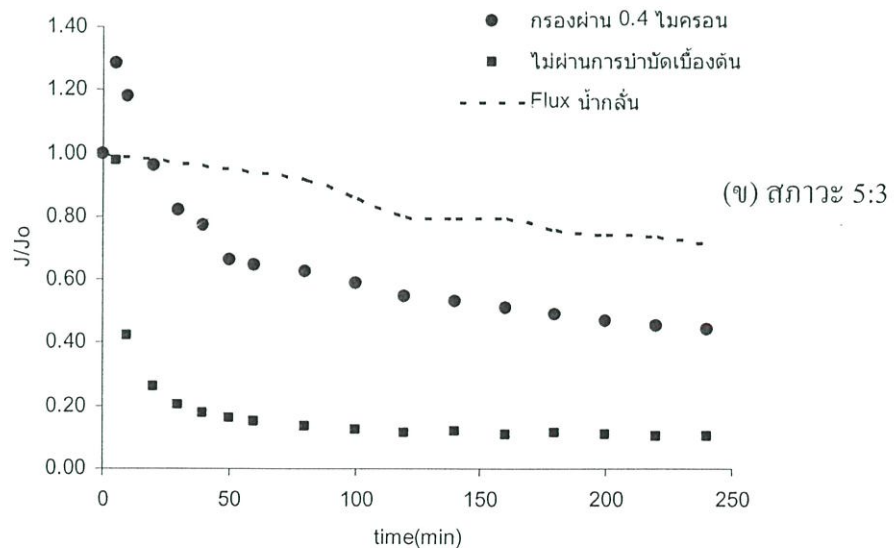
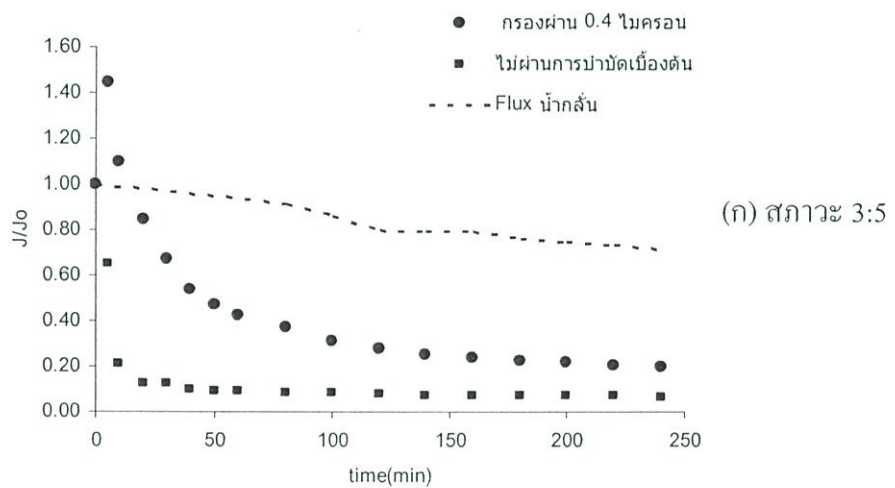
ชนิดของสารรวมตะกอน	ค่าทีไอซี (mg/L)				%R <sub>TOC</sub>		ค่าการนำไฟฟ้า (µS/cm)				%R <sub>EC</sub>	
	เริ่มต้น		หลังรวมตะกอน				เริ่มต้น		หลังรวมตะกอน			
	3:5	5:3	3:5	5:3	3:5	5:3	3:5	5:3	3:5	5:3		
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	10.58	6.86	7.11	4.49	35	35	1077	1038	1086	1047	-0.8	-0.9
FeCl <sub>3</sub>	10.58	8.26	6.29	5.38	41	35	1131	1039	1190	1111	-5	-7
PACl	8.94	6.86	8.49	6.61	9	4	1085	1045	1060	1035	2.3	-0.95

หมายเหตุ 3:5 = สภาวะ 3:5    5:3 = สภาวะ 5:3

#### 4.3.3.2 การกรองเบื้องต้นด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน

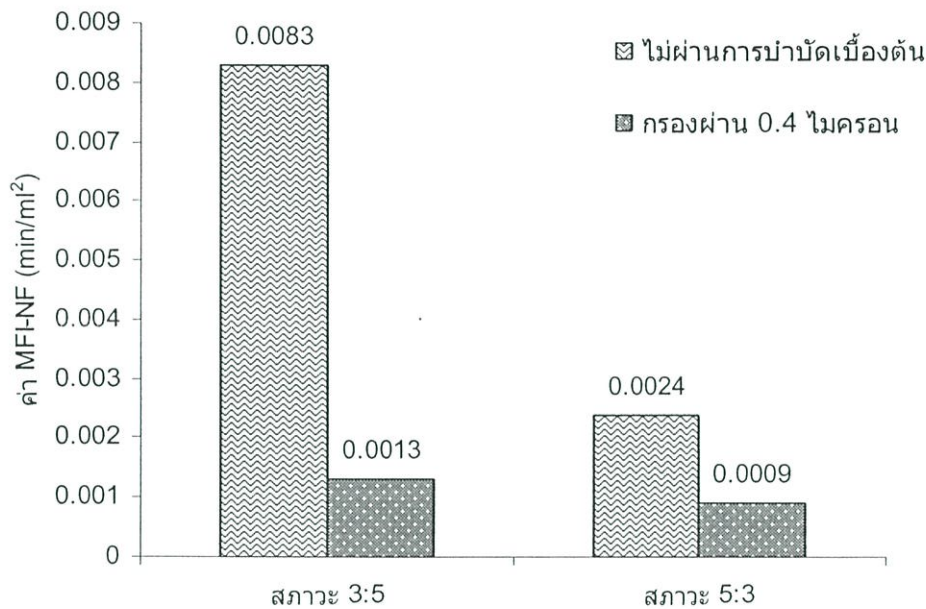
การบำบัดเบื้องต้นด้วยแท่งกรอง (cartridge filter) ขนาดรูพรุน 0.4 ไมครอนเป็นการกำจัดอนุภาคแขวนลอย ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 1-100 ไมครอน น้ำที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพทั้งสองสภาวะถูกนำมากรองผ่านแท่งกรองทำให้ค่าการลดลงของฟลักซ์ของน้ำทิ้งสภาวะ 3:5 และสภาวะ 5:3 มีค่าต่ำกว่าค่าการลดลงของฟลักซ์ของน้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการบำบัด ดังรูปที่ 4.8 (ก) และ (ข)

รูปที่ 4.8 พบว่าน้ำที่กรองผ่านแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอนให้ค่าฟลักซ์ที่สูงกว่าน้ำที่ไม่ผ่านการกรองแสดงถึงการลดลงของสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันเยื่อกรองนาโนเมื่อกรองผ่านแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน โดยเฉพาะสารแขวนลอยและสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามยังคงมีสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ผ่านแท่งกรองได้ ซึ่งได้แก่สาร SMP โดยพบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำทิ้งสภาวะ 3:5 มีการลดลงคิดเป็น 79 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.8 ก) เมื่อเทียบกับค่าฟลักซ์เริ่มต้น และน้ำทิ้งสภาวะ 5:3 มีการลดลงของค่าฟลักซ์ คิดเป็น 53 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.8 ข)



รูปที่ 4.8 การลดลงของค่าฟลักซ์ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยการกรองด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน (ก) สภาวะ 3:5 (ข) สภาวะ 5:3

รูปที่ 4.9 แสดงค่า MFI-NF ของน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นเปรียบเทียบกับน้ำที่กรองผ่านแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน พบว่าน้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นของสภาวะ 3:5 และสภาวะ 5:3 มีค่า MFI-NF เท่ากับ 0.0083 และ 0.0024  $\text{min/ml}^2$  ตามลำดับ เมื่อกรองผ่านแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน แล้วพบว่าทำให้ค่า MFI-NF ลดลง 0.0013 และ 0.0009  $\text{min/ml}^2$  ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการลดลงของฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ก-1, ก-5, ก-8 และ ก-11 ภาคผนวก ก)

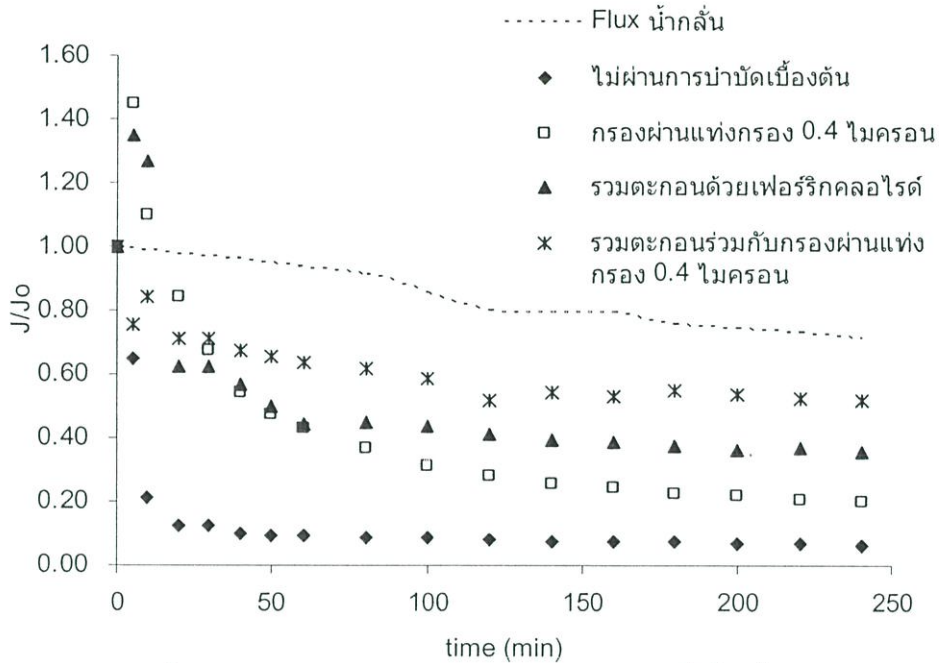


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่า MFI-NF ของน้ำทั้งสองสภาวะระหว่างน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นและกรองผ่านแท่งกรอง 0.4 ไมครอน

#### 4.3.3.3 การรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการกรองด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน

ค่าการลดลงของฟลักซ์ของน้ำที่ผ่านการรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการกรองเปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดเบื้องต้นวิธีอื่น ๆ แสดงในรูปที่ 4.10 จากผลการทดลองพบว่าการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการกรองผ่านแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน มีผลให้การลดลงของฟลักซ์มีค่าต่ำที่สุด จากรูปจะเห็นว่าน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีค่าการลดลงของฟลักซ์ถึง 93 เปอร์เซ็นต์เมื่อทำการบำบัดเบื้องต้น พบว่าการรวมตะกอนด้วยเพอร์ริคโลไรด์ และการกรองมีค่าการลดลงของฟลักซ์เท่ากับ 63 และ 79 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าน้ำที่ไม่ได้รับการบำบัดเบื้องต้น ส่วนน้ำที่บำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนร่วมกับการกรองมีค่าการลดลงของฟลักซ์เท่ากับ 47 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากการรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการกรองด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอนเป็นการกำจัดอนุภาคขนาดต่าง ๆ ในน้ำทิ้งจากระบบ

เอสบีอาร์ โดยการรวมตะกอนทางเคมีเป็นการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ และการกรองเป็นการกำจัดอนุภาคแขวนลอย ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งเป็นสาเหตุที่เกิดจากการอุดตันบนเยื่อกรอง

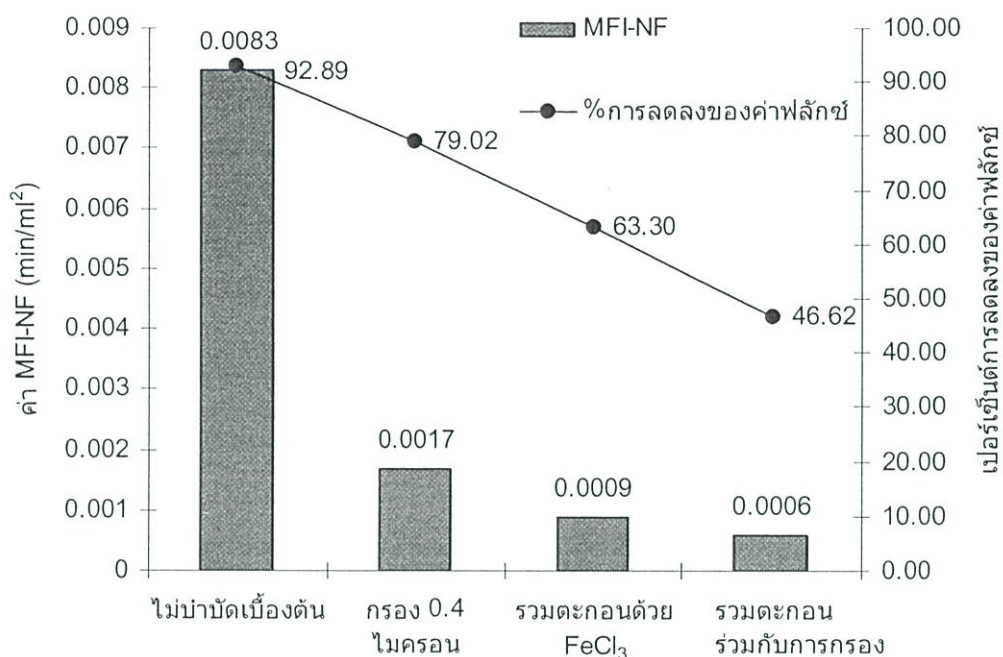


รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ในการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นด้วยวิธีต่าง ๆ

จากผลการทดลอง ค่าการลดลงของฟลักซ์สอดคล้องกับค่า MFI-NF ดังรูปที่ 4.11 โดยพบว่าค่า MFI-NF ของน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีค่าสูงถึง 0.0083 min/ml<sup>2</sup> ในขณะที่การบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการรวมตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์, กรองผ่านแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน และรวมตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับการกรอง ให้ค่า MFI-NF เท่ากับ 0.0017, 0.0009 และ 0.0006 min/ml<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการลดลงของฟลักซ์ แสดงให้เห็นว่าการบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นทำให้ค่าการลดลงของฟลักซ์ลดต่ำลง จะเห็นได้ว่าการรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการกรอง 0.4 ไมครอนทำให้มีค่า MFI-NF และค่าการลดลงของฟลักซ์ต่ำที่สุด ทำให้การอุดตันลดลง

นอกจากนี้การลดลงของค่าฟลักซ์มีความสอดคล้องกับค่าการกักกันสารอินทรีย์ในรูปทีโอซี โดยเยื่อกรองนาโนดังตารางที่ 4.4 โดยพบว่าสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นทั้งหมดเข้าสู่เยื่อกรองนาโนและถูกกักกันโดยเยื่อกรองได้ถึง 79 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การบำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนทางเคมี การกรอง และการรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการกรอง สามารถกำจัดสารอินทรีย์ก่อนเข้าระบบเยื่อกรองนาโนเท่ากับ 40 43 และ 43 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ทำให้ภาระสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบเยื่อกรองนาโนมีค่าน้อยลง จึงเป็นการลดโอกาสการอุดตันเยื่อกรองนาโนอันเนื่องมาจากสาร SMP แม้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารอินทรีย์รวมของทุกวิธีการ

