สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

# การทำความสะอาดเยื่อกรองนาโนที่อุดตันด้วยสารลดแรงตึงผิว

T107795

นาย ณรงค์ชัย ทองคง
นาย ธนากร เทพราช

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....107795
วัน,เดือน,ปี.....14 พ.ค. 2553

b.12212362
i.....

โครงงานพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Cleaning of Fouled Nanofiltration Membrane using Surfactants

**Mr. Narongchai Thongkhong**

**Mr. Tanakorn Tepparat**

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for**

**the Degree of Bachelor of Science**

**Department of Chemistry**

**Faculty of Science**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

**Academic Year 2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โครงงานพิเศษเรื่อง** การทำความสะอาดเยื่อกรองนาโนที่อุดตันด้วยสารลดแรงตึงผิว


**นักศึกษา** นาย ณรงค์ชัย ทองคง

นาย ธนากร เทพราช

**ภาควิชา** เคมี

**สาขาวิชา** เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์


**ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้ปัญหาพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต**

| คณะกรรมการตรวจสอบ | | ลายมือชื่อ |
|---|---|---|
| ประธานกรรมการ | ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย | ..... |
| กรรมการ | ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ | ..... |
| กรรมการ | ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ | ..... |

.....

(ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชาเคมี


**ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โครงงานพิเศษเรื่อง** การทำความสะอาดเยื่อกรองนาโนที่อุดตันด้วยสารลดแรงตึงผิว

**นักศึกษา** นาย ณรงค์ชัย ทองคง
นาย ธนากร เทพราช

**คณะ** วิทยาศาสตร์

**ภาควิชา** เคมี

**สาขาวิชา** เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

**ปีการศึกษา** 2549

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการทำความสะอาดเยื่อกรองนาโนเพื่อลดการอุดตันด้วยสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ คือ Octyl phenol ethoxylate (Triton-x100) ประจุลบคือ Sodium dodecyl sulfate (SDS) และประจุบวกคือ Benzalkonium chloride ในการทดลองใช้น้ำป้อนระบบที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบเอสบีอาร์ในห้องปฏิบัติการและศึกษาประสิทธิภาพการกรองโดยใช้หน่วยกรองชนิด Dead- end stirred cell filtration unit ที่ความดันคงที่คือ 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การทดลองแบ่งเป็น 3 ตอน คือ 1) การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวในการล้างเยื่อกรองโดยใช้ค่าความเข้มข้นในการล้างเท่ากับค่าความเข้มข้นวิกฤติในการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC) โดยพบว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (SDS) ให้ค่า % recovery สูงที่สุดเท่ากับ 64 % 2) การศึกษาผลของความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวในการล้างเยื่อกรอง โดยเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (SDS) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวส่งผลให้ค่า % recovery สูงขึ้นโดยที่ค่าความเข้มข้นของ SDS ที่ 4, 6, 8.13 และ 9 มิลลิโมลาร์ ให้ค่า % recovery เท่ากับ 36, 58, 64, และ 74 % ตามลำดับ 3) การศึกษาการล้างเยื่อกรองโดยใช้กรดซิตริกและ/หรือด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.0001 โมลาร์ ตามด้วย SDS พบว่าการล้างเยื่อกรองนาโน โดยใช้ด่างตามด้วย SDS มีความเหมาะสมสำหรับการล้างเยื่อกรองที่อุดตันด้วยสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ (SMP) โดยให้ค่า % recovery สูงถึง 84 %

**คำสำคัญ :** การลดลงของฟลักซ์, การอุดตันเยื่อกรองนาโน, ค่าความเข้มข้นวิกฤติการเกิดไมเซลล์, สารลดแรงตึงผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Special Project Title** Cleaning of Fouled Nanofiltration Membrane using Surfactants

**Name** Mr. Narongchai Thongkhong
Mr. Tanakorn Tepparat

**Department** Chemistry

**Program** Environmental Resource Chemistry

**Academic Year** 2006

**Special Project Advisor** Dr. Chalor Jarusutthirak

## ABSTRACT

This project focused on cleaning of fouled nanofiltration (NF) membrane to mitigate membrane fouling using 3 different types of surfactants, including nonionic surfactants (octyl phenol ethoxylate), anionic surfactants (sodium dodecyl sulfate, SDS), and cationic surfactants (benzalkonium chloride). Feed water used in the study was effluent from lab-scale sequencing batch reactor (SBR). Dead- end stirred cell filtration unit was operated at constant pressure mode of 60 psi to investigate NF performance. The experiments were divided into 3 sections as follows: 1) study on surfactants types in cleaning of fouled NF membrane: the concentration of each surfactant was adjusted to its critical micelle concentration (CMC). It was found that, with anionic surfactant (SDS), permeate flux became recovered up to 64% after cleaning. 2) study the effect of surfactant concentration on cleaning performance: the results show that increased concentration of surfactant (SDS) at 4, 6, 8.13 (CMC), and 9 mM, enhanced % flux recovery from 36, 58, 64, to 74%, respectively. 3) study on cleaning of fouled NF membrane using 0.0001 M citric acid and/or 0.0001 M sodium hydroxide, followed by surfactant (SDS): the result exhibited that the use of alkaline solution followed by SDS was an appropriate technique for cleaning of fouled NF membrane, providing 84% of flux recovery.

***Keywords:*** Critical micelle concentration, Flux decline, Membrane fouling, Surfactants

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษเล่มนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลือของ ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่ในการแก้ปัญหาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ผศ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ผศ. กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ และ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ที่กรุณาเสนอแนะ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้โครงงานพิเศษนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งยกระดับความสามารถนักเคมีสิ่งแวดล้อม ให้มีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณ นางสาว ทัศนีย์วรรณ ชมอินทร์ นางสาว ประกายธรรม สุขสถิตย์ และนักศึกษาระดับปริญญาโทสาขาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ช่วยให้คำชี้แนะและคำปรึกษาที่ดีเสมอมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือด้านเครื่องมือวิเคราะห์เป็นอย่างดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความรัก ความห่วงใย และเป็นกำลังใจตลอดมา ทำให้โครงงานพิเศษนี้มีคุณค่า และเกิดการพัฒนาต่อ ๆไป

นาย ณรงค์ชัย ทองคง

นาย ธนากร เทพราช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# นิยามคำศัพท์

| | |
|---|---|
| C | = ความเข้มข้น |
| CA | = เซลลูโลสอะซิเทต |
| $C_f$ | = ความเข้มข้นของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ |
| $C_p$ | = ความเข้มข้นของสารในเพอร์มีเอท |
| J | = ฟลักซ์ของสารผ่านเยื่อกรอง |
| $J_w$ | = ฟลักซ์ของน้ำผ่านเยื่อกรอง |
| mg/L | = มิลลิกรัมต่อลิตร |
| MF | = ไมโครฟิลเตรชัน |
| MEUF | = กระบวนการไมเซลลาร์อัลตราฟิลเตรชัน |
| MWCO | = ขนาดน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคที่ถูกกักกันไว้โดยเยื่อกรอง |
| n | = จำนวนไอออนในสารประกอบ |
| NF | = นาโนฟิลเตรชัน |
| PA | = พอลิเอไมด์เชิงประกอบ |
| PVA | = พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ |
| ppm | = พีพีเอ็ม, ส่วนในล้านส่วน |
| PS | = พอลิซัลโฟน |
| $P_f$ | = ความดันที่ป้อนเข้าสู่ระบบ |
| $P_p$ | = ความดันที่เพอร์มิเอท |
| $P_r$ | = ความดันที่รีเทนเทต |
| $\Delta P$ | = ความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง |
| $Q_f$ | = อัตราการไหลของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ |
| $Q_p$ | = อัตราการไหลของสารผ่านเยื่อกรอง |
| R | = ค่าคงที่ของก๊าซ |
| RO | = รีเวอร์สออสโมซิส |
| $R_f$ | = ความต้านทานทางชลศาสตร์จากการอุดตันของเยื่อกรอง |
| $R_m$ | = ความต้านทานทางชลศาสตร์ของแผ่นเยื่อกรองที่สะอาด |
| %R | = ประสิทธิภาพการกักกันโดยเยื่อกรอง |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%Re = ค่าสัดส่วนของน้ำผ่านเยื่อกรอง

SEM = กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่งอิเล็กตรอน

SMP = สารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ

T = อุณหภูมิ

TMP = ความดันที่ใช้เป็นแรงขับเคลื่อนผ่านเยื่อกรอง

UF = อัลตราฟิลเตรชัน

$\mu$ = ค่าความหนืดของน้ำ

$\Delta\pi$ = ความดันออสโมติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สัญลักษณ์คำย่อ | ง |
| สารบัญ | ฉ |
| สารบัญตาราง | ช |
| สารบัญรูป | ฌ |
| **บทที่ 1 บทนำ** | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาของปัญหาพิเศษ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 2 |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| **บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ** | 4 |
| 2.1 กระบวนการกรองนาโนฟิลเตรชัน | 4 |
| 2.1.1 ทฤษฎีเยื่อกรอง นาโนฟิลเตรชัน | 4 |
| 2.1.2 หลักการกรองผ่านเยื่อกรอง | 5 |
| 2.1.3 ทฤษฎีการกรองผ่านเยื่อกรองนาโน | 6 |
| 2.1.4 กลไกการอุดตันเยื่อกรอง | 8 |
| 2.1.5 การลดลงของฟลักซ์ | 9 |
| 2.2 สารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ | 11 |
| 2.3 สารลดแรงตึงผิว | 11 |
| 2.3.1 การเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิว | 11 |
| 2.3.2 ชนิดของสารลดแรงตึงผิว | 13 |
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 16 |
| **บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย** | 18 |
| 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี | 18 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ ( ต่อ )


3.1.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ 18

3.1.2 สารเคมี 19

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 19

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำป้อนระบบ 21

3.2.2 ระบบเยื่อกรองนาโนฟิลเตรชัน 21

3.2.3 การศึกษาปัจจัยต่างๆในการล้างเยื่อกรองนาโน 24

3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา 25

**บทที่ 4 ผลการวิจัย และอภิปรายผล**

4.1 การศึกษาคุณลักษณะของน้ำป้อนระบบ 26

4.2 การศึกษาการอุดตันของเยื่อกรองนาโนจากสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ 27

4.3 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวในการล้างเยื่อกรองนาโน 28

4.4 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการล้างเยื่อกรองนาโนด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ 30

4.5 การศึกษาการล้างเยื่อกรองนาโนด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบร่วมกับกรดและด่าง 33

4.6 การตรวจสอบการลดการอุดตันเยื่อกรองด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่งอิเล็กตรอน 36

**บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ** 38

5.1 สรุปผลการวิจัย 38

5.2 ข้อเสนอแนะ 38

**เอกสารอ้างอิง** 39

**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก ผลการทดสอบความแม่นยำของระบบ 43

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบค่าฟลักซ์ของการเดินระบบ 45

ภาคผนวก ค ความสามารถในการกักกันสารอินทรีย์ของเยื่อกรองนาโน 55


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


| | | หน้า |
|---|---|---|
| **ตารางที่ 2.1** | การเปรียบเทียบลักษณะการทำงานของเยื่อกรองชนิด RO, NF และ UF | 4 |
| **ตารางที่ 2.2** | ความสามารถในการกักกันสารของเยื่อกรองประเภทต่างๆ | 5 |
| **ตารางที่ 2.3** | รายละเอียดและคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ | 15 |
| **ตารางที่ 3.1** | การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ | 19 |
| **ตารางที่ 3.2** | คุณสมบัติของเยื่อกรองนาโนที่ใช้ในการทดลอง | 20 |
| **ตารางที่ 3.3** | สรุปการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาประสิทธิภาพเยื่อกรองนาโนโดยใช้สารลดแรงตึงผิว | 23 |
| **ตารางที่ 3.4** | วิเคราะห์พารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือหรือวิธีการและมาตรฐานต่างๆ | 25 |
| **ตารางที่ 4.1** | คุณลักษณะของน้ำป้อนระบบ | 26 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

หน้า

**รูปที่ 2.1** การสะสมตัวของสารละลายที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง 10
**รูปที่ 2.2** การจัดเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิว 11
**รูปที่ 2.3** การจัดเรียงตัวของ micelles เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึง 12
**รูปที่ 2.4** การเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิวและรูปร่างของ micelle 13
**รูปที่ 3.1** แผนภาพแสดงขั้นแสดงการดำเนินการวิจัย 20
**รูปที่ 3.2** การติดตั้งชุดทดลองระบบเยื่อกรองนาโนชนิด Dead-end stirred cell 23
**รูปที่ 4.1** การลดลงของค่าฟลักซ์ขณะเดินระบบเยื่อกรองนาโนด้วยน้ำ SMP 28
**รูปที่ 4.2** ค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอตขณะเดินระบบเยื่อกรองนาโนและหลังการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆที่ความความเข้มข้นเท่ากับค่า CMC ของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด 29
**รูปที่ 4.3** เปอร์เซ็นต์ recovery ของการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวประเภทต่างๆที่ความเข้มข้นเท่ากับค่า CMC 30
**รูปที่ 4.4** ค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอตขณะเดินระบบเยื่อกรองนาโนและหลังทำการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ คือ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 4, 6, 8.13 และ 9 mM 32
**รูปที่ 4.5** เปอร์เซ็นต์ recovery ของการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ที่ความเข้มข้นต่างๆ 32
**รูปที่ 4.6** ค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอตขณะเดินระบบเยื่อกรองนาโนและหลังทำการล้างด้วยกรดและด่างร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 8.13 mM 35
**รูปที่ 4.7** เปอร์เซ็นต์ Recovery ของการล้างด้วยกรดและด่างร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ที่ความ เข้มข้นเท่ากับ 8.13 mM 35
**รูปที่ 4.8** การตรวจสอบการลดการอุดตันเยื่อกรองด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่งอิเล็กตรอน 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาของปัญหาพิเศษ

ปัญหาการขาดแคลนน้ำในปัจจุบันทวีความรุนแรงมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง ปริมาณความต้องการน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของ จำนวนประชากรและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมซึ่งประกอบกับคุณภาพของน้ำดิบที่มีความเสื่อมโทรมลงจากภาวะมลพิษทางน้ำ โดยเกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งมีปริมาณและการปนเปื้อนที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ พร้อมกัน โดยน้ำเสียที่ได้จากการบำบัดจะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ ลำคลอง หนองบึง และทะเล เป็นต้น ทำให้แหล่งน้ำเหล่านี้มีปริมาณการปนเปื้อนของน้ำเสียที่เพิ่มสูงขึ้นและก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำหลายประการ จึงได้มีแนวคิด ในการนำน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดและลดปัญหาในการปลดปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอีกด้วย ซึ่งมีหลายวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมซึ่งมีความต้องการน้ำที่มีคุณภาพสูงเพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตจึงนิยมใช้เทคโนโลยีเมมเบรนเข้ามาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น เพราะว่าน้ำเสียที่ได้ทำการผ่านเยื่อกรองนาโนนั้นมีคุณภาพที่ดีสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยเยื่อกรองนาโน (Nanofiltration Membrane, NF) มีคุณสมบัติที่สามารถแยกสารจำพวกอินทรีย์สารและอนินทรีย์สารในน้ำเสียซึ่งมีการเจือปนอยู่ในน้ำเสียได้เป็นอย่างดี แต่เนื่องด้วยการใช้งานเยื่อกรองนาโนมักจะมีปัญหาในด้านการอุดตันบนพื้นผิวและ/หรือ รูพรุนของเยื่อกรองซึ่งเป็นปัญหาที่มีความสำคัญมากต่อการบำบัด (Collin และคณะ , 1985 ; Kaiya และคณะ, 1996) โดยส่งผลกระทบต่อการลดประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ ทำให้มีความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการทำการชำระล้างเยื่อกรองและเสียเวลาในการหยุดระบบเนื่องจากการอุดตันของเยื่อกรองรวมทั้งการเสื่อมสภาพของเยื่อกรองโดยการอุดตันของเยื่อกรองมีหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น สารชีวภัณฑ์ที่ละลายน้ำ (Soluble Microbial Products, SMP) การสะสมตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matters, NOM) และการเกิดตะกรันจากสารอนินทรีย์ (Inorganic Scalant) เป็นต้น

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้สารลดแรงตึงผิว (Surfactants) ในการทำความสะอาดเยื่อกรองนาโนเพื่อลดการอุดตันจากสาร SMP ที่มีอยู่ในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพโดยสารลดแรงตึงผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นตัวที่ช่วยในการลดการเกิดการอุดตัน บริเวณพื้นผิวและรูพรุนของเยื่อกรองนาโน โดยกลไกการทำงานจะทำหน้าที่เป็นตัวจับกับสารอินทรีย์ที่อุดตันบนแผ่นเยื่อกรองนาโน ชะล้างการสะสมตัวบนผิวและลดการอุดตันบนบริเวณพื้นผิวของเยื่อกรอง (Neon และคณะ, 2005) ในการวิจัยนี้ใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ประเภท ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic Surfactants) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic Surfactants) และสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cationic Surfactants) และทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการทำความสะอาดเยื่อกรองได้แก่ ชนิดและค่าความเข้มข้นของสารลด แรงตึงผิว รวมทั้งการใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับกรดและ/หรือด่าง ผลจากการวิจัยมีส่วนช่วยในการพัฒนาการทำงานของระบบเยื่อกรองเพื่อการนำน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์อันจะเป็นการลดปัญหาการขาดแคลนน้ำของภาคอุตสาหกรรมในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิว ในการลดการอุดตันของเยื่อกรองนาโนสำหรับการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิว ในการลดการอุดตันเยื่อกรองนาโน

1.2.3 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ในการใช้สารลดแรงตึงผิวสำหรับการลดการอุดตันเยื่อกรองนาโน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 น้ำป้อนระบบเยื่อกรอง (Feed) ที่ใช้ในการทดลอง ได้จากระบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor, SBR) ซึ่งใช้น้ำตาลซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอนในน้ำเสียสังเคราะห์

1.3.2 เยื่อกรองที่ใช้เป็นเยื่อกรองนาโน รุ่น NF 90 - 4040 บริษัท Osmonics ประเภท Thin film Composite membrane ชนิด Polyamide หน่วยการกรองที่ใช้เป็นแบบ Dead-end stirred cell

1.3.4 ศึกษาการอุดตันของเยื่อกรองนาโนโดย พิจารณาจากฟลักซ์ของน้ำที่ไหลผ่านเยื่อกรอง ที่เวลาต่างๆ โดยใช้ความดันคงที่ 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ( psi )

1.3.5 ตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองได้แก่

1.3.5.1 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่

- สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ : Octyl phenol ethoxylate (Triton-x100)
- สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ : Sodium dodecyl sulfate (SDS)
- สารลดแรงตึงผิวประจุบวก : Benzalkonium chloride

