



## การบำบัดน้ำผิวดินเบื้องต้นด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

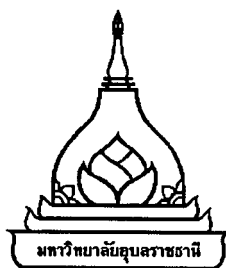
ภาณุวัฒน์ สีทา

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2550

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



# **MICROFILTRATION FOR PRETREATMENT OF SURFACE WATER**

**PANUWAT SEETA**

**AN INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING**

**MAJOR IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**UBON RAJATHANEE UNIVERSITY**

**YEAR 2007**

**COPYRIGHT OF UBON RAJATHANEE UNIVERSITY**



ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การบำบัดน้ำผิวดินเบื้องต้นด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

ผู้วิจัย นายภานุวัฒน์ สีทา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒนพงษ์ มัตราข)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์)

..... กรรมการ  
(ดร.สุกัญญา ศรีสง่า)

..... คณบดี  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร โกลา)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2550

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้าอิสระนี้สำเร็จลงด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือ ข้อชี้แนะ ตลอดจนกำลังใจ อันเป็นคุณประโยชน์ในการค้นคว้าข้อมูล การปฏิบัติการทดลองและการแก้ไขปัญหาดังกล่าว

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒน์พงษ์ มัตราข อาจารย์ ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ ที่ได้ให้คำแนะนำพร้อมทั้งคำปรึกษา ข้อเสนอแนะ รวมถึงแนวทางในการหาข้อมูลและดำเนินการวิจัย ตลอดจนวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ในการทดลอง ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่สละเวลาให้คำแนะนำในด้านต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ตัวข้าพเจ้า อีกทั้งได้ให้คำสั่งสอนทั้งความรู้ที่มีอยู่ในตำราเรียนและความรู้นอกตำราเรียน จนกระทั่งการค้นคว้าอิสระฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลอ จารุสุทธีรักษ์ และดร.สุกัญญา ศรีสง่า กรรมการค้นคว้าอิสระ ที่ได้ให้คำแนะนำ อันเป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัยและขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อเป็นคณะกรรมการค้นคว้าอิสระ

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้คำสั่งสอนและความรู้ที่มีอยู่ทั้งในตำราเรียนและนอกตำราเรียนทำให้ข้าพเจ้าสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการค้นคว้าอิสระ

ขอขอบคุณ ดร.สุทธีวัลย์ สีทา, เพื่อนๆ ร่วมรุ่นวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม รุ่นที่ 3 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี คุณคมสัน มงคลสวัสดิ์ คุณธีระวุฒิ บุญล้อม คุณพรนภา แก้วประดิษฐ์ และคุณพัฒนัชวัลพร สีนรัมย์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณ บริษัท ที.เอส.ซัพพลาย แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด ที่ได้สนับสนุนและให้กำลังใจในการศึกษาครั้งนี้ด้วย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ช่วยเหลือระหว่างทำการค้นคว้าอิสระ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้ชีวิต ความรัก คำสั่งสอนอบรมสนับสนุน และช่วยเหลือ อีกทั้งเป็นกำลังใจอันสำคัญในการทำวิจัยครั้งนี้มาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

ภุช วัฒน สัก

(นายภานุวัฒน์ สีทา)

ผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การบำบัดน้ำผิวดินเบื้องต้นด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

โดย : ภาณุวัฒน์ สีทา

ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒน์พงษ์ มัตราข

ศัพท์สำคัญ : เมมเบรน ไมโครฟิลเตรชัน ออสโมซิสย้อนกลับ เพอร์มิเอทฟลักซ์  
สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด

การวิจัยในครั้งนี้ เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบการกรองผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) ในการบำบัดเบื้องต้นของแหล่งน้ำผิวดินด้วยการดำเนินระบบการไหลตามแนวตั้ง (Dead- end operation) ส่วนน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันจะถูกทดสอบโดยการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับภายใต้เครื่องมือทดสอบแบบไหลขวาง (Cross-flow operation) เพื่อเปรียบเทียบเพอร์มิเอทฟลักซ์กับผลจากแหล่งน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น สถานะการดำเนินระบบแบ่งเป็นสองสถานะ ได้แก่การทดลองระบบแบบอนุกรม (Series) และแบบกะ (Batch) โดยใช้ขนาดรูพรุนของเมมเบรนที่แตกต่างกันได้แก่ 5, 1.2 และ 0.45 ไมโครเมตร ผลการศึกษาพบว่า การลดลงของเพอร์มิเอทฟลักซ์จากกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับมีค่าลดลงเนื่องจากการบำบัดเบื้องต้นจากการกรองผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุน 5, 1.2 และ 0.45 ไมโครเมตร สำหรับการทดสอบแบบอนุกรมและแบบกะค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์มีอัตราการลดลงอย่างเด่นชัดในช่วงระยะเวลา 10 นาทีแรกโดยค่าฟลักซ์จะลดลงน้อยกว่าร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์เริ่มต้นอาจเนื่องจากการสะสมสารแขวนลอยและคอลลอยด์บนผิวของเมมเบรนและหรือภายในช่องรูพรุนเมมเบรนทำให้เกิดการอุดตันบนแผ่นเมมเบรน ส่วนการเพิ่มความดันส่งผลทำให้เกิดการอัดตัวของอนุภาคสารแขวนลอยและคอลลอยด์ที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนและภายในรูพรุนเมมเบรนทำให้ขนาดรูพรุนเล็กลง จึงมีผลทำให้ค่าการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้น

## ABSTRACT

TITLE : MICROFILTRATION FOR PRETREATMENT OF SURFACE WATER  
BY : PANUWAT SEETA  
DEGREE : MASTER OF ENGINEERING  
MAJOR : ENVIRONMENTAL ENGINEERING  
CHAIR : ASST. PROF. SUPATPONG MATTARAJ, Ph.D.

KEYWORDS : MEMBRANE / MICROFILTRATION / REVERSE OSMOSIS /  
PERMEATE FLUX / TOTAL ORGANIC CARBON

This research studied the performance of microfiltration membrane for pretreatment of surface water using a dead-end operation while the pretreated water was further investigated using a reverse osmosis under a crossflow bench-scale test cell to compare the permeate flux with the results from source water. Experimental operations were divided into two conditions (i.e. series and batch experiments) with different microfiltration pore sizes (i.e. 5, 1.2, and 0.45  $\mu\text{m}$ ). Experimental results showed that the permeate flux decline from reverse osmosis membrane decreased due to pretreatment of surface water with microfiltration of 5, 1.2, and 0.45  $\mu\text{m}$ . For series and batch experiments, the permeate flux decreased significantly with the first 10 min filtration, indicating less than 10% of initial permeate flux, possibly due to increased accumulation of suspended and colloid materials on membrane surface and/or pores, causing membrane fouling. Increased operating pressures increased suspended and colloidal materials compacted on membrane surface and/or pores, thus reduced membrane pores. This enhances an increase rejection of turbidity and total organic carbon.

## สารบัญ

|                                               | หน้า |
|-----------------------------------------------|------|
| กิตติกรรมประกาศ                               | ก    |
| บทคัดย่อภาษาไทย                               | ข    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                            | ค    |
| สารบัญ                                        | ง    |
| สารบัญตาราง                                   | ฉ    |
| สารบัญภาพ                                     | ญ    |
| คำอธิบายสัญลักษณ์                             | ณ    |
| บทที่                                         |      |
| 1 บทนำ                                        |      |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา            | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย                   | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย                         | 2    |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย                  | 3    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                 | 3    |
| 1.6 สถานที่ดำเนินการวิจัย ทดลอง และเก็บข้อมูล | 3    |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง               |      |
| 2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำผิวดิน                  | 4    |
| 2.2 กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน                  | 7    |
| 2.3 กระบวนการไมโครฟิเตรชัน                    | 14   |
| 2.4 กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ                 | 17   |
| 2.5 การทำความสะอาดเมมเบรน                     | 23   |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                     | 25   |
| 3 วิธีดำเนินงานวิจัย                          |      |
| 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง                   | 27   |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ                      | 27   |
| 3.3 ขั้นตอนการทดลอง                           | 28   |

## สารบัญ(ต่อ)

|                                                                                                                                                       | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล                                                                                                                                | 33   |
| <b>4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>                                                                                                               |      |
| 4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง                                                                                                                           | 34   |
| 4.2 ผลจากการดำเนินระบบบำบัดน้ำผิวดินเบื้องต้นผ่านกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน                                                                       | 35   |
| 4.3 ผลจากการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ                                                                                | 59   |
| 4.4 ผลจากการดำเนินระบบผ่านกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับของน้ำผิวดินที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจากกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน                              | 61   |
| <b>5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>                                                                                                                  |      |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย                                                                                                                                    | 65   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ                                                                                                                                        | 66   |
| <b>เอกสารอ้างอิง</b>                                                                                                                                  | 68   |
| <b>ภาคผนวก</b>                                                                                                                                        |      |
| ก ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันและออสโมซิสย้อนกลับ                                                                          | 71   |
| ข ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันและออสโมซิสย้อนกลับ                           | 89   |
| ค ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของน้ำดิบผิวดินทั่วไปและค่าความต้านทานของเยื่อแผ่นเมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันและออสโมซิสย้อนกลับ | 96   |
| ง ตัวอย่างการคำนวณ                                                                                                                                    | 99   |
| <b>ประวัติผู้วิจัย</b>                                                                                                                                | 105  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                                                                                                                            | หน้า |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.1      | คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำผิวดิน                                                                                                                              | 35   |
| 4.2      | การเปรียบเทียบค่าการซึมผ่านของเมมเบรนหลังการทำความสะอาด<br>เมมเบรนแบบ Water cleaning และ Chemical ของน้ำผิวดินเมื่อผ่านการ<br>ดำเนินระบบแบบอนุกรม ที่ความดัน 172.33 kPa    | 55   |
| 4.3      | การเปรียบเทียบร้อยละค่าการซึมผ่านของเมมเบรนหลังการทำความสะอาด<br>เมมเบรนแบบ Water cleaning และ Chemical ของน้ำผิวดินเมื่อผ่านการ<br>ดำเนินระบบ แบบกะ ที่ความดัน 172.33 kPa | 55   |
| ก.1      | ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน<br>5 $\mu\text{m}$ ความดัน 68.93 kPa                                                                          | 72   |
| ก.2      | ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$<br>แล้วนำมา ดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$<br>ความดัน 68.93 kPa                 | 72   |
| ก.3      | ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$<br>แล้วนำมา ดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$<br>ความดัน 68.93 kPa              | 73   |
| ก.4      | ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน<br>5 $\mu\text{m}$ ความดัน 103.39 kPa                                                                         | 73   |
| ก.5      | ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$<br>แล้วนำมา ดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$<br>ความดัน 103.39 kPa                | 74   |
| ก.6      | ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$<br>แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$<br>ความดัน 103.39 kPa              | 74   |
| ก.7      | ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน<br>5 $\mu\text{m}$                                                                                            | 75   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ |                                                                                                                                                         | หน้า |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ก.8      | ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ แล้วนำมา ดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ ความดัน 137.86 kPa   | 75   |
| ก.9      | ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ ความดัน 137.86 kPa | 76   |
| ก.10     | ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa                                                         | 76   |
| ก.11     | ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa    | 77   |
| ก.12     | ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMFขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa  | 77   |
| ก.13     | ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ ความดัน 68.93 kPa                                                              | 78   |
| ก.14     | ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ ความดัน 68.93 kPa                                                            | 78   |
| ก.15     | ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ ความดัน 68.93 kPa                                                           | 79   |
| ก.16     | ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ ความดัน 103.39 kPa                                                             | 79   |
| ก.17     | ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ ความดัน 103.39 kPa                                                           | 80   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่                                                                                                                                                     | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ก.18 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ ความดัน 103.39 kPa                                                          | 80   |
| ก.19 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ ความดัน 137.86 kPa                                                             | 81   |
| ก.20 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ ความดัน 137.86 kPa                                                           | 81   |
| ก.21 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนแบบMF กะขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ ความดัน 137.86 kPa                                                          | 82   |
| ก.22 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa                                                             | 82   |
| ก.23 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa                                                           | 83   |
| ก.24 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa                                                          | 83   |
| ก.25 ผลการดำเนินระบบของน้ำสังเคราะห์ผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa                                                     | 84   |
| ก.26 ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa    | 84   |
| ก.27 ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa | 85   |
| ก.28 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนแบบ RO ที่ความดัน 482.51 kPa                                                                                      | 85   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่                                                                                                                                                                                                     | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ก.29 ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ แล้วนำมากรองผ่านเมมเบรนแบบ RO ที่ ความดัน 482.51 kPa.                                                          | 86   |
| ก.30 ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ แล้วนำมากรองผ่านเมมเบรนแบบ RO ที่ ความดัน 482.51 kPa.                                                        | 87   |
| ก.31 ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ แล้วนำมากรองผ่านเมมเบรนแบบ RO ที่ ความดัน 482.51 kPa.                                                       | 88   |
| ข.1 ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของ น้ำผิวดิน ผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ ความดัน 68.93 kPa                                                          | 90   |
| ข.2 ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรอง ผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรม ขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบ ผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ ความดัน 68.93 kPa       | 90   |
| ข.3 ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรอง ผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรม ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบ ผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ ความดัน 68.93 kPa | 91   |
| ข.4 ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของ น้ำผิวดิน ผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ ความดัน 103.39 kPa                                                         | 91   |
| ข.5 ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรอง ผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบผ่าน เมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ ความดัน 103.39 kPa    | 91   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ |                                                                                                                                                                                                         | หน้า |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ข.6      | ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ ความดัน 103.39 kPa  | 92   |
| ข.7      | ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำฝวดิน ผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ ความดัน 137.86 kPa                                                          | 92   |
| ข.8      | ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ ความดัน 137.86 kPa     | 92   |
| ข.9      | ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ ความดัน 137.86 kPa  | 93   |
| ข.10     | ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำฝวดิน ผ่านเมมเบรน MF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa                                                         | 93   |
| ข.11     | ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa     | 93   |
| ข.12     | ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรม ขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa | 94   |
| ข.13     | ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำฝวดิน ผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa                                                              | 94   |
| ข.14     | ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำฝวดิน ผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 1.2 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa                                                            | 94   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ |                                                                                                                                                                                                                                                                      | หน้า |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ข.15     | ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดิน ผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$ ความดัน 172.32 kPa                                                                                                                       | 95   |
| ข.16     | ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดิน ผ่านเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ ที่ความดัน 482.51 kPa                                                                                                                                      | 95   |
| ค.1      | คุณภาพน้ำผิวดินทั่วไป                                                                                                                                                                                                                                                | 97   |
| ค.2      | ค่าความต้านทานสำหรับการดำเนินระบบน้ำผิวดินแบบอนุกรมผ่านเมมเบรน MF ขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ , 1.2 $\mu\text{m}$ และ 0.45 $\mu\text{m}$ ที่มีความขุ่น 4.85 NTU ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 4.42 $\text{Mg.L}^{-1}$ ผ่านกระบวนการกรองแบบ MF ที่ความดัน 172.32 kPa | 98   |
| ค.3      | ค่าความต้านทานสำหรับการดำเนินระบบน้ำผิวดินแบบกะผ่านเมมเบรน MF ขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ , 1.2 $\mu\text{m}$ และ 0.45 $\mu\text{m}$ ที่มีความขุ่น 4.85 NTU ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 4.42 $\text{Mg.L}^{-1}$ ผ่านกระบวนการกรองแบบ MF ที่ความดัน 172.32 kPa     | 98   |
| ค.4      | ค่าความต้านทานสำหรับการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับที่ความดัน 482.51 kPa                                                                                                                                                                     | 98   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า                                                                                 |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.1    | หลักการของกระบวนการกรองผ่านเมมเบรน                                                   |
| 2.2    | ลักษณะการไหลผ่านเยื่อเมมเบรน                                                         |
| 2.3    | เปรียบเทียบกระบวนการเมมเบรนชนิดต่างๆ                                                 |
| 2.4    | ลักษณะการอุดตันแบบ Cake Layer                                                        |
| 2.5    | ลักษณะการอุดตันแบบ Pore Blocking                                                     |
| 2.6    | ลักษณะการอุดตันแบบ Interior pore fouling                                             |
| 2.7    | ไดอะแกรมแสดงการกักขังด้วยกลไกการล้างเมมเบรน                                          |
| 2.8    | เส้นโค้งการกักของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสองแบบ                                         |
| 2.9    | หลักการดำเนินระบบของออสโมซิสและออสโมซิสย้อนกลับ                                      |
| 2.10   | การกรองแบบไหลขวางในกระบวนการแบบออสโมซิสย้อนกลับ                                      |
| 3.1    | ลักษณะการดำเนินระบบแบบอนุกรม                                                         |
| 3.2    | ลักษณะการดำเนินระบบแบบกะ                                                             |
| 3.3    | แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน         |
| 3.4    | แผนภาพแสดงการดำเนินระบบการไหลตามแนวตั้งของกระบวนการกรองเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน      |
| 3.5    | แผนภาพแสดงการทำงานของระบบเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ                                  |
| 4.1    | ค่าพลาซิกซ์กับเวลาในการดำเนินระบบแบบอนุกรมผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุนต่างๆ                 |
| 4.2    | ค่าเพอร์มิเอทพลาซิกซ์กับเวลาในการดำเนินระบบแบบอนุกรมที่ความดันต่างๆ                  |
| 4.3    | ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจากการดำเนินระบบแบบอนุกรมที่ความดันต่างๆ                |
| 4.4    | ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดจากการดำเนินระบบแบบ MF ที่ความดันต่างๆ |
| 4.5    | ผลการดำเนินระบบผ่าน MF แบบกะที่ความดันต่างๆ                                          |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                        | หน้า |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.6    | ค่าเพอร์มิเทฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบแบบกะที่ความดันต่างๆ                                                           | 46   |
| 4.7    | ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจากการดำเนินระบบแบบกะผ่านเมมเบรน MF ขนาดต่างๆ                                             | 48   |
| 4.8    | ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดจากการดำเนินระบบแบบ MF ผ่านกระบวนการกรองแบบกะ ที่ความดัน 172.32 kPa      | 49   |
| 4.9    | ค่าฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบผ่านเมมเบรนขนาดต่างๆ ที่ความดัน 172.32 kPa                                              | 50   |
| 4.10   | ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของระบบ MF                                                    | 51   |
| 4.11   | ประสิทธิภาพการดำเนินระบบแบบอนุกรมผ่านกระบวนการกรองแบบ MF ของน้ำสังเคราะห์ความขุ่น ที่ความดัน 172.32 kPa                | 52   |
| 4.12   | ผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ของระบบเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันแต่ละขนาดรูพรุน                                                    | 54   |
| 4.13   | ความสัมพันธ์ระหว่างเพอร์มิเทฟลักซ์กับความดันของเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45 $\mu\text{m}$                                    | 56   |
| 4.14   | ความต้านทานการอุดตันของเมมเบรนแต่ละขนาดรูพรุนเมื่อดำเนินระบบแบบอนุกรมที่ความดัน 172.32 kPa                             | 58   |
| 4.15   | ความต้านทานการอุดตันของเมมเบรนแต่ละขนาดรูพรุนเมื่อดำเนินระบบแบบกะที่ความดัน 172.32 kPa                                 | 58   |
| 4.16   | ผลการดำเนินระบบของน้ำฟีดินผ่านกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ ที่ความดัน 482.51 kPa                                   | 59   |
| 4.17   | ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดจากการดำเนินระบบการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับที่ความดัน 482.51 kPa | 60   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                       | หน้า |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.18   | ผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ ของระบบเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ                                                            | 61   |
| 4.19   | ผลเพอร์มิเอตฟลักซ์ จากการดำเนินระบบการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ<br>ของ น้ำผิวดินที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจากกระบวนการ MF | 62   |
| 4.20   | ผลค่าฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบออสโมซิสย้อนกลับของน้ำผิวดิน ที่<br>ความดัน 482.51 kPa                               | 63   |
| 4.21   | ความต้านทานการอุดตันของเมมเบรนแบบออสโมซิสที่ผ่านการบำบัด<br>เบื้องต้น กระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 482.51 kPa    | 64   |