บำบัดเบื้องต้นจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อพิจารณาในด้านฟลักซ์ของน้ำที่ผลิตได้ จะเห็นว่า การรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการกรองให้ผลดีที่สุดสำหรับการลดการอุดตันจากสาร SMP ระหว่างการบำบัดด้วยเยื่อกรองนาโน



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่า MFI-NF ของน้ำทิ้งสภาวะ 3:5 และเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าฟลักซ์

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยวิธีการบำบัดแบบต่าง ๆ

วิธีการบำบัด	ปริมาณ TOC (mg/L)				% การกักกัน TOC			
	น้ำทิ้งจากระบบ SBR	รวมตะกอน	กรอง 0.4 μm	NF	รวมตะกอน	กรอง 0.4 μm	NF	รวม
ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น	26.04	-	-	5.39	-	-	79.28	79.28
บำบัดโดยการรวมตะกอน	10.58	6.29	-	3.68	40.55	-	41.49	82.04
บำบัดโดยการกรอง	14.86	-	8.51	6.07	-	42.73	28.63	71.36
บำบัดโดยการรวมตะกอนร่วมกับการกรอง	23.00	14.66	13.66	8.59	36.26	6.82	37.14	80.22

อย่างไรก็ตาม การบำบัดเบื้องต้นสามารถลดค่าการนำไฟฟ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกักกันค่อนข้างต่ำ ทำให้น้ำป้อนระบบเยื่อกรองนาโนมีค่าการนำไฟฟ้าสูง ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าอาจส่งผลต่อการอุดตันเยื่อกรองได้ เนื่องจากผลของเกลืออนินทรีย์ที่วัดในรูปของค่าการนำไฟฟ้า

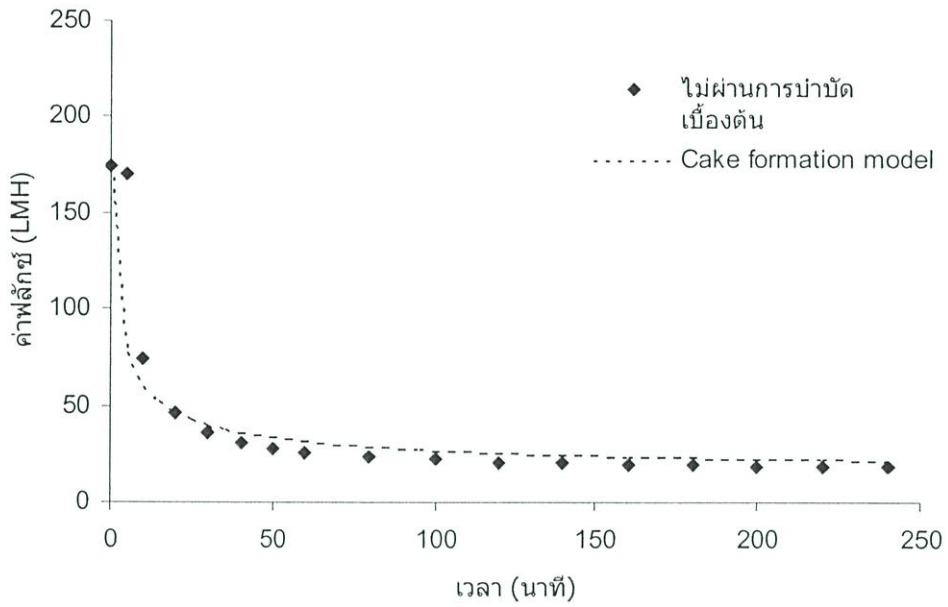
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยวิธีการบำบัดแบบต่าง ๆ

วิธีการบำบัด	ค่าการนำไฟฟ้า (mg/L)				% การกักกันค่าการนำไฟฟ้า			
	น้ำทิ้งจากระบบ SBR	รวมตะกอน	กรอง 0.4 $\mu\text{m}$	NF	รวมตะกอน	กรอง 0.4 $\mu\text{m}$	NF	รวม
ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น	1136	-	-	551	-	-	51	51
บำบัดโดยการรวมตะกอน	1131	1190	-	766	-5.22	-	32.27	27.05
บำบัดโดยการกรอง	788	-	760	551	-	3.55	30.07	33.62
บำบัดโดยการรวมตะกอนร่วมกับกรอง	1118	1114	1090	712	0.35	2.5	36.31	39.16

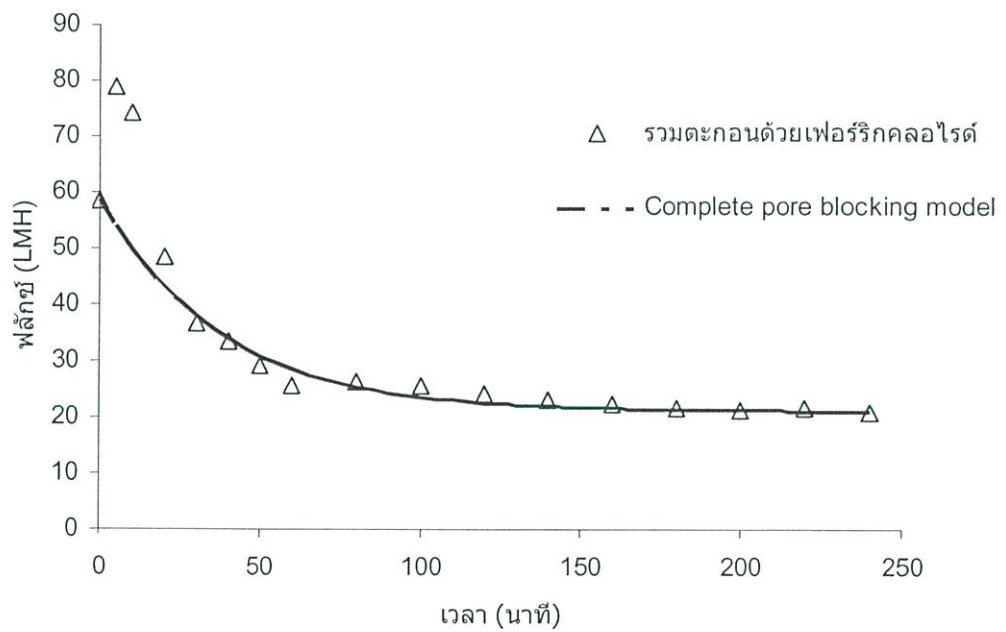
#### 4.4 การศึกษาการอุดตันบนเยื่อกรองนาโนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการวิเคราะห์การอุดตันด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรมโซลเวอร์ พบว่าการลดลงของฟลักซ์ของน้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น สอดคล้องกับแบบจำลองการอุดตันแบบ Cake formation model (ดังรูปที่ 4.12) โดยให้ค่าผลรวมความผิดพลาดยกกำลังสอง (SSE) ต่ำสุดเท่ากับ 0.5 เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ค-2 ภาคผนวก ค) การอุดตันในลักษณะการเกิดชั้นเค้กนี้อาจเกิดจากน้ำที่ยังไม่ได้รับการบำบัด มีสาร SMP และอนุภาคแขวนลอยจำนวนมากสะสมบนผิวหน้าและทับถมเป็นชั้นเค้ก

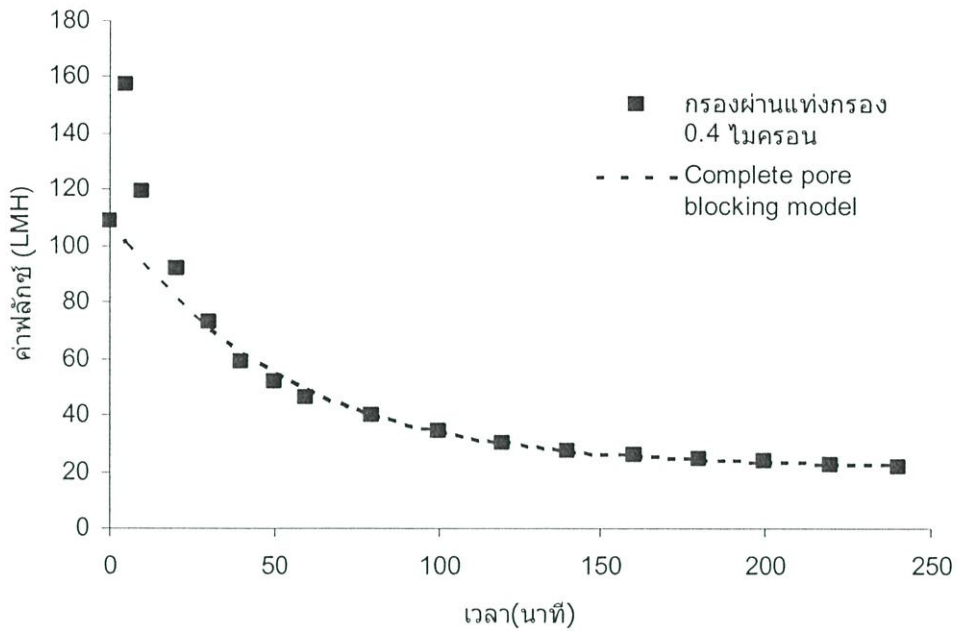
การวิเคราะห์การอุดตันเยื่อกรองจากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการรวมตะกอนทางเคมี และการกรองด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน พบว่ามีลักษณะการอุดตัน สอดคล้องกับแบบจำลองแบบ Complete pore blocking model โดยให้ค่า SSE ต่ำสุดเท่ากับ 0.24 และ 0.20 ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ (รายละเอียดแสดงในตาราง ค-1 ภาคผนวก ค) ซึ่งในการบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการทั้งสองสามารถลดอนุภาคขนาดใหญ่ และอนุภาคแขวนลอย ยังคงเหลือเพียงอนุภาคขนาดเล็กในน้ำทิ้ง ทำให้เกิดการอุดตันรูพรุน ซึ่งสอดคล้องกับการอุดตันแบบ Complete pore blocking model



รูปที่ 4.12 แบบจำลองการอุดตันของน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น



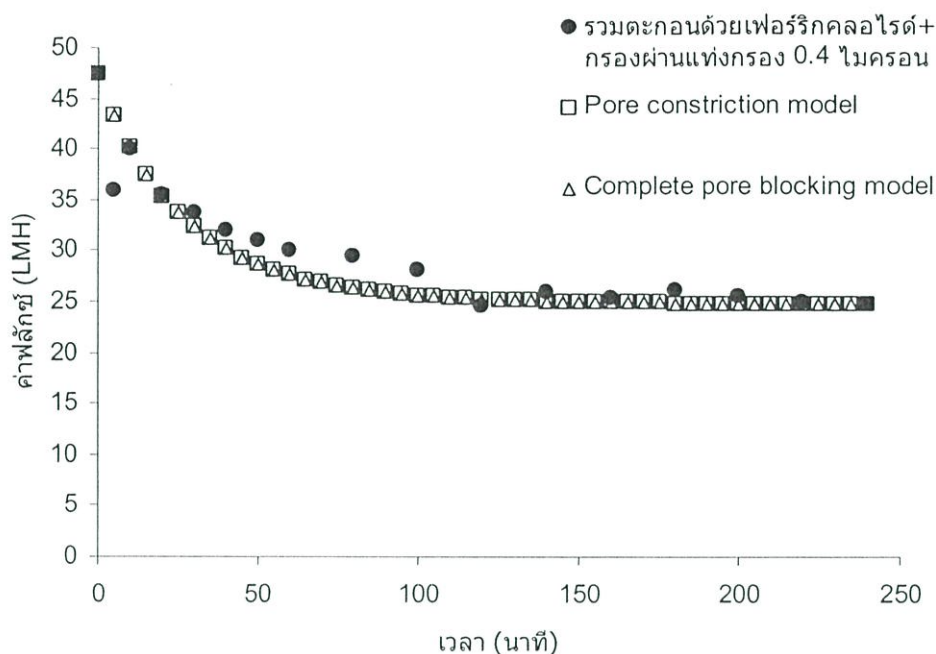
รูปที่ 4.13 แบบจำลองการอุดตันของน้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนทางเคมีด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์



รูปที่ 4.14 แบบจำลองการอุดตันของน้ำที่บำบัดด้วยการกรองผ่านแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน

ส่วนการบำบัดร่วมกันระหว่างการรวมตะกอนทางเคมีและการกรอง พบว่ามีลักษณะการอุดตันสอดคล้องกับแบบจำลองแบบ Complete pore blocking model และแบบ Pore constriction model โดยให้ค่า SSE ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.053 และ 0.049 ตามลำดับ รูปที่ 4.15 (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ค-1 ภาคผนวก ก) แบบจำลองทั้งสองชนิดแสดงลักษณะการอุดตันของอนุภาคที่มีขนาดเล็กซึ่งทำให้เกิดการอุดตันรูพรุน หรืออนุภาคขนาดเล็กมาก ๆ อาจเข้าไปในรูพรุนทำให้ปริมาตรในรูพรุนลดลง ซึ่งทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

จะเห็นได้ว่า การบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นด้วยวิธีการต่าง ๆ มีการเปลี่ยนรูปแบบการอุดตันเยื่อกรองนาโนเกิดขึ้น โดยสาร SMP ในน้ำทิ้งทำให้เกิดการอุดตันสะสมและทับถมบนเยื่อกรองซึ่งเป็นลักษณะการเกิดชั้นเค้กจากน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น เมื่อนำน้ำทิ้งมาบำบัดเบื้องต้นทำให้รูปแบบการอุดตันจากเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงไป เกิดจากสาร SMP บางส่วนในน้ำทิ้งจากระบบเอสบีอาร์ถูกกำจัดออกในระหว่างการบำบัดเบื้องต้น ช่วยในการลดการสะสมตัวของสาร SMP บนเยื่อกรอง เป็นผลให้ค่าการลดลงของฟลักซ์เพิ่มขึ้น ทำให้การกรองในระบบเยื่อกรองนาโนมีประสิทธิภาพดีขึ้น