1.3.5.2 ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวพิจารณาจากค่าความเข้มข้นวิกฤติในการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC) ของสารลดแรงตึงผิวโดยแปรค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และลดลงในการทดลอง

1.3.5.3 การล้างด้วยกรดซิตริกและด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.0001 โมลาร์ ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเยื่อกรองนาโนในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

1.4.2 เพื่อเป็นแนวทางในการยืดอายุการใช้งานเยื่อกรองนาโนในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย

1.4.3 ทราบถึงชนิดของสารลดแรงตึงผิวและปริมาณและสภาวะที่เหมาะสมในการลดการอุดตันของเยื่อกรองนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 กระบวนการกรองนาโนฟิลเตรชัน

กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) เป็นกระบวนการแยกสารด้วยเยื่อกรองเพื่อแยกอนุภาคคอลลอยด์ ของแข็งแขวนลอย จุลินทรีย์ และไอออนโดยมีขนาดอยู่ในช่วง 0.001- 0.01 ไมครอน (μm) และขนาดน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคที่ถูกกักกันไว้ โดยเยื่อกรองนาโนอยู่ในช่วง 100 - 1,000 ดาลตัน (Da) ความดันที่ใช้เป็นแรงขับเคลื่อนผ่านเยื่อกรอง (Transmembrane pressure, TMP) อยู่ในช่วง 500 – 1400 กิโลปาสคาล (kPa) โดยความสามารถในการทำงานของ กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน อยู่ระหว่างกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis, RO) และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อกรองทั้ง 3 ชนิด ดังตารางที่ 2.1 และความสามารถในการกักกันสารของเยื่อกรองแต่ละชนิด แสดงในตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.1** การเปรียบเทียบลักษณะการทำงานของเยื่อกรองชนิด RO, NF และ UF (ขันทอง, 2547)

| เยื่อกรอง | ขนาดอนุภาค (μm) | ขนาดรูพรุน (Da) | TMP (kPa) |
|---|---|---|---|
| รีเวอร์สออสโมซิส (RO) | $\leq 0.001$ | $\leq 100$ | 1,300 – 7,000 |
| นาโนฟิลเตรชัน (NF) | 0.001 – 0.01 | 100 – 1,000 | 500 – 1,400 |
| อัลตราฟิลเตรชัน (UF) | 0.01 - 0.1 | 1,000 – 500,000 | 200 – 1,400 |

พอลิเมอร์ที่นิยมใช้ทำเยื่อกรองนาโน ได้แก่ พอลิเอไมด์เชิงประกอบ (Thin film composite polyamide membrane, PA), เซลลูโลสอะซิเทต (Cellulose acetate, CA), พอลิซัลโฟน (Polysulfone, PS) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) และพอลิอะคริโลไนไตรล์ (Polyacrylonitrile) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.2** ความสามารถในการกักกันสารของเยื่อกรองประเภทต่างๆ (มั่นสิน, 2538)

| ชนิดของสารที่กักกัน | ประเภทของเยื่อกรอง | | |
|---|---|---|---|
| | RO | NF | UF |
| Sodium chloride, NaCl | 99 % | 0 – 50 % | 0 % |
| Sodium sulfate, $Na_2SO_4$ | 99 % | 99 % | 0 % |
| Calcium chloride, $CaCl_2$ | 99 % | 0 – 60 % | 0 % |
| Magnesium sulfate, $MgSO_4$ | > 99 % | > 99% | 0 % |
| Sulfuric acid, $H_2SO_4$ | 98 % | 0 % | 0 % |
| Hydrochloric acid, HCl | 90 % | 0 % | 0 % |
| Fructose, MW 180 | > 99 % | > 99 % | 0 % |
| Sucrose, MW 360 | > 99 % | > 99 % | 0 % |
| Humic acids | > 99 % | > 99 % | 0 % |
| Virus | 99.99 % | 99.99 % | 99 % |
| Proteins | 99.99 % | 99.99 % | 99 % |
| Bacteria | 99.99 % | 99.99 % | 99 % |

### 2.1.1 หลักการกรองผ่านเยื่อกรอง

ระบบเยื่อกรองใช้เป็นตัวกลางขวางกั้นระหว่างเฟสของไหลสองเฟส ที่มีสมบัติไม่ให้สารบางชนิดผ่านได้ หลักการกรองพื้นฐานก็คือ มีสารป้อน (Feed) เข้าสู่ระบบทางด้านหนึ่ง แล้วผ่านเยื่อกรองออกไปเรียกว่า เพอร์มิเอท (Permeate) สารละลายที่ออกมาส่วนนี้มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนสารละลายที่ไม่สามารถผ่านไปได้เรียกว่า รีเทนเทต (Retentate) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงมาก โดยการที่สารสามารถผ่านเยื่อกรองไปได้จะอาศัยหลักการดังต่อไปนี้

**1) การละลาย – การแพร่ (Solution-diffusion model)**

เมื่อป้อนสารเข้าสู่ระบบตามปกติ สารที่มีความเข้มข้นสูงกว่าจะแพร่ผ่านเยื่อกรองไปยังส่วนที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า จนกระทั่งความเข้มข้นทั้งสองส่วนมีค่าเท่ากัน เรียกว่า การออสโมซิส (Osmosis) แต่ในความเป็นจริงต้องการไม่ให้สารผ่านไปอีกด้านหนึ่ง คือโมเลกุลของน้ำจะสวนทางกับการออสโมซิสด้วยความดันที่ป้อนเข้าไปทางด้านสารป้อนกระบวนการนี้เรียกว่ารีเวอร์สออสโมซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Reverse Osmosis) หลักการนี้สามารถใช้ได้กับเยื่อกรองนาโน (NF) และเยื่อกรอง รีเวอร์สออสโมซิส (RO) ดังนั้นความดันที่ใช้ในการขับเคลื่อนสาร (Transmembrane pressure) จึงต้องมีค่าสูงกว่าความดันออสโมติกที่เกิดจากสารละลาย (Osmotic pressure) เพื่อให้น้ำเพอร์มิเอท สามารถไหลผ่านเยื่อกรองได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$F_w = K_w (TMP - \Delta\P) \quad \textbf{(2.1)}$$

เมื่อ $F_w$ = ฟลักซ์ของน้ำผ่านเยื่อกรอง

$K_w$ = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านเยื่อกรองของโมเลกุลน้ำ

TMP = ความดันที่ใช้ในการขับเคลื่อนสาร

$\Delta\P$ = ความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมติก

**2) การไหลผ่านรูพรุน (Pore-flow model)**

สมมติว่าความเข้มข้นของตัวทำละลายและตัวถูกละลายภายในเยื่อกรองเท่ากัน การที่สารละลายจะผ่านเยื่อกรองได้ส่วนหนึ่งต้องอาศัยขนาดรูพรุนของเยื่อกรองเป็นตัวกักกันสารละลาย หากสารละลายมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนจะสามารถไหลผ่านรูพรุนตามอัตราการไหล แต่หากสารละลายมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองจะไม่สามารถไหลผ่านเยื่อกรองได้ทำให้สารนั้นติดค้างบนผิวหน้าเยื่อกรอง หลักการนี้สามารถใช้ได้กับเยื่อกรองนาโน (NF), อัลตรา (UF) และ ไมโคร (MF)

**2.1.2 ทฤษฎีการกรองผ่านเยื่อกรองนาโน**

**1) ฟลักซ์ของสารผ่านเยื่อกรอง (Permeate flux)**

เป็นค่าอัตราการไหลของสารผ่านเยื่อกรองมีหน่วยเป็น ปริมาตร/พื้นที่ เวลา สามารถคำนวณได้จากสมการของดาร์ซี (Darcy's Law) ดังสมการที่ 2.2

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m)} \quad \textbf{(2.2)}$$

เมื่อ J = ฟลักซ์ของสารที่ผ่านเยื่อกรอง (Permeate flux) ที่ 25 °C ($m^3/m^2 . min$)

$\Delta P$ = ความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง (psi)

$\mu$ = ค่าความหนืดของน้ำ (psi. min)

$R_m$ = ความต้านทานทางชลศาสตร์ของแผ่นเยื่อกรองที่สะอาด ($m^{-1}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2) ค่าความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง (Transmembrane pressure, TMP)**

ได้แก่ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างความดันที่ป้อนเข้าสู่ระบบ และความดันของเพอร์มิเอต ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$\Delta P = \left(\frac{P_f + P_r}{2}\right) - P_p \qquad (2.3)$$

เมื่อ $\Delta P$ = ความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง (psi)

$P_f$ = ความดันที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (psi)

$P_r$ = ความดันที่รีเทนเทต (psi)

$P_p$ = ความดันที่เพอร์มิเอท (psi)

**3) ค่าสัดส่วนของน้ำผ่านเยื่อกรอง (Recovery factor)**

ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรน้ำที่ผ่านเยื่อกรอง ต่อปริมาตรของน้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ดังสมการที่ 2.4

$$\%\,\mathrm{Re} = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100 \qquad (2.4)$$

เมื่อ % Re = ค่าสัดส่วนของน้ำผ่านเยื่อกรอง

$Q_p$ = อัตราการไหลของสารที่ผ่านเยื่อกรอง ($m^3/d$)

$Q_f$ = อัตราการไหลของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ($m^3/d$)

**4) ประสิทธิภาพการกักกันโดยเยื่อกรอง (% Rejection)**

การกรองผ่านเยื่อกรองสามารถกักกันสารต่างๆ ออกจากน้ำได้โดยการหาประสิทธิภาพการกักกันโดยเยื่อกรอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 (Yang และคณะ, 2007)

$$\%\,R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \qquad (2.5)$$

เมื่อ % R = ประสิทธิภาพการกักกันโดยเยื่อกรอง (%)

$C_p$ = ความเข้มข้นของสารที่เพอร์มิเอท (mol/L)

$C_f$ = ความเข้มข้นของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (mol/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**5) สมดุลมวลของระบบเยื่อกรอง (Membrane Mass Balance)**

การเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuou operation) ความเข้มข้นของสารบนผิวของเยื่อกรองจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีการป้อนน้ำเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องสารละลายจะถูกกักกันไว้ที่ผิวหน้าเยื่อกรอง ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดลดลง ส่วนนี้กำหนดให้การเกิดปฏิกิริยาอยู่ในสภาวะสมดุล ดังสมการที่ 2.5 (Thorsen, 2004)

$$Mass_{in} - Mass_{out} = Accumulation$$

$$Q_f C_f - Q_p C_p = V_r \frac{dC_r}{dt} \quad \textbf{(2.6)}$$

**2.1.3 กลไกการอุดตันเยื่อกรองนาโน**

**1) กลไกการคัดแยกขนาด (Size Exclusion)**

เนื่องจากเยื่อกรองนาโนมีขนาดรูที่เล็กคือ ขนาดประมาณ 150- 300 ดาลตัน ทำให้สารที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเยื่อกรองไม่สามารถที่จะผ่านออกมาได้สารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรอง อาจมีการสะสมตัวบนพื้นผิวหรือในรูพรุนของเยื่อกรองส่งผลให้ความต้านทานบนผิวหน้าเยื่อกรองสูงขึ้นและทำให้อัตราการไหลลดลง กระบวนการนาโนสามารถคัดแยก สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC), สารไตรฮาโลมีเทน (THM), ความกระด้าง, สี และสารละลายไอออนประจุเดี่ยว คิดเป็น 90-95 % , 91-98 %, 85-95 %, 90-97 % และมากกว่า 70 % ตามลำดับ

**2) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุ (Charge Interaction)**

เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองมีประจุที่เกิดจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตในแต่ละชนิด ทำให้เกิดแรงผลัก (Electrostatic repulsion) ระหว่างตัวถูกละลายที่มีประจุชนิดเดียวกันกับผิวหน้าของเยื่อกรอง และยิ่งมีค่าประจุมากก็จะทำให้เกิดแรงผลักมากขึ้น อย่างไรก็ตามแรงผลักไม่มีผลมากเพราะว่าเยื่อกรองแบบนาโนมีการใช้แรงดันที่สูง ในทางกลับกันหากประจุพื้นผิวของเยื่อกรองและตัวถูกละลายมีประจุตรงกันข้ามกัน ก็อาจเกิดการดูดติด (Electrostatic attraction) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดการอุดตันเยื่อกรองนาโนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3) ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ( Hydrophilicity and Hydrophobicity)**

เมื่อเยื่อกรองสัมผัสกับน้ำจะแสดงการตอบสนองต่อโมเลกุลน้ำในลักษณะชอบน้ำโดยสร้างพันธะกับโมเลกุลน้ำ หรือไม่ชอบน้ำโดยการผลักโมเลกุลน้ำให้ห่างออกไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าความชอบน้ำ (Hydrophilicity) และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) โดยอนุภาคในน้ำที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำมีแนวโน้มที่จับตัวกันเป็นอนุภาคคอลลอยด์ และชอบที่จะเข้าไปจับติดกับเยื่อกรองหากมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำเช่นเดียวกัน ส่งผลให้คุณสมบัติของเยื่อกรองเสียไปและทำให้เกิดการอุดตันในเวลาต่อมา

**2.1.4 การลดลงของฟลักซ์ (Flux decline)**

การสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคของสารไม่สามารถกรองผ่านเยื่อกรองได้ และไม่สามารถกลับสู่สารละลายได้อีก เป็นผลให้ตัวถูกละลาย สารโมเลกุลใหญ่ สารแขวนลอย รวมไปถึงสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กระดับเซลสะสมอยู่บนผิวหน้าของเยื่อกรอง และทำให้ความต้านทานของเยื่อกรองเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันดังสมการที่ 2.7

$$J = \frac{\Delta P}{\mu (R_m + R_f)} \qquad (2.7)$$

เมื่อ $J$ = ฟลักซ์ของน้ำผ่านเยื่อกรองที่ 25 °C ($m^3/m^2 . d$)

$\Delta P$ = ความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง (psi)

$\mu$ = ค่าความหนืดของน้ำที่ 25 °C (psi.s)

$R_m$ = ความต้านทานทางชลศาสตร์ของแผ่นเยื่อกรองที่สะอาด ($m^{-1}$)

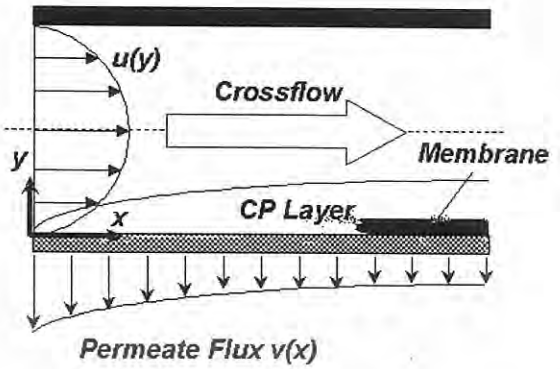
$R_f$ = ความต้านทานทางชลศาสตร์จากการอุดตันของเยื่อกรอง ($m^{-1}$)

สาเหตุของการลดลงของฟลักซ์ เกิดจากปัจจัยดังนี้

**1) ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration polarization)**

เป็นปรากฏการณ์ที่ตัวถูกละลายหรือสารที่ต้องการกรองสะสมอยู่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง โดยเมื่อมีน้ำผ่านเข้ามามากขึ้น สารที่ถูกกักกันมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นบนผิวหน้าเยื่อกรอง ทำให้ความเข้มข้นบริเวณด้านหน้าเยื่อกรองสูงขึ้นตามระยะห่างระหว่างน้ำและเยื่อกรองดังแสดงในรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.1** การสะสมตัวของสารละลายที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง

**2) การเกิดชั้นเค้ก (Cake formation)**

จากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน กำหนดให้มีการตกสะสมของสารที่ต้องการกรอง ในสภาวะคงตัว เนื่องจากอนุภาคแขวนลอย (Macromolecule) มีสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายค่อนข้างต่ำ ทำให้การเคลื่อนที่มวลสารแบบการแพร่ (Diffusion) จากผิวหน้าเยื่อกรองกลับสู่เนื้อสารละลายอยู่ในระดับต่ำไม่สามารถเอาชนะการเคลื่อนที่มวลสารแบบการพา (Convection) เข้าสู่เยื่อกรองได้ จนความเข้มข้นของสารกรองเกินค่าการละลาย (Solubility) ทำให้การตกสะสมของสารกรองกลายเป็นชั้นเนื้อสารบนผิวหน้าเยื่อกรองปิดกั้นการไหลของสารผ่านเยื่อกรอง หากชั้นเนื้อสารดังกล่าวเป็นสารประกอบอินทรีย์จะเกิดโครงสร้างแบบโครงข่ายสามมิติพองตัวมากเรียกว่า ชั้นเจล

**3) การอุดตันภายในรูพรุน (Interior pore blockage)**

จากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน กำหนดให้มีการตกสะสมของสารที่ต้องการกรอง ในสภาวะคงตัว สารกรองซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็ก เช่น สารที่มีขนาดระดับไอออน มีความเป็นขั้วสูงและส่วนใหญ่เป็นไอออนประจุบวกและเนื่องจากเยื่อกรองส่วนใหญ่เป็นประเภทชอบน้ำ (Hydrophilic) มีประจุบนผิวเป็นประจุลบทำให้สารกรองประเภทดังกล่าวเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับผิวของเยื่อกรอง และเข้าไปแทรกอยู่ในระหว่างรูของเยื่อกรองดูดติดที่ผิวด้านในทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง สูญเสียคุณสมบัติการแยกสารกีดขวางการไหล และล้างทำความสะอาดได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.2 สารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ (Soluble Microbial Products, SMP)**

เป็นกลุ่มสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของสารละลายในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพโดยเกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมที่อยู่ในเซลล์จุลินทรีย์ซึ่งเกิดจากการเจริญเติบโต และการย่อยสลายของสารชีวมวล โดยส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์จากเชื้อจุลินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ สามารถจำแนกได้เป็นกลุ่มคือ โปรตีน ฮิวมิก กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน กรดนิวคลีอิก กรดฟุลวิก Polysaccharides, Steroids, Exocellular enzymes, Siderophores ส่วนประกอบต่างๆ ของเซล รวมทั้งผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเมตาบอลิซึม (Barker and Stuckey, 1999) สามารถแบ่งกลุ่มทั้งหมดออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ

1) Utilisation Associated Products (UAP) คือ สาร SMP ที่เกิดการเผาผลาญสารอาหารที่ใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่งจะเปลี่ยนรูปเป็น intermediate ที่ใช้ในการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต การขับถ่ายของเสียซึ่งการผลิต intermediate เป็นอัตราส่วนกับการใช้สารอาหาร

2) Biomass Associated Products (BAP) คือ สาร SMP ที่เกิดจากการแตกสลายของเซลล์ ซึ่งเกิดขึ้นเป็นอัตราส่วนกับความเข้มข้นของชีวมวล (biomass)