## คำอธิบายสัญลักษณ์

### สัญลักษณ์

### คำอธิบาย

|              |                                                                |
|--------------|----------------------------------------------------------------|
| $Q_f$        | อัตราการไหลเข้า มีหน่วยเป็น ลิตร/นาทึ                          |
| $Q_{perm}$   | อัตราการซึมผ่านเมมเบรน มีหน่วยเป็น ลิตร/นาทึ                   |
| $C_f$        | ความเข้มข้นของสารละลายเข้าสู่ระบบ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม / ลิตร |
| $C_r$        | ความเข้มข้นของสารละลายออกจากระบบ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม / ลิตร  |
| $C_p$        | ความเข้มข้นของเพอร์มิเอท มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม / ลิตร          |
| $J_v$        | อัตราการซึมผ่านเมมเบรน ลูกบาศก์เมตร/เมตร <sup>2</sup> /ชั่วโมง |
| $L_p$        | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารหรือความสามารถในการซึมผ่าน          |
| $\Delta P$   | ความดันเฉลี่ย มีหน่วยเป็น kPa                                  |
| $\sigma$     | Osmotic reflection coefficient                                 |
| $\Delta \pi$ | ค่าความแตกต่างของแรงดันออสโมติก มีหน่วยเป็น kPa                |
| $R$          | อัตราการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ                                 |
| $\mu$        | ค่าความหนืดของน้ำ                                              |
| $T$          | อุณหภูมิที่จุดสมบูรณ์                                          |
| $r_m$        | ค่าความต้านทานที่เกิดจากเมมเบรน                                |
| $r_c$        | ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของสารละลายที่มีความเข้มข้น        |
| $r_{c1}$     | ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของเจล                             |
| $r_{c2}$     | ค่าความต้านทานที่การดูดซับที่สามารถล้างออกได้                  |
| $r_f$        | ค่าความต้านทานที่ไม่สามารถล้างออกได้                           |
| MF           | เมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน                                       |
| NF           | เมมเบรนแบบนาโนฟิลเตรชัน                                        |
| NOM          | สารอินทรีย์ธรรมชาติ                                            |
| RO           | เมมเบรนแบบออสโมซิสผันกลับ                                      |
| UF           | เมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน                                      |

## คำอธิบายสัญลักษณ์(ต่อ)

### สัญลักษณ์

### คำอธิบาย

TOC

สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด

$R_{feed}$

อัตราการกำจัดสารละลายออกจากน้ำเมื่อเทียบกับน้ำเข้า  
ระบบ

$\mu m$

ไมโครเมตร

$\mu S.cm^{-1}$

ไมโครซีเมนต่อตารางเซนติเมตร

$cm^{-1}$

หนึ่งต่อเซนติเมตร

$Pa$

ปาสคาล

$kPa$

กิโลปาสคาล

LMH

ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง

$L.min^{-1}$

ลิตรต่อนาที

$L.m^{-2}.h^{-1}$

ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง

$L.m^{-1}.h^{-1}.kpa^{-1}$

ลิตรต่อเมตรต่อชั่วโมงต่อความดัน

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการกรองผ่านเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis, RO) เป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane Technology) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เพื่อแยกน้ำบริสุทธิ์ออกจากสารละลายต่างๆ ในน้ำ เช่น เกลือต่างๆ โลหะหนัก สารเคมี สารอินทรีย์และสิ่งขับถ่ายของเสียจากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้สามารถผลิตน้ำสะอาดและบริสุทธิ์ที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสมและใช้ในการอุปโภคและบริโภคได้อย่างปลอดภัย

ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมผลิตน้ำเพื่ออุปโภคและบริโภคของกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ คือ เกิดการอุดตัน (Fouling) ของเมมเบรน ซึ่งการอุดตันเกิดได้หลายสาเหตุ โดยอาจเกิดจากการดูดซับ (Adsorption) การเก็บกัก (Deposition) การรวมตัวเป็นกลุ่มของอนุภาค (Aggregation) ทำให้กระบวนการทำงานมีประสิทธิภาพลดลงด้วยเหตุนี้ การทำความสะอาดน้ำเบื้องต้น (pretreatment) ก่อนนำมาผ่านกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ จึงมักเป็นเรื่องที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ กระบวนการกรองผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งในการบำบัดน้ำ โดยอาศัยแรงดันที่ต่ำเป็นแรงขับเคลื่อน โดยกระบวนการกรองสามารถแยกอนุภาคคอลลอยด์ ของแข็งแขวนลอย แบคทีเรีย ตลอดจนจุลินทรีย์อื่นๆ ออกจากน้ำ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการกรองเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำผิวดินจากแหล่งน้ำธรรมชาติเบื้องต้น ด้วยการดำเนินระบบการไหลตามแนวตั้ง (Dead end operation) และนำน้ำผิวดินที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจากกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน มาดำเนินระบบออสโมซิสย้อนกลับแบบไหลขวาง (Cross-flow operation) โดยเปรียบเทียบน้ำผิวดินที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น ตลอดจนศึกษาถึงคุณลักษณะของน้ำผิวดินจากแหล่งน้ำหนองอีเจมส์ จังหวัดอุบลราชธานี เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและนำมาประยุกต์เพื่อการพัฒนาของกระบวนการกรองเมมเบรนต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการกรองเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน ในการบำบัดน้ำผิวดินเบื้องต้น และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการกรองในการดำเนินระบบแบบอนุกรม (Series) และการดำเนินระบบแบบกะ (Batch)

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการกรองเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ ในการดำเนินระบบแบบไหลขวางและเปรียบเทียบน้ำผิวดินที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการกรองเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน ในการบำบัดน้ำผิวดินเบื้องต้นจากแหล่งน้ำธรรมชาติ และนำน้ำผิวดินที่ผ่านการบำบัดมาผ่านกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ โดยจะศึกษาจากปัจจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 น้ำตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำผิวดินจากแหล่งน้ำหนองอีเจมส์ จังหวัดอุบลราชธานี

1.3.2 เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันที่ใช้ในการศึกษาจากบริษัท Sartorius ชนิด Cellulose Nitrate ประเทศเยอรมัน ขนาดรูพรุน (Pore size) 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  ตามลำดับเพื่อศึกษาการลดปริมาณความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด ระบบการกรองที่ใช้ในการทดสอบเป็นการกรองแบบไหลตามแนวตั้ง

1.3.3 เมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับ ที่ใช้ในการศึกษารุ่น Model AG 2540 F1328 Serial 2049118 (Spiral wound cross flow) ชนิด Polyamide เพื่อศึกษาการลดปริมาณความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด ระบบการกรองที่ใช้ในการทดสอบเป็นการกรองแบบไหลขวาง

1.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพของเมมเบรน โดยศึกษาจาก

1.3.4.1 ค่าฟลักซ์ที่ลดลง (Flux decline)

1.3.4.2 ค่าการกักจัด (% Rejection)

1.3.5 ศึกษาคุณลักษณะของน้ำผิวดินจากแหล่งน้ำหนองอีเจมส์ จังหวัดอุบลราชธานี ด้วยการวัดค่าพีเอช (pH) ค่าความขุ่น ค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon, TOC) และค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาพร้อมรวบรวมผลการศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.4.2 จัดซื้อและจัดเตรียมเครื่องมือตลอดจนสารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง
- 1.4.3 ดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดลอง เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.4.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองพร้อมทั้งข้อเสนอแนะ
- 1.4.5 จัดทำรูปเล่มและนำเสนอผลการทดลอง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงประสิทธิภาพของกระบวนการกรองเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำผิวดินเบื้องต้น
- 1.5.2 ทราบถึงประสิทธิภาพของกระบวนการกรองเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับในการดำเนินระบบก่อนและหลังจากการบำบัดน้ำผิวดินเบื้องต้นด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน
- 1.5.3 ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้เกิดการอุดตันบนผิวเมมเบรน ซึ่งมีผลทำให้ฟลักซ์ลดลง
- 1.5.4 ทราบถึงคุณลักษณะเบื้องต้นของแหล่งน้ำดิบผิวดินหนองอีเจมส์ จังหวัดอุบลราชธานี ก่อนดำเนินการระบบการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันและออสโมซิสย้อนกลับ
- 1.5.5 ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อใช้ในการอุปโภคบริโภค ของแหล่งน้ำหนองอีเจมส์ จังหวัดอุบลราชธานี และนำไปประยุกต์เพื่อใช้เปรียบเทียบกับแหล่งน้ำผิวดินอื่น
- 1.5.6 ผลงานวิจัยที่ได้ยังใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาวิจัยทางด้านกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนต่อไป

## 1.6 สถานที่ดำเนินการวิจัย ทดลอง และเก็บข้อมูล

เก็บตัวอย่างน้ำผิวดินจากแหล่งน้ำธรรมชาติภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี 1-2 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยในครั้งนี้ เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการกรองเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการกรองเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ โดยการนำน้ำผิวดินที่มีความขุ่น และสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด จากแหล่งน้ำธรรมชาติหนองอีเจมส์ จังหวัดอุบลราชธานี มาผ่านการบำบัดน้ำเบื้องต้นด้วยกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน โดยมีวิธีการดำเนินระบบการไหลตามแนวตั้ง จากนั้นนำน้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นไปผ่านกระบวนการกรองเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ โดยมีวิธีการดำเนินระบบการไหลแบบไหลขวาง เพื่อนำน้ำที่ได้มาวิเคราะห์หาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการลดลงของฟลักซ์และค่าการกำจัด

ดังนั้นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้จะกล่าวถึงลักษณะสมบัติของน้ำผิวดิน ตามธรรมชาติ กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ การทำความสะอาดเมมเบรน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำผิวดิน

น้ำผิวดิน หมายถึง น้ำจากแม่น้ำลำคลอง ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ หนองและบึง เนื่องจากน้ำผิวดินมักมีแหล่งกำเนิดมาจากน้ำใต้ดิน การจำแนกลักษณะสมบัติของน้ำผิวดิน สามารถจำแนกตามปริมาณและชนิดของสิ่งปนเปื้อน ได้แก่ ลักษณะสมบัติทางกายภาพ เคมีและแบคทีเรีย

##### 2.1.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ

เป็นลักษณะของน้ำที่สามารถมองเห็นหรือสัมผัสได้ (อุคร จารุรัตน์ และจารุรัตน์ วรรณิสรากุล, 2537) การวัดปริมาณสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ กระทำได้ไม่ละเอียดนัก มักใช้วิธีเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานต่างๆ จึงมีหน่วยแตกต่างกันไป ลักษณะสมบัติทางกายภาพได้แก่ ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น สี กลิ่น รส และอุณหภูมิ ซึ่งจะขอกกล่าวถึงเฉพาะของแข็งแขวนลอยและความขุ่นเท่านั้น

##### 2.1.1.1 ของแข็งแขวนลอย

ของแข็งหรือสารที่เจือปนอยู่ในน้ำมีทั้งที่แขวนลอย (Suspended) และละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ (Dissolved) ของแข็งแขวนลอยประกอบด้วย สารอนินทรีย์ สารอินทรีย์ และของเหลวที่ไม่ผสมกับน้ำ (Immiscible liquid) เช่น น้ำมัน ส่วนประกอบอนินทรีย์ที่พบในน้ำ

ผิวดินทั่วไป คือ ดิน กรวด โคลนตมและเศษหิน ในขณะที่ของแข็งอินทรีย์จะเป็นเศษใบหญ้าใบไม้ หรือซากสิ่งมีชีวิตต่างๆ แพลงตอน จุลินทรีย์และสารละลายจำพวกคอลลอยด์ ของแข็งแขวนลอย เหล่านี้จะปะปนเข้ามาระหว่างที่น้ำไหลเซาะหรือผ่านผิวดิน แต่ในน้ำบาดาลจะไม่ค่อยพบของแข็งแขวนลอยเพราะถูกกรองโดยดินชั้นต่าง ๆ ของแข็งแขวนลอยจะทำให้ให้น้ำไม่น่าอุปโภคบริโภค และยังเป็นตัวดูดซับสารเคมีปนเปื้อนในน้ำ สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในน้ำ เชื้อโรคและสาหร่ายบางชนิดที่ผลิตสารพิษ นอกจากนี้ของแข็งอินทรีย์เองอาจผลิตสารที่ไม่ต้องการออกมาในระหว่างการย่อยสลายตามธรรมชาติอีกด้วย

#### 2.1.1.2 ความขุ่น

ความขุ่นในน้ำผิวดินเกิดจากการสลายตัวของ ดิน หิน โคลน ออกไซด์ของโลหะ ที่อยู่ในดิน เชื้อไม้ แพลงตอน และจุลินทรีย์ น้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสารที่ทำให้เกิดความขุ่นได้มากมายหลายชนิด คอลลอยด์ที่คงตัว (Stable) มักเกิดจาก สบู่ ผงซักฟอก และ Emulsifying agents ก็เป็นตัวทำให้เกิดความขุ่นด้วย ความขุ่นทำให้น้ำไม่เป็นที่ยอมรับเพราะจะสังเกตเห็นได้ทันทีถ้าบรรจุในภาชนะใส สารคอลลอยด์ที่ทำให้ความขุ่นจะเป็นตัวดูดซับสารเคมี อาจก่อให้เกิดสารอันตรายหรือทำให้เกิดกลิ่นและรสที่ไม่ต้องการ การฆ่าเชื้อในน้ำขุ่นจะกระทำได้ยากขึ้น (มันสัน ตันจุลเวศน์, 2539) เพราะความขุ่นจะทำตัวเป็นเกราะกำบังเชื้อโรคไว้ ความขุ่นในน้ำ ธรรมชาติมีสีน้ำตาล แต่อาจมีสีอื่นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของสารที่ก่อให้เกิดความขุ่น ความขุ่นจะบดบังการส่องผ่านของแสงลงสู่ก้นน้ำ มีผลให้การสังเคราะห์แสงของพืชในลำน้ำและ ทะเลสาปลดลง นอกจากนี้ความขุ่นที่ทับถมจมลงสู่ก้นลำน้ำหรือทะเลสาปจะจับตัวเป็นโคลนเลน และเปลี่ยนสภาพความเป็นอยู่ของสิ่งมีชีวิตใต้น้ำต่างๆ ในปัจจุบันการวัดค่าความขุ่นทันสมัยขึ้นโดยใช้ Nephelometric method ซึ่งใช้คุณสมบัติของการกระจัดกระจายแสง (Scattering) อันเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวัดความขุ่นต่ำๆ ใช้ฟอร์มามซินโพลิเมอร์ (Formazin polymer) ความขุ่นที่วัดด้วยวิธีนี้มีหน่วยเป็น NTU (Nephelometry Turbidity Unit) เครื่องมือชนิดนี้วัดความขุ่นได้ตั้งแต่ 0-200 NTU และอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.01 NTU