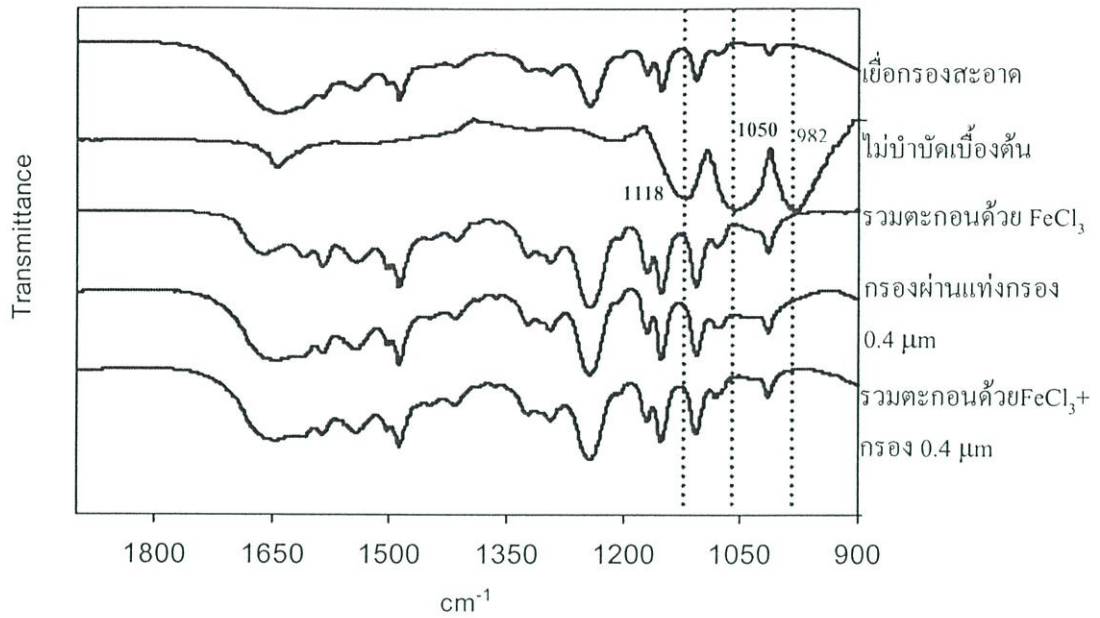


รูปที่ 4.15 แบบจำลองการอุดตันของน้ำที่ผ่านการบำบัดร่วมกันระหว่างการรวมตะกอนทางเคมีด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ และการกรองผ่านแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์การอุดตันบนเยื่อกรองนาโน

##### 4.5.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

ผลการวิเคราะห์เยื่อกรองนาโนด้วยเทคนิค ATR-FTIR เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่พบในการอุดตันเยื่อกรองนาโนจากสาร SMP ในน้ำทิ้งจากระบบเอสบีอาร์ แสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าสารอุดตันเยื่อกรองนาโนที่เดินระบบด้วยน้ำที่ไม่ได้รับการบำบัดเบื้องต้น มีลักษณะแตกต่างจากเยื่อกรองสะอาดอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งแสดงสเปกตรัมของอินฟราเรดบริเวณความถี่ 1050 และ 982  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งอาจเป็นพันธะ C-O stretching จากหมู่เอเทอร์ และพบสเปกตรัมบริเวณความถี่ 1118  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเห็นได้ชัดเจนและอาจเป็นกลุ่มของ C-O-C ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม Dialkyl ether (R-O-R) อาจบ่งชี้ถึงสารอินทรีย์ที่เกิดจากสารในกลุ่มพอลิแซคคาไรด์และอะมิโนซูการ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jarusutthirak *et al.* (2002) พบว่าสารในกลุ่มพอลิแซคคาไรด์พบในส่วน of ผนังเซลล์จุลินทรีย์ที่ถูกปล่อยออกมาระหว่างการเจริญเติบโตในขั้น Endogenous phase

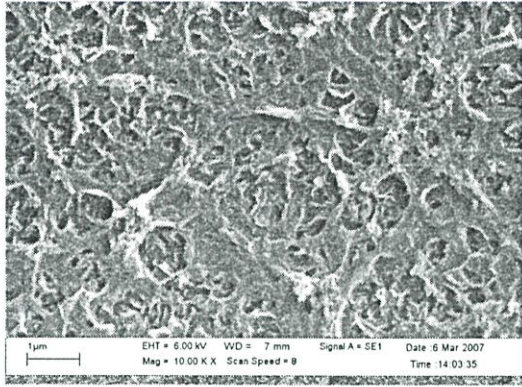


รูปที่ 4.16 สเปกตรัม FT-IR แสดงหมู่ฟังก์ชันของสารที่ทำให้เกิดการอุดตันบนเยื่อกรองนาโน

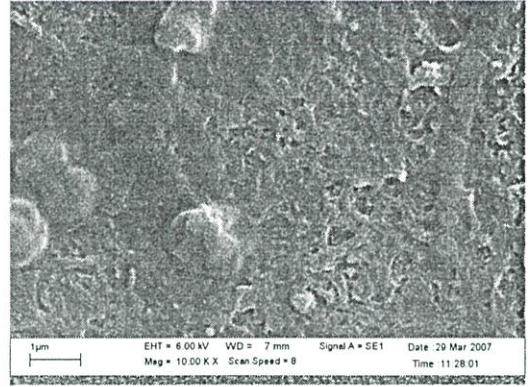
เมื่อนำน้ำทิ้งจากระบบเอสปีอาร์มาบำบัดเบื้องต้นด้วยวิธีการต่าง ๆ และนำไปเดินระบบเยื่อกรองนาโน จากสเปกตรัม FT-IR พบว่าหมู่ฟังก์ชันของสารอุดตันบนเยื่อกรองนาโนหายไป เมื่อผ่านการบำบัดเบื้องต้น และสเปกตรัมโดยรวมมีลักษณะใกล้เคียงกับเยื่อกรองสะอาด ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการบำบัดเบื้องต้น โดยวิธีการรวมตะกอนทางเคมีและการกรอง สามารถลดสาร SMP ที่มีผลต่อการอุดตันเยื่อกรองนาโนได้

#### 4.5.2 ผลการวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

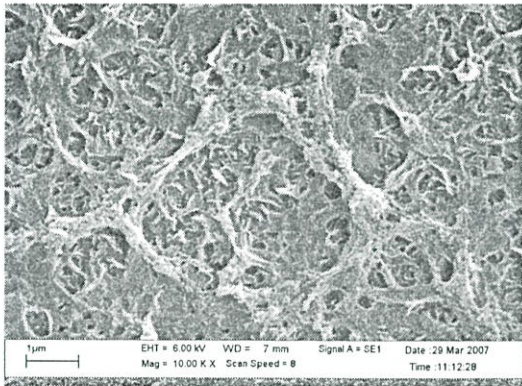
ภาพถ่าย Scanning Electron Microscope เปรียบเทียบลักษณะของผิวหน้าเยื่อกรองนาโน สะอาดที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และเยื่อกรองที่ผ่านอุตุตันด้วยสาร SMP จากน้ำสภาวะ 3:5 และ 5:3 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ



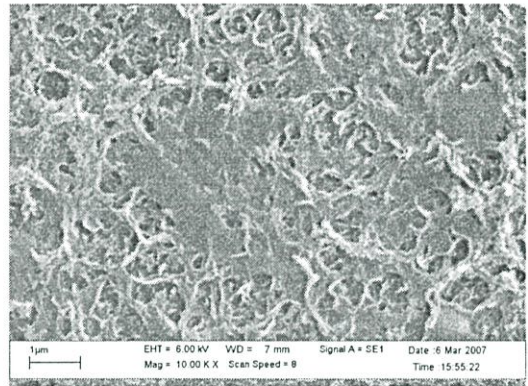
(ก) เยื่อกรองนาโนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน



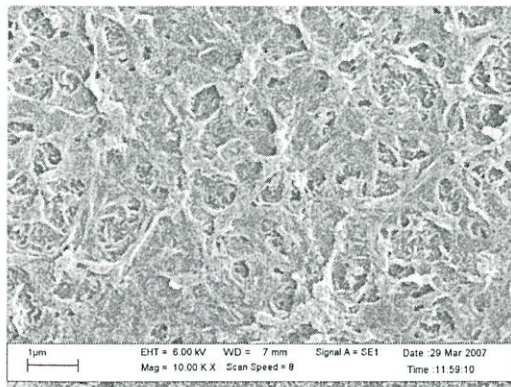
(ข) ยังไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น



(ค) บำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนทางเคมี

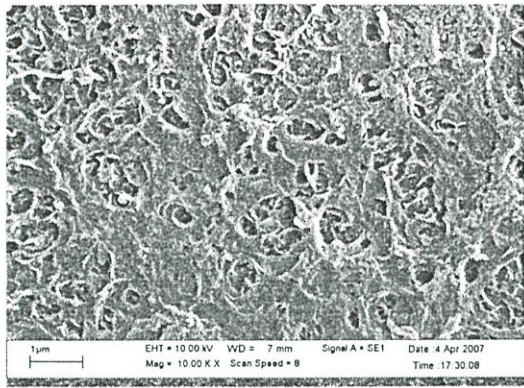


(ง) บำบัดเบื้องต้นด้วยแท่งกรอง 0.4 ไมครอน

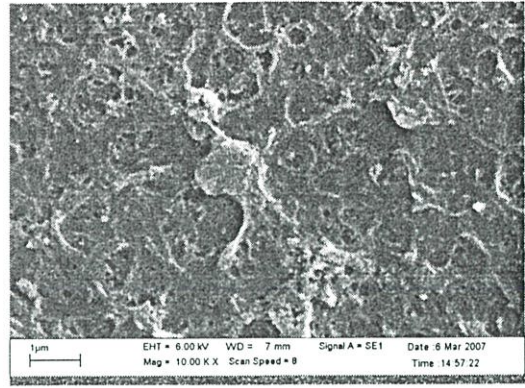


(จ) บำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการกรอง

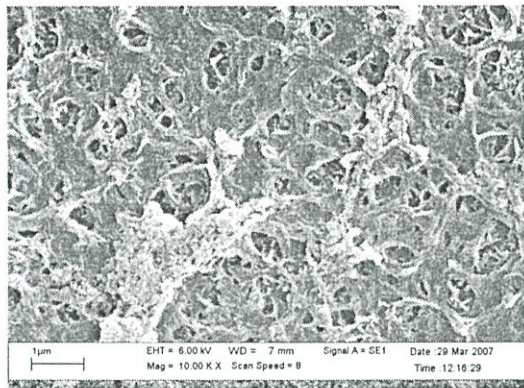
รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย SEM แสดงการสะสมตัวของสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันของน้ำสภาวะ 3:5 ที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น



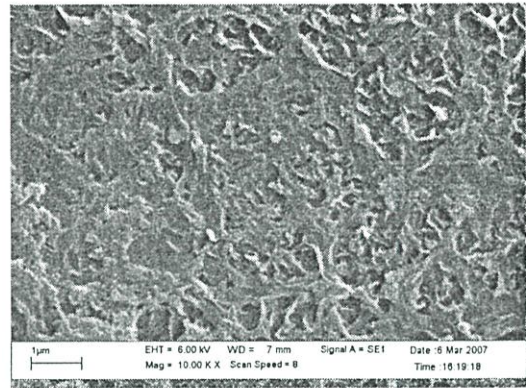
(ก) เชื้อกรองนาโนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน



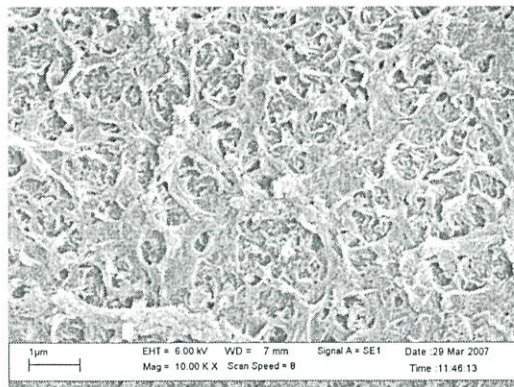
(ข) ยังไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น



(ค) บำบัดน้ำเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอน โดยใช้ FeCl<sub>3</sub>



(ง) บำบัดน้ำเบื้องต้นด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน



(จ) บำบัดน้ำเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนร่วมกับกรอง

รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM แสดงการสะสมตัวของสารที่ก่อให้เกิดการอุดตันของน้ำสถานะ 5:3 ที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดเบื้องต้น

จากรูปที่ 4.17 (ก) แสดงเยื่อกรองนาโนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.17 (ข) ซึ่งได้แก่เยื่อกรองที่ผ่านการกรองด้วยน้ำที่ไม่ได้รับการบำบัดเบื้องต้นจะเห็นว่า น้ำทิ้งของระบบ SBR ซึ่งเป็นกลุ่มของสาร SMP สะสมตัวเป็นชั้นเล็กที่ผิวของเยื่อกรองสะอาด และสอดคล้องกับการลดลงอย่างมากของค่าฟลักซ์ ซึ่งผลของการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายรูปแบบการอุดตันเป็นแบบชั้นเล็ก (Cake formation model) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.17 (ค) เป็นเยื่อกรองที่ผ่านการกรองน้ำที่บำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนและรูปที่ 4.17 (ง) เป็นเยื่อกรองที่ผ่านการกรองน้ำที่บำบัดเบื้องต้นด้วยการกรอง 0.4 ไมครอน จะเห็นว่ารูปที่ 4.17 (ค) และ (ง) มีความหนาของสาร SMP ที่ปกคลุมลดลงและมองเห็นรูพรุนเยื่อกรองมากขึ้นกว่ารูปที่ 4.17 (ข) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนรูปแบบการอุดตันเยื่อกรองหลังจากการบำบัดเบื้องต้นซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.4 ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว จากรูปแบบการอุดตันแบบ Cake formation model เป็น Complete pore blocking model ส่วนรูปที่ 4.17 (จ) แสดงให้เห็นว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการกรอง ทำให้การอุดตันบนผิวหน้าเยื่อกรองลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.17 (ข) มีรูปแบบการอุดตันเป็นแบบ Complete pore blocking model และ Pore constriction model ซึ่งเป็นการอุดตันที่มีอนุภาคนขนาดเล็กเข้าไปในรูพรุนทำให้ปริมาตรในการกรองลดลง ลดค่าฟลักซ์ด้วยพบว่าพื้นผิวมีลักษณะใกล้เคียงกับเยื่อกรองสะอาดมากที่สุดเนื่องจากการบำบัดเบื้องต้นร่วมกันทั้งการรวมตะกอนและการกรอง ทำให้ลดสาร SMP ในน้ำทิ้งที่มีขนาดใหญ่ซึ่งอาจสะสมบนเยื่อกรองระหว่างการกรองมากที่สุด โดยที่สาร SMP ถูกกำจัดออกไประหว่างการบำบัดเบื้องต้นช่วยในการลดการสะสมตัวของสาร SMP บนเยื่อกรอง ทำให้ค่าการลดลงของฟลักซ์เพิ่มขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองของระบบเยื่อกรองนาโน เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.18 (ก) – (จ) สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน