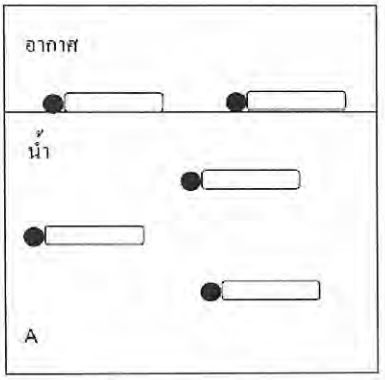
**2.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactants)**

สารลดแรงตึงผิว (Surfactants) คือสารที่ช่วยเพิ่มการละลายของสารใดๆในโมเลกุลของน้ำ ซึ่งสารลดแรงตึงผิวจะประกอบด้วยโมเลกุลหรือไอออน 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีขั้วหรือ ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และ ส่วนที่ไม่มีขั้วหรือ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้ ต้องสมดุลกัน ทำให้ถูกดูดซับที่พื้นผิวหรือระหว่างพื้นผิวของของเหลวทำให้ความเข้มข้นที่พื้นผิวสูงกว่าความ เข้มข้นภายในเนื้อของของเหลวและแรงตึงผิวลดลง

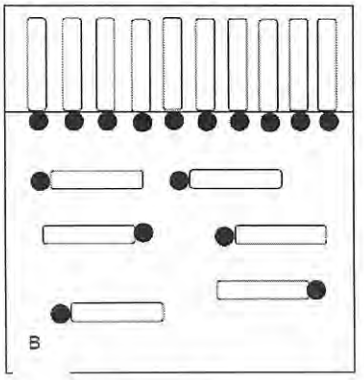
**2.3.1 การเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิว**

ณ จุดที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่ำ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเรียงตัวบนพื้นผิวน้ำ (รูปที่ 2.1 ก) โดยหันส่วนที่มีขั้วเข้าหาน้ำและส่วนที่ไม่มีขั้วทอดขนานกับผิวน้ำ เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น (รูปที่ 2.1 ข) โมเลกุลจะเรียงตั้งตรงโดยหันส่วนที่มีขั้วเข้าหาน้ำ และส่วนที่ไม่มีขั้วเข้าหาอากาศทำให้เปลี่ยนจากระหว่างพื้นผิวน้ำ-อากาศ เป็นระหว่างพื้นผิวไฮโดรคาร์บอน-อากาศ ทำให้แรงตึงผิวของน้ำลดลงเนื่องจากแรงตึงผิวของไฮโดรคาร์บอนจะต่ำกว่าแรงตึงผิวของน้ำส่วนพื้นผิวของน้ำและน้ำมัน โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเรียงตัวโดยหันส่วนที่มีขั้วเข้าหาน้ำและส่วนที่ไม่มีขั้วเขาหาน้ำมัน (รูปที่ 2.1 ค)

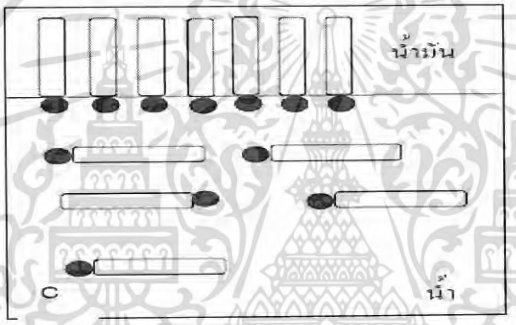
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



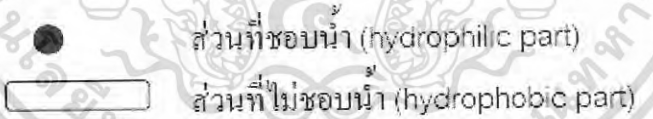

(ก) ที่พื้นผิวของน้ำเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่ำ




(ข) ที่พื้นผิวของน้ำเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงขึ้น




(ค) ที่พื้นผิวของน้ำและน้ำมัน

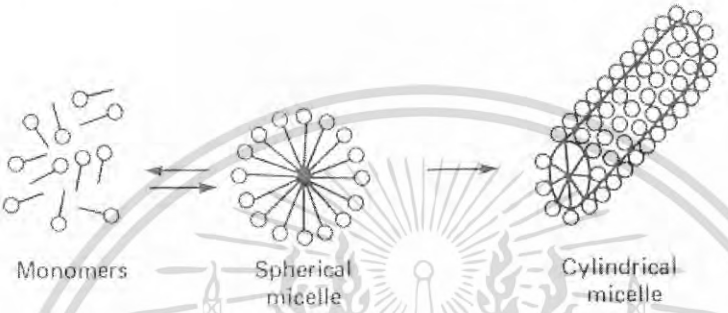



**รูปที่ 2.2** การจัดเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิว

เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงถึงความเข้มข้นหนึ่ง โมเลกุลภายในเนื้อของของเหลวจะรวมกันเป็นกลุ่ม เรียกว่า ไมเซลล์ (micelle) โดยสารละลายที่ประกอบด้วยไมเซลล์เรียกว่า สารละลายไมเซลล์ (micellar solution) ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ต่ำสุดที่เริ่มเกิดไมเซลล์ เรียกว่าความเข้มข้นไมเซลล์วิกฤต (critical micelle concentration, CMC) และจำนวนของสารลดแรงตึงผิวที่รวมตัวกันในแต่ละไมเซลล์เรียกว่า aggregation number โดยทั่วไปไมเซลล์จะประกอบด้วยปริมาณของสารลดแรงตึงผิว 50-100 โมเลกุลต่อหนึ่งไมเซลล์ เมื่อความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวใกล้เคียงความเข้มข้นไมเซลล์วิกฤตนี้ ไมเซลล์จะมีรูปร่างเป็นทรงกลม (spherical micelle) (รูปที่ 2.3 2.4 ก และ 2.4 ข)

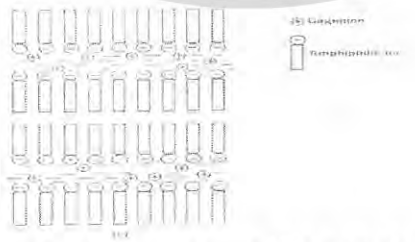
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าความเข้มข้นสูงขึ้นจะมีโอกาสที่ไมเซลล์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นทรงกระบอก (cylindrical micelle) (รูปที่ 2.3 ) หรือแผ่นแบน (laminar micelle) (รูปที่ 2.4 ค) ถ้าของเหลวเป็นน้ำ โมเลกุลจะเรียงตัวโดยหันส่วนที่มีขั้วออกหาน้ำและส่วนไม่มีขั้วเข้าภายในไมเซลล์ (รูปที่ 2.4 ก) แต่ถ้าของเหลวเป็นของเหลวที่ไม่ชอบน้ำ เช่น น้ำมัน โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะหันส่วนที่มีขั้วเข้าภายในไมเซลล์และส่วนไม่มีขั้วออกหาน้ำมัน (รูปที่ 2.4 ข)




**รูปที่ 2.3** การจัดเรียงตัวของ micelles ในรูปแบบต่างๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

(ก) Spherical micelle ในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ (ข) Spherical micelle ในตัวทำละลายที่ไม่ชอบน้ำ



(c) Laminar micelle เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดมีประจุ (ionic surfactant) สูงขึ้น

**รูปที่ 2.4** การเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิวและรูปร่างของ micelle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3.2 ชนิดของสารลดแรงตึงผิว**

สารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีได้ดังนี้

1) สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic surfactants)

สารลดแรงตึงผิวชนิดนอนไอออนิกหรือสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ หมายถึง สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนชอบน้ำไม่แสดงประจุใดๆและในโมเลกุลจะไม่มีไอออนที่ไม่มีบทบาทในสารลดแรงตึงผิว ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้จึงเป็นที่นิยมใช้กันมากมายอย่างแพร่หลาย ในโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวนี้แต่ละชนิดประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ชอบน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆกันทำให้มีอำนาจการละลายน้ำได้ต่างกันอาจแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ คือ

- กลุ่มอนุพันธ์ของโพลีอัลคอกซีเลท (Polyyalkoxylates) เช่น สารประกอบพวกโพลีเอทอกซีเลท (polyethoxylates) และโพลีโพรพอกซีเลท (polypropoxylates) เป็นต้น

- กลุ่มโพลีไกลคอลเอสเทอร์(Polyglycol esters) เช่น กลีเซอริล สเตียเรท เป็นต้น

- กลุ่มผสมของเอทอกซีเลท/โพรพอกซีเลท ( ethoxylates/propoxylates) อัลคาโนลาไมด์ (alkanolamides) เอมีนออกไซด์ (amineoxides) เป็นต้น

2) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic surfactants)

สารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออนิกหรือสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ หมายถึง สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนที่ชอบน้ำแสดงประจุลบและเป็นส่วนที่มีบทบาทในการลดแรงตึงผิว สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบนี้นิยมใช้กันมากมักจะเป็นสารที่ในโมเลกุลประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอกซิเลต (carboxylate) หรือ (sulfonate) กลุ่มหนึ่งสารลดแรงตึงผิวที่ประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอกซิเลตมักจะรู้จักกันในนามของสบู่ ซึ่งโดยทั่วไปจะเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาซาปอนิฟิเคชั่น (saponification) ระหว่างกรดไขมันที่มีอะตอมของคาร์บอนมากๆ เช่น ประมาณ 12- 18 อะตอม กลีเซอรีนในสารละลายที่เป็นด่าง การละลายในน้ำของสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของกรดไขมันและความอิ่มตัวของพันธะทางเคมี ถ้าความยาวของกรดไขมันมีมากจะทำให้การละลายในน้ำลดลง สบู่ที่มีประจุบวก เป็นพวกไอออนที่มีวาเลนซีมากกว่าหนึ่ง เช่น แคลเซียม และแมกนีเซียม จะไม่ละลายน้ำแม้ว่ากรดไขมันจะสั้น ตัวอย่างของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ เช่น Sodium dodecyl sulfate (SDS) เป็นต้น

3) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cationic surfactants)

สารลดแรงตึงผิวชนิดแคทไอออนิกหรือสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก หมายถึง สารลดแรงตึงผิวที่ชอบน้ำแสดงประจุบวก และเป็นส่วนที่มีบทบาทในการลดแรงตึงผิว ส่วนประจุลบที่อยู่ในโมเลกุลจะเป็นไอออนที่ไม่มีบทบาทในการลดแรงตึงผิว ตัวอย่างของสารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ ได้แก่ เกลือของเอมีน และเกลือของควาเทอนารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium salts) ซึ่งต่างก็ละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

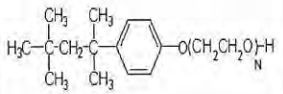
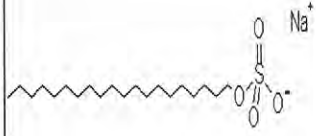
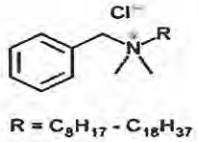
น้ำได้ดี สารกลุ่มนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางในแง่ของสารฆ่าเชื้อและสารปรับสภาพผมมากกว่า ตัวอย่างของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก เช่น Benzalkonium chloride เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้สารลดแรงตึงผิวในการศึกษา 3 ชนิด คือ

- สารลดแรงตึงผิวแบบประจุลบ (Anionic surfactants): Sodium dodecyl sulfate (SDS)
- สารลดแรงตึงผิวแบบประจุบวก (Cationic surfactants): Benzalkonium chloride
- สารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีประจุ (Nonionic surfactants): Octyl phenolethoxylate (Triton -x100)

โดยแต่ละชนิดมีรายละเอียดและคุณสมบัติดังตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** รายละเอียดและคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ

| คุณสมบัติ | สารลดแรงตึงผิว | | |
|---|---|---|---|
| | Octyl phenol ethoxylate (Triton -x100) | Sodium dodecyl sulfate (SDS) | Benzalkonium chloride |
| ประเภท | Nonionic surfactant | Anionic surfactants | Cationic surfactant |
| สูตรทางเคมี | $C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)n$ | $CH_3(CH_2)_{11}OSO_3Na$ | $C_{22}H_{40}NCl$ |
| สถานะ (ที่ 25 C°) | ของเหลว | ของแข็ง | ของแข็ง |
| การละลาย | ละลายในน้ำได้ดี | ละลายในน้ำได้ดี | ละลายในน้ำได้ดี |
| ค่าพีเอชในการเกิดปฏิกิริยา | 6.0 – 8.0 | 6.0 – 8.0 | 6.0 - 9.0 |
| มวลโมเลกุล | 603 g/mol ( n = 9 ) | 288.38 g/mol | 353.5 g / mol |
| ค่า CMC | 0.22 – 0.24 มิลลิโมลาร์ | 8.13 มิลลิโมลาร์ | 0.04 มิลลิโมลาร์ |
| สูตรโครงสร้าง |  |  |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bowen และคณะ (1995) พบว่าอนุภาคของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ปกคลุมบนผิวหน้าของเยื่อกรองจะมีผลต่อการลดลงของฟลักซ์ เนื่องมาจากการสะสมตัวที่เกิดขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติสูงขึ้น จนมีลักษณะเป็นชั้นคล้ายเค้กปกคลุมที่ผิวของเยื่อกรองเป็นผลให้มีความต้านทานของระบบที่เพิ่มมากขึ้น

Nilson และคณะ (1996) พบว่าสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลใหญ่สามารถจะทำให้เกิดการอุดตันบนเยื่อกรองแบบนาโน ทำให้ฟลักซ์ลดลง เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าแรงตึงผิวมากขึ้น ทำให้ติดค้างอยู่กับเยื่อกรอง

Cho และคณะ (2000) พบว่าส่วนประกอบของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่โดยใช้แหล่งน้ำธรรมชาติในการทดลอง เป็นผลให้เกิดการลดลงของฟลักซ์มากที่สุด เนื่องมาจากมีการติดค้างอยู่ในบริเวณรูของเยื่อกรองสูง เป็นผลให้รูของเยื่อกรองแคบลง เกิดการขัดขวางการไหลเป็นผลให้มีความต้านทานสูงขึ้นทำให้เกิดการลดลงของฟลักซ์

Lin และคณะ (2000) พบว่าการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน นอกจากน้ำหนักโมเลกุลแล้วยังสามารถที่จะเกิดการรวมกันของชั้นอนุภาคและขนาดอนุภาค เนื่องจากเกิดการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้า ทำให้มีค่าความต้านทานสูง โดยการลดลงของฟลักซ์ ในเยื่อกรองแบบอัลตราฟิวเตรชัน เกิดขึ้นโดยสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาด 6.5-22.6 kDa

Nuengjamnong และคณะ (2000) ศึกษาบทบาทของสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ ในการเกิดการอุดตันของเยื่อกรอง พบว่าแนวโน้มของความเข้มข้นของคาร์บอนอินทรีย์ใน SMP ไม่ขึ้นอยู่กับอายุตะกอนสลัดจ์ แต่ส่วนของโปรตีนใน SMP มีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุตะกอนสลัดจ์เพิ่มขึ้นและหาค่าความต้านทานของเค้กจำเพาะ (specific cake resistance) ของชั้นการอุดตัน โดยความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานบ่งชี้ให้เห็นถึงความต้านทานของ SMP ซึ่งมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่าความต้านทานทั้งหมด นอกจากนี้พบว่า SMP เป็นส่วนประกอบหลักของทั้งในแผ่นฟิล์มชีวภาพและในของเหลวตะกอน SMP จึงมีบทบาทที่สำคัญต่อการเกิดการอุดตันของเยื่อกรอง

Lin และคณะ (2004) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อในการลดลงของอัตราการไหลออกของน้ำผ่านเยื่อกรองโดยใช้แบบจำลอง Phenomenological ซึ่งเป็นแบบจำลองเกี่ยวกับการเกิดชั้นเค้กบนเยื่อกรอง จากการศึกษาพบว่าอัตราการไหลออกลดลงอันเนื่องมาจากปริมาณของสารอินทรีย์และปริมาณการตกตะกอน ผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองพบว่าในช่วงแรกนั้น น้ำผ่านเยื่อกรองจะมีอัตราการไหลที่เร็วและจะมีการก่อตัวของชั้นเค้กที่ละน้อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ชั้นเค้กจะมีความหนาขึ้นและการลดลงเกิดฟลักซ์สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



Kilduff และคณะ (2004) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ระดับ 0 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง โดยความเข้มข้นสูงยิ่งทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงมากขึ้น เนื่องมาจากความต้านทานจากชั้นเค้ก ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงและความสามารถในการกำจัดเกลือลดลง และเมื่อมีการเพิ่มระดับพีเอชเป็น 10 พบว่าค่าฟลักซ์ที่ได้ มีค่าที่ลดลงมากที่สุด

Ang และคณะ (2006) ศึกษาปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของการชะล้างเยื่อกรอง RO ที่เกิดการอุดตันจากสารอินทรีย์ พบว่าการใช้สาร NaOH และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุเป็นลบ จะสามารถทำการชะล้างสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการอุดตันบนเยื่อกรอง RO ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ผลทางเคมี ( ปริมาตรความเข้มข้นที่ใช้ และ pH ) และผลทางกายภาพ ( เวลา ความเร็วในการไหลผ่านสภาพระหว่างการชะล้าง ) โดยใช้สาร NaOH ในการทำการชะล้างซึ่งพิจารณาจากปัจจัยทางกลศาสตร์ 2 อย่างคือ ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างตัวชะล้างกับสารอินทรีย์ที่เกิดการอุดตันบนพื้นผิวเยื่อกรอง และอัตราการเคลื่อนที่ของตัวชะล้างกับสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการอุดตัน

107795

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3
# การดำเนินการวิจัย

## 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

### 3.1.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์

1) เยื่อกรองนาโน รุ่น NF 90 - 4040 บริษัท Osmonics ประเภท Thin film composite membrane ชนิด Polyamide
2) ชุดเยื่อกรอง ประกอบด้วย ถังก๊าซ ไนโตรเจน ($N_2$), Dead-end stirred cells filtration unit รุ่น 8200 ยี่ห้อ Amicon, Pressure Gage และถังเก็บน้ำป้อนระบบ (Feed Reservoir) ความจุ 10 ลิตร
3) บีกเกอร์ ขนาด 100, 250, 500 และ1000 มิลลิลิตร
4) แท่งแก้วคนสาร
5) ช้อนตักสาร
6) ปิเปต ขนาด 5, 10 และ 25 มิลลิลิตร
7) ลูกยาง
8) สายยางซิลิโคน
9) ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 และ 100
10) เครื่องปั่นกวน (Stirred plate)
11) นาฬิกาจับเวลา
12) เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter) บริษัท Denver Instrument รุ่น 215 ประเทศอังกฤษ
13) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) บริษัท Wissenschaftlich-Technische Werkstatten GMBH ประเทศเยอรมัน
14) ชุดกรองขนาด 5 และ0.3 ไมครอน
15) กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่งอิเล็คตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น 1450VP บริษัท Leo ประเทศอังกฤษ
16) เครื่องวิเคราะห์ Total Organic Carbon (TOC) รุ่น VCPH, บริษัท Shimadzu Corporation ประเทศญี่ปุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