#### 2.1.2 ลักษณะสมบัติทางเคมี

ลักษณะสมบัติทางเคมีเป็นลักษณะสมบัติที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือการสัมผัสอื่นๆ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทางเคมีซึ่งลักษณะสมบัติทางเคมีแสดงผลให้ทราบว่าน้ำมีสภาพความเป็นกรดหรือด่างเพียงใด มีแร่ธาตุอะไรละลายอยู่ในน้ำ มีสารพิษอันตรายปะปนอยู่หรือไม่ในน้ำ การทราบลักษณะสมบัติทางเคมีจำเป็นต่อกระบวนการบำบัดน้ำ นอกจากนี้แล้วยังต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์ต่างๆ ในการใช้ข้อมูลของลักษณะสมบัติทางเคมีมาพิจารณา ซึ่งจะบอกกล่าวถึงเฉพาะสารอินทรีย์เท่านั้น

สารอินทรีย์ที่ไม่เสถียรจะถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ โดยออกซิเจน จะถูกใช้ในปฏิกิริยา สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำเหล่านี้ประกอบด้วย แป้ง ไขมัน โปรตีน แอลกอฮอล์ กรดอะมิโน และ เอสเทอร์ เป็นต้น ซึ่งมาจากการย่อยสลายซากพืชซากสัตว์ในแหล่งน้ำหรือจากน้ำเสียชุมชน น้ำเสียอุตสาหกรรมและน้ำเสียจากการเกษตร สารอินทรีย์เหล่านี้มักทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับความขุ่น สี กลิ่นและรสชาติของน้ำ

TOC (Total Organic Carbon) คือ ปริมาณสารอินทรีย์ทุกชนิดที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุคาร์บอน ซึ่งประกอบด้วย

(1) สารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย (Dissolved Organic Carbon, DOC) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถผ่านเมมเบรนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน

(2) อนุภาคสารอินทรีย์คาร์บอน (Particulate Organic Carbon, POC) คือ สารอินทรีย์คาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ และถูกกักแยกโดยเมมเบรนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน

(3) สารอินทรีย์คาร์บอนระเหย (Volatile Organic Carbon, VOC) คือ สารอินทรีย์คาร์บอนที่สลายตัวได้และถูกกำจัดออกโดย gas stripping ภายใต้สภาวะจำเพาะ VOC ส่วนใหญ่เป็นสารจากอุตสาหกรรม พบปนเปื้อนอยู่ทั้งในแหล่งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน หลายตัวในสารกลุ่มนี้จัดให้เป็นสารก่อมะเร็ง สารในกลุ่มนี้ที่ EPA กำหนดค่าสูงสุดในน้ำดื่ม ได้แก่ Benzene, 1,1-dichloroethylene, para – dichlorobenzene, 1,1-trichloroethane, trichloroethylene และ Vinyl chloride

(4) สารอินทรีย์คงตัว (Nonpurgeable Organic Carbon, NPOC) คือ ส่วนของ TOC ที่ไม่ถูกกำจัดออกโดย Gas stripping

สำหรับสารอินทรีย์ที่ไม่ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในน้ำธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส กรดแทนนิน กรดลิกนิน สารชีวโมเลกุล เป็นต้น จะใช้ค่าการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) เป็นตัวแทนของปริมาณสารอินทรีย์เหล่านี้ทั้งในน้ำสะอาดและน้ำเสีย ซึ่งช่วงค่าความยาวคลื่นมาตรฐานคือ 254 นาโนเมตร แต่ก็สามารถกำหนดใช้ช่วงค่าความยาวคลื่นอื่นๆ ได้ ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงสารประกอบอื่นๆ ในน้ำ ซึ่งอาจจะสามารถดูดซับรังสีอัลตราไวโอเลตในช่วงค่าความยาวคลื่นนั้นๆ ได้เช่นกัน ทำให้ค่าที่วัดได้ผิดไปจากที่ควรจะเป็น โดยอัตราส่วนระหว่างค่าการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเลตต่อสารอินทรีย์คาร์บอน สามารถแสดงถึงลักษณะของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดได้

นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยได้อีกประเภทหนึ่ง ซึ่งไม่ได้เกิดขึ้นเองตามกระบวนการตามธรรมชาติ แต่มักจะมาจากการสังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้งานในจุดประสงค์ต่างๆ และจะถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหลังใช้งานเสมอ สารอินทรีย์เหล่านี้มักจะ

มีเจือปนอยู่ในปริมาณน้อย แต่จะมีอันตรายต่อผู้ได้รับ เราอาจเรียกสารอินทรีย์กลุ่มนี้ว่า Trace Organics ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงบางชนิดเท่านั้น และเชื่อว่าในอนาคตจะต้องมีจำนวนและปริมาณเพิ่มขึ้นอีกมาก สารเหล่านี้ได้แก่ สารซักล้าง (ABS), สารปราบศัตรูพืช (DDT), สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากการเผ่าเชื้อด้วยคลอรีน (THMs), ไชยาไนต์ และฟีนอล เป็นต้น

### 2.1.3 ลักษณะสมบัติทางแบคทีเรีย

ผลที่เกิดจากข้อบกพร่องของคุณภาพน้ำในด้านนี้มักจะเห็นได้โดยตรงจากการเกิดโรคต่างๆ ที่มีน้ำเป็นสื่อหรือเป็นพาหะ โรคติดต่อทางน้ำ (Waterborne Diseases) ส่วนใหญ่เกิดจากการติดเชื้อแบคทีเรีย (Bacteria infection) เช่น ไข้รากสาด (Typhoid) ไข้รากสาดน้ำ (Paratyphoid) โรคบิดแบบไม่มีตัว (Bacillary dysentery) อหิวาต์ (Asiatic Cholera) Salmonellosis และ Shigellosis หรือโรคที่เกิดจากการติดเชื้อไวรัส (Viral Diseases) ได้แก่ ตับอักเสบ (Infectious Hepatitis) และโรคโปลิโอ (Poliomyelitis) หรือโรคที่เกิดจากโปรโตซัว (Protozoa) ได้แก่ โรคบิดมีตัว (Amoebic dysentery) และ Giardiasis นอกจากนี้ยังมีโรค Schistosomiasis ที่เกิดจากหนอน (worm) ซึ่งอาศัยอยู่ในหอยทาก (snail) และอาศัยน้ำเป็นตัวพาเข้าสู่ร่างกายคนเรา

แบคทีเรียที่พบอยู่ในน้ำมีมากมายหลายชนิด ส่วนใหญ่จะไม่มีผลต่อสุขภาพหรือความน่าเสียสุขภาพอนามัยและบางชนิด ที่ถูกจัดให้เป็นตัวชี้บ่งบอกความสกปรกหรือความน่าเสีย (Pollution indicator) จุลินทรีย์กลุ่มนี้ไม่มีผลต่อการเจ็บป่วยคือไม่เป็นเชื้อโรค (Nonpathogens) แต่จะมีจุลินทรีย์ส่วนน้อยที่เหลืออีกกลุ่มที่เป็นเชื้อโรค (Pathogens) ทำให้เกิดโรคภัยไข้เจ็บต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น จุลินทรีย์พวกนี้จะดำรงชีวิตได้ดีภายในร่างกายของคนเรา แต่ไม่มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงภายนอก และจะตายอย่างรวดเร็วเมื่อถูกถ่ายออกจากร่างกาย การวิเคราะห์หาเพื่อจำแนกชนิดกระทำได้ยาก สิ้นเปลืองทั้งเวลา และแรงงาน จึงไม่นิยมวิเคราะห์หา นอกจากในกรณีที่มีการระบาด (Epidemic) ของโรคอย่างรุนแรง

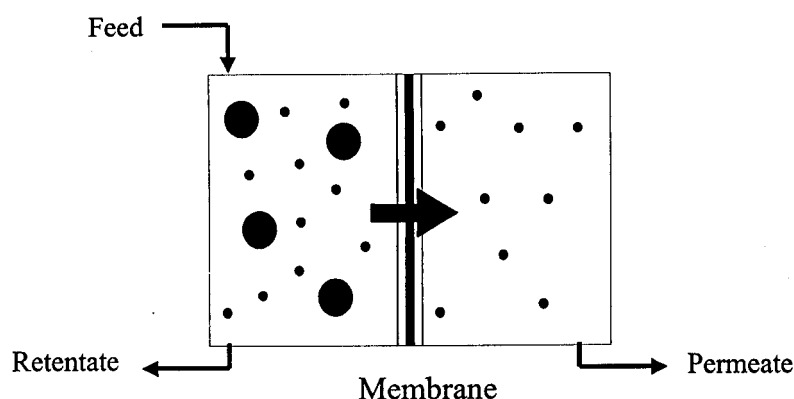
แบคทีเรียกลุ่มที่เป็นตัวชี้ความสกปรกเรียกว่า โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Coliform bacteria) จะอาศัยอยู่ในทางเดินอาหารของสัตว์เลือดอุ่นและพบเสมอเป็นจำนวนมากๆ ในอุจจาระ อีกทั้งสามารถอาศัยในสิ่งแวดล้อมภายนอกร่างกายได้นานกว่าเชื้อโรค

## 2.2 กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน

### 2.2.1 เมมเบรน

2.2.1.1 เมมเบรน คือ เยื่อฟิล์มบางที่สังเคราะห์ขึ้นจากวัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ เช่น เซลลูโลสอะซิเตต เซลลูโลสไนเตรด และโพลีเอไมด์ เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการเลือกกักแยกอนุภาคต่างๆ สารอินทรีย์ – อนินทรีย์ และไอออนออกจากของเหลวหรือก๊าซได้ ซึ่งเมมเบรน

เป็นตัวกลางขวางกั้นระหว่างเฟสของไหล 2 เฟส ที่มีคุณสมบัติยอมให้สารบางชนิดผ่านได้ (จันทอง สุนทรภา, 2545) จากภาพที่ 2.1 แสดงหลักการของกระบวนการกรองผ่านเมมเบรน โดยมี สารป้อน(Feed) เข้าทางด้านหนึ่งของเมมเบรนส่วนที่ผ่านเมมเบรนไปได้ เรียกว่า เพอร์มิเอท (Permeate) และส่วนของสารป้อนที่กั้นที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ เรียกว่า รีเทนเตท (Retentate) แรงขับ (Driving force) ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวล ได้แก่ ความดัน ความเข้มข้น แรงเคลื่อนไฟฟ้า เป็นต้น ตามประเภทของกระบวนการ



ภาพที่ 2.1 หลักการของกระบวนการกรองผ่านเมมเบรน

#### 2.2.1.2 โครงสร้างของเมมเบรน

เมมเบรนสังเคราะห์สามารถแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

- (1) เมมเบรนมีรูพรุน (Porous membrane)
- (2) เมมเบรนเนื้อแน่น (Dense membrane)
- (3) เมมเบรนแบบมีประจุ (Electrically charged membrane) หรือเมมเบรน

แลกเปลี่ยนไอออน (Ione exchange membrane)

(4) เมมเบรนของเหลว (Liquid membrane) เป็นเมมเบรนที่ใช้ Liquid carrier ทำหน้าที่คัดเลือกสารหรือองค์ประกอบ

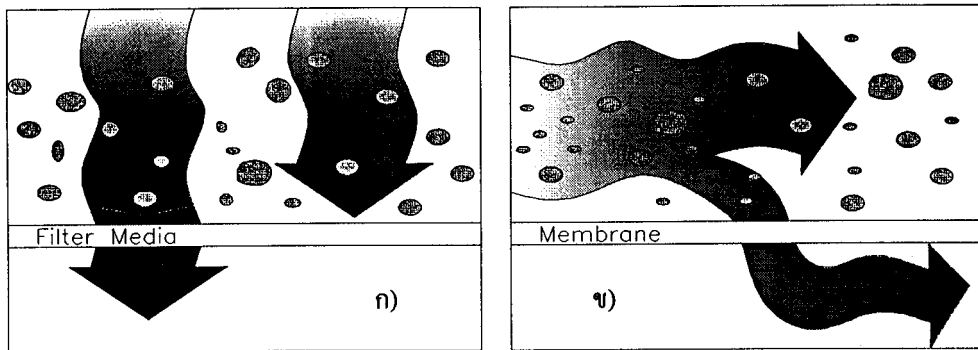
ลักษณะโครงสร้างของเมมเบรนยังแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ โครงสร้างแบบสมมาตร (Symmetric structure) และโครงสร้างแบบไม่สมมาตร (Asymmetric structure) โดยเมมเบรนที่มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตรอาจเตรียมจากพอลิเมอร์ชนิดเดียวที่ทำให้ผิวด้านสัมผัสกับสารป้อนมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าด้านสัมผัสกับเพอร์มิเอท หรือได้จากการเตรียมชั้นเนื้อแน่นจากพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งซ้อนอยู่บนโครงสร้างแบบมีรูพรุนของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง โครงสร้างแบบไม่

สมมาตรที่ได้จากพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน เรียกว่า “เมมเบรนไม่สมมาตรเชิงประกอบ (Composite asymmetric membrane)” หรือเรียกสั้นๆ ว่า “เมมเบรนเชิงประกอบ (Composite membrane)” เมมเบรนที่มีสมรรถนะสูง คือ เมมเบรนที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- (1) มีฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านสูง (High Flux and Selectivity)
- (2) มีความแข็งแรงเชิงกล (Good mechanical)
- (3) ทนต่อสารเคมีและความร้อนภายใต้สภาวะการดำเนินการได้ (Chemical and thermal stability under operating conditions)
- (4) มีแนวโน้มจับสิ่งสกปรกไว้ที่ผิวได้ต่ำ (Low fouling tendency)
- (5) ราคาไม่แพง (Cost effective)

2.2.2 กระบวนการเมมเบรน คือ กระบวนการต่างๆ ที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (Semi-permeable membrane) ในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลว ตลอดจนอนุภาคหรือโมเลกุลสารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูที่มีขนาดใหญ่ที่สุดจะถูกกันออกไปทั้งหมด อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูที่มีขนาดใหญ่ที่สุดแต่ใหญ่กว่ารูที่มีขนาดเล็กที่สุด อนุภาคนี้อาจสามารถผ่านออกไปเพียงบางส่วนตามการกระจายของขนาดรูบนเมมเบรน (Pore size distribution) ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูที่เล็กที่สุดจะสามารถผ่านเมมเบรนไปได้ ดังนั้นหลักการของกระบวนการเมมเบรนในการแยกสาร โดยใช้เยื่อเมมเบรนที่รูพรุนจึงเป็นการคัดขนาดโมเลกุลสารที่ขนาดแตกต่างกัน

ภาพแบบการไหลของของไหลผ่านเยื่อกรองเมมเบรน แบ่งออกได้หลายลักษณะ หากแบ่งตามทิศการไหลของของไหล ด้านสารป้อนและด้านเพอร์มิเอทที่เคลื่อนที่ขนานกับผิวของเมมเบรน สามารถแบ่งได้เป็นแบบตามกระแสกัน (Co-Current flow) หากเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน หรือสวนกระแสกัน (Counter current flow) การแบ่งรูปแบบการไหลอีกลักษณะหนึ่งที่สำคัญกว่า คือ การแบ่งเป็นแบบไหลตามแนวตั้ง ทั้งสารป้อนและเพอร์มิเอทจะไหลตั้งฉากกับผิวของเมมเบรน ดังนั้น หากสารป้อนมีอนุภาคของสารแขวนลอยมากจะทำให้ผิวเมมเบรนสกปรกและเกิดการอุดตันของ รูพรุนในเมมเบรนได้ง่าย แต่ในการไหลแบบไหลขวาง ขณะที่สารป้อนไหลขนานกับผิวของเมมเบรน เพอร์มิเอทก็ซึมผ่านเมมเบรนในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวของเมมเบรนและไหลออกจากเยื่อเมมเบรนแบบตามกระแส หรือสวนกระแส หรือตั้งฉากกับสารป้อนอนุภาคของสารแขวนลอยในสารป้อนจึงไม่เกาะติดกับผิวของเมมเบรน และไม่ทำให้รูพรุนในเมมเบรนอุดตันเพราะได้ถูกพาออกไปพร้อมกับกระแสรีเทนเทต ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ลักษณะการไหลผ่านเยื่อเมมเบรน ก) แบบไหลตามแนวตั้ง ข) แบบไหลขวาง

กระบวนการเมมเบรนที่ใช้ในการบำบัดน้ำและน้ำเสียที่สำคัญ มี 4 แบบ คือ กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis, RO) ดังแสดงในภาพที่ 2.3 สรุปถึงความแตกต่างของกระบวนการเมมเบรน