## บทที่ 5

# สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การอุดตันบนเยื่อกรองนาโน เกิดจากสาร SMP และสารอินทรีย์ที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ
2. การเดินระบบเยื่อกรองนาโนด้วยน้ำที่ยังไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน พบว่าค่าการลดลงของฟลักซ์ที่พีเอช 9 มีค่าต่ำที่สุด
3. การบำบัดน้ำทิ้งเบื้องต้นก่อนเข้าระบบเยื่อกรองนาโนด้วยวิธีการต่าง ๆ พบว่าสามารถลดแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตันเนื่องมาจากน้ำตัวอย่างโดยลดค่า MFI-NF ซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้แนวโน้มของการอุดตัน
4. การบำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ให้ผลในการลดการอุดตันได้ดีกว่าอลูมิเนียมซัลเฟต และโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ โดยปริมาณที่เหมาะสมที่ใช้อยู่ในช่วงความเข้มข้น 100-150 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4.7-5.0 สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ 35-41 เปอร์เซ็นต์
5. การบำบัดเบื้องต้นด้วยการกรองไมโคร ลดการอุดตันเยื่อกรองนาโนได้ โดยลดค่าการลดลงของฟลักซ์ และทำให้ค่า MFI-NF ของน้ำทิ้งสภาวะ 3:5 ลดลงจาก 0.0083 เหลือ 0.0013  $\text{min/ml}^2$  และ น้ำทิ้งสภาวะ 5:3 ลดลงจาก 0.0024 เหลือ 0.0009  $\text{min/ml}^2$
6. การบำบัดเบื้องต้นด้วยการรวมตะกอนโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ และกรองไมโคร สามารถกำจัดสารอินทรีย์ก่อนเข้าระบบเยื่อกรองนาโนได้ถึง 42 เปอร์เซ็นต์ และทำให้ค่า MFI-NF ลดลงจาก 0.0083 เหลือต่ำสุดคือ 0.0006  $\text{min/ml}^2$
7. ลักษณะการอุดตันเยื่อกรองนาโนโดยสาร SMP ที่เกิดขึ้นก่อนการบำบัดพบว่ามีลักษณะการอุดตันแบบ Cake formation model และในขณะที่หลังบำบัดพบว่าทำให้รูปแบบการอุดตันมีการเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นการอุดตันแบบ Complete pore blocking model
8. ผลการวิเคราะห์การอุดตันบนเยื่อกรองนาโน พบว่า สารที่ทำให้เกิดการอุดตันเยื่อกรองนาโน เป็นสารในกลุ่มโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งอาจเกิดจากการผนังเซลล์

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาด้วยน้ำเสียจริงแทนน้ำเสียสังเคราะห์

2. ควรทำการควบคุมค่าทีโอซี และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ใช้ป้อนระบบเขื่อกรองนาโนให้  
คงที่
3. ควรศึกษาหาการกระจายตัวของน้ำหนัก โมเลกุลของน้ำที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพและน้ำ  
ที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นแล้วด้วยวิธีการต่าง ๆ กันเพื่อที่สามารถนำไปใช้อธิบายเกี่ยวกับการเกิดการอุด  
ตันในรูปแบบต่าง ๆ ได้
4. ควรศึกษาค่าความต้านทานของเขื่อกรองที่เกิดขึ้นแบบต่าง ๆ เช่น เกิดจากชั้นเจล เกิดจาก  
การคูดซับอย่างอ่อนเป็นต้น เพื่อเป็นข้อมูลประกอบในการอธิบายลักษณะการอุดตันที่ได้จากแบบ  
จำลองทางคณิตศาสตร์
5. ศึกษาการอุดตันจากสารเคมีที่ใช้ในการรวมตะกอนต่าง ๆ ในเขื่อกรอง
6. ควรศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการอุดตัน เช่น ความกระด้างของน้ำ ค่าความแรงประจุ  
เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2546. เทคนิคการบำบัดน้ำเสียทางวิธี การนำน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์ และการทดสอบพิษวิทยาสำหรับน้ำทิ้ง. เล่มที่ 4. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- ชั้นทอง สุนทรภา. 2545. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ.
- ชลอ จารุสุทธิรักษ์, สุพัฒน์พงษ์ มัตราช และ รัตนา จิระรัตนานนท์. 2548. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการ : อิทธิพลของสารอินทรีย์ต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- ชอุพนธ์ เจริญสุข. 2548. “ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโนโดยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม. บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มันสิน ตันกุลเวศน์. 2539. วิศวกรรมประปา. เล่ม2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. 2543. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ไทยเส็ง.
- Abdessemed, D., Nezzal, G., and Aim, R. B. 2000. “Coagulation-Adsorption-Ultrafiltration for Wastewater Treatment and Reuse.” **Desalination**. 131 : 307-314.
- Al-Malack, M. H. and Anderson, G. K. 1996. “Coagulation-Crossflow Microfiltration of Domestic Wastewater.” **J. Membr. Sci.** 121 : 59-65.
- Barker, D. J. and Stuckey, D. C. 1999. “A Review of Soluble Microbial Products (SMP) in Wastewater Treatment System.” **Wat. Res.** 33 : 3063-3082.
- Boero, V. J., Eckenfelder, Jr. W. W., and Bowers, A. R. 1991. “Soluble Microbial Products Formation in Biological Systems.” **Water Sci. Technol.** 23 : 1067-1076.
- Boerlage, S. F.E., Kennedy, M. D., Dickson, M. R., El-Hodali, D. E.Y., and Schippers, J. C. 2002. “The Modified Fouling Index Using Ultrafiltration Membranes (MFI-UF) : Characterization, Filtration Mechanisms and Propose Reference Membrane.” **J. Membr. Sci.** 197 : 1-21
- Committee Report. 1992. “Membrane Processes in Potable Water Treatment.” 59-67. in AWWA Membrane Technology Research Committee. **J. AWWA.** 84(1).

- Chae, S. R., Ahn, Y. T., Kang, S. T. and Shin, S. H. 2006. "Mitigated Membrane Fouling in Vertical Submerge Membrane Bioreactor (VSMBR)." **J. Membr. Sci.** 280(1-2) : 572-581.
- Grady, C. P., Daigger, T. G. and Lim, H. C. 1999. **Biological Wastewater Treatment.** 2<sup>nd</sup> ed. New York.
- Her, N. 2002. "Identification and Characterization of Foulants and Scalants on NF Membrane." Ph.D Thesis Of University of Colorado.
- Huang, X., Liu, R. and Qian, Y. 2000. "Behaviour of Soluble Microbial Products in a Membrane Bioreactor." **Process Biochemistry.** 36 : 401-406.
- Jarusutthirak, C., and Amy, G. 2007. "Understanding Soluble Microbial Products (SMP) as a Component of Effluent Organic Matter (EfOM)." **Wat. Res.** 41 : 2787-2793.
- Jarusutthirak, C., Amy, G. and Croue, J. P. 2002. "Fouling Characteristics of Wastewater Effluent Organic Matter (EfOM) Isolates on NF and UF Membranes." **Desalination.** 145 : 247-255.
- Jarusutthirak, C., Mattaraj, S. and Jiratananon, R. 2007 "Influence of Inorganic Scalants and Natural Organic Matter on Nanofiltration Membrane Fouling." **J. Membr. Sci.** 287 : 138-145.
- Jiang, H. 2007. "Characterization and Modelling of Soluble Microbial Products in Membrane Bioreactor." Ph.D Thesis Of Ghent University, Belgium.
- Kilduff, J. E., Mattaraj, S. and Belfort, G. 2004. "Flux Decline During Nanofiltration of Naturally-Occurring Dissolved Organic Matter : Effects of Osmotic Pressure, Membrane Permeability, and Cake Formation." **J. Membr. Sci.** 239 : 39-53.
- Kim, S-H., Moon, S-Y., Yoon, C-H., Yim, S-K. and Cho, J-W. 2005. "Role of Coagulation in Membrane Filtration of Wastewater for Reuse." **Desalination.** 173 : 301-307.
- Lapidou, C. S. and Rittmann, B. E. 2002. "A Unified Theory for Extracellular Polymeric Substance, Soluble Microbial Products, and Active and Inert Biomass." **Wat. Res.** 36 : 2711-2720.
- Lee, W., Kang, S. and Shin, H. 2003. "Sludge Characteristics and their Contribution Micofiltration in Submerge Bioreactor." **J. Membr. Sci.** 216 : 217-227.
- Lin, C. F., Lin, T. Y. and Hao, O. J. 2000. "Effect of Humic Substance Characteristics on UF Performance." **Wat. Res.** 34(4) : 1097-1106.

- Madigan, M. T., Martinko, J. M., and Parker, J. 1997. **Biological of Microorganisms**. 8<sup>th</sup> ed. New Jersey : Prentice-Hall.
- Metcalf and Eddy. 2004. **Wastewater Engineering Treatment and Reuse**. 4<sup>th</sup> ed. NewYork : McGraw Hill.
- Namkung, E. and Rittmann, B. E. (1986). "Soluble Microbial Products (SMP) Formation Kinetics by Biofilms." **Wat. Res.** 20(6) : 795-806.
- Nuengjamnong, C. 2005. "The Investigation of Soluble Microbial Products in Membrane Fouling." Department of Animal Husbandary, Faculty of Veterinary Science, Chulalongkorn University.
- Park, N., Kwon, B., Kim, I. S. and Cho, J. 2005. "Biofouling Potential of Various NF Membrane With Respect to Bacteria and Their Soluble Microbial Products (SMP) : Characterization, Flux Decline, and Transport Parameters." **J. Membr. Sci.** article in press.
- Shon, H. K., Vigneswaran, S., Kim, I. S., Cho, J. and Ngo, H. H. 2004a. "Effect of Pretreatment On the Fouling of Membranes : Application in Biologically Treated Sewage Effluent." **J. Membr. Sci.** 234 : 111-120.
- Shon, H. K., Vigneswaran, S., Kim, I. S., Cho, J. and Ngo, H. H. 2004b. "The Effect of Pretreatment to Ultrafiltration of Biologically Treated Sewage Effluent : A Detailed Effluent Organic Matter (EfOM) Characterization." **Wat. Res.** 38 : 1933-1939.

[www.appliedmembrane.com](http://www.appliedmembrane.com)

ภาคผนวก ก.

ตารางแสดงผลการเดินระบบเยื่อกรองนาโนในสถานะต่าง ๆ

ตารางที่ ก-1 ค่าฟลักซ์ของการทดสอบความแม่นยำของระบบ (Reproducibility)

เวลา	ค่าฟลักซ์ (Flux Decline, LMH)			SD	หมายเหตุ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
5	80.57	84.00	86.72	3.08	<b>Membrane</b> : NF 90 Filmtec <b>Pressure</b> : 60 psi. <b>วิธีการบำบัดเบื้องต้น</b> : ทดสอบความแม่นยำของระบบ <b>ค่า pH</b> ป้อนระบบ : 7 <b>ค่า TOC</b> ป้อนระบบ : 0.5 mg/L <b>ค่า EC</b> ป้อนระบบ : 2.3 $\mu\text{S/cm}$ <b>ค่า UV<sub>254</sub></b> ป้อนระบบ : - $\text{cm}^{-1}$ <b>MFI-NF</b> : - $\text{min/ml}^2$
10	83.00	82.45	80.32	1.41	
20	78.56	80.86	81.22	1.44	
30	73.80	77.29	76.62	1.85	
40	71.54	74.24	75.57	2.06	
50	68.32	71.85	74.53	3.11	
60	64.62	69.68	71.00	3.37	
80	63.41	65.91	62.31	1.84	
100	59.25	62.53	61.37	1.66	
120	56.06	59.32	62.63	3.29	
140	53.90	56.74	56.28	1.53	
160	52.77	54.46	54.01	0.88	
180	47.18	52.28	49.82	2.55	
200	47.09	51.07	46.26	2.57	
220	45.54	50.15	47.15	2.34	
240	42.65	47.60	44.27	2.53	
260	41.76	46.64	42.88	2.56	
280	39.88	45.69	41.93	2.95	
300	38.31	44.32	41.24	3.01	

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ค่าฟลักซ์ของการทดสอบความแม่นยำของระบบ (Reproducibility)

เวลา	ค่าฟลักซ์ (Flux Decline, LMH)			SD	หมายเหตุ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
หยุดเดินระบบ					
305	73.08	137.48	108.50	106.35	32.25
310	67.11	109.25	85.88	87.41	21.11
320	58.50	86.93	59.44	68.29	16.15
330	51.11	68.38	53.92	57.80	9.27
340	48.10	58.45	46.03	50.86	6.65
350	44.68	52.60	43.78	47.02	4.85
360	44.09	48.59	43.21	45.30	2.88
380	39.27	45.83	39.26	41.45	3.79
400	37.19	42.28	37.59	39.02	2.83
420	35.73	38.60	34.77	36.37	2.00

Membrane : NF 90 Filmtcc  
 Pressure : 60 psi.  
 วิธีการบำบัดเบื้องต้น : ทดสอบความแม่นยำของระบบ  
 ค่า pH ป้อนระบบ : 7  
 ค่า TOC ป้อนระบบ : 0.5 mg/L  
 ค่า EC ป้อนระบบ : 2.3  $\mu\text{S/cm}$   
 ค่า UV<sub>254</sub> ป้อนระบบ : -  $\text{cm}^{-1}$   
 MFI-NF : -  $\text{min/ml}^2$

ตารางที่ ก-2 การเดินระบบแยกกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 พีเอชที่ 4 ไม่มีการบำบัดเบื้องต้น

เวลา(นาที)	ปริมาณ (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/V)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			หมายเหตุ	
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV<sub>254</sub></sub>		
0			1										
5	9.61	40.18	1.00	9.61	0.5203								
10	5.07	21.20	0.85	14.68	0.6812								
20	11.03	46.12	0.45	25.71	0.7779								
30	4.4	18.40	0.38	30.11	0.9963	9.055	618	0.089	55.70	55.79	73.82		
40	6.6	27.60	0.28	36.71	1.0896								
50	6.03	25.21	0.29	42.74	1.1699								
60	6.11	25.55	0.27	48.85	1.2282	3.535	455	0.036	82.71	67.45	89.41		
80	12.81	53.56	0.25	61.66	1.2974								
100	9.67	40.43	0.25	71.33	1.4019								
120	12.18	50.93	0.25	83.51	1.4370	2.053	313	0.01	89.96	77.61	97.06		
140	11.83	49.46	0.246	95.34	1.4684								
160	10.28	42.98	0.25	105.62	1.5149								
180	13.36	55.86	0.22	118.98	1.5129	1.961	201	0.012	90.41	85.62	96.47		
200	13.28	55.53	0.25	132.26	1.5122								
220	8.74	36.54	0.24	141.00	1.5603								
240	10.05	42.02	0.24	151.05	1.5889	1.926	184	0.014	90.58	86.84	95.88		
Retentate	-					36.50	1849	0.386					

Membrane : NF 90 Filmtec

Pressure : 60 psi.