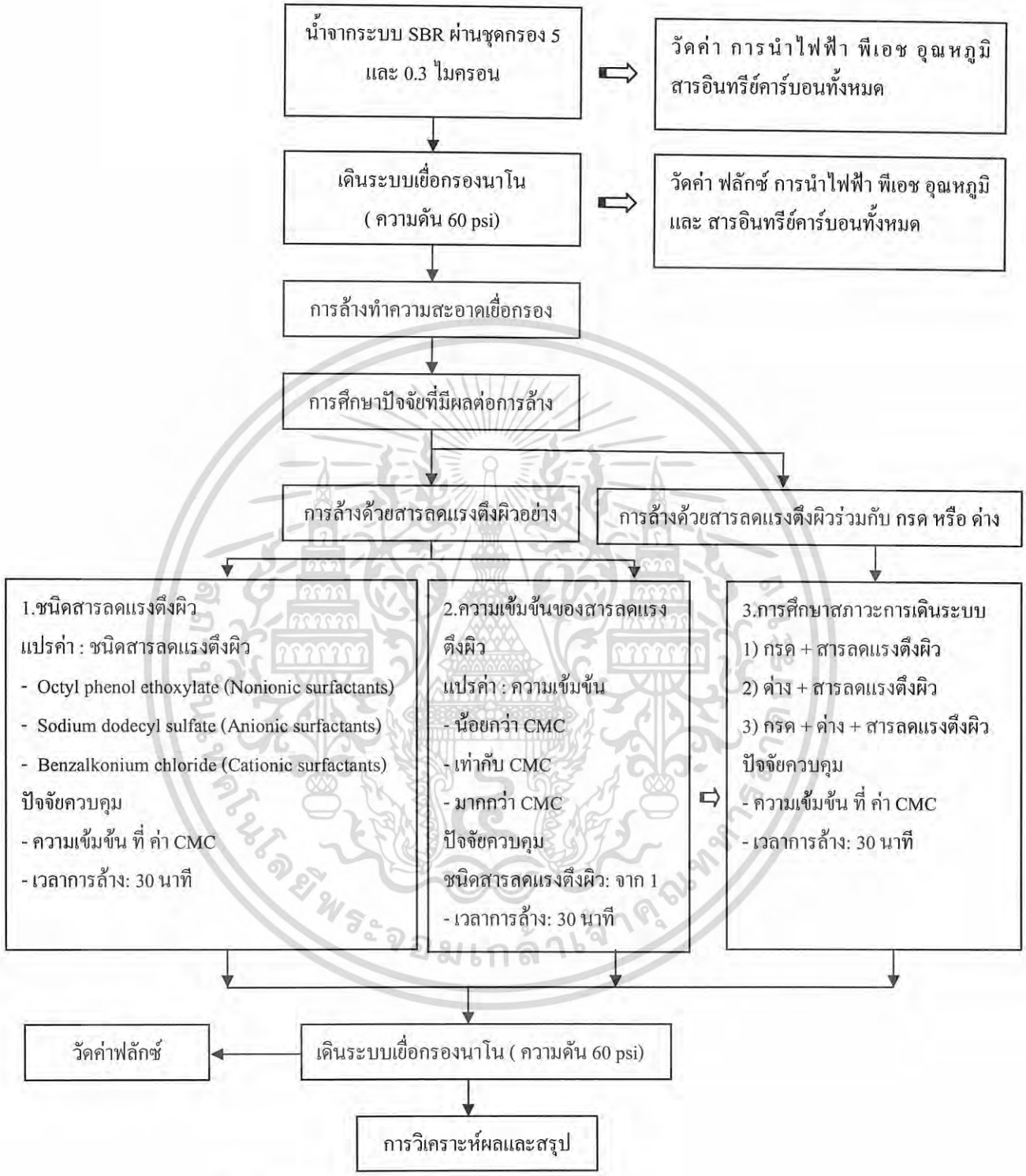
### 3.1.2 สารเคมี

1) สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($NaHSO_3$) 1 % เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent
2) สารละลายกรดซิตริก เข้มข้น 0.0001 โมลาร์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent
3) สารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.0001 โมลาร์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Lab Scan
4) สารละลาย Sodium dodecyl sulfate เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fluka chemika
5) สารละลาย Benzalkonium chloride เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba reagent
6) สารละลาย Octyl phenol ethoxylate เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fluka chemika
7) น้ำปราศจากไอออน (Deionize Water)

## 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ได้แก่ 1) การเตรียมน้ำป้อนระบบจากระบบเอสบีอาร์ 2) การเดินระบบเยื่อกรองนาโน 3) การล้างทำความสะอาดเยื่อกรอง โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นที่เหมาะสม และการล้างด้วยกรดและด่างร่วมการสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น และ 4) การวิเคราะห์ผลการทดลองและสรุป ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.1** แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำป้อนระบบ

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจากระบบเอสบีอาร์โดยใช้น้ำตาลซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับจุลินทรีย์ และปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสซึ่งใช้เป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สารอาหารที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในการแสดงดังตารางที่ 3.1 ( Lee และคณะ, 2003)

**ตารางที่ 3.1** การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับระบบเอสบีอาร์

| สารที่ใช้ | น้ำหนัก ( กรัม )* |
|---|---|
| $C_{12}H_{22}O_{11}$ | 17.76 |
| $NH_4Cl$ | 2.96 |
| $MgSO_4.7H_2O$ | 0.34 |
| $CaCl_2.2H_2O$ | 0.019 |
| $KH_2PO_4$ | 33.36 |
| $Na_2HPO_4$ | 41.60 |

* ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 40 ลิตร

### 3.2.2 ระบบเยื่อกรองนาโนฟิลเตรชัน

1) การเตรียมเยื่อกรอง

เป็นเยื่อกรองนาโน รุ่น NF 90 - 4040 บริษัท Osmonics ประเภท Thin film composite membrane ชนิด Polyamide โดยนำเยื่อกรองแบบนาโนมาตัดให้เป็นแผ่นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตร พื้นที่เยื่อกรอง 28.7 ตารางเซนติเมตร เพื่อสามารถนำมาใส่ลงในชุดเยื่อกรอง สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ตัดแล้วและยังไม่ได้นำมาใช้งานในทันที ควรเก็บรักษาโดยแช่ในสารละลาย Sodium metabisulphite ความเข้มข้น 1 % เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และนำไปเก็บในตู้เย็นเพื่อลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่มีผลต่อผิวหน้าเยื่อกรอง โดยเยื่อกรองนาโนที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.2** คุณสมบัติของเยื่อกรองนาโนที่ใช้ในการทดลอง

| คุณลักษณะ | ค่า |
|---|---|
| ประเภทของเยื่อกรอง | Thin film membrane |
| วัสดุที่ใช้ทำเยื่อกรอง | Polyamide |
| รุ่น / บริษัท | NF 90 -4040 / Osmonics |
| พื้นผิว | ประจุลบ |
| การกำจัดเกลือ $MgSO_4$ | 99 % |
| ช่วงพีเอชของการดำเนินการ | 2 – 11 |
| ช่วงพีเอชของการทำความสะอาด | 1 – 12 |
| ความดันสูงสุดที่ทนได้ | 600 psi (4,136 kPa) |
| อัตราการไหลสูงสุดที่ทนได้ | 3.6 $m^3$/hr (16 gpm) |
| อุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้ | 40°C (104°F) |

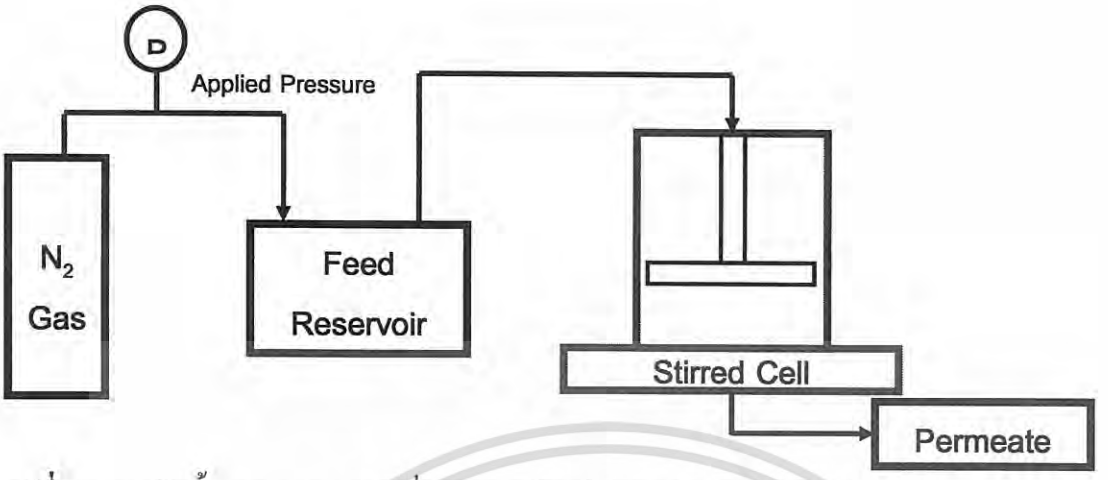
ก่อนการใช้งานเยื่อกรองจะต้องทำความสะอาดก่อน โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ล้างเยื่อกรองนาโนด้วยน้ำปราศจากไอออน
- ล้างเยื่อกรองด้วยกรด โดยผ่านสารละลายกรดซิตริก (Citric acid) เข้มข้น 0.0001 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 30 นาที
- ล้างออกด้วยน้ำปราศจากไอออน
- ล้างเยื่อกรองด้วยด่าง โดยผ่านสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.0001 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 30 นาที

2) การติดตั้งระบบ

ชุดเยื่อกรอง ประกอบด้วยชุด Dead-end stirred cells filtration unit รุ่น 8200 ยี่ห้อ Amicon, Pressure gage ถังเก็บน้ำป้อนระบบ (Feed reservoir) ความจุ 10 ลิตร และถังก๊าซ ไนโตรเจน ($N_2$) ทำการติดตั้งดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.2** การติดตั้งชุดทดลองระบบเยื่อกรองนาโนชนิด Dead-end stirred cell

3) การทดสอบค่าฟลักซ์

เดินระบบด้วยน้ำกลั่น และวัดอัตราการไหลผ่านเยื่อกรอง เพื่อทราบค่า ฟลักซ์เริ่มต้น โดยวัดอัตราการไหลทุกๆ 5 นาที ใน 20 นาทีแรก และจากนั้นวัดอัตราการไหลทุกๆ 10 นาที โดยใช้บีกเกอร์รองน้ำที่ผ่านออกมาทางเพอร์มิเอทแล้ววัดปริมาตร และชั่งน้ำหนัก (เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของเพอร์มิเอท) จนกว่าค่า ฟลักซ์จะคงที่

4) การทดสอบการอุดตันระบบเยื่อกรองนาโน

ผ่านตัวอย่างน้ำป้อนระบบ และจับเวลาตั้งแต่ตัวอย่างเข้าสู่ระบบ ศึกษาการลดลงของฟลักซ์จากการอุดตัน โดยวัดอัตราการไหลทุกๆ 10 นาที ในชั่วโมงแรก และทุกๆ 30 นาทีในชั่วโมงถัดไปจนครบ 360 นาที โดยใช้บีกเกอร์รองน้ำที่ผ่านออกมาทางเพอร์มิเอทเป็นเวลา 10 และ 30 นาที แล้ววัดปริมาตร และชั่งน้ำหนัก (เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของเพอร์มิเอท) นำเยื่อกรองถ่ายภาพการอุดตันด้วย SEM

5) การศึกษาความสามารถในการกักกันสารของเยื่อกรอง

เก็บตัวอย่างน้ำจากระบบไปวิเคราะห์ พีเอช สภาพการนำไฟฟ้า อุณหภูมิ สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด โดยเก็บตัวอย่างน้ำป้อนระบบและเพอร์มิเอทที่เวลา 0, 10, 30, 60, 90, 150, 240, 360 และในส่วนรีเทนเตท

### 3.2.3 การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำความสะอาดเยื่อกรอง

ในการล้างเยื่อกรองนาโนและหาค่าฟลักซ์ของน้ำหลังการล้างมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1) นำเยื่อกรองที่ผ่านการเดินระบบจนเกิดการอุดตันออกจากชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) นำเยื่อกรองที่อุดตันแช่ลงไปในบีกเกอร์ที่มีสารลดแรงตึงผิว กรด หรือด่าง อยู่ 150 มิลลิลิตร โดยคว่ำผิวหน้าของเยื่อกรองลงไป และปั่นกวนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

3) นำเยื่อกรองออกจากการล้างและล้างผิวหน้าของเยื่อกรองด้วยน้ำกลั่น

4) นำเยื่อกรองเข้าสู่การเดินระบบ

5) วัดการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์จากการทำความสะอาดเยื่อกรอง โดยวัดอัตราการไหลทุกๆ 10 นาที ในชั่วโมงแรก และทุกๆ 30 นาทีในชั่วโมงถัดไปจนครบ 360 นาที โดยใช้ บีก เกอร์รองน้ำที่ผ่านออกมาทางเพอร์มิเอท แล้ววัดปริมาตร และชั่งน้ำหนัก (เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของเพอร์มิเอท)

6) คำนวณหา % recovery โดย % recovery = $(J/J_0) \times 100$

7) เก็บเยื่อกรองเพื่อถ่ายภาพการอุดตันด้วย SEM ( เพื่อเปรียบเทียบเยื่อกรองที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เยื่อกรองที่อุดตัน และเยื่อกรองที่ผ่านการล้าง )

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการล้างเยื่อกรองนาโนสำหรับงานวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

3.2.3.1 ชนิดของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ศึกษามี 3 ชนิด คือ

1) Octyl phenol ethoxylate (Nonionic surfactants) ค่า CMC 0.23 mM

2) Sodium dodecyl sulfate (Anionic surfactants) ค่า CMC 8.13 mM

3) Benzalkonium chloride (Cationic surfactants) ค่า CMC 0.04 mM

ทำการทดลองตามข้อ 3.2.2 โดยล้างเยื่อกรองใช้ค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด ที่ ค่า CMC

3.2.3.2 ความเข้มข้นของสารลดแรงตึง

เลือกใช้สารลดแรงตึงผิวจากข้อ 3.2.3.1 ที่สามารถล้างเยื่อกรองเหมาะสมที่สุด และทำการทดลองตามข้อ 3.2.2 โดยแปรค่าความเข้มข้นของการล้างเป็นค่า CMC และค่าเพิ่มขึ้นและลดลงจากค่า CMC

3.2.3.3 การล้างโดยใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับ กรด หรือ ด่าง

ใช้กรดซิตริกและด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.0001 โมลาร์ ล้างร่วมกับสารลดแรงตึงผิวจากข้อ 3.2.3.1 ที่สามารถล้างเยื่อกรองได้เหมาะสมที่สุด โดยแบ่งการล้างเป็น 3 ตอน คือ 1) การล้างด้วยกรดตามด้วยกับสารลดแรงตึงผิว 2) การล้างด้วยด่างตามด้วยสารลดแรงตึงผิว 3) การล้างด้วยกรด ด่าง และตามด้วยสารลดแรงตึงผิว โดยทำการทดลองตามข้อ 3.2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา

น้ำป้อนระบบเพอร์มิเอทและรีเทนเทตที่เก็บรวบรวมได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3** พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา

| พารามิเตอร์ | เครื่องมือ |
|---|---|
| พีเอช | pH meter |
| ค่าการนำไฟฟ้า | Conductivity meter |
| อุณหภูมิ | Thermometer |
| ค่าสารอินทรีย์คาร์บอนรวม | Total Organic Carbon Analyzer |
| ถ่ายภาพการอุดตัน | Scanning Electron Microscope |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

# ผลการวิจัย และอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการลดการอุดตันของเยื่อกรองนาโนฟิลเตรชัน ด้วยการล้างเยื่อกรองหลังจากการเดินระบบด้วยน้ำป้อนระบบ ซึ่งเป็นน้ำที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จากระบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor, SBR) ในห้องปฏิบัติการ โดยน้ำทิ้งจากระบบเอสบีอาร์จะผ่านการกรองด้วยชุดกรองไมโครฟิลเตรชัน (MF) ซึ่งมีขนาด 5 และ 0.3 ไมครอนตามลำดับก่อนที่จะนำมาเดินระบบเพื่อให้เกิดการอุดตันจากนั้นทำการศึกษาการล้างเยื่อกรองโดยใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิดคือสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ และสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเพื่อทดสอบหาชนิดของสารลดแรงตึงผิว และความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการล้าง รวมไปถึงการใช้สารลดแรงตึงผิวล้างร่วมกับกรดและด่าง โดยทำการวัดค่าฟลักซ์ของน้ำที่ผ่านเยื่อกรอง ค่าการนำไฟฟ้า ค่าพีเอช ค่าอุณหภูมิและค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เพื่อใช้บอกสภาวะที่เหมาะสมและค่าประสิทธิภาพในการล้างเยื่อกรองได้

## 4.1 คุณลักษณะของน้ำป้อนระบบ

การทดลองใช้น้ำป้อนระบบจากระบบเอสบีอาร์ (SBR) ซึ่งในการเดินระบบในแต่ละครั้งจะมีค่าพารามิเตอร์ของน้ำป้อนระบบที่แตกต่างกัน เช่น ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้าและค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด ซึ่งขึ้นอยู่กับการบำบัดในแต่ละวันของระบบ โดยค่าที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.1 จากข้อมูลคุณลักษณะของน้ำป้อนระบบพบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละพารามิเตอร์ค่อนข้างสูง แสดงถึงความแปรปรวนของข้อมูลซึ่งอาจมีผลต่อความแตกต่างในการเกิดการอุดตันเยื่อกรองและการลดลงของฟลักซ์ระหว่างการเดินระบบได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ของน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสียจริงพบว่า ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ อาจมีค่าไม่สม่ำเสมอ เช่นเดียวกัน

**ตารางที่ 4.1** คุณลักษณะของน้ำป้อนระบบ

| พารามิเตอร์ | ค่า | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|
| ค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด( mg/L ) | 8.05 -19.09 | 11.3 | 3.49 |
| ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu S/cm^2$ ) | 748 -1923 | 1218 | 396 |
| ค่าพีเอช | 6.22 - 6.97 | 6.66 | 0.25 |
| ค่าอุณหภูมิ (°C ) | 23.70 - 28.50 | 26.4 | 1.88 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.2 การศึกษาการอุดตันของเยื่อกรองนาโนโดยสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ (SMP)**