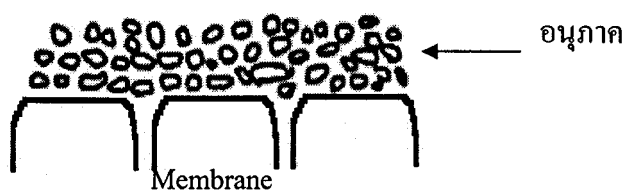
|                             | Atomic force microscopy |           | Electron microscopy |        | Optical microscope      |     | Visible        |  |
|-----------------------------|-------------------------|-----------|---------------------|--------|-------------------------|-----|----------------|--|
|                             | Dissolved matter        |           | Colloids            |        | Suspended matter        |     |                |  |
|                             | Ions                    | Molecules | Macromolecular      |        | Microparticles          |     | Macroparticles |  |
|                             | 100                     | 1000      | 10000               | 100000 |                         |     |                |  |
| Molecular weight, Da        | 0.001                   | 0.01      | 0.1                 | 1      | 10                      | 100 | 1000           |  |
| Size, $\mu\text{m}$         |                         |           |                     |        |                         |     |                |  |
| Solute/particle dimension   | Mineral Salts           | Proteins  |                     |        | Algae protozoa          |     |                |  |
|                             | Fulvic Acid             |           |                     |        | Red Blood Cells         |     |                |  |
|                             | Humic Acid              |           |                     |        | FeCl <sub>3</sub> Flocs |     | Macrophytes    |  |
|                             | Metal Ions              | Pyrogens  |                     |        |                         |     | Clay, Sand     |  |
|                             | Pesticides              | Virus     |                     |        |                         |     |                |  |
|                             | Amino                   | Colloids  |                     |        |                         |     | Pollen         |  |
|                             | Polysaccharides         |           |                     |        |                         |     |                |  |
|                             |                         |           |                     |        |                         |     |                |  |
|                             |                         |           |                     |        |                         |     |                |  |
|                             |                         |           |                     |        |                         |     |                |  |
| Membrane separation process | RO                      |           |                     |        |                         |     |                |  |
|                             | NF                      |           |                     | MF     |                         |     |                |  |
|                             | Electrodialysis         |           |                     |        |                         |     |                |  |

ภาพที่ 2.3 เปรียบเทียบกระบวนการเมมเบรนชนิดต่างๆ (A.I. Schafer and et al., 2000)

### 2.2.3 ลักษณะการอุดตันบนเมมเบรน

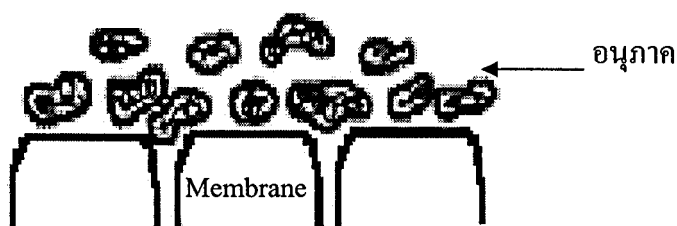
Concentration Polarization (CP) เป็นปรากฏการณ์ปกติของกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนที่ดำเนินภายใต้แรงดัน เมื่อตัวละลายเกิดการสะสมกันอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรนทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายที่ไม่ผ่านเมมเบรนออกไปสูงกว่าความเข้มข้นในเนื้อสารละลายก่อให้เกิดชั้นขอบ (Boundary layer) ขึ้นเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การอุดตัน (Fouling) ทำให้สมรรถนะของเมมเบรน กล่าวคือ ฟลักซ์ (Flux) และสมรรถนะการเลือก (Selectivity) ลดลง การเกิด Fouling หรือการอุดตันของสารละลายบนแผ่นเมมเบรน มี 3 ลักษณะ คือ

2.2.3.1 Cake Layer เป็นการลดลงของฟลักซ์โดยที่อนุภาคจะตกสะสมบนผิวด้านนอกของเมมเบรนเป็นชั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.4



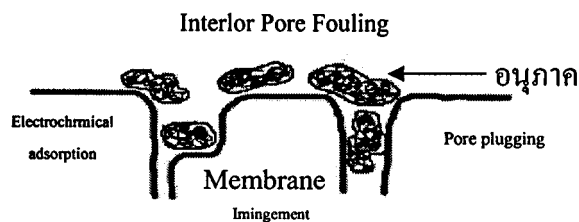
ภาพที่ 2.4 ลักษณะการอุดตันแบบ Cake Layer

2.2.3.2 Pore blocking เป็นการลดลงของฟลักซ์โดยที่อนุภาคจะตกสะสมที่ช่องเปิดของรู ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ลักษณะการอุดตันแบบ Pore Blocking

2.2.3.3 Interior pore fouling เป็นการลดลงของฟลักซ์โดยที่อนุภาคจะตกภายในรูของเมมเบรน ทำให้ขนาดรูเล็กลง กีดขวางการไหลและล้างทำความสะอาดได้ยาก ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ลักษณะการอุดตันแบบ Interior pore fouling

ความสัมพันธ์ของ Concentration polarization ดังสมการที่ (2.1) ซึ่งแสดงได้ด้วยอัตราส่วนของความเข้มข้นตัวละลายที่ผิวหน้าเมมเบรน ( $C_s^w$ ) กับความเข้มข้นตัวละลายในเนื้อสารละลาย ( $C_s^b$ )

$$CP = \frac{C_s^w}{C_s^b} \quad (2.1)$$

|        |         |     |                                         |
|--------|---------|-----|-----------------------------------------|
| โดยที่ | $CP$    | คือ | Concentration polarization              |
|        | $C_s^w$ | คือ | ความเข้มข้นของตัวละลายที่ผิวหน้าเมมเบรน |
|        | $C_s^b$ | คือ | ความเข้มข้นของตัวละลายในเนื้อสารละลาย   |

#### 2.2.4 ปัจจัยที่มีผลก่อให้เกิดการอุดตันบนแผ่นเมมเบรน

สิ่งที่มีผลที่ก่อให้เกิดการอุดตันบนเมมเบรน และทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงนั้นมีหลายปัจจัยด้วยกัน ซึ่งปัจจัยเริ่มต้นมาจากคุณภาพของน้ำที่นำมาผ่านเมมเบรน คุณลักษณะของเมมเบรน, ความดัน, ความเข้มข้นของสารละลาย, ความแรงของประจุ (Ionic Strength), ค่าพีเอชและอุณหภูมิของสารละลาย, ขนาดน้ำหนัโมเลกุลของสาร, ลักษณะการกรองผ่านเมมเบรน เป็นต้น

2.2.4.1 รูพรุน ขนาดของรูพรุนหมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดความกว้างของรูพรุน ดังนั้นเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันจึงว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ และสำหรับอัลตราฟิลเตรชันเป็นขนาดกลาง ถ้าขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตรนิยมเรียกว่าเมมเบรนแบบแน่นมากกว่าที่จะเรียกว่ามีรูพรุนขนาดเล็ก

2.2.4.2 ประจุหรือความมีขั้วของเมมเบรน จากการที่อัตราการไหลและค่า Recovery ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างเมมเบรนและตัวถูกละลาย ทำให้ผู้ใช้ต้องมีความเข้าใจและสามารถที่จะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับตัวถูกละลายที่ต้องการจะทำการแยก เช่น เซลลูโลสอะ-ซีเตด และโพลีเอไมด์จะแสดงความเป็นขั้วลบเล็กน้อย ในขณะที่โพลีเมอร์อื่นๆ อาจจะมีคุณสมบัติที่เป็นกลาง

2.2.4.3 ความดัน สารละลายที่ประกอบด้วยสาร โมเลกุลขนาดใหญ่ที่สามารถเกิดเจลได้ที่มีความเข้มข้นสูง จะมีผลต่อความดันของฟลักซ์คือ ฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นกับความดันในช่วงแรกหรือก่อนเกิดเจล และในช่วงเกิดเจล แรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้ชั้นเจลอัดแน่น ฟลักซ์จึงไม่เพิ่มขึ้นแต่มีแนวโน้มคงที่ ส่วนของการกักกันจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นเจล ส่วนระบบที่ความเข้มข้นต่ำและตัวถูกละลายไม่สามารถเกิดเจลได้ การเพิ่มความดันทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มมักจะช้าลงในช่วงความดันสูงขึ้น เนื่องจากผลของ CP

2.2.4.4 ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ (Hydrophilicity and Hydrophobicity) เมมเบรนที่มีสมบัติชอบน้ำจะให้มุมสัมผัส (Contact angle) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าของเมมเบรนกับเส้นสัมผัสหยดน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0-90 องศา โดยค่ามุมสัมผัสที่ต่ำกว่า แสดงว่าสามารถทำให้เมมเบรนเปียกน้ำได้มากขึ้น เมมเบรนที่ชอบน้ำมากๆ ทำให้โมเลกุลน้ำมารวมกันเกิดเป็นชั้นน้ำบริสุทธิ์ที่ผิวหน้าของเมมเบรน ขณะเดียวกันจะผลักโมเลกุลของสารอื่นให้ห่างออกไปจากผิวหน้าของเมมเบรน จึงเกิดการถ่ายโอนเฉพาะ โมเลกุลน้ำผ่านเมมเบรนออกไปทางรูพรุน หรือในกรณีของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นจะเกิดการดูดซับ โมเลกุลน้ำเข้าไปในเนื้อเมมเบรนและแพร่ผ่านเมมเบรนออกไปอีกด้านหนึ่ง ส่วนอนุภาคที่แขวนลอยในน้ำ มักมีสมบัติไม่ชอบน้ำมีแนวโน้มชอบจับตัวกันเป็นอนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particle) และชอบที่จะเข้าจับติดกับผิวเมมเบรน ส่งผลให้สมบัติความชอบน้ำของเยื่อกรองเสียไปทำให้เกิดการอุดตันของรูพรุนบนเมมเบรน

2.2.4.5 ความเข้มข้นของสารละลาย ความเข้มข้นมีผลต่อการอุดตันของเมมเบรนจากการเกิด Concentration polarization ชั้นของสารที่สัมผัสผิวหน้าเมมเบรน คือ ชั้น Boundary Layer หากสารละลายมีความเข้มข้นมากการสะสมตัวของสารละลาย เช่น สารอินทรีย์จะไปตกอยู่ในชั้นนี้ทำให้ผิวหน้าเมมเบรนมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงกว่าบริเวณที่ห่างจากผิวหน้าเมมเบรนออกไปหากไม่มีความปั่นป่วนบริเวณผิวหน้าเมมเบรน จะทำให้เกิด Concentration polarization ได้ดียิ่งขึ้นซึ่งส่งผลต่อการอุดตันตามมาต่อไป

2.2.4.6 ความแรงของประจุ (Ionic Strength) ความแรงของประจุมีผลต่อค่าฟลักซ์ด้วยเช่นกัน

2.2.4.7 พีเอชและอุณหภูมิของสารละลาย การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแต่ละองศา ในช่วง 15-30 องศาเซลเซียส ช่วยให้อัตราการซึมผ่านเมมเบรนมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยประมาณร้อยละ 3-5 เพราะอุณหภูมิมีผลต่อความหนืดของน้ำ ค่าพีเอชของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด มีผลต่อค่าฟลักซ์ที่ลดลง

2.2.4.8 ค่าน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight cut off) คือ ค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารละลายที่ถูกเมมเบรนกักไม่ให้ผ่าน 90-95% ซึ่งขนาดน้ำหนักโมเลกุลเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะใช้ทำการศึกษาถึงการอุดตันของเมมเบรน โดยจะสังเกตการณ์ลดลงของค่า ฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรน หากสารละลายที่นำมากรองผ่านเมมเบรนมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนมากๆ ทำให้เกิดการอุดตันได้

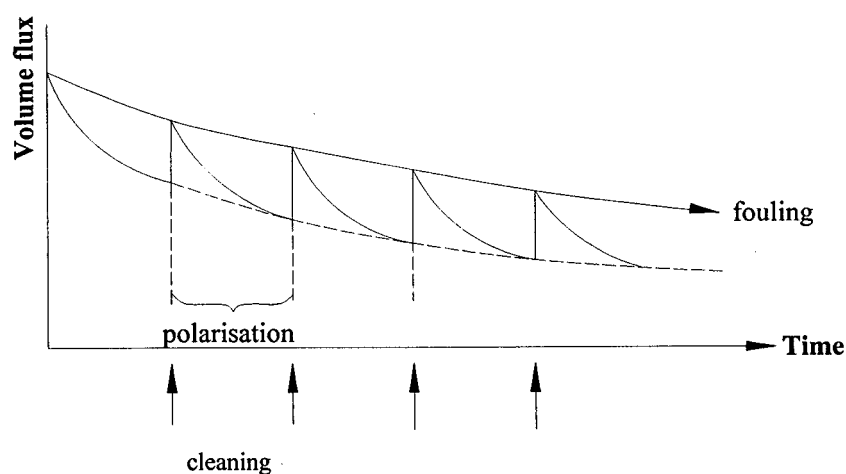
## 2.2.5 ข้อควรปฏิบัติเพื่อควบคุมการอุดตันบนแผ่นเมมเบรน

2.2.5.1 การบำบัดเบื้องต้น (Pretreatment) ได้แก่ การเติมสารตกตะกอน การกรองเบื้องต้น การเติมคลอรีน หรือการดูดซับด้วยคาร์บอน

2.2.5.2 การดัดแปลงผิวหน้าของเมมเบรน (Membrane Surface modification) โดยการเติมหมู่ชอบน้ำ หรือหมู่ที่มีประจุที่ผิวหน้าของเมมเบรน

2.2.5.3 การออกแบบอุทกพลศาสตร์ของโมดูลให้เหมาะสม

2.2.5.4 การล้างเมมเบรน (Membrane cleaning) ด้วยสารเคมีที่เหมาะสมเมื่อฟลักซ์ลดลงจนถึงระดับหนึ่ง จำเป็นต้องล้างเมมเบรนเพื่อให้ได้ฟลักซ์กลับคืนมาบางส่วนหรือให้ได้เท่าเดิม สารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดได้แก่ กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และสารฆ่าเชื้อ (Disinfectant) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ไดอะแกรมแสดงการกู้ฟลักซ์ด้วยการล้างเมมเบรน

## 2.3 กระบวนการไมโครฟิเตรชัน

กระบวนการไมโครฟิเตรชัน เป็นกระบวนการทางกายภาพ อาศัยแรงดันที่ต่ำเป็นแรงขับเคลื่อนให้ของเหลวผ่านช่องว่างของเมมเบรน ในการแยกอนุภาคคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.01-10 ไมโครเมตร รวมทั้งแบคทีเรียและจุลินทรีย์อื่นๆ ออกจากของเหลว กระบวนการไมโครฟิเตรชันเป็นกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่ง เนื่องจากมีอัตราการผลิต



น้ำสูงกว่ากระบวนการเมมเบรนแบบอื่นที่ความดันเดียวกัน จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมผลิตเครื่องคั้ประเภทต่างๆ อุตสาหกรรมในการผลิตโปรตีนสังเคราะห์ ตลอดจนอุตสาหกรรมผลิตยา เป็นต้น

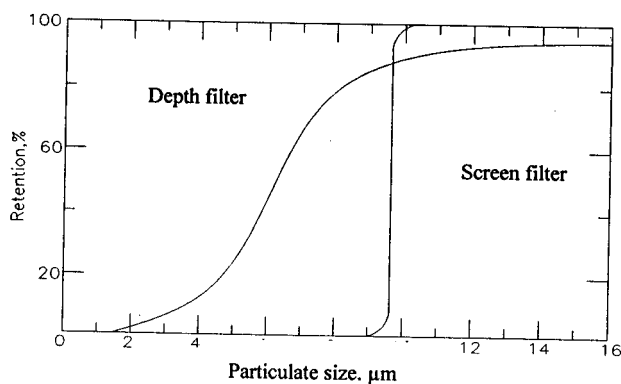
จากความต้องการใช้เมมเบรนในประเทศสหรัฐอเมริกา เดบโดปีละร้อยละ 7.4 โดยมีมูลค่าทั้งสิ้นในปี ค.ศ.2006 เท่ากับ 2.1 พันล้านเหรียญ คิดเป็นความต้องการพื้นที่เมมเบรนเท่ากับ 121 ล้านตารางเมตร โดยในปี ค.ศ.2001 กระบวนการไมโครฟิลเตรชันมีการครองตลาดมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 50 ของความต้องการเมมเบรนทั้งหมด (Atkin Son, S., 2002)

### 2.3.1 กลไกการทำงานของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

อนุภาคที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าขนาดภาพของ Screen filter จะถูกกักไว้โดยตรงบนผิวหน้าของเมมเบรน ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูของเมมเบรนสามารถผ่านเมมเบรนออกไปได้ถ้าไม่มีการอัดติดเนื่องจากความเฉื่อย (Inertial impaction) และการซึมซาบ (Diffusion) ของอนุภาคบนผนังรู

สำหรับกลไกการกักอนุภาคของ Depth filter คือ การดูดซับ และการดักติด (Entrapment) อนุภาคส่วนใหญ่ถูกจับไว้อยู่ภายในซอกของเมมเบรนยกเว้นอนุภาคที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากความสามารถในการกักอนุภาคของ Depth filter ขึ้นอยู่กับความคดเคี้ยวของเส้นทางการไหล เมมเบรนแบบนี้จึงสามารถกักอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่าขนาดรูพิกัดได้ด้วย ลักษณะเส้นโค้งการกักอนุภาคของเมมเบรนทั้งสองแบบแสดงในภาพที่ 2.8 นอกจากนั้น Depth filter ยังมีพื้นที่ผิวใช้ประโยชน์ได้ (Available surface area) มากกว่า Screen filter อย่างมาก ดังนั้น Depth filter จึงสามารถกักอนุภาคไว้เป็นปริมาณมากกว่า Screen filter และมีตำแหน่งให้โปรตีนและไวรัสยึดเหนี่ยวเป็นจำนวนมาก