วิธีการบำบัดเบื้องต้น

: ไม่บำบัดเบื้องต้น

อุณหภูมิ : 29.7 °C

ค่า pH ป้อนระบบ : 4

ค่า TOC ป้อนระบบ

: 20.44 mg/L

ค่า EC ป้อนระบบ : 1398 µS/cm

ค่า UV<sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.340 cm<sup>-1</sup>

MFI-NF : 0.0065 min/ml<sup>2</sup>

ตารางที่ ก-3 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 เพื่อที่ 7 ไม่มีการบำบัดเบื้องต้น

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตรสะสม (ml)	เวลาต่อปริมาตรสะสม (t/V)	เพอร์มิเทค			%การกักกัน			หมายเหตุ
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>	
0			1			-	-	-	-	-	-	Membrane : NF 90 Filmtec
5	22.85	95.54	0.65	22.85	0.2188	-	-	-	-	-	-	Pressure : 60 psi.
10	7.43	31.07	0.21	30.28	0.3303	-	-	-	-	-	-	วิธีการบำบัดเบื้องต้น : ไม่บำบัดเบื้องต้น
20	10.79	22.56	0.13	41.07	0.4870	-	-	-	-	-	-	: ไม่บำบัดเบื้องต้น
30	8.90	18.61	0.13	49.97	0.6004	16.56	744	0.134	36.41	55.79	29.10	อุณหภูมิ : 28.6 °C
40	7.07	14.78	0.10	57.04	0.7013	-	-	-	-	-	-	ค่า pH ป้อนระบบ : 7
50	6.65	13.90	0.10	63.69	0.7851	-	-	-	-	-	-	ค่า TOC ป้อนระบบ : 26.04 mg/L
60	6.35	13.28	0.09	70.04	0.8567	10.45	611	0.086	59.87	49.21	54.50	ค่า EC ป้อนระบบ : 1136 µS/cm
80	12.19	12.74	0.09	82.23	0.9729	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.189 cm <sup>-1</sup>
100	11.91	12.45	0.09	94.14	1.0622	-	-	-	-	-	-	MFI-NF : 0.0083 min/ml <sup>2</sup>
120	11.61	12.14	0.08	105.75	1.1348	7.643	497	0.047	70.65	56.25	75.13	
140	10.49	10.97	0.07	116.24	1.2044	-	-	-	-	-	-	
160	10.42	10.89	0.07	126.66	1.2632	-	-	-	-	-	-	
180	10.09	10.55	0.07	136.75	1.3163	5.882	322	0.039	77.41	71.65	79.37	
200	9.93	10.38	0.07	146.68	1.3635	-	-	-	-	-	-	
220	9.89	10.34	0.07	156.57	1.4051	-	-	-	-	-	-	
240	8.91	9.31	0.06	165.48	1.4503	5.395	221	0.025	79.28	80.55	86.77	
Retentate	-	-	-	-	-	41.67	1488	0.316	-	-	-	

ตารางที่ ก-4 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 พีเอชที่ 9 ไม่มีการบำบัดเบื้องต้น

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตรสะสม (ml)	เวลาต่อปริมาตรสะสม (t/v)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			หมายเหตุ	
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV<sub>254</sub></sub>		
0			1.00										
5	6.15	21.43	0.16	6.15	0.8130								
10	1.82	9.51	0.07	7.97	1.2547								
20	5.42	11.33	0.08	13.39	1.4937								
30	5.29	10.05	0.07	18.68	1.6060	11.21	626	0.127	52.52	59.95	71.46		
40	5.26	10.00	0.07	23.94	1.6708								
50	3.65	9.54	0.07	27.59	1.8123								
60	4.70	9.83	0.07	32.29	1.8582	5.996	291	0.056	74.60	81.38	87.42		
80	9.23	9.65	0.07	41.52	1.9268								
100	9.80	9.31	0.07	51.32	1.9486								
120	9.61	9.13	0.07	60.93	1.9695	2.111	219	0.030	91.06	85.99	93.26		
140	6.37	7.40	0.05	67.3	2.0802								
160	7.19	7.52	0.05	74.49	2.1479								
180	12.20	7.29	0.05	86.69	2.0764	1.952	195.3	0.023	91.73	87.50	94.83		
200	6.15	-	-	-	-								
220	1.82	6.97	0.05	101.7	2.1632								
240	5.42	-	-	-	-	1.655	197.6	0.017	92.99	87.36	96.18		
Retentate	-	-	-	-	-	39.17	2070	0.455	-	-	-		

Membrane : NF 90 Filmtec

Pressure : 60 psi.

วิธีการบำบัดเบื้องต้น

: ไม่บำบัดเบื้องต้น

อุณหภูมิ : 30 °C

ค่า pH ป้อนระบบ : 9

ค่า TOC ป้อนระบบ

: 23.61 mg/L

ค่า EC ป้อนระบบ : 1563 µS/cm

ค่า UV<sub>254</sub> : 0.445 cm<sup>-1</sup>

MFI-NF : 0.0105 min/ml<sup>2</sup>

ตารางที่ ก-5 การเดินระบบแยกกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 พีเอชที่ 4 ไม่มีการบำบัดเบื้องต้น

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตรสะสม (ml)	เวลาต่อปริมาตรสะสม (t/V)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			หมายเหตุ
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV<sub>254</sub></sub>	
0			1			-	-	-	-	-	-	Membrane : NF 90 Filmtec
5	21.14	63.14	0.89	21.14	0.2365	-	-	-	-	-	-	Pressure : 60 psi.
10	5.76	40.14	0.56	26.90	0.3717	-	-	-	-	-	-	วิธีการบำบัดเบื้องต้น
20	16.19	33.85	0.48	43.09	0.4641	-	-	-	-	-	-	: ไม่บำบัดเบื้องต้น
30	13.00	27.18	0.38	56.09	0.5349	4.942	564	0.089	44.71	38.83	73.82	อุณหภูมิ : 28.4 °C
40	12.34	25.80	0.36	68.43	0.5845	-	-	-	-	-	-	ค่า pH ป้อนระบบ : 4
50	11.91	22.64	0.32	80.34	0.6224	-	-	-	-	-	-	ค่า TOC ป้อนระบบ
60	9.44	21.93	0.31	89.78	0.6683	3.058	328	0.036	65.79	64.43	89.41	: 8.94 mg/L
80	20.70	21.64	0.30	110.48	0.7241	-	-	-	-	-	-	ค่า EC ป้อนระบบ : 922 µS/cm
100	19.03	19.89	0.28	129.51	0.7721	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.34 cm <sup>-1</sup>
120	19.80	20.70	0.29	149.31	0.8037	1.92	286	0.01	78.52	68.98	97.06	MFI-NF : 0.0025 min/ml <sup>2</sup>
140	19.26	20.13	0.28	168.57	0.8305	-	-	-	-	-	-	
160	20.25	21.17	0.30	188.82	0.8474	-	-	-	-	-	-	
180	16.69	17.45	0.25	205.51	0.8759	1.928	267	0.012	78.43	71.04	96.47	
200	17.78	18.59	0.26	223.29	0.8957	-	-	-	-	-	-	
220	17.76	18.56	0.26	241.05	0.9127	-	-	-	-	-	-	
240	17.90	18.71	0.26	258.95	0.9268	1.635	259	0.014	81.71	71.91	95.88	
Retentate						14.43	1344	0.386	-	-	-	

ตารางที่ ก-6 การเดินระบบเชื่อมต่อกรองด้วยน้ำสกลภาวะ 5:3 พีเอชที่ 7 ไม่มีการบำบัดเบื้องต้น

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/V)	เพอร์มิอัท			%การกักกัน			หมายเหตุ	
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>		
0			1										
5	40.82	170.68	0.98	40.82	0.1225	-	-	-	-	-	-	-	
10	17.71	74.05	0.42	58.53	0.1709	-	-	-	-	-	-	-	
20	22.08	46.16	0.26	80.61	0.2481	-	-	-	-	-	-	-	
30	17.23	36.02	0.21	97.84	0.3066	8.21	754	0.090	62.70	21.70	20.35	-	
40	14.92	31.19	0.18	112.76	0.3547	-	-	-	-	-	-	-	
50	20.08	27.99	0.16	132.84	0.3764	-	-	-	-	-	-	-	
60	6.27	26.22	0.15	139.11	0.4313	10.68	478	0.052	51.45	50.36	53.98	-	
80	23.07	24.11	0.14	162.18	0.4933	-	-	-	-	-	-	-	
100	21.29	22.25	0.13	183.47	0.5450	-	-	-	-	-	-	-	
120	19.48	20.36	0.12	202.95	0.5913	4.17	367	0.036	81.07	61.89	68.14	-	
140	20.05	20.96	0.12	223.00	0.6278	-	-	-	-	-	-	-	
160	18.55	19.39	0.11	241.55	0.6624	-	-	-	-	-	-	-	
180	18.95	19.81	0.11	260.50	0.6910	7.12	308	0.025	67.62	68.02	77.88	-	
200	18.25	19.08	0.11	278.75	0.7175	-	-	-	-	-	-	-	
220	17.92	18.73	0.11	296.67	0.7416	-	-	-	-	-	-	-	
240	17.87	18.68	0.11	314.54	0.7630	6.85	287	0.024	68.87	70.20	78.76	-	
Retentate	-	-	-	-	-	35.10	1553	0.202	-	-	-	-	

Membrane : NF 90 Filmtec  
 Pressure : 60 psi.  
 วิธีการบำบัดเบื้องต้น : ไม่บำบัดเบื้องต้น  
 อุณหภูมิ : 29.6 °C  
 ค่า pH ป้อนระบบ : 7  
 ค่า TOC ป้อนระบบ : 22.00 mg/L  
 ค่า EC ป้อนระบบ : 922 µS/cm  
 ค่า UV<sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.113 cm<sup>-1</sup>  
 MFI-NF : 0.0024 min/ml<sup>2</sup>

ตารางที่ ก-7 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 พีเอชที่ 9 ไม่มีการบำบัดเบื้องต้น

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/v)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			หมายเหตุ	
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>		
0			1										
5	27.11	80.97	0.39	27.11	0.1844	-	-	-	-	-	-	-	
10	8.94	62.30	0.30	36.05	0.2774	-	-	-	-	-	-	-	
20	12.92	27.01	0.13	48.97	0.4084	-	-	-	-	-	-	-	
30	11.13	23.27	0.11	60.10	0.4992	6.223	650	0.069	38.57	31.00	80.23	-	
40	9.46	19.78	0.09	69.56	0.5750	-	-	-	-	-	-	-	
50	10.34	19.65	0.09	79.90	0.6258	-	-	-	-	-	-	-	
60	8.69	20.19	0.10	88.59	0.6773	7.809	241	0.027	22.91	74.42	92.26	-	
80	18.33	19.16	0.09	106.92	0.7482	-	-	-	-	-	-	-	
100	19.29	20.16	0.10	126.21	0.7923	-	-	-	-	-	-	-	
120	16.27	17.01	0.08	142.48	0.8422	6.559	220	0.017	35.25	76.65	95.13	-	
140	17.59	18.39	0.09	160.07	0.8746	-	-	-	-	-	-	-	
160	17.06	17.83	0.09	177.13	0.9033	-	-	-	-	-	-	-	
180	18.46	19.30	0.09	195.59	0.9203	6.498	214	0.016	35.85	77.28	95.42	-	
200	15.63	16.34	0.08	211.22	0.9469	-	-	-	-	-	-	-	
220	15.62	16.33	0.08	226.84	0.9698	-	-	-	-	-	-	-	
240	16.18	16.91	0.08	243.02	0.9876	6.364	210	0.015	37.18	77.71	95.70	-	
Retentate	-	-	-	-	-	14.85	1914	0.349	-	-	-	-	

Membrane : NF 90 Filmtec  
 Pressure : 60 psi.  
 วิธีการบำบัดเบื้องต้น : ไม่บำบัดเบื้องต้น  
 อุณหภูมิ : 29.6 °C  
 ค่า pH ป้อนระบบ : 9  
 ค่า TOC ป้อนระบบ : 10.13 mg/L  
 ค่า EC ป้อนระบบ : 2007 µS/cm  
 ค่า UV<sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.328 cm<sup>-1</sup>  
 MFI-NF : 0.0033 min/ml<sup>2</sup>

ตารางที่ ก-8 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 พีเอชที่ 4 ป่าดป้องกันด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/v)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			หมายเหตุ	
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV<sub>254</sub></sub>		
0			1										
5	14.13	59.08	1.41	14.13	0.3539								
10	12.48	52.18	1.25	26.61	0.3758								
20	20.22	42.27	0.91	46.83	0.4271								
30	18.20	38.05	0.91	65.03	0.4613	6.91	670	0.065	22.78	26.70	29.35		
40	14.08	29.44	0.70	79.11	0.5056								
50	13.25	27.70	0.66	92.36	0.5414								
60	12.68	26.51	0.63	105.04	0.5712	6.24	608	0.059	30.30	33.48	35.87		
80	23.72	24.79	0.59	128.76	0.6213								
100	22.18	23.18	0.55	150.94	0.6625								
120	21.13	22.09	0.53	172.07	0.6974	5.55	569	0.051	37.97	37.75	44.57		
140	20.52	18.65	0.45	192.59	0.7269								
160	20.51	21.44	0.51	213.10	0.7508								
180	18.71	19.56	0.47	231.81	0.7765	5.92	560	0.050	33.84	38.73	45.65		
200	19.41	19.32	0.46	251.22	0.7961								
220	18.33	19.16	0.46	269.55	0.8162								
240	16.59	18.25	0.44	286.14	0.8388	5.66	557	0.049	36.81	39.06	46.74		
Retentate	-	-	-	-	-	12.47	1168	0.137	-	-	-		

ตารางที่ ก-9 การเดินระบบเชื่อมกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 พีเอชที่ 7 บำบัดเบื้องต้นด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/V)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			หมายเหตุ	
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>		
0			1										
5	37.65	157.42	1.45	37.65	0.1328								
10	28.52	119.25	1.10	66.17	0.1511								
20	44.02	92.03	0.85	110.19	0.1815								
30	35.10	73.38	0.68	145.29	0.2065	8.35	733	0.083	1.84	6.98	7.78		
40	28.24	59.04	0.54	173.53	0.2305								
50	24.77	51.78	0.48	198.30	0.2521								
60	22.27	46.56	0.43	220.57	0.2720	7.93	668	0.080	6.78	15.23	11.11		
80	38.55	40.30	0.37	259.12	0.3087								
100	32.72	34.20	0.31	291.84	0.3427								
120	28.93	30.24	0.28	320.77	0.3741	7.11	605	0.067	16.46	23.22	25.56		
140	26.49	27.69	0.25	347.26	0.4032								
160	25.17	26.31	0.24	372.43	0.4296								
180	23.69	24.76	0.23	396.12	0.4544	6.40	529	0.059	24.84	32.87	34.44		
200	22.63	23.66	0.22	418.75	0.4776								
220	21.75	22.74	0.21	440.50	0.4994								
240	21.07	22.02	0.20	461.57	0.5200	6.07	551	0.041	28.63	30.08	54.44		
Retentate	-	-	-	-	-	12.11	1068	0.127	-	-	-		

Membrane : NF 90 Filmtec  
 Pressure : 60 psi.  
 วิธีการบำบัดเบื้องต้น  
 : กรองผ่านแท่งกรอง 0.4 µm  
 อุณหภูมิ : 28.3 °C  
 ค่า pH ป้อนระบบ : 7  
 ค่า TOC ป้อนระบบ  
 : 8.51 mg/L  
 ค่า EC ป้อนระบบ : 788 µS/cm  
 ค่า UV<sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.090 cm<sup>-1</sup>  
 MFI-NF : 0.0009 min/ml<sup>2</sup>