จากการเดินระบบเยื่อกรองนาโนด้วยน้ำป้อนระบบจากถัง SBR ที่ผ่านการกรองเบื้องต้นด้วยเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน (MF) ซึ่งได้ทำการศึกษาการอุดตันของเยื่อกรองนาโนโดยเลือกพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า และค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของน้ำป้อนระบบซึ่งมีผลต่อการเกิดการอุดตันของเยื่อกรอง สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มตามคุณลักษณะของน้ำป้อนระบบ ได้แก่

1) กลุ่มน้ำป้อนระบบที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ ค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดต่ำ

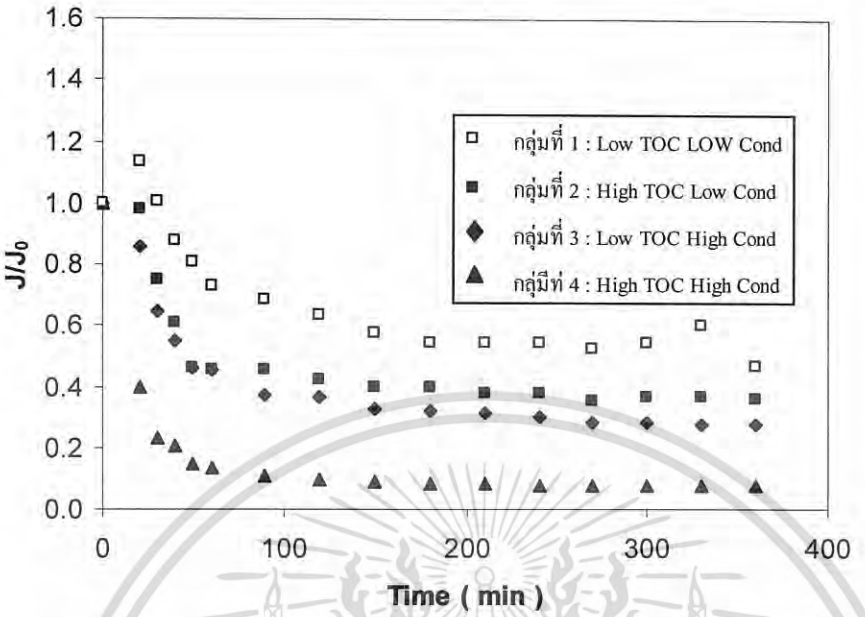
2) กลุ่มน้ำป้อนระบบที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ ค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดสูง

3) กลุ่มน้ำป้อนระบบที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง ค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดต่ำ

4) กลุ่มน้ำป้อนระบบที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง ค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดสูง

จากรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงการลดลงของฟลักซ์ในช่วงระยะเวลาการเดินระบบต่างๆพบว่าคุณลักษณะของน้ำป้อนระบบ โดยเฉพาะค่าการนำไฟฟ้าและค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดมีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองและการลดลงของฟลักซ์ โดยน้ำป้อนระบบที่มีทั้งค่าการนำไฟฟ้าและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดสูง (กลุ่มที่ 4) มีค่าการลดลงของฟลักซ์สูงสุดถึง 93 % น้ำป้อนระบบกลุ่มที่ 2 และ 3 ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าหรือสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด ค่าใดค่าหนึ่งสูงในกลุ่มที่ 2 และ 3ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงถึง 53 % และ 64 % ตามลำดับ ส่วนน้ำป้อนระบบที่มีค่าการนำไฟฟ้าและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดต่ำ (กลุ่มที่ 1) แสดงค่าการลดลงของฟลักซ์ต่ำที่สุด คือประมาณ 40 % จากผลการทดลองพบว่า ทั้งสาร อนินทรีย์และสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในรูปของ SMP มีส่วนทำให้เกิดการอุดตันเยื่อกรอง นาโนได้ โดยสารอนินทรีย์อาจส่งผลให้เกิดการอุดตันในรูปของการเกิดตะกรัน (Scale formation) หรือปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน เพิ่มแรงดันออสโมติกบริเวณผิวของเยื่อกรองและลดค่า ฟลักซ์ของน้ำผ่านเยื่อกรองได้ ส่วน SMP อาจก่อให้เกิดการอุดตันเยื่อกรองในรูปของการเกิดชั้นเจลและการเกิดชั้นเค้ก (Nuengjamnong และคณะ, 2000) ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

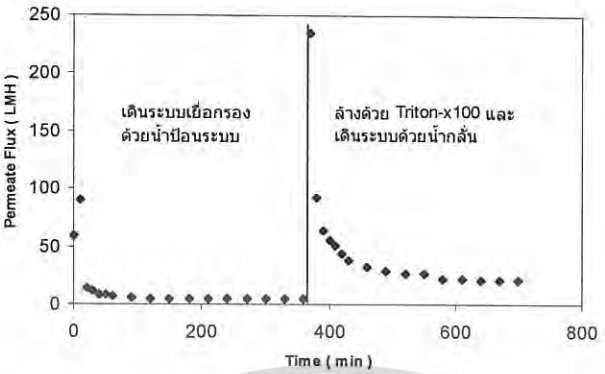



**รูปที่ 4.1** การลดลงของค่าฟลักซ์ขณะเดินระบบเยื่อกรองนาโนด้วยน้ำ SMP

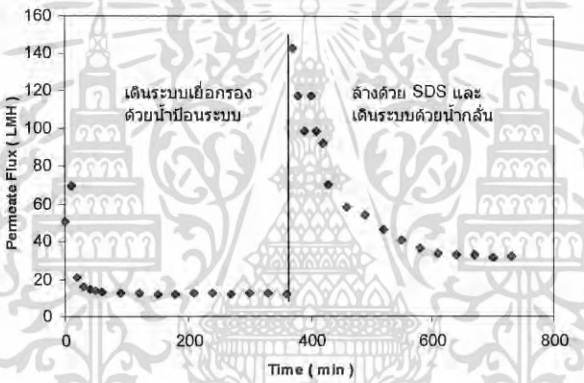
### 4.3 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวในการล้างเยื่อกรองนาโน

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมสำหรับการล้างเยื่อกรอง โดยใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ 1) สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุคือ Octyl phenol ethoxylate (Triton-x100) 2) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบคือ Sodium dodecyl sulfate (SDS) และ 3) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกคือ Benzalkonium chloride รูปที่ 4.3 แสดงค่าฟลักซ์ของน้ำป้อนระบบที่ผ่านเยื่อกรองและค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นหลังการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (4.3 ก) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (4.3 ข) และสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (4.3 ค) จากรูปจะเห็นว่าเยื่อกรองที่ผ่านการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ให้ค่า% Recovery แตกต่างกัน โดยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ( SDS ) ให้ค่า % Recovery สูงที่สุด การใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบล้างเยื่อกรองเป็นการใช้คุณสมบัติของไมเซลล์แบบประจุลบดึงสารชีวภัณฑ์ที่ละลายน้ำได้ออกจากผิวของเยื่อกรอง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความสะอาดเยื่อกรองของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 แสดงในรูปที่ 4.3 โดยพบว่า SDS ให้ค่า % Recovery สูงกว่า Benzalkonium chloride และ Triton -x100 ที่ความเข้มข้น CMC ของแต่ละตัว โดยให้ค่าสูงถึง 64 % ในขณะที่ Triton -x100 และ Benzalkonium chloride ให้ % Recovery ภายหลังการทำความสะอาดเท่ากับ 35 และ 25% ตามลำดับ ซึ่ง SDS จะถูกพิจารณาในการเลือกใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวสำหรับการล้างเยื่อกรองในขั้นตอนต่อไป

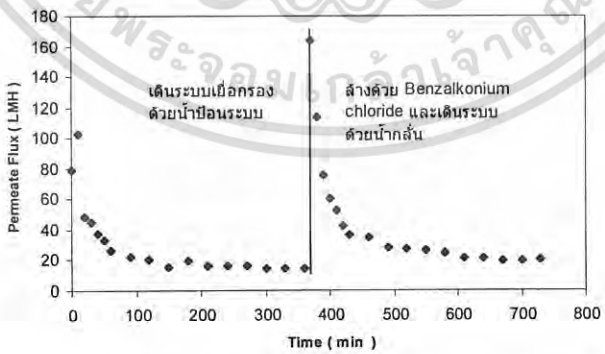
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




( ก ) สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Octyl phenol ethoxylate (Triton-x100) ความเข้มข้น 0.23 mM



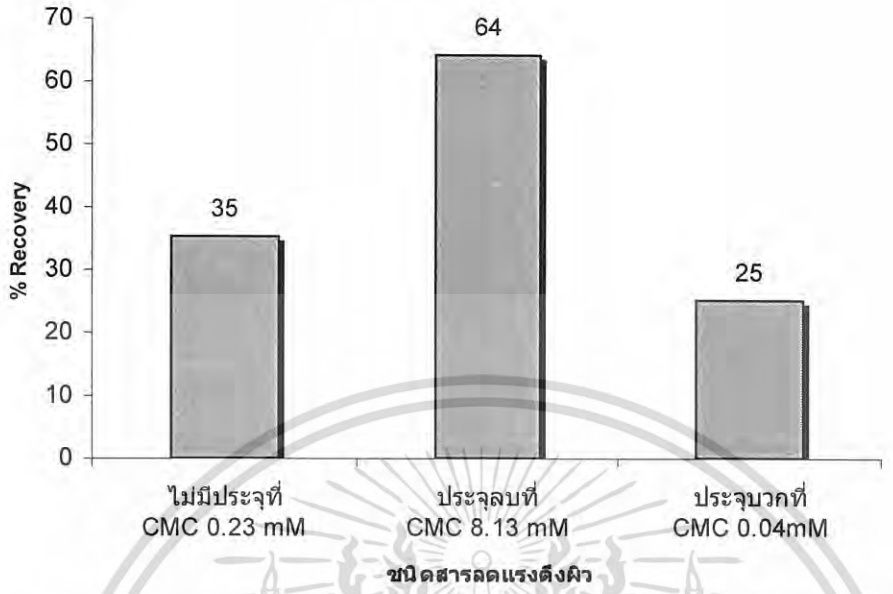

( ข ) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ความเข้มข้น 8.13 mM




( ค ) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก Benzalkonium chloride ความเข้มข้น 0.04 mM

**รูปที่ 4.2** ค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอตขณะเดินระบบเยื่อกรองนาโนและหลังการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นเท่ากับค่า CMC ของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

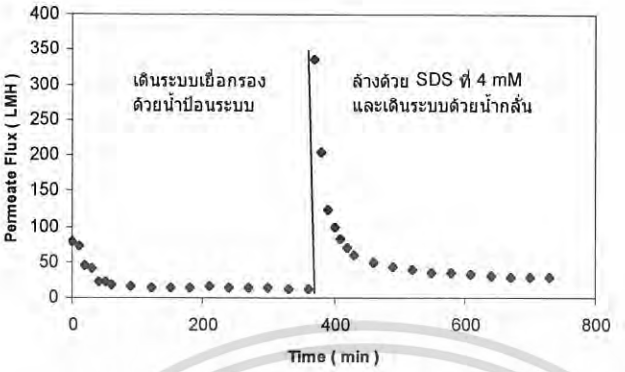



**รูปที่ 4.3** เปอร์เซ็นต์ Recovery ของการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวประเภทต่างๆที่ความเข้มข้นเท่ากับค่า CMC

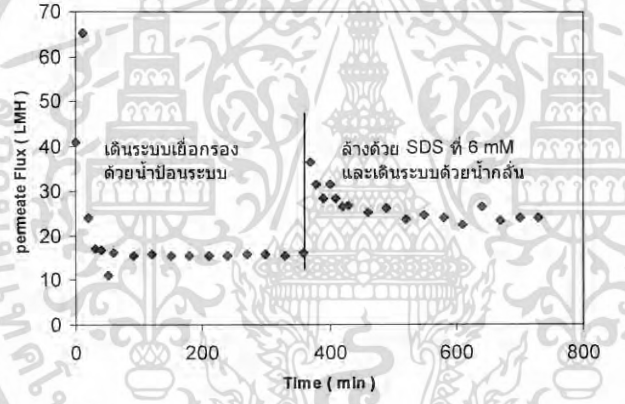
### 4.4 ผลของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการล้างเยื่อกรองนาโนด้วย

การศึกษาเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ คือ Sodium dodecyl sulfate ( SDS ) สำหรับการล้างเยื่อกรองนาโน โดยเลือกความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่ความเข้มข้น 4, 6, 8.13 และ 9 มิลลิโมลาร์ (CMC = 8.13 มิลลิโมลาร์) และทำการวัดและเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ ( $J/J_0$) ขณะเดินระบบเยื่อกรองนาโนและฟลักซ์ของน้ำกลั่นหลังการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิว SDS ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของ SDS มีผลต่อประสิทธิภาพการล้างเยื่อกรองนาโนที่อุดตัน จากรูปที่ 4.5 พบว่าค่า % Recovery ที่ความเข้มข้น 4, 6, 8.13 และ 9 มิลลิโมลาร์ เท่ากับ 36, 58, 64 และ 74 ตามลำดับ จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวจะมีผลทำให้ค่า %Recovery สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวทำให้จำนวนโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างไมเซลล์หนาขึ้นสามารถเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุกับสารอินทรีย์ประเภทสารชีวภัณฑ์ที่ละลายน้ำได้ดีขึ้น

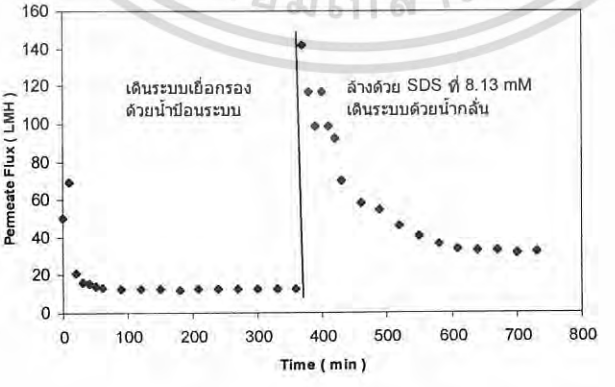
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




( ก ) ความเข้มข้น 4mM

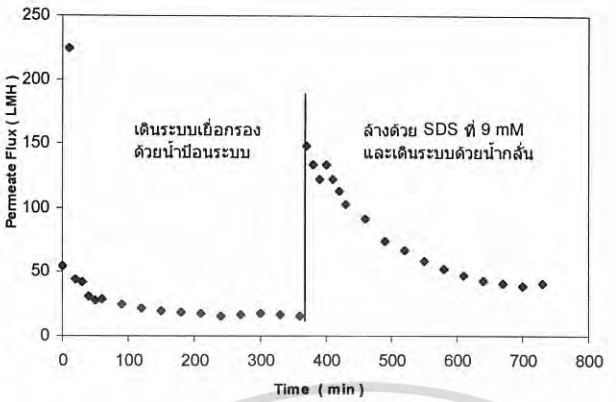



( ข ) ความเข้มข้น 6 mM



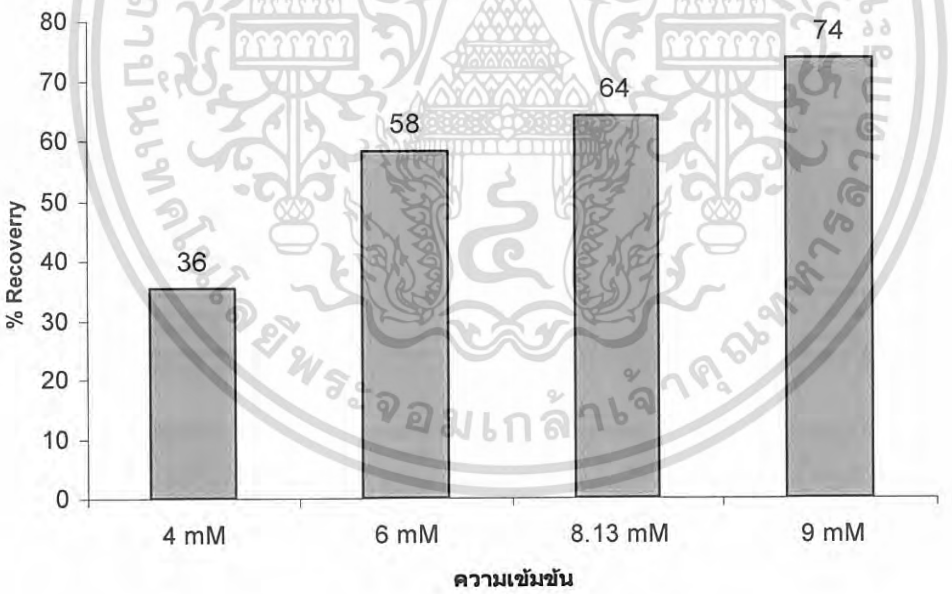

( ค ) ความเข้มข้น 8.13 mM (CMC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




( ง ) ความเข้มข้น 9 mM

**รูปที่ 4.4** ค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอตขณะเดินระบบเยื่อกรองนาโนและหลังการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ คือ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ที่ความ เข้มข้นเท่ากับ 4, 6, 8.13 และ 9 มิลลิโมลาร์



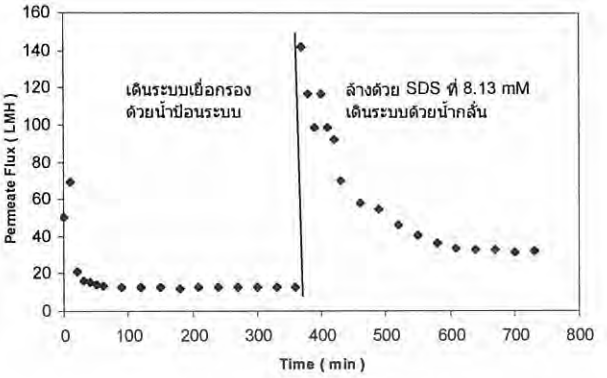

**รูปที่ 4.5** เปอร์เซ็นต์ Recovery ของการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ที่ความ เข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

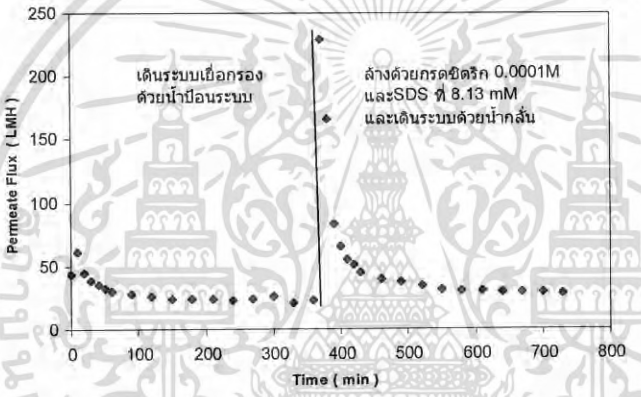
### 4.5 การศึกษาการล้างเยื่อกรองนาโนด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบร่วมกับกรดและด่าง