อย่างไรก็ตามในแง่ของอัตราการไหลจากเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันทั้งสองแบบมีค่าเท่ากันโดยประมาณ ถึงแม้ว่า Depth membrane จะมีรูเปิดมากกว่าแต่ Screen membrane มีความบางกว่า กล่าวคือ Screen membrane มีความหนา 10 ไมครอน ขณะที่ Depth membrane หนา 50-120 ไมครอน



ภาพที่ 2.8 เส้นโค้งการกักของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสองแบบ

สำหรับสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน แบคทีเรีย อนุภาคแขวนลอย อาจถูกกำจัดด้วยกลไกการดูดติดผิวหน้าของเมมเบรน หรือภายในโครงสร้าง ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน คือ วัสดุชนิด Hydrophobic จะมีคุณสมบัติในการดูดติดสารอินทรีย์สูง และยอมให้น้ำไหลผ่านได้น้อยกว่าชนิด Hydrophilic (เทียบที่ Molecular Weight cutt off ขนาดเดียวกัน) แต่จะก่อให้เกิดการอุดตันเมมเบรน

การระบุลักษณะสมบัติของเมมเบรนมีรูพรุนของเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน ได้แก่ ค่าฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรน (Trans-membrane flux) ขนาดรู การกระจายขนาดรู (Pore size distribution)

ค่าสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) เสถียรภาพต่อสารเคมีและความร้อน (Chemical and thermal stability) และความสามารถทำความสะอาดได้ (Cleanability)

ในการหาค่าฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรน ดังสมการที่ (2.2) โดยปกติทดสอบที่ค่าความดันต่างๆ กับน้ำสะอาด เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการอุดตันของรู ฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรนมักลดลงตามระยะเวลาที่ดำเนินการทดลอง เนื่องจากเกิดการอัดตัว (Compaction) ของโครงสร้างเมมเบรนภายใต้แรงดัน ซึ่งค่าการอัดตัว (Compaction factor) สามารถหาได้จากค่าความชันของกราฟที่พลอตระหว่างฟลักซ์กับความดันคงที่หนึ่งๆ กับเวลาบนสเกลกึ่งลอการิทึม (Semi-logarithm) หน่วยของฟลักซ์มีได้หลายแบบ เช่น ฟลักซ์เชิงปริมาตร มีหน่วยนับเป็น ปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และหนึ่งหน่วยเวลา ฟลักซ์เชิงโมลมีหน่วยเป็น โมลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และหนึ่งหน่วยเวลา ฟลักซ์เชิงมวลมีหน่วยเป็น น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และหนึ่งหน่วยเวลาเป็นต้น โดยพื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณ คือ พื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับความหนาของเมมเบรน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

$$J_v = \frac{V}{A\Delta t} \quad (2.2)$$

|        |            |                                                                         |
|--------|------------|-------------------------------------------------------------------------|
| โดยที่ | $J_v$      | คือ อัตราการซึมผ่านเมมเบรน, ฟลักซ์ ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ ) |
|        | $V$        | คือ ปริมาตรเพอร์มิเอทที่ผ่านเมมเบรน ( $\text{m}^3$ )                    |
|        | $A$        | คือ พื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ( $\text{m}^2$ )      |
|        | $\Delta t$ | คือ เวลาที่เก็บเพอร์มิเอท (h)                                           |

ส่วนการกำจัดสารละลายออกจากรน้ำ (Rejection) โดยการกรองผ่านเมมเบรนจะสกัดเอาสารละลายต่างๆ ออกจากน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสามารถคำนวณได้จากสูตร

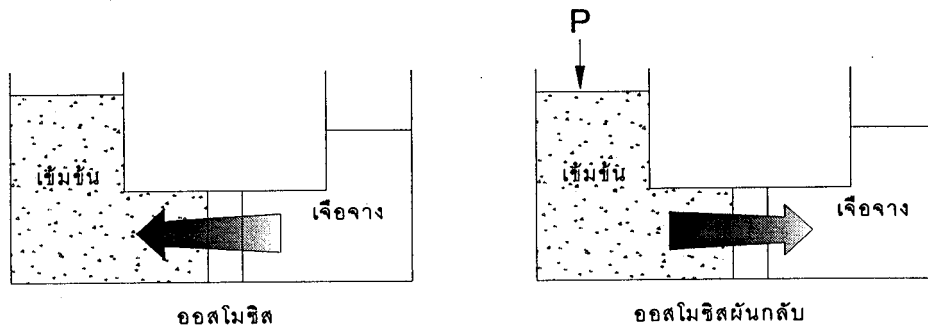
$$R = \left[ 1 - \frac{C_p}{C_f} \right] \times 100\% \quad (2.3)$$

$$R_f = \left[ 1 - \frac{C_p}{C_r} \right] \times 100\% \quad (2.4)$$

|        |       |                                                                  |
|--------|-------|------------------------------------------------------------------|
| โดยที่ | $R$   | คือ ค่าการกำจัดสารละลายออกจากรน้ำ (Rejection) ในสารละลายป้อน (%) |
|        | $R_f$ | คือ ค่าการกำจัดสารละลายในรีเทนเทท (%)                            |
|        | $C_p$ | คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ในเพอร์มิเอท (mg/l)                   |
|        | $C_f$ | คือ ความเข้มข้นของสารละลายในสารละลายป้อน (mg/l)                  |
|        | $C_r$ | คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในรีเทนเทท (mg/l)                      |

## 2.4 กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ

กระบวนการออสโมซิส (Osmosis Process) หมายถึง การเคลื่อนที่ซึ่งเกิดเองตามธรรมชาติของน้ำผ่านเมมเบรนบางๆ (Semi Permeable Membrane) จากสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งถึงจุดสมดุลที่จะทำให้ น้ำจากสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำหยุดการถ่ายเทไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ผลต่างของความดันที่จุดนี้เรียกว่า ความดันออสโมติก (Osmotic Pressure)



ภาพที่ 2.9 หลักการดำเนินระบบของออสโมซิสและออสโมซิสย้อนกลับ

ในกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ ถ้ามีความดันที่มากกว่าความดันออสโมติกมากระทำต่อด้านที่มีสารละลายความเข้มข้นสูง น้ำจะไหลย้อนกลับที่จากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงยังสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 2.9 หลังจากผ่านกระบวนการ สารละลายที่ออกมาจะมี 2 ส่วน คือ ส่วนที่เข้มข้น เรียกว่า รีเทนเทท (Retentate) กับส่วนที่ไหลผ่านเมมเบรน เรียกว่า เพอร์มิเอท (Permeate) ความดันออสโมซิส เป็นคุณสมบัติของสารละลายที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$\pi = \frac{C_i R_g T}{M_i} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\pi$  = ความดันออสโมติก (kPa)  $C_i$  = ความเข้มข้นเชิงมวลของสารละลาย  $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

$R_g$  = ค่าคงที่ของก๊าซ  $T$  = อุณหภูมิ

$M_i$  = น้ำหนักโมเลกุลของสาร i

#### 2.4.1 สมการที่เกี่ยวข้องในกลไกการไหลผ่านเยื่อกรองออสโมซิสย้อนกลับ

กลไกการไหลผ่านของตัวทำละลายและตัวถูกละลายขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติทางเคมีของโมเลกุล กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับจะใช้แยกตัวถูกละลายขนาดเล็ก เมมเบรนที่ใช้ต้องเป็นชนิดที่ขนาดของรูพรุนเล็กและแน่น โดยตัวทำละลายและตัวถูกละลายจะสามารถละลายหรือดูดซึมในเมมเบรนและสามารถเคลื่อนผ่านเมมเบรนได้โดยอาศัย Chemical Potential Gradient ซึ่งก็คือเป็นความแตกต่างของความสามารถในการละลายและการแพร่ของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย (Solution – Diffusion Mechanism) ความแตกต่างนี้จะทำให้เกิดการเลือก

ผ่านและส่งผลกระทบต่อฟลักซ์ของตัวทำละลายและตัวถูกละลายผ่านเมมเบรน โดยฟลักซ์ของตัวทำละลายสามารถแสดงความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$J_v = L_p (\Delta P - \Delta \pi) \quad (2.6)$$

- เมื่อ  $J_v$  = ฟลักซ์ของตัวทำละลาย ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )  
 $L_p$  = สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ )  
 $\Delta \pi$  = ผลต่างความดันออสโมติกระหว่างเมมเบรน (Pa)  
 $\Delta P$  = ความแตกต่างของความดันระหว่างผิวหน้าทั้งสองของเมมเบรน (Pa)

สำหรับฟลักซ์ของตัวถูกละลายสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$J_s = K_s \Delta C_s \quad (2.7)$$

- เมื่อ  $J_s$  = ฟลักซ์ของตัวถูกละลาย  
 $K_s$  = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านตัวถูกละลาย  
 $\Delta C_s$  = ผลต่างความเข้มข้นของตัวถูกละลาย หรือ  
 $C_R$  (ความเข้มข้นรีเทนเทท) -  $C_p$  (ความเข้มข้นเพอร์มิเอท)

สำหรับความสามารถของเมมเบรนในการผลิตน้ำสะอาดสามารถบอกได้ในรูปของเปอร์เซ็นต์ Recovery ดังสมการ

$$\text{Recovery} = \left[ \frac{Q_p}{Q_f} \right] \times 100\% \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $Q_p$  = อัตราไหลของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จากระบบ RO  
 $Q_f$  = อัตราไหลของสารละลายที่เข้าระบบ RO

#### 2.4.2 ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ

ตัวแปรในการดำเนินการที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ ได้แก่

2.4.2.1 ความดันที่ให้แก่ระบบ ( $\Delta P$ ) ความดันที่ใช้ในระบบเครื่องออสโมซิสย้อนกลับ ควรอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ตามที่ได้ออกแบบไว้ถ้าความดันน้อยเกินไป จะมีผลทำให้

Salt flux เพิ่มขึ้น แต่ถ้าความดันสูงเกินไป จะทำให้โครงสร้างของเมมเบรนเกิดการอัดตัวน้ำที่มีความเข้มข้นมากจะไหลออกทิ้งไม่สะดวก ซึ่งถ้าให้ใช้ไปนานๆ จะทำให้เมมเบรนเสื่อมประสิทธิภาพ

2.4.2.2 อุณหภูมิ พลังค์เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูงความหนืดของสารละลายลดลง สัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นทั้งน้ำและตัวถูกละลายผ่านเมมเบรนได้ดีขึ้น ค่าการกักกันลดลง โดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส พลังค์เพิ่มขึ้นร้อยละ 2-3

2.4.2.3 ความเข้มข้น การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือทำให้ความดันออสโมติกของสารละลายเพิ่มขึ้น ถ้าความดันที่ให้แก่สารละลายป้อนคงที่ ทำให้แรงขับเคลื่อนสุทธิ ( $\Delta P - \Delta \pi$ ) ลดลง พลังค์จึงลดลง และที่ความเข้มข้นสูง โอกาสที่เกลือจะละลาย/แพร่ ในเมมเบรนสูงขึ้นทำให้การกักกันลดลง

2.4.2.4 อัตราการไหล การเพิ่มอัตราการไหลหรือความเร็วที่สารละลายไหลผ่านผิวหน้าเมมเบรนช่วยลดการสะสมของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเมมเบรน ทำให้เกิด Concentration polarization น้อยลง หรือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (K) มีค่าสูงขึ้น เพราะในระบบการถ่ายเทมวล โดยการพา K ขึ้นอยู่กับตัวเลขเรโนลด์ส (Reynolds number) และตัวเลขชมิทท์ (Schmidt number)

2.4.2.5 pH (ความเป็นกรด-ด่าง) ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีผลต่อการแตกตัวของสารอิเล็กโทรไลต์ เช่น สารละลายเกลือ และสามารถมีผลต่อโพลาไรตีของเมมเบรน ตลอดจน interaction ระหว่างตัวทำละลายกับเมมเบรน

#### 2.4.3 ความต้านทานในการไหลผ่านเมมเบรน

ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลผ่านเมมเบรน เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับการถ่ายเทของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย สามารถวิเคราะห์ในรูปของความต้านทานการไหลผ่านเมมเบรนซึ่งเพอร์มิเอทฟลักซ์จะมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานในการไหลและความดัน ในกรณีที่ไม่มีตัวถูกละลายเพอร์มิเอทฟลักซ์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$J_{w1} = \frac{\Delta P}{\mu_w \cdot R_m} \quad (2.9)$$

|       |            |   |                                                                  |
|-------|------------|---|------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $J_{w1}$   | = | ฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) |
|       | $\Delta P$ | = | ความแตกต่างของความดันระหว่างผิวหน้าทั้งสองของเมมเบรน (kPa)       |
|       | $\mu_w$    | = | ความหนืดของน้ำบริสุทธิ์ (kPa.s)                                  |
|       | $R_m$      | = | ความต้านทานการไหลของเมมเบรน ( $\text{m}^{-1}$ )                  |

ในการแยกตัวถูกละลายจะเกิด CP และ/หรือการอุดตัน ทำให้เพอร์มิเทฟลักซ์ที่ได้มีค่าต่ำกว่าของน้ำบริสุทธิ์เนื่องจากความต้านทานการไหลเกิดขึ้น ดังนั้นเพอร์มิเทฟลักซ์ที่ได้จากการแยกตัวถูกละลายดังสมการ (สุพรรณพงษ์ มัตราษ, 2548)

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

|       |       |   |                                                              |
|-------|-------|---|--------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $J_v$ | = | เพอร์มิเทฟลักซ์ ( $\text{m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) |
|       | $\mu$ | = | ความหนืดของตัวทำละลาย (Pa.s)                                 |
|       | $R_t$ | = | ความต้านทานรวม ( $\text{m}^{-1}$ )                           |

ความต้านทานรวมในระบบออสโมซิสย้อนกลับเป็นผลมาจาก

(1) ความต้านทานเนื่องจากเมมเบรน ( $R_m$ )

(2) ความต้านทานเนื่องจากการเกิดโพลาไรซ์เซชัน ( $R_p$ ) ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทาน เนื่องจากการเกิด CP และความต้านทานเนื่องจากการสะสมของอออนบนผิวของเมมเบรน

(3) ความต้านทานเนื่องจากการเกิด Fouling ( $R_f$ ) ซึ่งเป็นความต้านทานเนื่องจากการดูดซับ และความต้านทานเนื่องจากการอุดตันรูพรุนของตัวถูกละลาย ดังนั้น

$$R_t = R_m + R_c + R_f \quad (2.11)$$

ความต้านทานเนื่องจากชั้นโพลาไรซ์ เป็นความต้านทานที่ผันกลับได้หรือสามารถล้างออกด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน ส่วนความต้านทานเนื่องจากการเกิด Fouling เป็นความต้านทานที่ผันกลับไม่ได้ หรือไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน ไม่ว่าจะใช้ที่สภาวะใดๆ ซึ่งเมื่อใช้น้ำทำความสะอาดเมมเบรนที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับแล้วจะสามารถกำจัดได้เฉพาะชั้นโพลาไรซ์เท่านั้นแต่ไม่อาจทำลายชั้น Fouling ได้ ดังนั้นความต้านทานการไหลของน้ำสำหรับเมมเบรนที่ใช้แล้วหลังจากล้างด้วยน้ำ คือ ความต้านทาน  $R_m$  และ  $R_f$

$$J_{w2} = \frac{\Delta P}{\mu_w (R_m + R_f)} \quad (2.12)$$

$$(R_m + R_f) = \frac{\Delta P}{\mu_w \cdot J_{w2}} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $J_{w2}$  = ฟลักซ์ของน้ำหลังการล้างเมมเบรนที่ใช้แล้วด้วยน้ำ ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )  
 $R_f$  = ความต้านทานการไหลเนื่องจากการเกิด Fouling ( $\text{m}^{-1}$ )

ความต้านทาน  $R_f$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

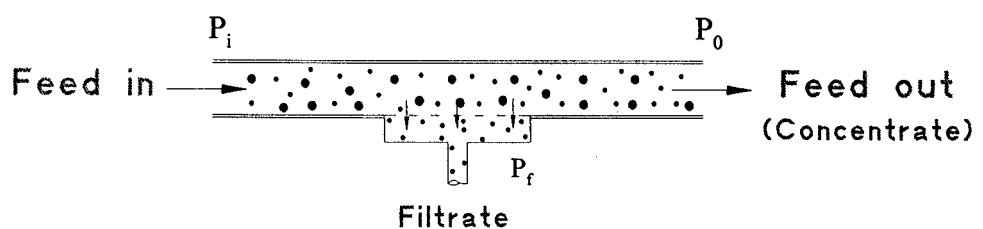
$$R_f = ((R_m + R_f) - R_m) \quad (2.14)$$