ตารางที่ ก-10 การเดินระบบแยกกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 พีเอชที่ 9 บำบัดเบื้องต้นด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตรสะสม (ml)	เวลาต่อปริมาตรสะสม (t/v)	เพอร์มิอัท			%การกักกัน			หมายเหตุ	
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV<sub>254</sub></sub>		
0			1			-	-	-	-	-	-	Membrane : NF 90 Filmtec	
5	39.85	138.85	3.32	39.85	0.1255	-	-	-	-	-	-	Pressure : 60 psi.	
10	11.19	58.48	1.40	51.04	0.1959	-	-	-	-	-	-	วิธีการบำบัดเบื้องต้น	
20	18.17	37.99	0.62	69.21	0.2890	-	-	-	-	-	-	: กรองผ่านแท่งกรอง 0.4 µm	
30	12.39	25.90	0.62	81.60	0.3676	8.37	718	0.078	4.86	16.12	32.17	อุณหภูมิ : 29.7 °C	
40	11.97	25.02	0.60	93.57	0.4275	-	-	-	-	-	-	ค่า pH ป้อนระบบ : 9	
50	9.94	20.78	0.50	103.51	0.4830	-	-	-	-	-	-	ค่า TOC ป้อนระบบ	
60	10.87	22.72	0.54	114.38	0.5246	8.08	647	0.055	8.14	24.42	52.17	: 8.79 mg/L	
80	17.72	18.52	0.44	132.10	0.6056	-	-	-	-	-	-	ค่า EC ป้อนระบบ : 856 µS/cm	
100	19.87	18.88	0.45	151.97	0.6580	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.115 cm <sup>-1</sup>	
120	15.77	18.32	0.44	167.74	0.7154	7.72	428	0.039	12.23	50.00	66.09	MFI-NF : 0.0034 min/ml <sup>2</sup>	
140	17.05	15.50	0.37	184.79	0.7576	-	-	-	-	-	-		
160	16.74	17.50	0.42	201.53	0.7939	-	-	-	-	-	-		
180	16.36	17.10	0.41	217.89	0.8261	7.37	399	0.038	16.22	53.39	66.96		
200	15.90	16.62	0.40	233.79	0.8555	-	-	-	-	-	-		
220	15.51	16.21	0.39	249.30	0.8825	-	-	-	-	-	-		
240	15.39	16.09	0.38	264.69	0.9067	6.75	364	0.036	23.20	57.48	68.70		
Retentate	-	-	-	-	-	11.18	1213	0.15	-	-	-	-	

ตารางที่ ก-11 การเดินระบบแยกกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 พีเอชที่ 4 บำบัดเบื้องต้นด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตรสะสม (ml)	เวลาต่อปริมาตรสะสม (h/v)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			หมายเหตุ
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>	
0			1									
5	29.06	121.51	2.48	29.06	0.1721	-	-	-	-	-	-	
10	18.46	77.18	1.58	47.52	0.2104	-	-	-	-	-	-	
20	29.07	60.77	1.20	76.59	0.2611	-	-	-	-	-	-	
30	45.04	58.85	1.20	121.63	0.2466	5.72	1311	0.067	8.82	13.12	6.94	
40	10.71	55.98	1.14	132.34	0.3023	-	-	-	-	-	-	
50	25.87	54.08	1.10	158.21	0.3160	-	-	-	-	-	-	
60	20.26	42.36	0.86	178.47	0.3362	5.59	1306	0.064	10.91	13.45	11.11	
80	36.51	38.16	0.78	214.98	0.3721	-	-	-	-	-	-	
100	31.18	32.59	0.67	246.16	0.4062	-	-	-	-	-	-	
120	31.64	33.07	0.68	277.80	0.4320	4.68	1166	0.056	25.36	22.73	22.22	
140	26.09	27.27	0.56	303.89	0.4607	-	-	-	-	-	-	
160	23.53	24.60	0.50	327.42	0.4887	-	-	-	-	-	-	
180	23.38	24.44	0.50	350.80	0.5131	4.41	1098	0.054	29.67	27.24	25.00	
200	25.41	26.56	0.54	376.21	0.5316	-	-	-	-	-	-	
220	23.30	24.36	0.50	399.51	0.5507	-	-	-	-	-	-	
240	19.57	20.46	0.42	419.08	0.5727	4.33	1081	0.053	30.88	28.36	26.39	
Retentate	-	-	-	-	-	8.81	1985	0.111	-	-	-	

**ตารางที่ ก-12** การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 ซีเอสที่ 7 บำบัดเบื้องต้นด้วยแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตรสะสม (ml)	เวลาต่อปริมาตรสะสม (UV)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>	
0			1			-	-	-	-	-	-	
5	14.16	59.21	1.29	14.16	0.3531	-	-	-	-	-	-	
10	12.96	54.19	1.18	27.12	0.3687	-	-	-	-	-	-	
20	21.18	44.28	0.96	48.30	0.4141	-	-	-	-	-	-	
30	18.03	37.69	0.82	66.33	0.4523	6.127	876	0.061	8.44	21.43	19.74	
40	16.98	35.50	0.77	83.31	0.4801	-	-	-	-	-	-	
50	14.58	30.48	0.66	97.89	0.5108	-	-	-	-	-	-	
60	14.29	29.87	0.65	112.18	0.5349	5.747	611	0.053	14.12	33.07	26.13	
80	27.64	28.89	0.63	139.82	0.5722	-	-	-	-	-	-	
100	25.99	27.17	0.59	165.81	0.6031	-	-	-	-	-	-	
120	24.22	25.32	0.55	190.03	0.6315	5.186	497	0.049	22.50	55.43	35.53	
140	23.41	24.47	0.53	213.44	0.6559	-	-	-	-	-	-	
160	22.45	23.47	0.51	235.89	0.6783	-	-	-	-	-	-	
180	21.69	22.67	0.49	257.58	0.6988	5.205	520	0.046	22.22	53.36	39.47	
200	20.65	21.59	0.47	278.23	0.7188	-	-	-	-	-	-	
220	20.07	20.98	0.46	298.30	0.7375	-	-	-	-	-	-	
240	21.52	20.45	0.44	319.82	0.7504	5.008	430	0.045	25.16	61.43	40.79	
Retentate	-	-	-	-	-	10.2	1508	0.118	-	-	-	

Membrane : NF 90 Filmtec  
 Pressure : 60 psi.  
 วิธีการบำบัดเบื้องต้น  
 : กรองผ่านแท่งกรอง 0.4 µm  
 อุณหภูมิ : 29.6 °C  
 ค่า pH ป้อนระบบ : 7  
 ค่า TOC ป้อนระบบ  
 : 0.076 mg/L  
 ค่า EC ป้อนระบบ : 1115 µS/cm  
 ค่า UV<sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.076 cm<sup>-1</sup>  
 MFI-NF : 0.0025 min/ml<sup>2</sup>

ตารางที่ ก-13 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสถานะ 5:3 ที่เลขที่ 9 นำไปเปิดเบื้องต้นด้วยแรงดันกรองขนาด 0.4 ไมครอน

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/V)	เปอร์มีเอท				%การกักกัน		
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV<sub>254</sub></sub>	
0			1			-	-	-	-	-	-	-
5	17.42	60.70	1.21	17.42	0.2870	-	-	-	-	-	-	-
10	6.51	34.02	0.68	23.93	0.4179	-	-	-	-	-	-	-
20	13.54	28.31	0.56	37.47	0.5338	-	-	-	-	-	-	-
30	11.91	24.90	0.50	49.38	0.6075	6.471	379.5	0.082	9.24	33.07	26.13	
40	11.51	24.06	0.48	60.89	0.6569	-	-	-	-	-	-	-
50	10.51	21.97	0.44	71.40	0.7003	-	-	-	-	-	-	-
60	10.73	22.43	0.45	82.13	0.7305	5.808	264	0.054	18.54	53.44	51.35	
80	22.47	20.42	0.41	104.60	0.7648	-	-	-	-	-	-	-
100	16.09	19.79	0.39	120.69	0.8286	-	-	-	-	-	-	-
120	18.37	19.20	0.38	139.06	0.8629	5.297	219	0.044	25.71	61.38	60.36	
140	22.62	18.92	0.38	161.68	0.8659	-	-	-	-	-	-	-
160	12.93	18.02	0.36	174.61	0.9163	-	-	-	-	-	-	-
180	17.72	18.52	0.37	192.33	0.9359	5.099	206.5	0.040	28.49	63.58	63.96	
200	17.75	18.55	0.37	210.08	0.9520	-	-	-	-	-	-	-
220	17.72	18.52	0.37	227.80	0.9658	-	-	-	-	-	-	-
240	16.56	17.31	0.35	244.36	0.9822	5.074	214	0.040	28.84	62.26	63.96	
Retentate	-	-	-	-	-	12.66	850	0.175	-	-	-	-

Membrane : NF 90 Filitec  
 Pressure : 60 psi.  
 วิธีการบำบัดเบื้องต้น  
 : กรองผ่านถังกรอง 0.4 µm  
 อุณหภูมิ : 29.7 °C  
 ค่า pH ป้อนระบบ : 9  
 ค่า TOC ป้อนระบบ  
 : 7.13 mg/L  
 ค่า EC ป้อนระบบ : 567 µS/cm  
 ค่า UV<sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.111 cm<sup>-1</sup>  
 MFI-NF : 0.0033 min/ml<sup>2</sup>

ตารางที่ 6-14 การเดินระบบแยกกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 บำบัดเบื้องต้น โดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 70 ppm

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/V)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			หมายเหตุ
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>	
0			1			-	-	-	-	-	-	Membrane : NF 90 Filmtec
5	13.87	41.42	0.75	13.87	0.3605	-	-	-	-	-	-	Pressure : 60 psi.
10	5.67	29.63	0.54	19.54	0.5118	-	-	-	-	-	-	วิธีการบำบัดเบื้องต้น
20	12.52	26.17	0.42	32.06	0.6238	-	-	-	-	-	-	: รวมตะกอนด้วย Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 70 ppm
30	11.01	23.02	0.42	43.07	0.6965	6.06	880	0.104	14.82	21.22	22.39	อุณหภูมิ : 28.9 °C
40	10.48	21.91	0.40	53.55	0.7470	-	-	-	-	-	-	ก่อนรวมตะกอนด้วย Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 70 ppm
50	10.85	22.68	0.41	64.40	0.7764	-	-	-	-	-	-	ค่า pH เริ่มต้น : 6.75
60	7.82	16.35	0.30	72.22	0.8308	5.98	662	0.092	15.93	40.73	31.34	ค่า TOC เริ่มต้น: mg/L
80	21.62	14.58	0.27	93.84	0.8525	-	-	-	-	-	-	ค่า EC เริ่มต้น : 1077 µS/cm
100	10.91	14.26	0.26	104.75	0.9547	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> เริ่มต้น :-
120	15.82	13.78	0.25	120.57	0.9953	3.25	475	0.054	54.37	57.48	59.70	หลังรวมตะกอน
140	6.62	12.58	0.23	127.19	1.1007	-	-	-	-	-	-	ค่า pH ก่อนระบบ : 6.36
160	12.79	12.73	0.23	139.98	1.1430	-	-	-	-	-	-	ค่า TOC ก่อนระบบ : 7.11 mg/L
180	11.63	12.16	0.22	151.61	1.1873	2.96	360	0.043	58.39	67.77	67.91	ค่า EC ก่อนระบบ : 1117 µS/cm
200	10.19	12.53	0.23	161.80	1.2361	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> ก่อนระบบ : 0.134 cm <sup>-1</sup>
220	11.29	12.42	0.23	173.09	1.2710	-	-	-	-	-	-	MFI-NF : 0.0049 min/ml <sup>2</sup>
240	13.38	12.16	0.22	186.47	1.2871	2.06	284	0.033	71.04	75.54	75.37	
Retentate	-	-	-	-	-	10.54	1510	0.207	-	-	-	

ตารางที่ ก-15 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสถานะ 5:3 บำบัดเบื้องต้น โดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วยลูมิเนียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 3 ppm

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (v/v)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			หมายเหตุ
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>	
0			1			-	-	-	-	-	-	Membrane : NF 90 Filmtec
5	47.04	122.93	1.13	47.04	0.1063	-	-	-	-	-	-	Pressure : 60 psi.
10	3.79	39.62	0.36	50.83	0.1967	-	-	-	-	-	-	วิธีการบำบัดเบื้องต้น
20	32.80	68.57	0.52	83.63	0.2391	-	-	-	-	-	-	: 3:5 ไม่บำบัดเบื้องต้น
30	27.29	57.05	0.52	110.92	0.2705	4.078	932	0.058	9.16	10.98	10.77	อุณหภูมิ : 29.7 °C
40	63.90	44.53	0.41	174.82	0.2288	-	-	-	-	-	-	ก่อนรวมตะกอนด้วย Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 3 ppm
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ค่า pH เริ่มต้น : 6.86
60	-	-	-	-	-	4.24	853	0.050	5.55	18.53	23.08	ค่า TOC เริ่มต้น: 6.86 mg/L
80	35.70	37.32	0.34	210.52	0.3800	-	-	-	-	-	-	ค่า EC เริ่มต้น : 1012 µS/cm
100	38.85	33.84	0.31	249.37	0.4010	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> เริ่มต้น : -
120	35.66	29.82	0.27	285.03	0.4210	3.652	828	0.046	18.65	20.92	29.23	หลังรวมตะกอน
140	80.18	30.48	0.28	365.21	0.3833	-	-	-	-	-	-	ค่า pH บ่อนระบบ : 6.60
160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ค่า TOC บ่อนระบบ : 4.48 mg/L
180	-	-	-	-	-	3.944	822	0.045	12.14	21.49	30.77	ค่า EC บ่อนระบบ : 1047 µS/cm
200	25.55	29.67	0.27	390.76	0.5118	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> บ่อนระบบ : 0.065 cm <sup>-1</sup>
220	28.32	28.19	0.26	419.08	0.5250	-	-	-	-	-	-	MFI-NF : 0.0009 min/ml <sup>2</sup>
240	24.30	28.22	0.26	443.38	0.5413	3.826	880	0.053	14.77	15.95	18.46	
Retentate	-	-	-	-	-	5.981	1357	0.081				

ตารางที่ ก-16 การเดินระบบแยกกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 บำบัดเบื้องต้นโดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย FeCl<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 150 ppm