เป็นการศึกษาการล้างเยื่อกรองนาโนโดยใช้กรดและด่างร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS) โดยใช้กรดซิตริกและด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นที่เท่ากัน คือ 0.0001 M และสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่ความเข้มข้น 8.13 มิลลิโมลาร์ โดยแบ่งการทดลองเป็น 4 กลุ่มการทดลองคือ 1) กลุ่มการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบเพียงอย่างเดียว 2 ) กลุ่มการใช้กรดล้างตามด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ 3) กลุ่มการใช้ด่างล้างตามด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ 4 ) กลุ่มการใช้กรดและด่างล้างตามด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ โดยทำการวัดและเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ ($J/J_0$) ก่อนและหลังการล้างทั้ง 4 กลุ่มการทดลอง จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่า % Recovery ของการทดลองทั้ง 4 กลุ่มเป็น 64, 65, 84 และ 87 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการล้างโดยใช้กรดตามด้วย SDS กับการใช้ SDS อย่างเดียว พบว่าค่า % Recovery ใกล้เคียงกันมาก แสดงว่ากรดไม่ได้ช่วยเสริมการล้างของ SDS มากนัก ส่วนการล้างโดยใช้ด่างตามด้วย SDS เทียบกับการล้างด้วยกรดตามด้วย SDS และการล้างด้วย SDS อย่างเดียว พบว่าค่า % Recovery สูงขึ้น แสดงว่าด่างช่วยเสริมการล้างของ SDS และช่วยล้างสารอินทรีย์ได้ดี (Ang และคณะ,2006) ส่วนการใช้กรดและด่างร่วมกับ SDS เมื่อเทียบกับการล้างโดยใช้ด่างร่วมกับ SDS พบว่าค่า % Recovery ไม่เพิ่มขึ้นมากนัก ยิ่งเป็นการชี้ให้เห็นว่ากรดไม่ได้ส่งผลในการเพิ่มประสิทธิภาพของการล้างมากนัก และเป็นการสะท้อนให้เห็นว่าการอุดตันเยื่อกรองส่วนใหญ่เกิดจากสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำซึ่งเป็นสารอินทรีย์มากกว่าการเกิดตะกรันจากเกลืออนินทรีย์

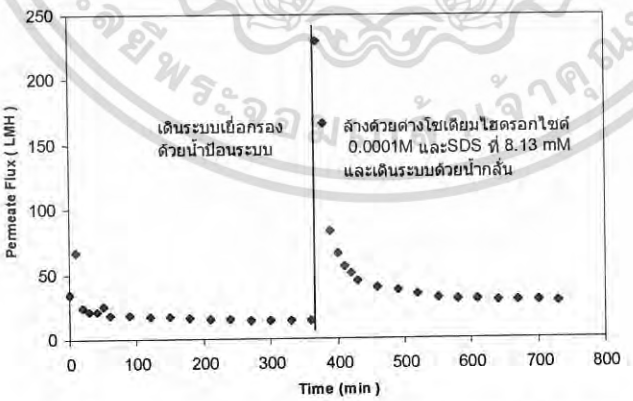
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




( ก ) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ความเข้มข้น 8.13 mM

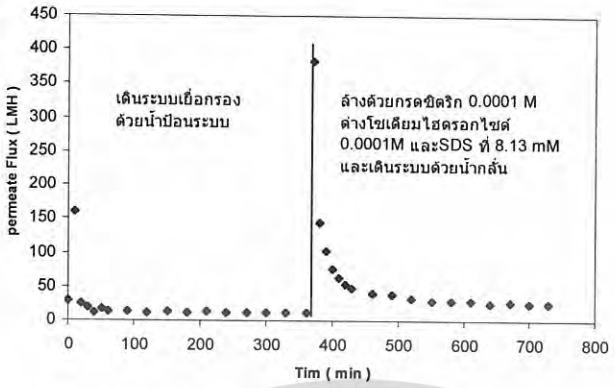



( ข ) กรดซิตริก 0.0001 Mตามด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ความเข้มข้น 8.13 mM



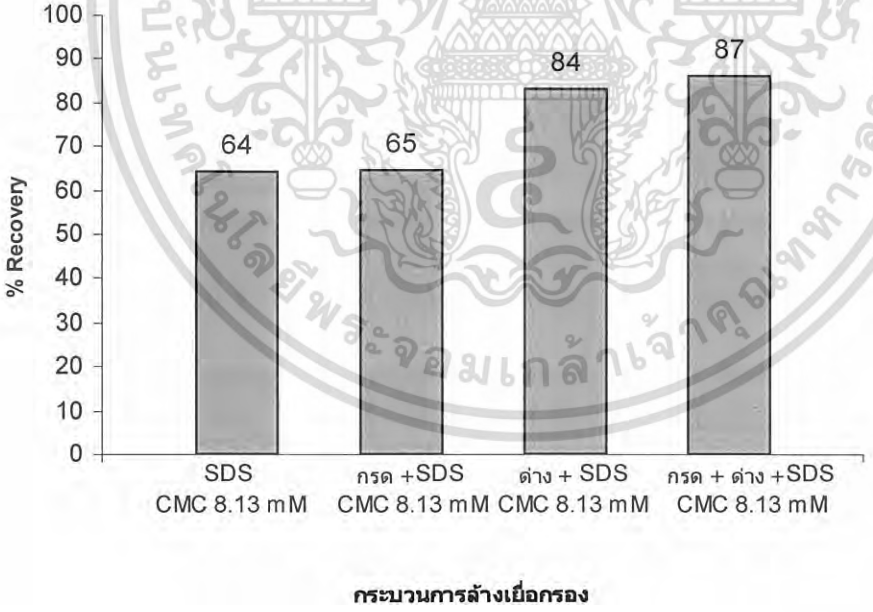

( ค ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0001M ตามด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ความเข้มข้น 8.13 mM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(ง) กรดซิตริก 0.0001 M และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0001 M ตามด้ายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ความเข้มข้น 8.13 mM

**รูปที่ 4.6** ค่าฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอตขณะเดินระบบเยื่อกรองนาโนและหลังทำการล้างด้วยกรดและด่างร่วมกับสารลดแรงตึงผิว ชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ที่ความ เข้มข้นเท่ากับ 8.13 mM

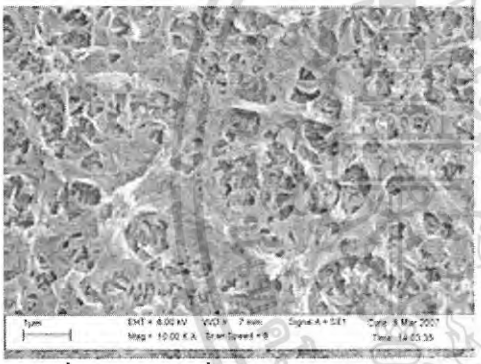



**รูปที่ 4.7** เปอร์เซ็นต์ Recovery ของการล้างด้วยกรดและด่างร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

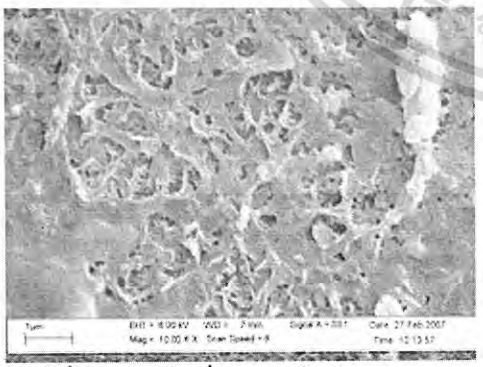
### 4.6 การตรวจสอบการลดการอุดตันเยื่อกรองด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิงอิเล็กตรอน

การตรวจสอบการอุดตันของเยื่อกรองนาโนด้วย SEM โดยตรวจสอบเยื่อกรองที่สะอาดไม่ผ่านการใช้งาน เยื่อกรองที่ผ่านการเดินระบบด้วยน้ำป้อนระบบ และเยื่อกรองที่หลังจากล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวประเภทต่างๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.8 (ก) – (ซ) จากรูปที่4.8 (ก) และ4.8 (ข) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเยื่อกรองนาโนที่ไม่ผ่านการใช้งานกับเยื่อกรองนาโนผ่านการใช้งานและอุดตันด้วยสาร SMP ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.8 ( ค) – (จ) แสดงถึงผิวหน้าของเยื่อกรองหลังจากการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวประเภทต่าง ๆ ส่วนรูปที่ 4.8 (ฉ) – (ซ) แสดงถึงผิวหน้าของเยื่อกรองนาโนหลังจากการล้างโดยใช้กรดและด่างตามด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate ซึ่งรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงรูพรุนของเยื่อกรองที่ได้กลับคืนมาหลังจากการล้าง ซึ่งส่งผลต่อ % recovery อย่างไรก็ตามภาพถ่าย SEM เป็นเพียงการแสดงผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพเพื่อเสริมผลการทดลองที่ผ่านมาเท่านั้น ไม่สามารถบ่งชี้ถึงปริมาณการอุดตันหรือ % recovery ได้

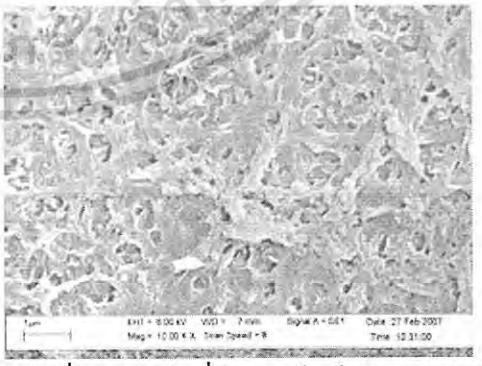


( ก ) เยื่อกรองนาโนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

( ข ) เยื่อกรองนาโนที่ผ่านการเดินระบบจากน้ำป้อนระบบ

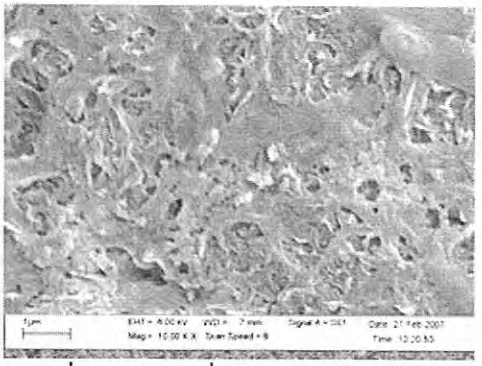


( ค ) เยื่อกรองนาโนที่ผ่านการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ ที่ค่า CMC

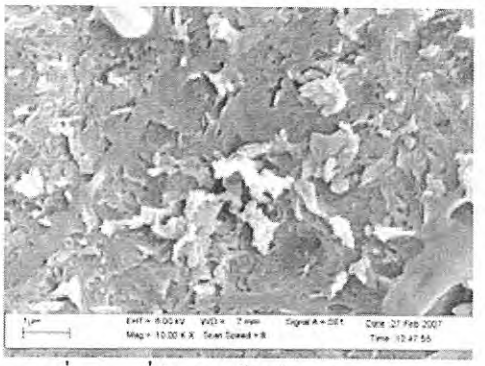


( ง ) เยื่อกรองนาโนที่ผ่านการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ที่ CMC

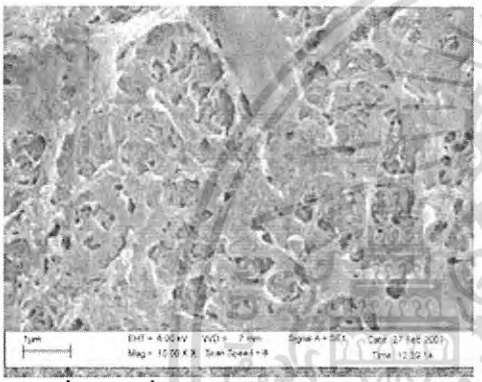
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



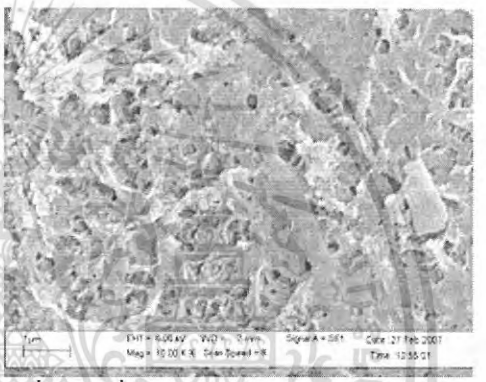
( จ ) เยื่อกรองนาโนที่ผ่านการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก ที่ค่า CMC



( ฉ ) เยื่อกรองที่ผ่านการล้างด้วยกรดและสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ที่ค่า CMC



( ช ) เยื่อกรองที่ผ่านการล้างด้วยด่างและสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ที่ค่า CMC



( ซ ) เยื่อกรองที่ผ่านการล้างด้วยกรด ด่าง และสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ที่ค่า CMC

**รูปที่4.8** ภาพถ่าย SEM ของเยื่อกรองนาโนที่สะอาดเปรียบเทียบกับเยื่อกรองนาโนที่อุดตันและเยื่อกรองนาโนที่ล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวประเภทต่าง ๆ (กำลังขยาย 10,000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5
# สรุปและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การอุดตันบนเยื่อกรองนาโนขณะทำการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ อาจเกิดจากสารอนินทรีย์และ/หรือ สารอินทรีย์ประเภทสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ โดยส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอต
2. สารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสำหรับการล้างเยื่อกรองนาโนที่อุดตันจากการทดลองได้เหมาะสมที่สุดคือสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ได้แก่ Sodium dodecyl sulfate (SDS)
3. การเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS ทำให้สามารถล้างเยื่อกรองนาโนได้ดีขึ้นโดยค่าความเข้มข้นที่ล้างได้เหมาะสมที่สุดคือ 9 มิลลิโมลาร์ จะให้ค่า % recovery เท่ากับ 74 %
4. ด่างเป็นสารที่เหมาะสมที่จะใช้ล้างร่วมกับสารลดแรงตึงผิวที่น้ำป้อนระบบมีสารอินทรีย์ประเภทสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ การใช้ด่างตามด้วย SDS ที่ความเข้มข้น 8.13 มิลลิโมลาร์ (CMC) ในการล้างเยื่อกรองนาโนสามารถเพิ่ม % recovery จาก 64 % เป็น 84 % เมื่อเทียบกับการใช้ SDS เพียงอย่างเดียว

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเลือกสารลดแรงตึงผิวที่หลากหลายยิ่งขึ้น เพราะอาจจะมีสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น ๆ ที่สามารถล้างได้ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการทดลอง
2. ในกระบวนการล้าง เป็นการล้างโดยใช้กระบวนการทางเคมีเป็นหลัก อาจจะใช้กระบวนการทางกายภาพเข้ามาช่วยได้อีก เช่น การใช้การสั่น หรือการเพิ่มความเร็วรอบในการปั่นกวนขณะทำการล้าง ซึ่งอาจจะทำให้ประสิทธิภาพการล้างดียิ่งขึ้นอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง


เกรียงกมล ตุนวัฒนกิจเจริญ.2549.**ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถังปฏิกรณ์เอสบีอาร์และถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน.** เอกสารวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขันทอง สุนทราภา. 2547. **เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน.** กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชฤพนธ์ เจริญสุข .2548. **ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโนโดยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ** เอกสารวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2538. **วิศวกรรมการประปา เล่ม 2.** กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ยุภาพร อำนาจ. 2548. **ปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์โดยสารอินทรีย์ธรรมชาติของระบบการกรองแบบนาโนฟิลเตรชัน** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

รัตนา จิระรัตนานนท์. 2543. **กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์.** พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ศิรินลักษณ์ .2547 . **การเตรียมอนุภาคซิลิกาที่ใช้ทางโครมาโทรกราฟีจากเถ้าแกลบโดยใช้การตกตะกอนในไมเซลล์.** เอกสารวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุจินดา นาถพินิจ .2548.**ระบบบำบัดน้ำเสียตะกอนเร่งร่วมกับตัวกรองเมมเบรน** สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

Ang W. S., Sangyoup L., and Menachem E. 2006. "Chemical and Physical Aspects of Cleaning of Organic-Fouled Reverse Osmosis membranes"**Journal of Membrane Science**, 272, 198-210

Barker, D. J. and Stuckey, D. C. 1999. "A Review of Soluble Microbial Products (SMP) in Wastewater Treatment System. " **Wat. Res.** 33: 3063 - 3082

Bowen, W. R., Calvo, J. I., and Hernadez, A. 1995. "Steps of Membrane Blocking in Fiux Decline


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

During Protein Microfiltration." **Journal of Membrane Science** 101: 153-165.

Cho, J., Amy, G. and Pellegrino, J. 2000. "Membrane Filtration of Natural Organic Matter Comparison of Flux Decline, NOM Rejection, and Foulants During Filtration with Three UF Membranes." **Desalination.** 127: 283 – 298.

Collins, M. R., Amy, G. L. and King, P. H. 1985. "Removal of Organic Matter in Water Treatment." **Journal Environmental Engineering.** 111(6): 850 – 864.

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.

Jung seok Y., Kitae B., and Ji Won Y. 2005. "Crossflow Ultrafiltration of Surfactant Solutions" **Desalination** 184: 385-394.

Kaiya, Y., Itoh, Y., Fujita, K. and Takizawa, S. 1996. "Study on Fouling Materials in the Membrane Treatment Process for Potable Water." **Desalination.** 106: 71-77.

Lee W, Seoktae K- and Hangsik S.2003."Sludge Characteristics and Their Contribution to Microfiltration in Submerged Membrane Bioreactors" **Journal of Membrane Science**. 216:217-227.

Lin, C-F., Lin, T-Y., and Hao, O. J. 2000. "Effect of Humic Substances Characteristics on UF Performance." **Wat. Res.** 34(4): 1097 – 1106.

Manttari M., Pihlajamaki, A., and Nystrom, M. 2006. "Effect of pH on hydrophilicity and charge and their effect on the filtration efficiency of NF membranes at different pH." **Journal of Membrane Science.** 78: 198-253.

Neon P., Boksoon .K, Kim S., and Cho. J. 2005. Biofouling Potential of Various NF Membrane with Respect to Bacteria and Their soluble microbial Product (SMP): Characterizations, flux decline, and transport parameters **Journal of Membrane Science.** 272: 198-210.

Nison. J. A. and Digiano, F. A. 1996. "Influence of NOM Composition on Nanofiltration." **J. AWWA.** 88(5): 53 – 66.