ส่วนความต้านทาน  $R_C$  สามารถหาได้จาก

$$R_C = R_t - (R_m + R_f) \quad (2.15)$$

การลดผลของการเกิด Concentration Polarization (CP) สามารถทำได้โดยใช้การกรองแบบไหลขวางซึ่งความดันที่กระทำจะไม่ตั้งฉากกับเมมเบรนแต่จะกระทำในแนวขนานกับผิวหน้าเมมเบรน นั่นคือ สารละลายจะไหลขนานกับผิวหน้าเมมเบรน และแพร่ผ่านเมมเบรน

ภาพแสดงการกรองแบบไหลขวางในภาพออสโมซิสย้อนกลับ แสดงดังภาพที่ 2.4 โดยมีค่า ความดันลด (Pressure drop,  $\Delta P^*$ ) คือ



ภาพที่ 2.10 การกรองแบบไหลขวางในกระบวนการแบบออสโมซิสย้อนกลับ

$$\Delta P^* = P_i - P_0 \quad (2.16)$$

เมื่อ  $P_i$  = ความดันขาเข้า  
 $P_0$  = ความดันขาออก (หรือความดันด้านรีเทนเทท)

เมื่อสมมุติว่าไม่มีความดันลด หรือ  $P_i = P_0$  และ  $P_0 =$  ความดันบรรยากาศ นั่นคือ  $\Delta P = P_i$  ซึ่งเป็นค่าที่อ่านได้จากเกจ เป็นแรงขับเคลื่อนที่มักใช้กันโดยทั่วไป เช่น ในสมการ (2.6)

แต่ถ้าคิดผลของความดันลดด้วย แรงขับเคลื่อนก็จะต่ำกว่าค่าที่เป็นจริง โดยเรียกค่าความดันนี้ว่า Transmembrane pressure drop ( $\Delta P_M$ )

$$\Delta P_M = \frac{(P_i + P_0)}{2} - P_p \quad (2.17)$$

เมื่อ  $P_p =$  ความดันด้านเพอร์มิเอท ซึ่งก็คือความดันบรรยากาศ หรือ เกจอ่านเป็นศูนย์

$$\Delta P_M = P_i - \left( \frac{\Delta P^*}{2} \right) \quad (2.18)$$

ดังนั้น  $\Delta P_M < \Delta P$  เพราะผลของความดันลด

## 2.5 การทำความสะอาดเมมเบรน

การนำเมมเบรนไปใช้งานในการแยกสารละลายที่เป็นของเหลว ถึงแม้จะมีการบำบัดสารละลาย มีการออกแบบโมดูล ตลอดจนมีการเลือกสภาวะดำเนินการ ที่ทำให้ลดการเกิด concentration polarization ก็ยังพบว่ามีเกิดการอุดตัน จึงมีความจำเป็นต้องทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีที่เหมาะสมเป็นระยะๆ เพื่อให้เมมเบรนมีสภาพใกล้เคียงเมมเบรนใหม่มากที่สุด และเพื่อยืดอายุการใช้งาน การเลือกวิธีการล้างและทำความสะอาดเมมเบรนต้องพิจารณาชนิดของสารอุดตัน วัสดุที่ผลิตเป็นเมมเบรนและรูปแบบของโมดูล ตลอดจนค่าใช้จ่าย ความยากง่าย และระยะเวลาในการล้างด้วย วิธีทำความสะอาดแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีกายภาพ และวิธีเคมี

2.5.1 วิธีกายภาพ (Hydrodynamic methods) หมายถึง การทำความสะอาดที่ใช้การเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานเป็นหลัก เช่น การเพิ่มอัตราการไหล ซึ่งจะเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรน แต่ก็ลดการอุดตันได้ระดับหนึ่งเท่านั้น

วิธีกายภาพที่แพร่หลายและได้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือ การล้างกลับทาง (Back washing) ซึ่งทำได้โดยการป้อนสารละลายภายใต้ความดันเข้าทางด้านเพอร์มิเอท (ตรงข้ามกับการ

ดำเนินการปกปิดที่เพอร์มิเอทเป็นทางออก) ซึ่งจะทำให้สารละลายต้นสารดูดตันหลุดออกจากเมมเบรน การล้างกลับทางอาจทำระหว่างการกรอง หรืออาจทำเมื่อเสร็จสิ้นการกรอง คือ ล้างกลับทางด้วยน้ำ หรือสารทำความสะอาด ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ อุปกรณ์จะต้องมีการออกแบบเฉพาะให้มีการล้างกลับทางได้ นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีการพ่นอากาศที่ความดันสูงเข้าทางช่องเพอร์มิเอทแทนการใช้สารละลาย อย่างไรก็ตามการที่จะนำสารดูดตันที่หลุดออกจากเมมเบรนให้ออกมานอกระบบก็ทำได้ด้วยการล้างน้ำเพื่อให้เป็นตัวพาสารดูดตัน

วิธีกายภาพใช้ได้ผลดีกรณีที่มีการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนมากกว่าการดูดตันในรูพรุน หลังจากการล้างกลับทาง ฟลักซ์อาจมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดตัน แต่ในระยะยาวแล้วก็อาจพบว่า ฟลักซ์ยังคงลดลงอยู่ ดังนั้น การล้างด้วยวิธีเคมี จึงมีความจำเป็น เป็นที่นิยมใช้และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีกว่า

2.5.2 วิธีเคมี (Chemical method) หมายถึง การทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมี สารเคมีอาจช่วยให้มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพโดยสารเคมีอาจทำให้สารดูดตันพองตัว หดตัว ละลาย เกิดการหลุดออก (desorption) หรือ สารเคมีที่ใช้อาจทำปฏิกิริยาเคมีกับสารดูดตัน เช่น การเกิดไฮโดรไลซิส การย่อยสลายพันธะเปปไทด์ของโปรตีน และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นต้น สารเคมีที่ใช้ควรมีคุณสมบัติดังนี้

2.5.2.1 ละลายสารดูดตันหรือทำให้สารดูดตันเกาะตัวกันน้อยลงด้วยกลไกทางกายภาพหรือทางเคมี

2.5.2.2 รักษาสภาพการกระจายตัวของสารดูดตันไม่ให้กลับไปสะสมอีก

2.5.2.3 ไม่เป็นสารที่อาจก่อให้เกิดการดูดตันเสียเอง

2.5.2.4 ไม่ทำให้เมมเบรนเสื่อมสภาพ

2.5.3 สารเคมีที่ใช้ทำความสะอาด แบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

2.5.3.1 กรด ใช้ได้ทั้งกรดอินทรีย์และอนินทรีย์ เช่น กรดเกลือ (hydrochloric acid) กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก เป็นต้น ใช้ได้ผลดีในการละลายตะกอนที่เป็นโลหะออกไซด์ เกลือคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารดูดตันที่พบในกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับและนาโนฟิลเตรชัน แต่ใช้ไม่ได้ผลกับสารดูดตันที่เป็นซิลิกา ซิลิเกต และจุลินทรีย์

2.5.3.2 ด่าง ที่ใช้กันแพร่หลาย คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต และฟอสเฟต ใช้ได้ผลดีกับสารดูดตันที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน เพคติน เซลลูโลส ดังนั้น จึงนิยมใช้ล้างเมมเบรนที่ใช้ในอุตสาหกรรม อาหารและน้ำผลไม้

2.5.3.3 เอนไซม์ (enzyme) ใช้สำหรับทำความสะอาดสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน โดยทำให้เกิดการแตกตัว ทำลายพันธะ เป็นโมเลกุลที่เล็กลง โดยต้องเลือกเอนไซม์ที่เหมาะสม เช่น

ถ้าสารอุดตันเป็นโปรตีน ควรใช้เอนไซม์โปรติเอส (protease) ถ้าเป็นแป้งควรใช้อะมัยเลส (amylase) หรือ ควรใช้ โลเปส (lapase) เอนไซม์จัดเป็นสารทำความสะอาดที่อ่อนไม่เป็นอันตรายต่อเมมเบรนแต่มีราคาแพง

2.5.3.4 สารลดแรงตึงผิว (surfactants) เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่ประกอบด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ และส่วนชอบน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่เมื่ออยู่ในน้ำจะแสดงประจุบวกหรือประจุลบ หรือเป็นกลาง ขึ้นอยู่กับชนิดของสารลดแรงตึงผิว สารลดแรงตึงผิวสามารถเข้าถึงส่วนต่างๆ ของเมมเบรนได้ดี (เกิดการเปียก หรือ wetting) จึงสัมผัสกับสารอุดตันได้ดี ถ้างอกได้ง่าย แต่ควรเลือกอย่างระมัดระวังเพราะสารลดแรงตึงผิวอาจถูกดูดซับได้โดยเมมเบรนบางชนิด จึงอาจกลายเป็นสารอุดตันเสียเอง

2.5.3.5 สารฆ่าเชื้อ (disinfectant) การฆ่าเชื้อ หมายถึง การทำลายหรือกำจัดจุลินทรีย์ที่เป็นพิษ ซึ่งอาจเจือปนอยู่ในสารละลายหรือติดค้างอยู่ในระบบท่อ การใช้กระบวนการเมมเบรนในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม จึงอาจมีความจำเป็นที่ต้องทำความสะอาดด้วยสารฆ่าเชื้อทุกวัน สารฆ่าเชื้อส่วนมากเป็นตัวออกซิเดนต์ (oxidant) เช่น คลอรีน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารพวกไฮโปคลอไรท์ (คณินท์ บุญศาสตร์, 2546) เป็นสารที่ออกฤทธิ์แรง จึงควรใช้ด้วยความระมัดระวัง เพราะอาจมีผลเสียต่อเมมเบรนและส่วนอื่นๆ ของหน่วยอุปกรณ์

2.5.3.6 สารทำความสะอาดกำหนดสูตร (formulated cleaner) เป็นสารที่ผู้จำหน่ายกำหนดส่วนประกอบขึ้นโดยอาจใช้สารหลายชนิดผสมกันให้มีความเหมาะสมกับชนิดของสารอุดตัน และเมมเบรน ค่อนข้างมีราคาแพง

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเลือกสารทำความสะอาดจะต้องทราบข้อมูลของเมมเบรนว่ามีความคงทนต่อสารเคมีที่จะเลือกใช้เพียงใด

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาถึงประสิทธิภาพและผลกระทบจากการอุดตันในกระบวนการเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน และออสโมซิสย้อนกลับ มีผู้สนใจและทำการศึกษาวิจัยดังนี้

รัตน จิระรัตนานนท์ และคุษฎี อุดภาพ (2536) ได้ทำการศึกษา fouling และความต้านทานต่อการไหลในระบบ Cross-flow microfiltration (CFMF) พบว่าสารละลายที่มีโมเลกุลเล็ก (Blood serum albumin, BSA) จะเกิดการอุดตันเฉพาะภายในหรือมีกลไกตาม standard blocking model (SBM) ส่วนสารละลายที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้น ( $\text{BaSO}_4$ ) จะเกิดการ transition จากกลไกตาม SBM ไปเป็นตาม CFM (Cake Filtration Model) ที่ความเข้มข้นและความดันสูงขึ้น

A.A. Karimi and et al. (1999) ได้ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพ กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน แบบไมโครฟิลเตรชัน ในการบำบัดน้ำในอ่างเก็บน้ำที่ Holly wood พบว่ากระบวนการ MF สามารถลดความขุ่นของน้ำในอ่างเก็บน้ำจาก 1 NTU เป็นน้อยกว่า 0.4 NTU และลดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดได้มากกว่า ร้อยละ 10

Lin, J., and Marcel, M. (1996) พบว่าการอุดตันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ การอุดตันภายในซึ่งจะมีการสะสมของวัสดุอินทรีย์ภายในรู โครงสร้างของเมมเบรนและการอุดตันภายนอก ซึ่งจะมีการสะสมของชั้นเค้กที่ผิวหน้าของเมมเบรน

David Waite and et al. (1999) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากการอุดตันของ Colloid ใน Ultrafiltration membrane พบว่าการอุดตันที่เกิดขึ้นบน Ultrafiltration Membranes เป็นผลที่เกิดจากการสะสมของสารอินทรีย์จำพวก hematite ขณะที่ผลจากการรวมตัวของสารอินทรีย์อาจจะลดความแตกต่างบางอย่างลงได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและคุณลักษณะของสารอินทรีย์

Wei Yuan and Andrew, L. (1999) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากการอุดตันของ humic acid ในกระบวนการกรองแบบ Microfiltration พบว่า การดูดซึมและขนาดโมเลกุลของ humic acid เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการอุดตันบนรูพรุนของเมมเบรน ซึ่งขั้นตอนเริ่มต้นของการอุดตันจาก humic acid คือ การเกาะเนื่องจากการพามาของอนุภาคหรือกลุ่มของ humic acid บนผิวเมมเบรน ซึ่งการเกาะเริ่มต้นนี้จะเร่งให้เกิดการเกาะของ humic acid ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ต่อไป

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 Sodium hydroxide (NaOH) ใช้ในการปรับสภาพค่า pH ของสารละลายและล้างเมมเบรน

3.1.2 Hydrochloric acid (HCl) ใช้ในการปรับสภาพค่า pH ของสารละลายและล้างเมมเบรน

3.1.3 Sodium chloride (NaCl) ใช้ในการปรับสภาพเมมเบรน

3.1.4 เกาลิน (kaolin) ใช้ในการสร้างน้ำสังเคราะห์ให้มีความขุ่นเท่ากับน้ำผิวดิน

##### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 ถังบรรจุก๊าซไนโตรเจน พร้อมอุปกรณ์ (มาตรวัดแรงดัน วาล์ว สายยาง) เพื่อใช้แรงดันของก๊าซขับน้ำตัวอย่างจากถังเก็บไปยังชุดทดลอง

3.2.2 ชุดทดลองสำหรับกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน ใช้ชุดทดลอง Dead-end unit cell รุ่น SM 16510/11 บริษัท Sartorius ประเทศเยอรมัน แบบไหลตรง ขนาดความจุ 250 มิลลิลิตร พื้นที่ในการกรอง 17.35 ตารางเซนติเมตร ความดันไม่เกิน 2 บาร์

3.2.3 ชุดทดลองสำหรับกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ ใช้ชุดทดลอง Cross-flow bench scale test cell บริษัท Osmonic ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.4 เมมเบรน ที่ใช้การศึกษานี้ใช้ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน Sartorius membrane filter ชนิด Cellulose Nitrate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร. Pore size 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$ , 0.45  $\mu\text{m}$  และออสโมซิสย้อนกลับเมมเบรน รุ่น AG 2540 F 1328 ชนิด Polyamide

3.2.5 เครื่องมือวิเคราะห์ ในการศึกษานี้จะใช้เครื่องมือวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ดังนี้

3.2.5.1 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดของสารอินทรีย์ (Total Organic Carbon, TOC) รุ่น TOC-VCPH ของบริษัท Shimadzu Corporation ประเทศญี่ปุ่น เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน

3.2.5.2 เครื่องมือวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) รุ่น inoLab Cond Level 2 ของบริษัท Wissenschaftlich-Technische Werkstätten (WTW) ประเทศเยอรมัน ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้า

3.2.5.3 เครื่องมือวิเคราะห์ความขุ่น(Turbidimeter) รุ่น Ratio/Xn บริษัท HACH ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้วัดความขุ่นของน้ำตัวอย่าง

3.2.5.4 เครื่องมือวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดเป็นเบส (pH meter) รุ่น inolab pH level 1 บริษัท Wissenschaftlich-Technische Werkstätten (WTW) ประเทศเยอรมัน ใช้ในการวัดค่า pH ของสารละลายและน้ำตัวอย่าง

3.2.5.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก รุ่น PB3002-S บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักของสารเคมีเพื่อเติมในสารละลายเตรียมทดลอง

3.2.6 อุปกรณ์ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้อุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

3.2.6.1 บีกเกอร์ ขนาด 100, 400, 1000 และ 5000 มิลลิลิตร เพื่อบรรจุสารละลายและน้ำตัวอย่างในการทดลอง

3.2.6.2 แท่งแก้วสำหรับคนสาร

3.2.6.3 ข้อนดักสารเคมี

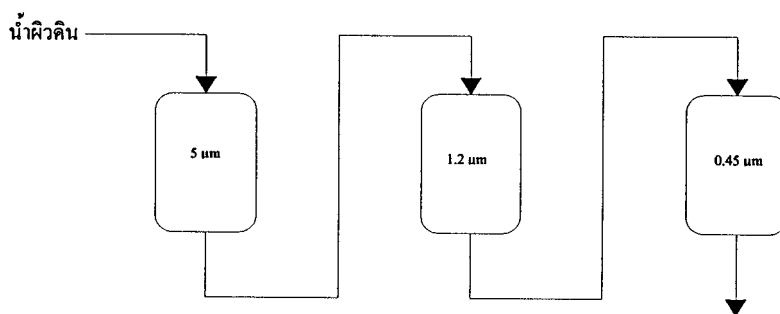
### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การศึกษาน้ำผิวดินตัวอย่างจากแหล่งน้ำหนองอีเจมส์ จังหวัดอุบลราชธานี โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดำเนินระบบได้แก่ ขนาดรูปทรงของแผ่นเมมเบรน ความดัน เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดำเนินระบบแบบเมมเบรน และแบบกะ ต่อดจน เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเมมเบรนก่อนและหลังการดำเนินระบบ โดยมีลักษณะในการดำเนินระบบดังภาพที่ 3.1 และ 3.2 และมีขั้นตอนในการทดลองดังภาพที่ 3.3 ต่อดจนมีรายละเอียดดังนี้