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/V)	เพอร์มิเทท			%การกักกัน			หมายเหตุ
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>	
0			1									
5	22.69	79.06	1.35	22.69	0.2204	-	-	-	-	-	-	Membrane : NF 90 Filmtec Pressure : 60 psi.
10	17.73	74.13	1.27	40.42	0.2474	-	-	-	-	-	-	วิธีการบำบัดเบื้องต้น : 3:5 ไม่มีบำบัดเบื้องต้น
20	20.88	48.50	0.63	61.30	0.3263	-	-	-	-	-	-	อุณหภูมิ : 29. °C
30	19.27	36.62	0.63	80.57	0.3723	4.834	925	0.087	23.09	19.91	24.96	ก่อนรวมตะกอนด้วย FeCl <sub>3</sub> 150 ppm
40	14.39	33.43	0.57	94.96	0.4212	-	-	-	-	-	-	ค่า pH เริ่มต้น :
50	18.17	29.22	0.50	113.13	0.4420	-	-	-	-	-	-	ค่า TOC เริ่มต้น: 10.58 mg/L
60	8.64	25.80	0.44	121.77	0.4927	4.628	870	0.075	26.36	24.68	35.06	ค่า EC เริ่มต้น : -
80	25.34	26.49	0.45	147.11	0.5438	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> เริ่มต้น :
100	27.11	25.76	0.44	174.22	0.5740	-	-	-	-	-	-	
120	23.08	24.13	0.41	197.30	0.6082	4.036	793	0.0625	35.78	31.34	45.89	หลังรวมตะกอน
140	23.16	23.06	0.39	220.46	0.6350	-	-	-	-	-	-	ค่า pH ป้อนระบบ : 4.6
160	18.44	22.68	0.39	238.90	0.6697	-	-	-	-	-	-	ค่า TOC ป้อนระบบ : 6.29 mg/L
180	20.90	21.85	0.37	259.80	0.6928	3.903	766	0.057	37.90	33.68	50.65	ค่า UV <sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.115 cm <sup>-1</sup>
200	20.47	21.40	0.37	280.27	0.7136	-	-	-	-	-	-	ค่า EC ป้อนระบบ : 1115 cm <sup>-1</sup>
220	25.90	21.66	0.37	306.17	0.7186	-	-	-	-	-	-	MFI-NF : 0.0017 min/ml <sup>2</sup>
240	16.08	21.01	0.36	322.25	0.7448	3.676	766	0.059	41.51	33.68	48.92	
Retentate	-	-	-	-	-	8.91	1556	0.141	-	-	-	-

ตารางที่ ก-17 การเดินระบบแยกกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 บำบัดเบื้องต้นโดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย FeCl<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 100 ppm

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/v)	เพอร์มิเทท			%การกักกัน			หมายเหตุ
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>	
0			1			-	-	-	-	-	-	Membrane : NF 90 Filmtec Pressure : 60 psi. วิธีการบำบัดเบื้องต้น : 3:5 ไม่บำบัดเบื้องต้น อุณหภูมิ : 29.7 °C
5	34.94	146.09	1.36	34.94	0.1431	-	-	-	-	-	-	
10	29.69	124.14	1.15	64.63	0.1547	-	-	-	-	-	-	
20	50.49	105.55	0.80	115.12	0.1737	-	-	-	-	-	-	
30	53.74	86.42	0.80	168.86	0.1777	4.977	1056	0.066	7.42	7.12	2.94	
40	25.25	75.41	0.70	194.11	0.2061	-	-	-	-	-	-	ก่อนรวมตะกอนด้วย ppm FeCl <sub>3</sub> 100 ppm
50	35.92	68.27	0.63	230.03	0.2174	-	-	-	-	-	-	ค่า pH เริ่มต้น :
60	25.78	53.90	0.50	255.81	0.2345	5.249	1055	0.062	2.36	7.21	8.82	ค่า TOC เริ่มต้น: mg/L
80	52.55	54.93	0.51	308.36	0.2594	-	-	-	-	-	-	ค่า EC เริ่มต้น :
100	52.00	47.27	0.44	360.36	0.2775	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> เริ่มต้น :
120	34.28	42.16	0.39	394.64	0.3041	4.992	1016	0.066	7.14	10.64	2.94	หลังรวมตะกอน
140	36.16	37.80	0.35	430.80	0.3250	-	-	-	-	-	-	ค่า pH ก่อนระบบ : 5.0
160	42.02	33.79	0.31	472.82	0.3384	-	-	-	-	-	-	ค่า TOC ก่อนระบบ : 5.37 mg/L
180	21.55	32.18	0.30	494.37	0.3641	4.771	987	0.064	11.25	13.19	5.88	ค่า UV <sub>254</sub> ก่อนระบบ : 0.068 cm <sup>-1</sup>
200	29.20	30.52	0.28	523.57	0.3820	-	-	-	-	-	-	ค่า EC เริ่มต้น : 1137
220	30.55	31.93	0.30	554.12	0.3970	-	-	-	-	-	-	MFI-NF : 0.0005 min/ml <sup>2</sup>
240	24.97	26.10	0.24	579.09	0.4144	4.36	959	0.056	18.90	15.66	17.65	
Retentate	-	-	-	-	-	6.9	1446	0.106	-	-	-	

ตารางที่ ก-18 การเดินระบบแยกกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 บำบัดเบื้องต้น โดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย PACI ที่ความเข้มข้น 0.2 ppm

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/vv)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			หมายเหตุ	
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>		
0			1										
5	18.16	75.93	1.07	18.16	0.2753	-	-	-	-	-	-	-	Membrane : NF 90 Filmtec Pressure : 60 psi.
10	13.74	57.45	0.81	31.90	0.3135	-	-	-	-	-	-	-	การบำบัดเบื้องต้น
20	23.58	49.30	0.58	55.48	0.3605	-	-	-	-	-	-	-	: รวมตะกอนด้วย PACI 0.2 ppm
30	21.70	41.24	0.58	77.18	0.3887	6.633	840	0.077	21.95	22.29	51.88	-	อุณหภูมิ : 29.7 °C
40	16.53	38.40	0.54	93.71	0.4268	-	-	-	-	-	-	-	ก่อนรวมตะกอนด้วย PACI 0.2 ppm
50	19.42	31.23	0.44	113.13	0.4420	-	-	-	-	-	-	-	ค่า pH เริ่มต้น :
60	8.67	36.25	0.51	121.80	0.4926	6.259	731	0.065	26.35	32.38	59.38	-	ค่า TOC เริ่มต้น: 10.00 mg/L
80	25.40	26.55	0.37	147.20	0.5435	-	-	-	-	-	-	-	ค่า EC เริ่มต้น : 1085
100	24.76	25.88	0.36	171.96	0.5815	-	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> เริ่มต้น : 0.150
120	23.40	24.46	0.34	195.36	0.6143	5.116	645	0.057	39.28	40.33	64.38	-	
140	21.09	20.04	0.28	216.45	0.6468	-	-	-	-	-	-	-	หลังรวมตะกอน
160	18.83	19.68	0.28	235.28	0.6800	-	-	-	-	-	-	-	ค่า pH ป้อนระบบ :
180	22.62	19.70	0.28	257.90	0.6979	4.42	588	0.053	47.99	45.61	66.88	-	ค่า TOC ป้อนระบบ : 8.49 mg/L
200	18.74	19.59	0.28	276.64	0.7230	-	-	-	-	-	-	-	ค่า EC ป้อนระบบ : 1081 µS/cm
220	15.36	20.07	0.28	292.00	0.7534	-	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.109 cm <sup>-1</sup>
240	20.02	19.02	0.27	312.02	0.7692	4.57	579	0.044	46.22	46.44	72.50	-	MFI-NF : 0.0017 min/ml <sup>2</sup>
Retentate	-	-	-	-	-	12.84	1527	0.109	-	-	-	-	

ตารางที่ ก-19 การเดินระบบแยกกรองด้วยน้ำสภาวะ 5:3 บำบัดเบื้องต้น โดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย PACI ที่ความเข้มข้น 0.4 ppm

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/v)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			หมายเหตุ	
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>		
0			1										
5	38.27	160.01	1.65	38.27	0.1307	-	-	-	-	-	-	-	Membrane : NF 90 Filmtec
10	16.32	56.86	0.59	54.59	0.1832	-	-	-	-	-	-	-	Pressure : 60 psi. วิธีการบำบัดเบื้องต้น :
20	26.21	60.88	0.34	80.80	0.2475	-	-	-	-	-	-	-	3:5 ไม่บำบัดเบื้องต้น อุณหภูมิ : 29.7 °C
30	17.19	32.67	0.34	97.99	0.3062	-	-	-	-	-	-	-	ก่อนรวมตะกอนด้วย PACI 0.4 ppm
40	16.99	29.60	0.31	114.98	0.3479	6.499	894	0.063	1.60	13.62	5.97	-	ค่า pH เริ่มต้น :
50	13.61	23.71	0.24	128.59	0.3888	-	-	-	-	-	-	-	ค่า TOC เริ่มต้น: mg/L
60	5.57	23.29	0.24	134.16	0.4472	4.692	-	0.056	28.96	-	16.42	-	ค่า EC เริ่มต้น :
80	20.73	21.67	0.22	154.89	0.5165	-	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> เริ่มต้น :
100	23.70	21.54	0.22	178.59	0.5599	-	-	-	-	-	-	-	หลังรวมตะกอน
120	18.75	19.60	0.20	197.34	0.6081	3.739	582	0.041	43.39	43.77	38.81	-	ค่า pH ป้อนระบบ : 6.60 mg/L
140	16.62	18.29	0.19	213.96	0.6543	-	-	-	-	-	-	-	ค่า TOC ป้อนระบบ : 6.60 mg/L
160	16.03	17.64	0.18	229.99	0.6957	-	-	-	-	-	-	-	ค่า EC เริ่มต้น : 1035
180	15.42	17.91	0.18	245.41	0.7335	4.106	-	0.050	37.83	-	25.37	-	ค่า UV <sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.067 cm <sup>-1</sup>
200	16.91	17.68	0.18	262.32	0.7624	-	-	-	-	-	-	-	MFI-NF : 0.0028 min/ml <sup>2</sup>
220	16.92	17.69	0.18	279.24	0.7879	-	-	-	-	-	-	-	
240	16.26	17.00	0.18	295.50	0.8122	3.435	515	0.037	47.99	50.24	44.78	-	
Retentate	-	-	-	-	-	8.794	1528	0.111	-	-	-	-	

ตารางที่ ก-20 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำสภาวะ 3:5 บำบัดเบื้องต้นโดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย FeCl<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 150 ppm กรองผ่านแท่งกรอง 0.4 µm

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/v)	เพอร์มิเทอ			%การกักกัน			หมายเหตุ	
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>		
0			1										
5	8.59	35.92	0.76	8.59	0.5821								Membrane : NF 90 Filmtec Pressure : 60 psi. อุณหภูมิ : 30 °C
10	9.56	39.97	0.84	18.15	0.5510								วิธีการบำบัดเบื้องต้น : รวมตะกอนด้วย FeCl <sub>3</sub> 150 ppm และกรอง 0.4 µm
20	17.01	35.56	0.71	35.16	0.5688								
30	19.45	33.89	0.71	54.61	0.5493	9.282	830	0.078	32.05	30.37	22.00		ก่อนรวมตะกอนด้วย FeCl <sub>3</sub> 150 ppm
40	12.25	32.01	0.67	66.86	0.5983								ค่า pH เริ่มต้น : 6.7 ค่า TOC เริ่มต้น: 13.66mg/L
50	14.87	31.09	0.65	81.73	0.6118								ค่า EC เริ่มต้น : 1183 µS/cm
60	14.43	30.17	0.63	96.16	0.6240	9.472	813	0.074	30.66	31.80	26.00		ค่า UV <sub>254</sub> เริ่มต้น : -
80	28.25	29.53	0.62	124.41	0.6430								หลังรวมตะกอน
100	32.19	28.04	0.59	156.60	0.6386								ค่า pH 5.8 ค่า TOC : mg/L
120	18.87	24.66	0.52	175.47	0.6839	8.645	796	0.069	36.71	33.22	31.00		ค่า EC : - µS/cm
140	24.79	25.91	0.54	200.26	0.6991								ค่า UV <sub>254</sub> ป้อนระบบ :- cm <sup>-1</sup>
160	24.25	25.35	0.53	224.51	0.7127								หลังกรองด้วยแท่งกรอง 0.4 µS/cm
180	25.02	26.15	0.55	249.53	0.7214	8.972	827	0.069	34.32	30.62	31.00		ค่า pH ป้อนระบบ :5.8
200	26.9	25.56	0.54	276.43	0.7235								ค่า TOC ป้อนระบบ : 13.66 mg/L
220	21.56	25.04	0.53	297.99	0.7383								ค่า EC เริ่มต้น : 1192 µS/cm
240	23.7	24.77	0.52	321.69	0.7461	8.587	840	0.075	37.14	29.53	25.00		ค่า UV <sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.100 cm <sup>-1</sup>
Retentate	-	-	-	-	-	14.6	1192	0.100	-	-	-		MFI-NF : 0.0006 min/ml <sup>2</sup>

ตารางที่ ก-21 การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำเสาะ 5:3 บำบัดเบื้องต้น โดยการรวมตะกอนทางเคมีด้วย FeCl<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 100 ppm กรองผ่านแท่งกรอง 0.4 µm

เวลา(นาที)	ปริมาตร (ml)	ฟลักซ์ (LMH)	J/J <sub>0</sub>	ปริมาตร สะสม (ml)	เวลาต่อ ปริมาตร สะสม (t/v)	เพอร์มิเอท			%การกักกัน			หมายเหตุ
						TOC (mg/L)	EC (µS/cm)	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	%R <sub>TOC</sub>	%R <sub>EC</sub>	%R <sub>UV254</sub>	
0			1			-	-	-	-	-	-	Membrane : NF 90 Filmtec
5	63.05	263.62	2.63	63.05	0.0793	-	-	-	-	-	-	Pressure : 60 psi อุณหภูมิ : 29.7 °C
10	28.38	118.66	1.18	91.43	0.1094	-	-	-	-	-	-	วิธีการบำบัดเบื้องต้น : รวมตะกอนด้วย FeCl <sub>3</sub> 150 ppm และกรอง 0.4 µm
20	38.25	79.97	0.60	129.68	0.1542	-	-	-	-	-	-	
30	29.00	60.63	0.60	158.68	0.1891	4.459	970	0.06	2.43	7.53	7.69	ก่อนรวมตะกอนด้วย FeCl <sub>3</sub> 100 ppm
40	25.56	53.44	0.53	184.24	0.2171	-	-	-	-	-	-	ค่า pH เริ่มต้น : 7.27 ค่า TOC เริ่มต้น: 9.215 mg/L
50	20.00	41.81	0.42	204.24	0.2448	-	-	-	-	-	-	ค่า EC เริ่มต้น : 1410 µS/cm
60	17.57	36.73	0.37	221.81	0.2705	4.046	863	0.054	11.47	17.73	16.92	ค่า UV <sub>254</sub> เริ่มต้น : - cm <sup>-1</sup>
80	34.59	36.16	0.36	256.40	0.3120	-	-	-	-	-	-	หลังรวมตะกอน
100	29.47	30.80	0.31	285.87	0.3498	-	-	-	-	-	-	ค่า pH : 6.75 ค่า TOC : 5.55 mg/L
120	24.08	25.17	0.25	309.95	0.3872	3.338	791	0.046	26.96	24.59	29.23	ค่า EC เริ่มต้น : 1407 µS/cm
140	23.95	25.03	0.25	333.90	0.4193	-	-	-	-	-	-	ค่า UV <sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.340 cm <sup>-1</sup>
160	24.96	26.09	0.26	358.86	0.4459	-	-	-	-	-	-	หลังกรองด้วยแท่งกรอง 0.4 µS/cm
180	20.23	23.24	0.23	379.09	0.4748	3.259	735	0.042	28.69	29.93	35.38	ค่า pH ป้อนระบบ : 6.75
200	22.24	23.25	0.23	401.33	0.4983	-	-	-	-	-	-	ค่า TOC ป้อนระบบ : 4.57 mg/L
220	21.64	22.62	0.23	422.97	0.5201	-	-	-	-	-	-	ค่า EC เริ่มต้น : 1403 µS/cm
240	21.61	22.59	0.23	444.58	0.5398	3.258	731	0.043	28.71	30.31	33.85	ค่า UV <sub>254</sub> ป้อนระบบ : 0.340 cm <sup>-1</sup>
Retentate	-	-	-	-	-	6.248	1049	0.065	-	-	-	MFI-NF : 0.0013 min/ml <sup>2</sup>

ภาคผนวก ข.