Nuengjamnong C., Martin. K, Pilavan S. 2000. "The Investigation of Soluble Microbial Products in Membrane Fouling" **Journal of Membrane Science**.36 (1): 31-38.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Seng W., Sangyoup L., and Menachem E. 2005 . "Chemical and physical aspects of organic Fouled Reverse Osmosis membrane" **Journal of Membrane Science**. 272: 198-210.

Thorsen T. 2004 "Concentration Polarizations by Natural Organic Matter (NOM) in NF and UF" **Journal of Membrane Science .** 233:79-91

Yang C. F., Renuga G., Satinderpal K., Casey C., Seeram R., Shahram T. and Takeshi M. 2007. "Electrospun Nanofibrous Polysulfone Membranes as Pre-Filters: Particulate removal" **Journal of Membrane Science**. 289: 210-219

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก

# ผลการทดสอบความแม่นยำของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก.** การทดสอบความแม่นยำของระบบ

| Time (min) | Pressure (psi) | Jv1 ( L/m2-hr ) | Jv2 ( L/m2-hr ) | Average ( L/m2-hr ) |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 60 | 94.49 | 86.22 | 90.36 |
| 5 | 60 | 81.49 | 75.60 | 78.54 |
| 10 | 60 | 61.90 | 58.54 | 60.22 |
| 20 | 60 | 55.53 | 52.58 | 54.05 |
| 30 | 60 | 45.09 | 40.43 | 42.76 |
| 40 | 60 | 44.49 | 42.61 | 43.55 |
| 50 | 60 | 38.38 | 37.32 | 37.85 |
| 60 | 60 | 38.00 | 38.80 | 38.40 |
| 80 | 60 | 30.98 | 31.85 | 31.42 |
| 100 | 60 | 31.53 | 32.16 | 31.84 |
| 120 | 60 | 31.42 | 31.59 | 31.51 |
| 140 | 60 | 27.29 | 28.25 | 27.77 |
| 160 | 60 | 25.20 | 25.85 | 25.53 |
| 180 | 60 | 24.23 | 24.71 | 24.47 |
| 200 | 60 | 25.16 | 23.07 | 24.11 |
| 220 | 60 | 23.11 | 23.64 | 23.38 |
| 240 | 60 | 22.25 | 22.25 | 22.25 |
| 260 | 60 | 17.01 | 17.72 | 17.36 |
| 280 | 60 | 17.08 | 17.21 | 17.14 |
| 300 | 60 | 19.39 | 21.19 | 20.29 |

หมายเหตุ น้ำป้อนระบบ - น้ำกลั่น

ความดัน - 60 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ข

# ค่าฟลักซ์ของการเดินระบบและหลังการล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.1** ผลของค่าฟลักซ์ของการเดินระบบเยื่อกรองนาโนทำความสะอาดสารด้วยลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุความเข้มข้น 0.23 มิลลิโมลาร์

| ฟลักซ์เริ่มต้น | | | การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำป้อนระบบ | | | การทำความสะอาดและกรองด้วยน้ำกลั่น | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH |
| 24.7 | 2.8 µS/cm | 6.81 | 23.9 | 1923 µS/cm | 6.97 | 26.6 | 2.6 µS/cm | 6.85 |

| เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (L) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 211.74 | 885.32 | 0 | 42.73 | 89.33 | 0 | 112.64 | 235.48 |
| 5 | 119.32 | 498.90 | 10 | 11.07 | 23.14 | 10 | 44.29 | 92.59 |
| 10 | 95.38 | 398.80 | 20 | 6.52 | 13.63 | 20 | 30.11 | 62.95 |
| 15 | 67.41 | 281.85 | 30 | 5.68 | 11.87 | 30 | 26.32 | 55.02 |
| 20 | 59.72 | 249.70 | 40 | 4.06 | 8.49 | 40 | 24.17 | 50.53 |
| 25 | 54.28 | 226.95 | 50 | 3.79 | 7.92 | 50 | 21.03 | 43.97 |
| 30 | 55.38 | 115.78 | 60 | 9.38 | 6.54 | 60 | 54.17 | 37.75 |
| 40 | 50.22 | 104.99 | 90 | 8.36 | 5.83 | 90 | 46.25 | 32.23 |
| 50 | 46.38 | 96.96 | 120 | 7.33 | 5.11 | 120 | 40.78 | 28.42 |
| 60 | 43.08 | 90.06 | 150 | 7.02 | 4.89 | 150 | 38.80 | 27.04 |
| 70 | 40.76 | 85.21 | 180 | 6.77 | 4.72 | 180 | 37.40 | 26.06 |
| 80 | 38.17 | 79.80 | 210 | 6.52 | 4.54 | 210 | 32.23 | 22.46 |
| 90 | 35.82 | 74.89 | 240 | 6.48 | 4.52 | 240 | 30.92 | 21.55 |
| 100 | 33.84 | 70.75 | 270 | 6.26 | 4.36 | 270 | 30.31 | 21.12 |
| 110 | 28.08 | 58.70 | 300 | 6.32 | 4.40 | 300 | 30.35 | 21.15 |
| 120 | 29.51 | 61.69 | 330 | 6.23 | 4.34 | 330 | 29.77 | 20.75 |
| 130 | 29.24 | 61.13 | 360 | 6.13 | 4.27 | | | |
| 140 | 28.64 | 59.87 | | | | | | |
| 150 | 29.68 | 62.05 | | | | | | |
| 160 | 30.27 | 63.28 | | | | | | |
| 170 | 30.05 | 62.82 | | | | | | |
| 180 | 28.51 | 59.60 | | | | | | |
| 190 | 28.59 | 59.77 | | | | | | |
| 200 | 28.11 | 58.77 | | | | | | |

*** ความดันในการเดินระบบใช้ความดันคงที่ (Constant pressure model) ที่ 60 psi ตลอดการทดลอง**

ตารางที่ ข.2 ผลของค่าฟลักซ์ของการเดินระบบเยื่อกรองนาโนทำความสะอาดด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบความเข้มข้น 8.13 มิลลิโมลาร์

| ฟลักซ์เริ่มต้น | | | การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำป้อนระบบ | | | การทำความสะอาดและกรองด้วยน้ำกลั่น | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH |
| 27.4 | 2.6 μS/cm | 6.75 | 26.5 | 1057 μS/cm | 7.05 | 27.1 | 2.9 μS/cm | 6.65 |

| เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (L) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 132.24 | 552.92 | 0 | 33.10 | 69.20 | 0 | 198.06 | 142.16 |
| 5 | 97.46 | 407.50 | 10 | 9.94 | 20.78 | 10 | 86.71 | 116.89 |
| 10 | 88.53 | 370.16 | 20 | 7.70 | 16.10 | 20 | 68.00 | 98.57 |
| 15 | 69.88 | 292.18 | 30 | 7.20 | 15.05 | 30 | 55.91 | 116.89 |
| 20 | 121.30 | 253.59 | 40 | 6.75 | 14.11 | 40 | 47.15 | 98.57 |
| 25 | 109.70 | 229.34 | 50 | 6.32 | 13.21 | 50 | 44.02 | 92.03 |
| 30 | 98.02 | 204.92 | 60 | 19.21 | 13.39 | 60 | 100.60 | 70.10 |
| 40 | 85.90 | 179.58 | 90 | 18.25 | 12.72 | 90 | 83.49 | 58.18 |
| 50 | 72.74 | 152.07 | 120 | 18.32 | 12.77 | 120 | 78.03 | 54.38 |
| 60 | 68.34 | 142.87 | 150 | 17.57 | 12.24 | 150 | 66.58 | 46.40 |
| 70 | 66.13 | 138.25 | 180 | 17.48 | 12.18 | 180 | 58.46 | 40.74 |
| 80 | 48.42 | 101.23 | 210 | 17.65 | 12.30 | 210 | 52.36 | 36.49 |
| 90 | 49.08 | 102.61 | 240 | 17.68 | 12.32 | 240 | 48.57 | 33.85 |
| 100 | 46.69 | 97.61 | 270 | 17.55 | 12.23 | 270 | 46.89 | 32.68 |
| 110 | 43.42 | 90.77 | 300 | 17.86 | 12.45 | 300 | 47.16 | 32.86 |
| 120 | 42.14 | 88.10 | 330 | 17.72 | 12.35 | 330 | 45.54 | 31.74 |
| 130 | 40.06 | 83.75 | 360 | 17.60 | 12.26 | 360 | 46.36 | 32.31 |
| 140 | 39.87 | 83.35 | | | | | | |
| 150 | 33.66 | 70.37 | | | | | | |
| 160 | 35.30 | 73.80 | | | | | | |
| 170 | 34.37 | 71.85 | | | | | | |
| 180 | 31.12 | 65.06 | | | | | | |
| 190 | 27.74 | 57.99 | | | | | | |
| 200 | 24.11 | 50.40 | | | | | | |
| 210 | 24.06 | 50.30 | | | | | | |

*** ความดันในการเดินระบบใช้ความดันคงที่ (Constant pressure model) ที่ 60 psi ตลอดการทดลอง**

ตารางที่ ข.3 ผลของค่าฟลักซ์ของการเดินระบบเยื่อกรองนาโนทำความสะอาดด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกความเข้มข้น 0.04 มิลลิโมลาร์

| ฟลักซ์เริ่มต้น | | | การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำป้อนระบบ | | | การทำความสะอาดและกรองด้วยน้ำกลั่น | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH |
| 26.6 | 2.9 μS/cm | 6.69 | 26.6 | 1353 μS/cm | 7.02 | 25.5 | 2.7 μS/cm | 6.68 |

| เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (L) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 158.73 | 663.68 | 0 | 120.01 | 250.89 | 0 | 78.25 | 163.59 |
| 5 | 113.78 | 475.74 | 10 | 48.98 | 102.40 | 10 | 54.25 | 113.41 |
| 10 | 72.28 | 302.22 | 20 | 23.25 | 48.61 | 20 | 36.22 | 75.72 |
| 15 | 60.52 | 253.05 | 30 | 21.59 | 45.14 | 30 | 28.83 | 60.27 |
| 20 | 90.96 | 190.16 | 40 | 17.89 | 37.40 | 40 | 25.11 | 52.49 |
| 25 | 85.23 | 169.54 | 50 | 15.90 | 33.24 | 50 | 20.39 | 42.63 |
| 30 | 74.11 | 154.93 | 60 | 37.80 | 26.34 | 60 | 52.27 | 36.43 |
| 40 | 68.83 | 143.90 | 90 | 32.09 | 22.36 | 90 | 50.07 | 34.89 |
| 50 | 67.13 | 140.34 | 120 | 29.15 | 20.31 | 120 | 40.17 | 27.99 |
| 60 | 66.04 | 138.06 | 150 | 22.18 | 15.46 | 150 | 38.95 | 27.14 |
| 70 | 62.95 | 131.60 | 180 | 27.48 | 19.15 | 180 | 38.04 | 26.51 |
| 80 | 58.83 | 122.99 | 210 | 23.30 | 16.24 | 210 | 35.35 | 24.63 |
| 90 | 58.02 | 121.30 | 240 | 23.59 | 16.44 | 240 | 30.43 | 21.21 |
| 100 | 56.27 | 117.64 | 270 | 23.35 | 16.27 | 270 | 30.55 | 21.29 |
| 110 | 56.14 | 117.37 | 300 | 20.30 | 14.15 | 300 | 28.62 | 19.94 |
| 120 | 53.23 | 111.28 | 330 | 20.26 | 14.12 | 330 | 27.98 | 19.50 |
| 130 | 49.05 | 102.54 | 360 | 20.40 | 14.22 | 360 | 28.68 | 19.99 |
| 140 | 47.18 | 98.63 | | | | | | |
| 150 | 47.66 | 99.64 | | | | | | |
| 160 | 42.70 | 89.27 | | | | | | |
| 170 | 40.13 | 83.90 | | | | | | |
| 180 | 39.55 | 82.68 | | | | | | |
| 190 | 37.89 | 79.21 | | | | | | |
| 200 | 37.72 | 78.86 | | | | | | |

*** ความดันในการเดินระบบใช้ความดันคงที่ (Constant pressure model) ที่ 60 psi ตลอดการทดลอง**

**ตารางที่ ข.4** ผลของค่าฟลักซ์ของการเดินระบบเยื่อกรองนาโนทำความสะอาดด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบความเข้มข้น 4 มิลลิโมลาร์

| ฟลักซ์เริ่มต้น | | | การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำป้อนระบบ | | | การทำความสะอาดและกรองด้วยน้ำกลั่น | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH |
| 26.4 | 2.6 μS/cm | 6.67 | 26.6 | 1150 μS/cm | 6.93 | 26.6 | 2.7 μS/cm | 6.65 |

| เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (L) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 164.73 | 688.77 | 0 | 34.71 | 72.56 | 0 | 160.31 | 335.14 |
| 5 | 123.78 | 517.55 | 10 | 25.63 | 53.58 | 10 | 97.28 | 203.37 |
| 10 | 74.28 | 310.58 | 20 | 22.15 | 46.31 | 20 | 59.34 | 124.06 |
| 15 | 61.52 | 257.23 | 30 | 19.32 | 40.39 | 30 | 47.47 | 99.24 |
| 20 | 95.96 | 200.61 | 40 | 11.02 | 23.04 | 40 | 39.08 | 81.70 |
| 25 | 77.11 | 161.21 | 50 | 10.62 | 22.20 | 50 | 33.60 | 70.24 |
| 30 | 69.83 | 145.99 | 60 | 26.64 | 18.56 | 60 | 85.42 | 59.53 |
| 40 | 70.13 | 146.61 | 90 | 23.82 | 16.60 | 90 | 70.19 | 48.91 |
| 50 | 67.04 | 140.15 | 120 | 21.83 | 15.21 | 120 | 61.05 | 42.54 |
| 60 | 64.95 | 135.78 | 150 | 21.76 | 15.16 | 150 | 54.84 | 38.22 |
| 70 | 59.83 | 125.08 | 180 | 21.53 | 15.00 | 180 | 49.89 | 34.77 |
| 80 | 59.02 | 123.39 | 210 | 22.41 | 15.62 | 210 | 48.86 | 34.05 |
| 90 | 57.27 | 119.73 | 240 | 20.12 | 14.02 | 240 | 46.10 | 32.13 |
| 100 | 57.14 | 119.46 | 270 | 20.15 | 14.04 | 270 | 43.56 | 30.36 |
| 110 | 54.23 | 113.37 | 300 | 19.34 | 13.48 | 300 | 42.20 | 29.41 |
| 120 | 50.05 | 104.63 | 330 | 19.03 | 13.26 | 330 | 41.95 | 29.23 |
| 130 | 48.18 | 100.72 | 360 | 18.34 | 12.78 | 360 | 40.31 | 28.09 |
| 140 | 46.66 | 97.55 | | | | | | |
| 150 | 43.70 | 91.36 | | | | | | |
| 160 | 41.13 | 85.99 | | | | | | |
| 170 | 40.55 | 84.77 | | | | | | |
| 180 | 38.89 | 81.30 | | | | | | |
| 190 | 37.82 | 79.07 | | | | | | |
| 200 | | | | | | | | |
| 210 | | | | | | | | |

*** ความดันในการเดินระบบใช้ความดันคงที่ (Constant pressure model) ที่ 60 psi ตลอดการทดลอง**

**ตารางที่ ข.5** ผลของค่าฟลักซ์ของการเดินระบบเยื่อกรองนาโนทำความสะอาดด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบความเข้มข้น 6 มิลลิโมลาร์

| ฟลักซ์เริ่มต้น | | | การเดินระบบเยือกรองด้วยน้ำป้อนระบบ | | | การทำความสะอาดและกรองด้วยน้ำกลั่น | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH |
| 26.1 | 2.7 µS/cm | 6.31 | 24.9 | 748 µS/cm | 6.75 | 26.9 | 2.6 µS/cm | 6.35 |

| เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (L) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 182.16 | 761.64 | 0 | 31.19 | 65.21 | 0 | 68.88 | 36.67 |
| 5 | 163.37 | 683.08 | 10 | 12.98 | 27.14 | 10 | 23.77 | 31.57 |
| 10 | 111.88 | 467.79 | 20 | 11.52 | 24.08 | 20 | 17.54 | 28.33 |
| 15 | 64.49 | 269.64 | 30 | 8.12 | 16.98 | 30 | 15.10 | 31.57 |
| 20 | 112.01 | 234.17 | 40 | 8.00 | 16.72 | 40 | 13.55 | 28.33 |
| 30 | 82.60 | 172.68 | 50 | 5.25 | 10.98 | 50 | 12.66 | 26.47 |
| 40 | 65.92 | 137.81 | 60 | 22.87 | 15.94 | 60 | 38.28 | 26.68 |
| 50 | 57.05 | 119.27 | 90 | 22.09 | 15.39 | 90 | 36.34 | 25.32 |
| 60 | 40.69 | 85.07 | 120 | 22.45 | 15.64 | 120 | 37.49 | 26.13 |
| 70 | 43.19 | 90.29 | 150 | 22.15 | 15.44 | 150 | 34.16 | 23.80 |
| 80 | 34.05 | 71.18 | 180 | 22.26 | 15.51 | 180 | 35.28 | 24.59 |
| 90 | 29.79 | 62.28 | 210 | 22.33 | 15.56 | 210 | 34.49 | 24.03 |
| 100 | 26.99 | 56.43 | 240 | 22.32 | 15.55 | 240 | 31.90 | 22.23 |
| 110 | 26.81 | 56.05 | 270 | 22.52 | 15.69 | 270 | 38.18 | 26.61 |
| 120 | 24.60 | 51.43 | 300 | 22.56 | 15.72 | 300 | 33.48 | 23.33 |
| 130 | 23.60 | 49.34 | 330 | 22.39 | 15.60 | 330 | 34.27 | 23.88 |
| 140 | 22.90 | 47.87 | 360 | 23.11 | 16.10 | 360 | 34.18 | 23.82 |
| 150 | 22.58 | 47.21 | | | | | | |
| 160 | 20.08 | 41.98 | | | | | | |
| 170 | 20.14 | 42.10 | | | | | | |
| 180 | 19.54 | 40.85 | | | | | | |
| 190 | 38.89 | 81.30 | | | | | | |
| 200 | 37.82 | 79.07 | | | | | | |