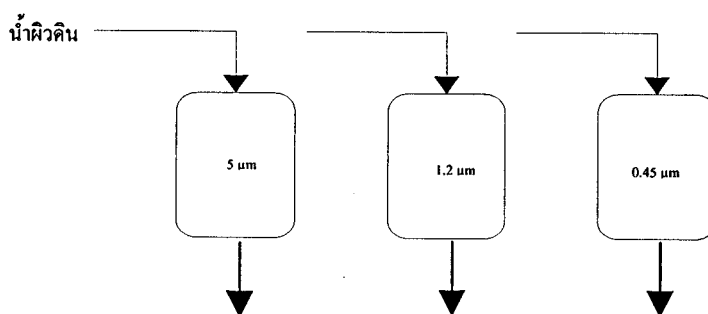
3.3.1.1 การเตรียมเมมเบรน ก่อนการทดลองต้องทำความสะอาดเมมเบรนทุกครั้ง โดยนำเมมเบรนที่เตรียมไว้มาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ pH 10 เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาแช่ในสารละลายไฮโดรคลอริก pH4 เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน จากนั้นนำเมมเบรนวางในชุดทดลอง Dead-end unit cell และเชื่อมต่อเข้ากับระบบดำเนินการ ดังแสดงในภาพที่ 3.4

3.3.1.2 ดำเนินการวัดอัตราการไหลที่ความดัน 68.93, 103.39, 137.86 และ 172.32 kPa (10, 15, 20 และ 25 psi) ด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 30 นาที นำน้ำผิวดินที่เตรียมไว้บรรจุลงในถังเก็บ ขนาด 10 ลิตร แล้วดำเนินระบบด้วยความดัน 68.93, 103.39, 137.86 และ 172.32 kPa

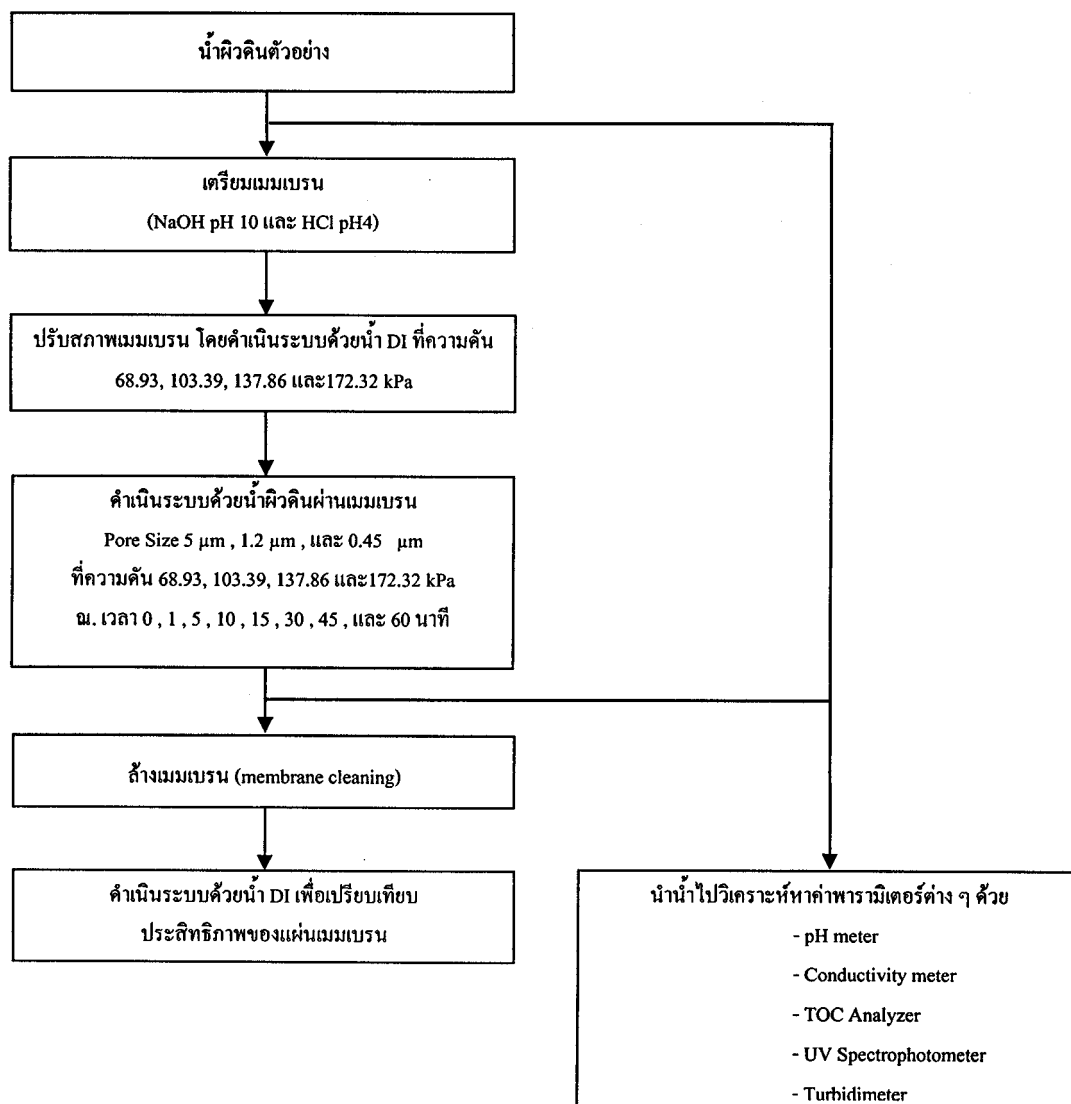
ตามลำดับ เริ่มจับเวลานับตั้งแต่ตัวอย่างเข้าสู่ระบบ โดยใช้ปั๊มเกอร์ ขนาด 5,000, 2,000 และ 1,000 มิลลิลิตร รวบรวมน้ำที่ผ่านเมมเบรนออกมา (เพอร์มิเอท) เพื่อกำหนดหาอัตราการไหลของเพอร์มิเอท โดยดำเนินระบบแบบเมมเบรนผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$



ภาพที่ 3.1 ลักษณะการดำเนินระบบแบบอนุกรม



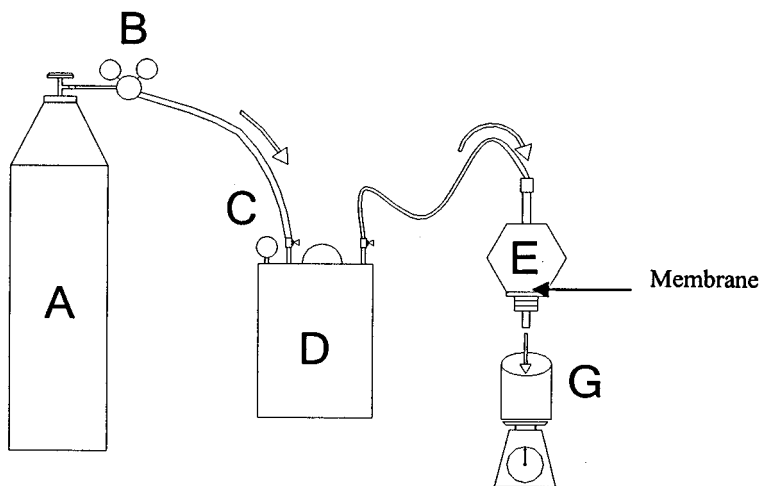
ภาพที่ 3.2 ลักษณะการดำเนินระบบแบบกะ



ภาพที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินการระบบของน้ำผิวดินผ่านกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

3.3.1.3 เก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพในการเก็บกัก

3.3.1.4 นำเมมเบรนหลังจากขั้นตอนที่ 3.3.1.2 เมื่อดำเนินการระบบผ่านน้ำผิวดินตัวอย่างแล้ว ทำการล้างเมมเบรน ด้วยน้ำปราศจากไอออนและสารเคมี โดยสารเคมีที่ใช้ในการล้างเมมเบรน คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ pH10 และ ไฮโดรคลอริก pH4 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นเมมเบรนก่อนและหลังการดำเนินการระบบ



ภาพที่ 3.4 แผนภาพแสดงการดำเนินระบบการไหลตามแนวตั้งของกระบวนการกรอง  
เมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน

A = ถังก๊าซไนโตรเจน

B = regulator ปรับความดันจากถังก๊าซเข้าถัง reservoir

C = เกจวัดความดันในถัง reservoir

D = ถัง reservoir ขนาด 10 ลิตรทำจากสแตนเลส

E = dead – end unit cell ขนาด 250 มิลลิลิตร

G = ส่วนที่รองรับน้ำ (permeate)

3.3.2 การศึกษาน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความขุ่นจากการผสมระหว่างน้ำปราศจาก  
ไอออนและสารสร้างความขุ่นเกลินโดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดำเนินระบบได้แก่ขนาดรูพรุน  
ของแผ่นเมมเบรน ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ระบบการกรองในการดำเนินระบบแบบเมมเบรนโดย  
กรองน้ำสังเคราะห์ความขุ่นผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ  
ที่ความดัน 172.32 kPa ซึ่งขั้นตอนในการทดลองจะคล้ายกับการทดลองของน้ำผิวดินในขั้นตอนที่  
3.3.1.1 ถึง 3.3.1.3

3.3.3 ศึกษา น้ำผิวดินตัวอย่างผ่านกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับโดยศึกษา  
น้ำผิวดินที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจากกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน โดยมีขั้นตอนการ  
ทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.5 และรายละเอียดดังนี้

3.3.3.1 จัดเตรียมเมมเบรนจากนั้นนำเมมเบรนวางในทุกการทดลอง Cross-flow bench scale test cell ดังแสดงในภาพที่ 3.3 และทำความสะอาดเมมเบรนด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH 10 และสารละลายไฮโดรคลอริกที่ pH 4

3.3.3.2 หลังจากทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน ดำเนินการปรับสภาพเมมเบรน โดยดำเนินระบบด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความดัน 482.51 kPa พร้อมวัด อัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน (Pure water permeability)

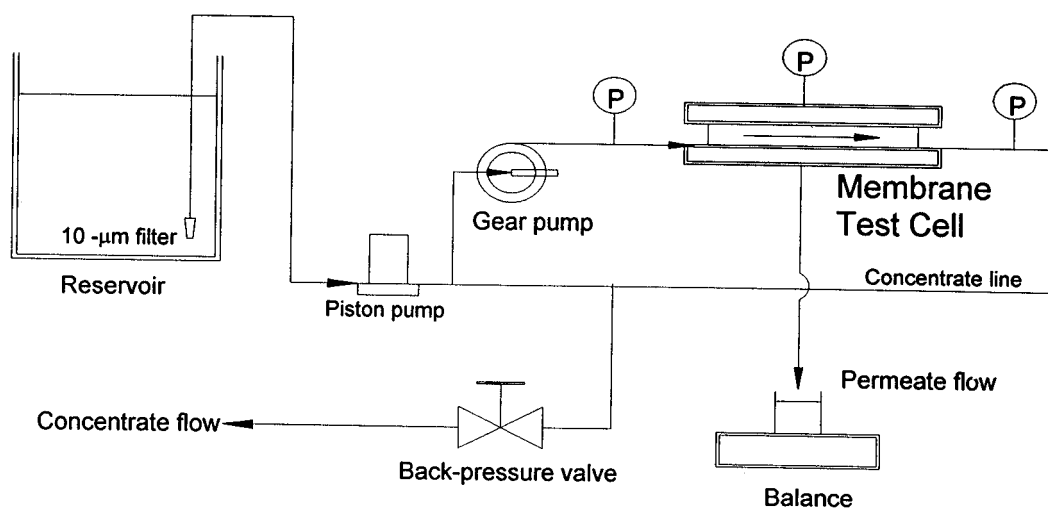
3.3.3.3 ดำเนินระบบด้วยน้ำผิวดินตัวอย่างก่อนและหลังการบำบัดจาก กระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน ที่ความดัน 482.51 kPa เป็นระยะเวลา 240 นาที แล้ววัด อัตราการไหลทุก 10 นาที โดยรองรับน้ำที่ผ่านเมมเบรนออกมาทางเพอร์มิเอท และรองรับน้ำที่ผ่าน ออกมาทางรีเทนเทท เป็นระยะเวลา 1 นาที พร้อมกัน แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อดำเนินการหาอัตราการ ไหลของเพอร์มิเอทและเปอร์เซ็นต์การไหลย้อนกลับ (Recovery) ตามลำดับ

3.3.3.4 เก็บน้ำตัวอย่างนำไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหา ประสิทธิภาพในการเก็บกัก

3.3.3.5 ดำเนินการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน จำนวน 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 นำน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 200 มิลลิลิตร มาดำเนินการล้างผ่านระบบเป็น 20 นาที และในครั้งที่ 2 นำน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร มาดำเนินการล้างผ่านระบบเป็น เวลา 20 นาที เช่นเดียวกัน หลังจากนั้นนำน้ำปราศจากไอออน มาดำเนินระบบผ่านเมมเบรน และวัด อัตราการไหลหลังจากการล้างทำความสะอาดเมมเบรนด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.3.2.6 ดำเนินการทำความสะอาดเมมเบรนในระบบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่พีเอช 10 ผ่านระบบเป็นเวลา 20 นาที เพื่อทำความสะอาดสารแขวนลอยตลอดจนสารอินทรีย์ คาร์บอนทั้งหมดที่ดูดซับและอุดตันบนผิวเมมเบรนที่ยังเหลืออยู่หลังจากทำความสะอาดด้วยน้ำ ปราศจากไอออน (จากที่ 3.3.2.5) หลังจากนั้นนำน้ำปราศจากไอออนมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรน และวัดอัตราการไหล

3.3.2.7 ดำเนินการทำความสะอาดเมมเบรนในระบบด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกที่ พีเอช 4 ผ่านระบบเป็นเวลา 20 นาที เพื่อทำความสะอาดสารแขวนลอยตลอดจนสารอินทรีย์ คาร์บอนทั้งหมดที่ดูดซับและ อุดตันบนผิวเมมเบรน จากนั้นนำน้ำปราศจากไอออนมาดำเนินระบบ ผ่านเมมเบรนและวัดอัตราการไหล



ภาพที่ 3.5 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการสำหรับการกรองของเมมเบรน เพื่อนำมาคิดเป็นค่าประสิทธิภาพในการดำเนินระบบ ซึ่งดัชนีที่บอกประสิทธิภาพของระบบเป็นค่าการกำจัด

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันและออสโมซิสย้อนกลับ โดยการนำน้ำผิวดินที่มีความขุ่นต่ำ จากแหล่งน้ำธรรมชาติหนองอีเจมส์ จังหวัดอุบลราชธานี มาผ่านการบำบัดน้ำเบื้องต้นด้วยกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน จากนั้นนำน้ำผิวดินที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นไปผ่านกระบวนการกรองเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ โดยทำการศึกษาผลกระทบต่อค่าการลดลงของฟลักซ์และค่าการกำจัด

#### 4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง

ในการศึกษาหาค่าคุณลักษณะเบื้องต้นของแหล่งน้ำผิวดิน หนองอีเจมส์ จังหวัดอุบลราชธานีได้นำขั้นตอนและวิธีการศึกษาจากคู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ (มันสิน ตันกุลเวศน์, 2546) มาใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติเพื่อทราบถึงคุณลักษณะเบื้องต้นตลอดจนพิจารณาว่ามีค่าใดที่เกินระดับค่ามาตรฐานที่ได้กำหนดไว้จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดินในแหล่งน้ำดังกล่าวทั้งทางด้านกายภาพและทางเคมี จากผลการศึกษาในตารางที่ 4.1 แสดงคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำผิวดิน จะเห็นได้ว่า ค่าจากพารามิเตอร์ของน้ำตัวอย่าง มีค่าคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำดิบผิวดินทั่วไป (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2550) ที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม และค่าความขุ่นของตัวอย่างน้ำผิวดินที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 4.85 NTU ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของน้ำผิวดินที่มีความขุ่นต่ำ ส่วนค่าของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของน้ำผิวดินมีค่าเท่ากับ  $4.42 \text{ mg.L}^{-1}$

#### ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำผิวดิน

| พารามิเตอร์                                                                                                            | ค่าที่วัดได้ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| พีเอช                                                                                                                  | 7.05         |
| สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon) , $\text{mg.L}^{-1}$                                                  | 4.42         |
| การดูดกลืนแสง $\text{UV}_{254\text{nm}}$ (UV Absorbance) , $\text{cm}^{-1}$                                            | 0.148        |
| การดูดกลืนแสงจำเพาะ (Specific UVA ( $\text{UV}_{254\text{nm}}/\text{TOC}$ )) , $\text{L. mg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ | 3.35         |
| การนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C}$ , $\mu\text{S.cm}^{-1}$                                     | 44           |
| ความขุ่น (Turbidity) , NTU                                                                                             | 4.85         |
| ความกระด้าง (Hardness) , $\text{mg as CaCO}_3/\text{L}$                                                                | 60           |
| ความเป็นด่าง (Alkalinity) i.e. $\text{HCO}_3^-$ , $\text{mg as CaCO}_3/\text{L}$                                       | 80           |
| ปริมาณแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) , $\text{mg as CaCO}_3/\text{L}$                                                   | 40           |
| ปริมาณแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) , $\text{mg as CaCO}_3/\text{L}$                                                 | 20           |
| ปริมาณคลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) , $\text{mg Cl}^-/\text{L}$                                                            | 30           |
| ปริมาณซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) , $\text{mg SO}_4^{2-}/\text{L}$                                                   | 0.01         |