ตารางแสดงผลการทำจาร์เทสต์ (Jar test) ของน้ำทิ้ง

ตารางที่ ข-1 การหาปริมาณการเติมสารรวมตะกอนที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์ทดสอบ (Jar test) ของน้ำทิ้งจากการเติมอากาศ 3:5 และ 5:3 ชั่วโมง

สารรวม ตะกอน	สภาวะการเติมอากาศ : หยุดเติมอากาศ 3:5 ชั่วโมง										สภาวะการเติมอากาศ : หยุดเติมอากาศ 5:3 ชั่วโมง									
	ความ เข้มข้น (mg/L)	ความขุ่น (NTU)					% การกำจัด ความขุ่น	ความ เข้มข้น (mg/L)	ความขุ่น (NTU)					% การกำจัด ความขุ่น						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	pH			SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		pH	SD				
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0	14.08	13.63	14.57	14.09	0.20	0	3.30	3.70	3.57	3.50	0.47	0	3.30	3.70	3.57	3.50	0.47		
	10	10.33	9.88	10.70	10.30	0.10	42.27%	3.38	3.28	3.48	3.380	0.41	1	3.38	3.28	3.48	3.380	0.41		
	30	11.30	11.34	11.11	11.25	0.06	ที่ความ เข้มข้น	3	3.12	3.22	3.1	3.147	0.12	3	3.12	3.22	3.1	3.147	0.12	
	50	10.27	10.46	10.81	10.51	0.21	เข้มข้น	5	3.43	3.42	3.78	3.54	0.27	5	3.43	3.42	3.78	3.54	0.27	
	70	8.20	8.10	8.11	8.14	0.13	70 mg/L	10	5.70	5.95	5.81	5.82	0.06	10	5.70	5.95	5.81	5.82	0.06	
	90	15.40	15.00	15.10	15.17	0.45		20	8.50	9.20	9.34	9.01	0.21	20	8.50	9.20	9.34	9.01	0.21	
FeCl <sub>3</sub>	0	2.11	2.23	2.00	2.11	0.12	0	2.55	2.79	2.86	2.73	0.16	0	2.55	2.79	2.86	2.73	0.16		
	50	1.51	1.72	1.68	1.64	0.11	63.88%	2.85	2.86	2.79	2.83	0.04	50	2.85	2.86	2.79	2.83	0.04		
	100	1.08	1.24	1.88	1.40	0.42	ที่ความ เข้มข้น	100	2.00	2.32	2.4	2.24	0.21	100	2.00	2.32	2.4	2.24	0.21	
	150	0.65	0.73	0.91	0.76	0.13	เข้มข้น	150	2.23	2.31	2.37	2.30	0.07	150	2.23	2.31	2.37	2.30	0.07	
	200	1.61	1.69	1.60	1.63	0.05	150 mg/L	200	2.26	2.63	2.55	2.48	0.19	200	2.26	2.63	2.55	2.48	0.19	
	250	1.58	1.69	1.71	1.66	0.07		250	2.97	2.88	2.64	2.83	0.17	250	2.97	2.88	2.64	2.83	0.17	
PACl	0	3.12	3.18	3.01	3.10	0.09	0	3.29	3.46	3.41	3.39	0.09	0	3.29	3.46	3.41	3.39	0.09		
	0.1	3.22	3.33	3.28	3.28	0.06	5.69%	2.80	2.60	2.95	2.78	0.18	0.1	2.80	2.60	2.95	2.78	0.18		
	0.2	2.83	3.03	2.92	2.93	0.10	ที่ความ เข้มข้น	0.4	2.61	2.57	2.65	2.61	0.04	0.2	2.61	2.57	2.65	2.61	0.04	
	0.3	3.23	3.21	3.13	3.19	0.05	เข้มข้น	0.6	2.70	2.78	2.75	2.74	0.04	0.3	2.70	2.78	2.75	2.74	0.04	
	0.4	4.81	4.28	4.50	4.53	0.27	0.2 mg/L	0.8	2.75	2.90	2.79	2.81	0.08	0.4	2.75	2.90	2.79	2.81	0.08	
	0.5	6.08	6.37	6.10	6.18	0.16		1.0	2.97	2.91	2.92	2.93	0.03	0.5	2.97	2.91	2.92	2.93	0.03	

ภาคผนวก ค.

ตารางผลการวิเคราะห์แสดงแบบจำลองการอุดหนุน

ตารางที่ ๓-1 ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอุดตันเยื่อกรองน้ำของน้ำเสาะ 3:5

Model	Pore Blocking			Pore Constriction			Intermediate			Cake Formation		
	$k_A$ (1/h)	$J^*$ (LMH)	SSE	$k_B$ (1/(m.h) <sup>1/2</sup> )	$J^*$ (LMH)	SSE	$k_C$ (1/m)	$J^*$ (LMH)	SSE	$k_D$ (h/m <sup>2</sup> )	$J^*$ (LMH)	SSE
Pretreatment												
ไม่บำบัดเบื้องต้น pH4	-0.319	13.749	0.430	-0.018	9.000	2.775	-0.002	12.323	0.202	0.000	7.005	2.582
ไม่บำบัดเบื้องต้น pH7	-0.159	12.086	0.422	-0.018	11.168	0.273	-0.002	11.323	0.413	0.000	9.094	3.761
ไม่บำบัดเบื้องต้น pH9	-0.319	14.181	0.135	-0.018	11.168	1.757	-0.002	11.323	0.546	0.000	10.294	4.638
กรอง 0.4 $\mu$ m pH4	-0.01326	17.07156	0.219083	-0.00203	15.54416	0.223922	-0.00029	16.06472	0.276711	-5.2E-06	6.036333	0.291968
กรอง 0.4 $\mu$ m pH7	-0.01919	21.32387	0.202042	-0.002	16.77386	0.220692	-0.00019	16.74312	0.49603	-5.2E-06	20.0256	0.644324
กรอง 0.4 $\mu$ m 5 pH9	-0.02498	16.13724	0.721746	-0.00426	15.76113	0.734463	-0.00019	4.743123	1.226508	-3.6E-06	5.03085	2.10439
รวมตะกอนด้วย												
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-0.04986	13.28409	0.219494	-0.00839	12.83802	0.140041	-0.00143	12.28562	0.089437	-3.9E-05	9.560142	0.055683
รวมตะกอนด้วย FeCl <sub>3</sub>	-0.02689	21.124	0.24382	-0.00394	20.47913	0.261881	-0.00061	20.38452	0.283548	-1E-05	13.37816	0.315273
รวมตะกอนด้วย PACI	-0.02515	19.67068	0.068298	-0.00342	18.4666	0.057709	-0.00045	16.19865	0.056738	-1.2E-05	18.26169	0.147886
รวมตะกอนด้วย FeCl <sub>3</sub>												
รวมกับกรอง 0.4 $\mu$ m	-0.03701	24.92914	0.053686	-0.00598	24.82623	0.049482	-0.00053	24.51529	0.101093	-2.5E-05	24.34496	0.039906

ตารางที่ ค-2 ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอุดตันเชิงกรองน้ำของน้ำสถานะ 5:3

Model	Pore Blocking			Pore Constriction			Intermediate			Cake Formation		
	$k_A$ (1/h)	$J^*$ (LMH)	SSE	$k_B$ $(1/(m \cdot h)^{1/2})$	$J^*$ (LMH)	SSE	$k_C$ (1/m)	$J^*$ (LMH)	SSE	$k_D$ $(h/m^2)$	$J^*$ (LMH)	SSE
วิธีกราบัด												
ไม่บำบัดเบื้องต้น pH4	-0.063	19.436	0.069	-0.009	18.905	0.049	-0.001	18.379	0.045	0.000	11.294	0.269
ไม่บำบัดเบื้องต้น pH7	-0.082	21.211	0.219	-0.009	19.787	0.147	-0.001	18.263	0.182	0.000	18.272	0.502
ไม่บำบัดเบื้องต้น pH9	-0.170	19.007	0.132	-0.016	19.787	0.149	-0.001	18.263	2.180	0.000	11.272	2.769
กรอง 0.4 $\mu$ m pH4	-0.00338	15.00765	1.06522	-0.00195	18.03638	1.064855	-0.00029	16.06472	0.761032	-5.2E-06	6.136333	1.154629
กรอง 0.4 $\mu$ m pH7	-0.01331	19.55314	0.130371	-0.00195	18.03638	0.13329	-0.00029	16.06472	0.07123	-5.2E-06	6.136333	0.141817
กรอง 0.4 $\mu$ m 5 pH9	-0.0492	18.54935	0.119972	-0.00805	18.17896	0.11343	-0.00211	12.323	0.201901	-1.8E-05	18.31538	0.555156
รวมตะกอนด้วย $Al_2(SO_4)_3$	-0.14463	34.51077	0.735624	-0.01338	32.82217	0.704301	-0.00137	31.35078	0.657765	-1.7E-05	29.11024	0.585527
รวมตะกอนด้วย $FeCl_3$	-0.00991	17.23461	0.150368	-0.00152	26.80809	0.255619	-0.00011	18	0.39716	-3.3E-06	29.54198	0.565724
รวมตะกอนด้วย PACI	-0.04879	17.9489	0.351375	-0.00659	17.27707	0.375764	-0.00089	16.17148	0.425256	-1.9E-05	16.25095	0.628747
รวมตะกอนด้วย $FeCl_3$ ร่วมกับกรอง 0.4 $\mu$ m	-0.02119	20.88108	0.520726	-0.00241	17.90555	0.559509	-0.00025	9.826601	0.597239	-6.7E-06	22.98926	0.907104

ภาคผนวก ง.

วิธีการทำจาร์ทดสอบและการคำนวณค่า MFI-NF

### ง-1 วิธีการทำจาร์ทดสอบ

- 1) นำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นแล้ว มาวัดค่าการนำไฟฟ้า พีเอช และความขุ่น เริ่มต้นก่อนทำจาร์ทดสอบ
- 2) เตรียมบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมน้ำทิ้งที่ต้องการทำจาร์ทดสอบลงไปบีกเกอร์ละ 700 มิลลิลิตร 4 บีกเกอร์ เติมหาเคมีที่ช่วยในการรวมตะกอนลงไป
- 3) กวนเร็วด้วยความเร็ว 120 รอบเป็นเวลา 1 นาที และกวนช้าด้วยความเร็ว 30 รอบเป็นเวลา 20 นาที และทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 45 นาที
- 4) นำน้ำส่วนใสมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความขุ่น เพื่อเลือกปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการตกตะกอน

### การคำนวณปริมาณการเติมสารเพื่อทำการตกตะกอน

1. ตัวอย่างการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์จาก Stock เข้มข้น 10000 mg/L

$$\text{จาก } C_1V_1 = C_2V_2$$

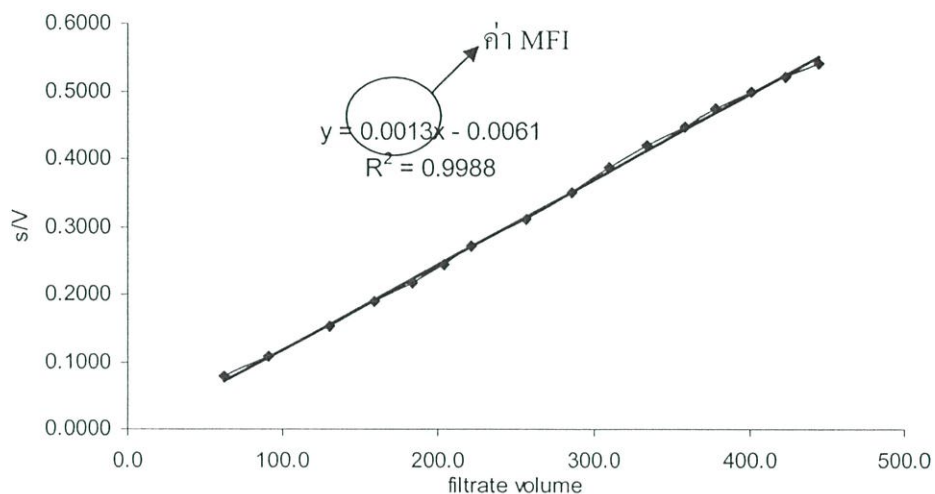
- โดยที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $C_1$ ) = 10000 mg/L  
 ความเข้มข้นที่ต้องการเติมในบีกเกอร์ ( $C_2$ ) = 100 mg/L  
 ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ทดสอบ ( $V_2$ ) = 700 mg/L  
 ปริมาตรสารเคมีที่เติม ( $V_1$ ) = ? mg/L

จะได้ 
$$V_1 = \frac{C_2V_2}{C_1} = \frac{100(\text{mg/L}) \times (700\text{ml})}{10000\text{mg/L}}$$

$$= 7 \text{ ml.}$$

## ง-2 การคำนวณค่าดัชนีชี้วัดการอุดตัน (Modified Fouling Index, MFI)

ดัชนีชี้วัดการอุดตัน ใช้ศึกษาในการวัดอนุภาคที่มาปนกับน้ำที่จะเข้าสู่ระบบเยื่อกรองที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรอง หาได้จากความชันของกราฟที่พลอตระหว่างปริมาตรที่กรองได้สะสม (V) กับเวลาต่อปริมาตรที่กรองได้สะสม (t/V) ตัวอย่างกราฟแสดงค่าดัชนีชี้วัดการอุดตัน



รูปที่ ง-1 กราฟแสดงค่าดัชนีชี้วัดการอุดตันของน้ำที่ผ่านการรวมตะกอนด้วยเฟอรัริกคลอไรด์ 150 มิลลิกรัมต่อลิตรและกรองผ่านแท่งกรองขนาด 0.4 ไมครอน

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวทัศนีย์วรรณ ชมอินทร์
วัน เดือน ปีเกิด	15 มีนาคม พ.ศ. 2525
ที่อยู่	187 หมู่ 4 ต.บ้านเกาะ อ.เมือง จ.อุดรดิตถ์ 53000
ประวัติการศึกษา	2546 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก 2549 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