*** ความดันในการเดินระบบใช้ความดันคงที่ (Constant pressure model) ที่ 60 psi ตลอดการทดลอง**

**ตารางที่ ข.6** ผลของค่าฟลักซ์ของการเดินระบบเยื่อกรองนาโนทำความสะอาดด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบความเข้มข้น 9 มิลลิโมลาร์

| ฟลักซ์เริ่มต้น | | | การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำป้อนระบบ | | | การทำความสะอาดและกรองด้วยน้ำกลั่น | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH |
| 27.1 | 2.6 μS/cm | 6.54 | 27.4 | 1028 μS/cm | 6.84 | 26.1 | 2.7 μS/cm | 6.52 |

| เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (L) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 242.89 | 1015.57 | 0 | 107.15 | 224.01 | 0 | 102.31 | 148.06 |
| 5 | 139.87 | 584.82 | 10 | 31.85 | 66.59 | 10 | 82.71 | 134.24 |
| 10 | 116.02 | 485.10 | 20 | 20.99 | 43.88 | 20 | 70.82 | 122.53 |
| 15 | 89.74 | 375.22 | 30 | 20.10 | 42.02 | 30 | 64.21 | 134.24 |
| 20 | 73.99 | 154.68 | 40 | 14.69 | 30.71 | 40 | 58.61 | 122.53 |
| 30 | 102.62 | 214.54 | 50 | 13.43 | 28.08 | 50 | 54.34 | 113.60 |
| 40 | 81.23 | 169.82 | 60 | 41.29 | 28.77 | 60 | 147.65 | 102.89 |
| 50 | 72.57 | 151.71 | 90 | 35.00 | 24.39 | 90 | 131.92 | 91.93 |
| 60 | 62.33 | 130.31 | 120 | 30.98 | 21.59 | 120 | 105.84 | 73.76 |
| 70 | 56.27 | 117.64 | 150 | 28.56 | 19.90 | 150 | 95.78 | 66.75 |
| 80 | 54.73 | 114.42 | 180 | 27.24 | 18.98 | 180 | 83.56 | 58.23 |
| 90 | 56.08 | 117.24 | 210 | 25.08 | 17.48 | 210 | 74.87 | 52.17 |
| 100 | 48.67 | 101.75 | 240 | 22.07 | 15.38 | 240 | 68.53 | 47.76 |
| 110 | 46.38 | 96.96 | 270 | 24.15 | 16.83 | 270 | 62.60 | 43.62 |
| 120 | 29.52 | 61.71 | 300 | 24.46 | 17.05 | 300 | 59.25 | 41.29 |
| 130 | 31.17 | 65.16 | 330 | 23.06 | 16.07 | 330 | 56.04 | 39.05 |
| 140 | 29.07 | 60.77 | 360 | 22.55 | 15.71 | 360 | 58.32 | 40.64 |
| 150 | 28.32 | 59.21 | | | | | | |
| 160 | 26.85 | 56.13 | | | | | | |
| 170 | 26.29 | 54.96 | | | | | | |

*** ความดันในการเดินระบบใช้ความดันคงที่ (Constant pressure model) ที่ 60 psi ตลอดการทดลอง**

ตารางที่ ข.7 ผลของค่าฟลักซ์ของการเดินระบบเยื่อกรองนาโนทำความสะอาดด้วยกรดและตามด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบความเข้มข้น 8.13 มิลลิโมลาร์

| ฟลักซ์เริ่มต้น | | | การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำป้อนระบบ | | | การทำความสะอาดและกรองด้วยน้ำกลั่น | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH |
| 27.9 | 2.7 μS/cm | 6.56 | 26.6 | 766 μS/cm | 6.22 | 28.1 | 2.7 μS/cm | 6.65 |

| เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (L) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 149.13 | 623.54 | 0 | 29.35 | 61.36 | 0 | 109.90 | 229.76 |
| 5 | 115.88 | 484.52 | 10 | 23.84 | 49.84 | 10 | 79.38 | 165.95 |
| 10 | 96.01 | 401.44 | 20 | 21.12 | 44.15 | 20 | 39.90 | 83.41 |
| 15 | 82.89 | 346.58 | 30 | 18.42 | 38.51 | 30 | 31.48 | 65.81 |
| 20 | 139.46 | 291.55 | 40 | 17.00 | 35.54 | 40 | 26.43 | 55.25 |
| 30 | 113.53 | 237.34 | 50 | 15.33 | 32.05 | 50 | 24.07 | 50.32 |
| 40 | 97.08 | 202.95 | 60 | 43.39 | 30.24 | 60 | 64.38 | 44.86 |
| 50 | 82.15 | 171.74 | 90 | 40.17 | 27.99 | 90 | 56.41 | 39.31 |
| 60 | 69.59 | 145.48 | 120 | 36.57 | 25.48 | 120 | 53.75 | 37.46 |
| 70 | 58.44 | 122.17 | 150 | 34.45 | 24.01 | 150 | 48.70 | 33.94 |
| 80 | 56.88 | 118.91 | 180 | 34.54 | 24.07 | 180 | 44.97 | 31.34 |
| 90 | 52.78 | 110.34 | 210 | 34.23 | 23.85 | 210 | 43.72 | 30.47 |
| 100 | 54.61 | 114.17 | 240 | 33.15 | 23.10 | 240 | 43.28 | 30.16 |
| 110 | 41.99 | 87.78 | 270 | 34.30 | 23.90 | 270 | 41.95 | 29.23 |
| 120 | 42.08 | 87.97 | 300 | 37.86 | 26.38 | 300 | 41.95 | 29.23 |
| 130 | 40.33 | 84.31 | 330 | 29.71 | 20.70 | 330 | 41.53 | 28.94 |
| 140 | 37.34 | 78.06 | 360 | 33.14 | 23.09 | 360 | 40.76 | 28.40 |
| 150 | 28.47 | 59.52 | | | | | | |
| 160 | 23.93 | 50.03 | | | | | | |
| 170 | 21.96 | 45.91 | | | | | | |
| 180 | 21.06 | 44.03 | | | | | | |

*** ความดันในการเดินระบบใช้ความดันคงที่ (Constant pressure model) ที่ 60 psi ตลอดการทดลอง**

ตารางที่ ข.8 ผลของค่าฟลักซ์ของการเดินระบบเยื่อกรองนาโนทำความสะอาดด้วยด่างและตามด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบความเข้มข้น 8.13 มิลลิโมลาร์

| ฟลักซ์เริ่มต้น | | | การเดินระบบเยื่อกรองด้วยน้ำป้อนระบบ | | | การทำความสะอาดและกรองด้วยน้ำกลั่น | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH |
| 26.9 | 2.7 μS/cm | 6.65 | 28.4 | 1595 μS/cm | 6.78 | 26.1 | 2.8 μS/cm | 6.75 |

| เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (L) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 145.36 | 607.78 | 0 | 31.84 | 66.56 | 0 | 180.21 | 376.75 |
| 5 | 80.70 | 337.42 | 10 | 14.44 | 30.19 | 10 | 68.03 | 142.22 |
| 10 | 51.82 | 216.67 | 20 | 11.66 | 24.38 | 20 | 49.88 | 104.28 |
| 15 | 39.92 | 166.91 | 30 | 10.25 | 21.43 | 30 | 41.04 | 85.80 |
| 20 | 33.08 | 69.16 | 40 | 9.96 | 20.82 | 40 | 34.66 | 72.46 |
| 30 | 44.48 | 92.99 | 50 | 11.88 | 24.84 | 50 | 34.20 | 71.50 |
| 40 | 37.90 | 79.23 | 60 | 25.92 | 18.06 | 60 | 76.79 | 53.51 |
| 50 | 31.80 | 66.48 | 90 | 26.50 | 18.47 | 90 | 74.34 | 51.80 |
| 60 | 28.59 | 59.77 | 120 | 24.78 | 17.27 | 120 | 70.86 | 49.38 |
| 70 | 24.54 | 51.30 | 150 | 24.17 | 16.84 | 150 | 50.99 | 35.53 |
| 80 | 23.69 | 49.53 | 180 | 23.40 | 16.31 | 180 | 58.73 | 40.93 |
| 90 | 21.65 | 45.26 | 210 | 22.46 | 15.65 | 210 | 57.98 | 40.40 |
| 100 | 21.28 | 44.49 | 240 | 21.46 | 14.95 | 240 | 62.43 | 43.51 |
| 110 | 18.87 | 39.45 | 270 | 20.93 | 14.59 | 270 | 64.85 | 45.19 |
| 120 | 20.64 | 43.15 | 300 | 20.54 | 14.31 | 300 | 53.70 | 37.42 |
| 130 | 16.75 | 35.02 | 330 | 21.02 | 14.65 | 330 | 40.31 | 28.09 |
| 140 | 18.97 | 39.66 | 360 | 20.15 | 14.04 | 360 | 41.09 | 28.63 |
| 150 | 18.00 | 37.63 | | | | | | |
| 160 | 15.69 | 32.80 | | | | | | |
| 170 | 16.63 | 34.77 | | | | | | |
| 180 | 16.25 | 33.97 | | | | | | |

*** ความดันในการเดินระบบใช้ความดันคงที่ (Constant pressure model) ที่ 60 psi ตลอดการทดลอง**

**ตารางที่ ข.9** ผลของค่าฟลักซ์ของการเดินระบบเยื่อกรองนาโนทำความสะอาดด้วยกรด ด่าง และตามด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบความเข้มข้น 8.13 มิลลิโมลาร์

| ฟลักซ์เริ่มต้น | | | การเดินระบบเยือกรองด้วยน้ำป้อนระบบ | | | การทำความสะอาดและกรองด้วยน้ำกลั่น | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH | Temp | Conductivity | pH |
| 28.1 | 2.6 μS/cm | 6.36 | 28.5 | 939 μS/cm | 6.38 | 27.2 | 2.61 μS/cm | 6.63 |

| เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (ml/min) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. | เวลา (นาที) | permeate (L) | ลิตร/ตร.ม.-ชม. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 145.30 | 607.53 | 0 | 76.33 | 159.57 | 0 | 183.59 | 383.81 |
| 5 | 80.62 | 337.09 | 10 | 15.06 | 31.48 | 10 | 69.32 | 144.92 |
| 10 | 51.76 | 216.42 | 20 | 12.19 | 25.48 | 20 | 49.18 | 102.82 |
| 15 | 36.84 | 154.03 | 30 | 9.01 | 18.84 | 30 | 36.34 | 75.97 |
| 20 | 52.46 | 109.67 | 40 | 5.86 | 12.25 | 40 | 29.79 | 62.28 |
| 30 | 47.49 | 99.28 | 50 | 8.14 | 17.02 | 50 | 25.96 | 54.27 |
| 40 | 32.00 | 66.90 | 60 | 19.19 | 13.37 | 60 | 68.63 | 47.83 |
| 50 | 31.80 | 66.48 | 90 | 18.53 | 12.91 | 90 | 56.35 | 39.27 |
| 60 | 24.20 | 50.59 | 120 | 17.29 | 12.05 | 120 | 54.69 | 38.11 |
| 70 | 24.56 | 51.34 | 150 | 19.22 | 13.39 | 150 | 46.21 | 32.20 |
| 80 | 26.43 | 55.25 | 180 | 17.25 | 12.02 | 180 | 42.16 | 29.38 |
| 90 | 22.43 | 46.89 | 210 | 18.55 | 12.93 | 210 | 41.32 | 28.79 |
| 100 | 22.21 | 46.43 | 240 | 16.59 | 11.56 | 240 | 40.62 | 28.31 |
| 110 | 22.31 | 46.64 | 270 | 16.76 | 11.68 | 270 | 36.77 | 25.62 |
| 120 | 21.56 | 45.07 | 300 | 16.92 | 11.79 | 300 | 37.01 | 25.79 |
| 130 | 20.11 | 42.04 | 330 | 16.78 | 11.69 | 330 | 35.92 | 25.03 |
| 140 | 17.19 | 35.94 | 360 | 16.66 | 11.61 | 360 | 36.69 | 25.57 |
| 150 | 15.80 | 33.03 | | | | | | |
| 160 | 14.48 | 30.27 | | | | | | |
| 170 | 14.07 | 29.41 | | | | | | |
| 180 | 14.10 | 29.48 | | | | | | |

*** ความดันในการเดินระบบใช้ความดันคงที่ (Constant pressure model) ที่ 60 psi ตลอดการทดลอง**

# ภาคผนวก ค
# ความสามารถในการกักกันสารอินทรีย์ของเยื่อกรองนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ค.** การทดสอบความสามารถในการกักกันสารอินทรีย์ของเยื่อกรองนาโนในการเดินระบบ

| ตัวอย่าง | เดินระบบครั้งที่ 1 | | | | เดินระบบครั้งที่ 2 | | | | เดินระบบครั้งที่ 3 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | cond(μS/cm$^2$) | pH | Temp (°C) | TOC (mg/L) | cond(μS/cm$^2$) | pH | Temp (°C) | TOC (mg/L) | cond(μS/cm$^2$) | pH | Temp (°C) | TOC (mg/L) |
| permeate 0 | 1221 | 6.89 | 24.30 | 19.7 | 1226 | 6.86 | 26.10 | 8.66 | 1380 | 6.88 | 24.90 | 11.50 |
| permeate 10 | 1186 | 6.93 | 24.10 | 17.66 | 1002 | 6.84 | 26.00 | 8.59 | 1303 | 6.89 | 24.80 | 10.89 |
| permeate 30 | 1057 | 6.98 | 24.20 | 16.5 | 946 | 6.84 | 26.10 | 8.22 | 1230 | 6.89 | 25.00 | 9.65 |
| permeate 60 | 961 | 7.03 | 24.00 | 13.59 | 862 | 6.78 | 26.40 | 7.94 | 1011 | 6.91 | 25.60 | 9.13 |
| permeate 90 | 821 | 7.00 | 24.10 | 11.97 | 762 | 6.71 | 26.10 | 7.84 | 932 | 6.98 | 25.50 | 9.02 |
| permeate150 | 612 | 6.99 | 24.20 | 8.79 | 531 | 6.91 | 26.10 | 7.33 | 820 | 7.01 | 25.40 | 8.16 |
| permeate240 | 399 | 6.99 | 24.50 | 6.26 | 416 | 6.91 | 26.30 | 6.4 | 799 | 7.03 | 25.50 | 6.12 |
| permeate360 | 283 | 6.97 | 24.20 | 4.26 | 381 | 6.96 | 27.10 | 2.66 | 924 | 7.06 | 25.10 | 3.22 |
| Feed | 1923 | 6.97 | 23.90 | 19.09 | 1382 | 6.63 | 26.80 | 9.45 | 1431 | 6.88 | 25.30 | 11.50 |
| Retentate | 2010 | 6.81 | 23.80 | 28.17 | 1526 | 6.62 | 26.40 | 14.33 | 1717 | 6.85 | 25.10 | 16.78 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ค.** (ต่อ) การทดสอบความสามารถในการกักกันสารอินทรีย์ของเยื่อกรองนาโนในการเดินระบบ

| ตัวอย่าง | เดินระบบครั้งที่ 4 | | | | เดินระบบครั้งที่ 5 | | | | เดินระบบครั้งที่ 6 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | cond(μS/cm$^2$) | pH | Temp (°C) | TOC (mg/L) | cond(μS/cm$^2$) | pH | Temp (°C) | TOC (mg/L) | cond(μS/cm$^2$) | pH | Temp (°C) | TOC (mg/L) |
| permeate 0 | 981 | 6.83 | 27.90 | 9.29 | 599 | 6.99 | 24.80 | 9.55 | 945 | 6.86 | 22.70 | 10.38 |
| permeate 10 | 905 | 6.72 | 28.00 | 8.91 | 258 | 7.13 | 24.70 | 8.63 | 939 | 6.89 | 24.00 | 9.55 |
| permeate 30 | 767 | 6.74 | 28.00 | 8.52 | 141.3 | 7.04 | 24.50 | 8.55 | 826 | 6.91 | 23.20 | 9.01 |
| permeate 60 | 517 | 6.74 | 27.80 | 7.55 | 103.6 | 7.02 | 24.30 | 8.12 | 782 | 6.92 | 23.40 | 8.85 |
| permeate 90 | 451 | 6.72 | 27.90 | 5.69 | 82.4 | 6.81 | 23.80 | 6.37 | 766 | 6.95 | 24.70 | 6.32 |
| permeate150 | 376 | 6.70 | 27.90 | 4.90 | 78.3 | 6.77 | 24.10 | 5.51 | 687 | 6.95 | 24.40 | 5.45 |
| permeate240 | 342 | 6.78 | 28.10 | 2.29 | 59.8 | 6.91 | 24.40 | 4.83 | 654 | 6.96 | 24.30 | 4.37 |
| permeate360 | 285 | 6.79 | 28.00 | 1.65 | 30.9 | 6.76 | 24.40 | 3.61 | 638 | 6.98 | 24.10 | 3.12 |
| Feed | 1150 | 6.50 | 28.10 | 9.38 | 748 | 6.75 | 24.90 | 10.56 | 1028 | 6.84 | 23.70 | 14.15 |
| Retentate | 1913 | 6.46 | 28.10 | 12.41 | 1448 | 6.74 | 24.90 | 13.15 | 1500 | 6.81 | 24.10 | 18.31 |

ตารางที่ ค. (ต่อ) การทดสอบความสามารถในการกักกันสารอินทรีย์ของเยื่อกรองนาโนในการเดินระบบ

| ตัวอย่าง | เดินระบบครั้งที่ 7 | | | | เดินระบบครั้งที่ 8 | | | | เดินระบบครั้งที่ 9 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | cond(μS/cm$^2$) | pH | Temp (°C) | TOC (mg/L) | cond(μS/cm$^2$) | pH | Temp (°C) | TOC (mg/L) | cond(μS/cm$^2$) | pH | Temp (°C) | TOC (mg/L) |
| permeate 0 | 575 | 6.16 | 26.60 | 1.07 | 929 | 6.93 | 28.40 | 2.13 | 933 | 6.07 | 28.70 | 11.35 |
| permeate 10 | 561 | 6.27 | 26.10 | 1.59 | 811 | 7.00 | 28.20 | 2.46 | 581 | 6.50 | 28.00 | 8.04 |
| permeate 30 | 502 | 6.28 | 26.20 | 1.84 | 421 | 6.91 | 27.90 | 2.89 | 360 | 6.62 | 28.30 | 5.46 |
| permeate 60 | 449 | 6.26 | 26.10 | 2.99 | 373 | 6.9 | 28.20 | 3.79 | 228 | 6.74 | 28.20 | 3.50 |
| permeate 90 | 432 | 6.36 | 26.30 | 3.73 | 312 | 6.89 | 28.40 | 4.26 | 189 | 6.74 | 28.40 | 3.05 |
| permeate150 | 411 | 6.29 | 25.90 | 4.39 | 293 | 7.00 | 28.30 | 4.89 | 131 | 6.80 | 28.50 | 2.11 |
| permeate240 | 413 | 6.26 | 26.10 | 5.49 | 201 | 7.01 | 28.00 | 5.76 | 125 | 6.92 | 28.00 | 2.07 |
| permeate360 | 406 | 6.32 | 25.80 | 7.04 | 118 | 7.03 | 28.40 | 7.18 | 110 | 6.92 | 28.60 | 1.45 |
| Feed | 766 | 6.22 | 26.60 | 8.07 | 1595 | 6.78 | 28.40 | 8.05 | 939 | 6.38 | 28.50 | 11.42 |
| Retentate | 1332 | 6.08 | 26.40 | 12.87 | 1702 | 6.87 | 28.30 | 12.45 | 1606 | 6.32 | 28.30 | 20.88 |