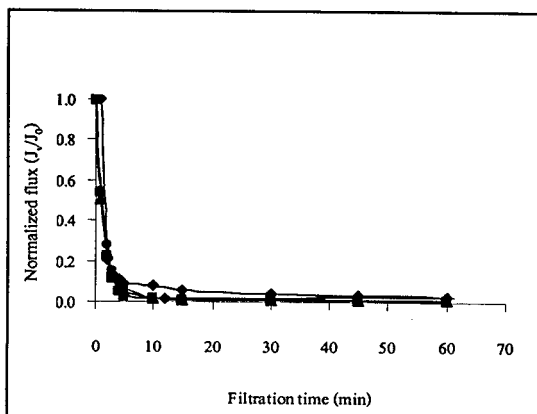
#### 4.2 ผลจากการดำเนินระบบบำบัดน้ำผิวดินเบื้องต้นผ่านกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

เมื่อนำน้ำผิวดินตัวอย่างที่มีส่วนผสมของสารแขวนลอย คอลลอยด์และสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด ซึ่งมีความขุ่นเท่ากับ 4.85 NTU และปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เท่ากับ  $4.42 \text{ mg.L}^{-1}$  มาผ่านกระบวนการกรองเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน โดยมีวิธีการดำเนินระบบแบบไหลตรง ศึกษาและใช้แรงขับเคลื่อนในการดำเนินระบบที่ 68.93 kPa, 103.39 kPa, 137.86 kPa และ 172.32 kPa ส่วนเมมเบรนทำมาจากวัสดุชนิด Cellulose nitrate แบบแผ่น (plate) มีขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  และวัดอัตราการไหลทุก 10 นาที โดยรองรับน้ำที่ผ่านเมมเบรนออกมาทางเพอร์มิเอท จึงนำไปชั่งเพื่อคำนวณหาอัตราการไหล และนำมาคิดเป็นค่าประสิทธิภาพ ซึ่งดัชนีที่บอกประสิทธิภาพของระบบเป็นค่าอัตราการซึมผ่านเมมเบรน และค่าการกำจัด ดังสมการ 2.2 และ 2.3 ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ระบบการกรองในการดำเนินระบบแบบอนุกรม โดยกรองน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ และดำเนินระบบการกรองแบบกะ โดยกรองน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแต่ละขนาดรูพรุน ซึ่งเลือกใช้ เมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการกรองแบบอนุกรมและแบบกะ ซึ่งผลจากการศึกษาดังนี้

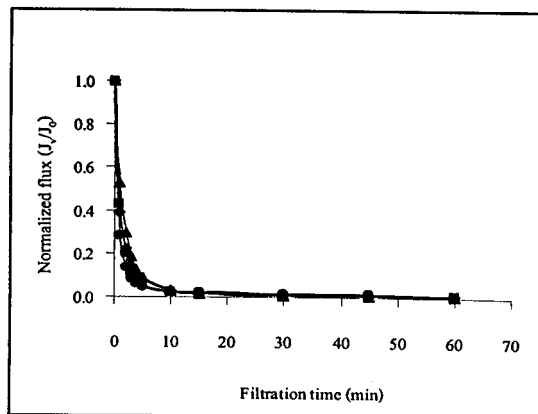
#### 4.2.1 ผลจากการดำเนินระบบแบบอนุกรม

เมื่อนำน้ำผิวดินตัวอย่างมาผ่านกระบวนการกรองเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  พบว่าที่ทุกความดันค่าฟลักซ์จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 10 นาทีแรกโดยค่าฟลักซ์จะลดลงเหลือประมาณต่ำกว่า 10% ของฟลักซ์เริ่มต้น ดังแสดงในภาพที่ 4.1 (ก) ดำเนินระบบผ่านเมมเบรน 5  $\mu\text{m}$  หลังจากนั้นค่าฟลักซ์ก็มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที ค่าฟลักซ์ลดลงต่ำมาก สาเหตุที่ทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำผิวดินตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการสะสมสารแขวนลอย และคอลลอยด์ซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนทำให้เกิดการอุดตันบนแผ่นเมมเบรน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ รัตนา(2543) ที่พบว่าถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน อนุภาคจะสะสมและเกิดเป็นเค้ก (Cakes) ที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กและใหญ่ผสมกัน อนุภาคขนาดเล็กจะถูกสะสมในรูพรุนและต่อมาจะเกิดการสะสมของอนุภาคขนาดใหญ่ เกิดเป็นชั้นเค้กที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น ส่วน Defrise and Gekas (1988) ได้อธิบายกลไกการเกิด Fouling ไว้ว่า การดูดซับ (adsorption) อนุภาคในรูพรุนและ/หรือ บนพื้นผิวหน้าของเยื่อแผ่นเป็นขั้นตอนแรกของการเกิด fouling และก่อให้เกิดการอุดตันของรูพรุนหรือเป็นตัวเริ่มในการก่อให้เกิดชั้นเค้กบนผิวของเยื่อแผ่น ส่วน Feuillat and Bernard (1985) ได้ศึกษาพบว่า คอลลอยด์สามารถที่จะฟอร์มตัวเป็นฟิล์ม ทั้งภายในและภายนอกเยื่อแผ่นซึ่งเป็นเหตุผลเบื้องต้นในการทำให้เยื่อแผ่นเกิดการอุดตัน จากภาพที่ 4.1 (ข) น้ำผิวดินตัวอย่างที่กรองผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  เมื่อนำมาผ่านกระบวนการกรองเมมเบรนที่รูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ก็ยังพบว่าค่าฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 10 นาทีแรกแสดงว่าสารแขวนลอยและคอลลอยด์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กลงมาถึงไหลผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  มีปริมาณมากทำให้เกิดสะสมบนพื้นผิวหน้าของเมมเบรน ที่ระยะเวลาใกล้เคียงกัน จากนั้นนำน้ำผิวดินตัวอย่างที่กรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  แล้วนำมากรองผ่านเยื่อแผ่นขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  พบว่าที่ความดัน 172.32 kPa จะเกิดอุดตันที่เมมเบรนต่ำกว่าความดันที่ 137.86, 103.34 และ 68.93 kPa ดังแสดงในภาพ 4.1 (ค) อันเป็นผลมาจากความดันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มแรงขับเคลื่อนระหว่างผิวเยื่อแผ่นจะเป็นการเพิ่มการถ่ายเทมวลระหว่างผิวเยื่อแผ่น ทำให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอทสูงขึ้น การบำบัดน้ำจากการดำเนินระบบผ่านกระบวนการกรองแบบอนุกรมโดยนำน้ำผิวดินตัวอย่างมาผ่านกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5 $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  ตามลำดับซึ่งผลจากการดำเนินระบบแสดงไว้ดังภาพที่ 4.2 แสดงค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบแบบอนุกรมที่ความดันต่างๆซึ่งจากผลการดำเนินระบบความดัน 68.93 kPa พบว่าน้ำผิวดินตัวอย่างกรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์เริ่มต้นเท่ากับ 9.27  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$  และเพอร์มิเอทฟลักซ์เมื่อดำเนินระบบเป็นเวลา 60 นาที เท่ากับ 0.17  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$  จากนั้นนำน้ำเพอร์มิเอทมาดำเนินระบบผ่านกระบวนการกรองเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  พบว่าค่าเพอร์

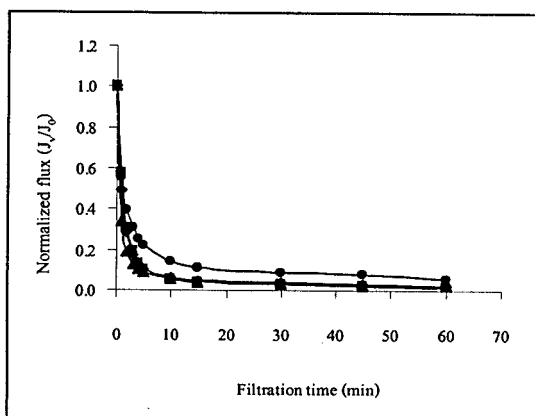
มีเอฟลักซ์เริ่มต้นเท่ากับ  $20.76 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  และเพอร์มิเอฟลักซ์สุดท้ายเท่ากับ  $0.15 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  และนำน้ำเพอร์มิเอทไปผ่านกระบวนการกรองเมมเบรนขนาดรูพรุน  $0.45 \text{ }\mu\text{m}$  ค่าเพอร์มิเอฟลักซ์เริ่มต้นเท่ากับ  $7 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  และค่าเพอร์มิเอฟลักซ์สุดท้ายเท่ากับ  $0.18 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  ดังภาพที่ 4.2 (ก) จากนั้นเพิ่มความดันในการดำเนินระบบการกรองสูงขึ้นเท่ากับ 103.34, 137.86 และ 172.32 kPa พบว่าค่าเพอร์มิเอฟลักซ์มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มความดันระหว่างผิวเมมเบรน จะเป็นการเพิ่มการถ่ายเทมวลระหว่างผิวเมมเบรนทำให้ค่าเพอร์มิเอฟลักซ์สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Jui-Fang (1996) ที่พบว่าความดันเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการซึมผ่านเมมเบรนสูงขึ้น ดังภาพที่ 4.2 (ข-ง) ทั้งนี้ผลของขนาดรูพรุนที่มีต่อค่าฟลักซ์พบว่ารูพรุนขนาด  $0.45 \text{ }\mu\text{m}$  จะมีค่าฟลักซ์ต่ำกว่าเมมเบรนขนาด  $5 \text{ }\mu\text{m}$  และ  $1.2 \text{ }\mu\text{m}$  เนื่องจากในน้ำผิวคินมีอนุภาคของสารแขวนลอยและคอลลอยด์ ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปะปนกันไปซึ่งถ้าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาดำเนินระบบการกรองก็จะเกิดการอุดตันได้ง่ายกว่า จึงทำให้ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ได้



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.1 ค่าฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบแบบอนุกรมผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุนต่างๆ

(ก) เมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$

(ข) เมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$

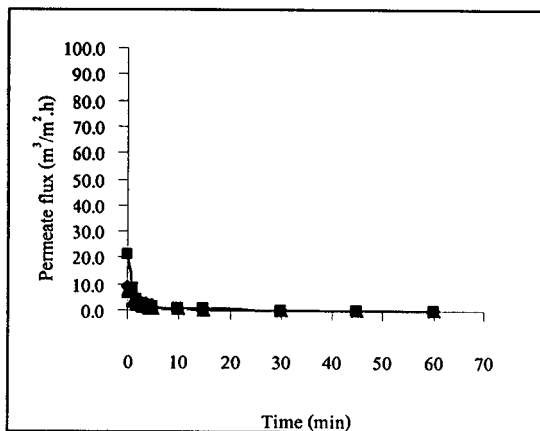
(ค) เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$

◆ แทนความดัน 68.93 kPa

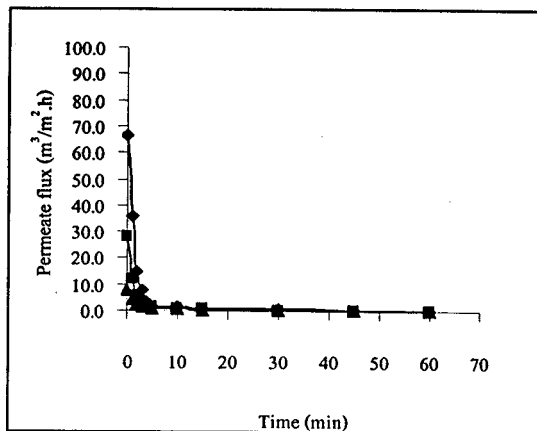
■ แทนความดัน 103.39 kPa

▲ แทนความดัน 137.86 kPa

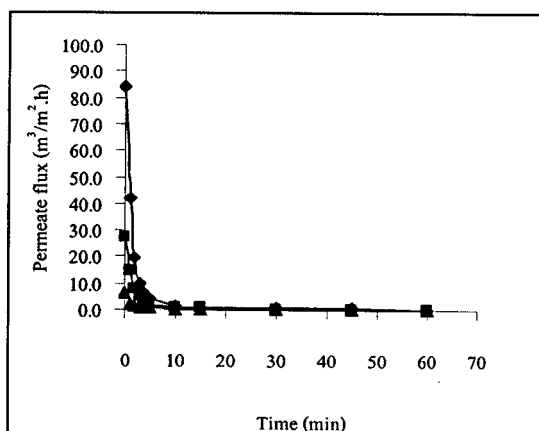
● แทนความดัน 172.32 kPa



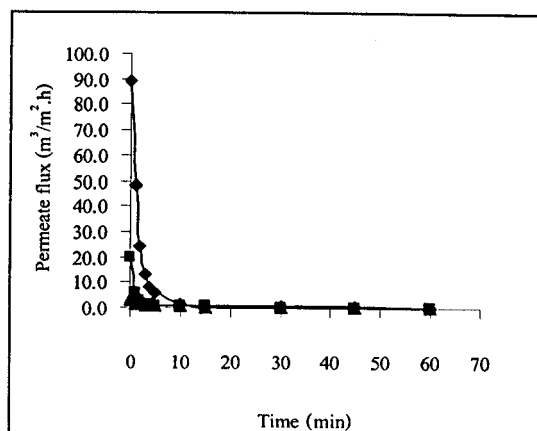
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 4.2 ค่าเพอร์มิเทฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบแบบอนุกรมที่ความดันต่างๆ

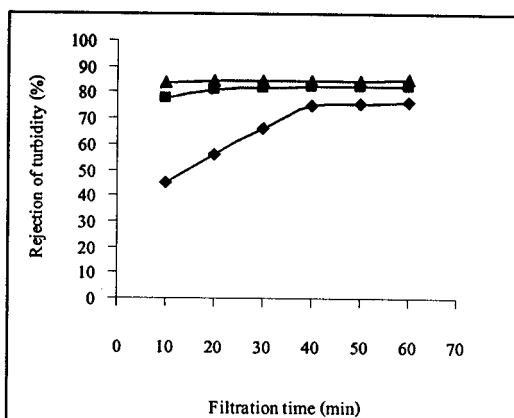
(ก) ความดัน 68.93 kPa (ข) ความดัน 103.39 kPa

(ค) ความดัน 137.86 kPa (ง) ความดัน 172.32 kPa

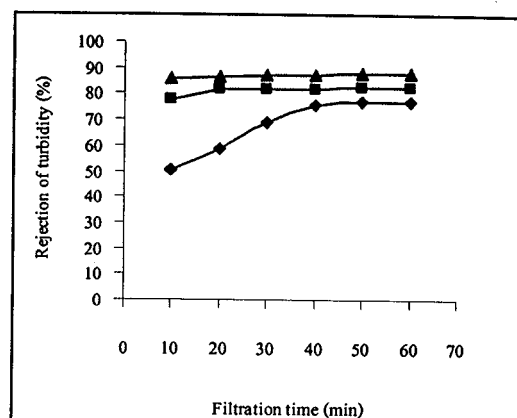
- ◆ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน  $5\ \mu\text{m}$
- แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน  $1.2\ \mu\text{m}$
- ▲ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน  $0.45\ \mu\text{m}$

จากภาพที่ 4.3 (ก) พบว่าการนำน้ำผิวดินที่มีความขุ่นเท่ากับ 4.85 NTU มาผ่านการดำเนินระบบเป็นเวลา 60 นาที ผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ค่าความขุ่นลดลงมาที่ 1.164 NTU เมื่อกรองผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 0.850 NTU เมื่อกรองผ่าน เมมเบรน ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.742 NTU เมื่อกรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  (ผลแสดงในภาคผนวก ข, ข.1 , ข.2 และ ข.3) สามารถคำนวณเป็นค่าการกำจัดความขุ่นได้เท่ากับร้อยละ 84.70 เมื่อเปรียบเทียบกับความขุ่นเริ่มต้น จากนั้นเพิ่มแรงขับเคลื่อนขึ้นเป็น 103.39 kPa พบว่าเมื่อดำเนินระบบผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  เป็นเวลา 60 นาที ตรวจวัดค่าความขุ่นได้เท่ากับ 0.121 NTU และ 0.847, 0.582 NTU (ผลแสดงในภาคผนวก ข, ข.4, ข.5 และ ข.6) เมื่อดำเนินระบบผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2 และ 0.45  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ สามารถคำนวณเป็นค่าการกำจัดความขุ่นได้เท่ากับร้อยละ 88 เมื่อเปรียบเทียบกับความขุ่นเริ่มต้น ดังแสดงในภาพที่ 4.3 (ข) จากนั้นเพิ่มแรงขับเคลื่อนขึ้นเป็น 137.86 kPa และ 172.32 kPa ใช้ระยะเวลาในการดำเนินระบบเท่ากับ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของเมมเบรน MF ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  เท่ากับร้อยละ 91.11 (ผลแสดงในภาคผนวก ข.9) และร้อยละ 93.57 ตามลำดับ (ผลแสดงในภาคผนวก ข.12) ดังแสดงในภาพที่ 4.3 (ง)

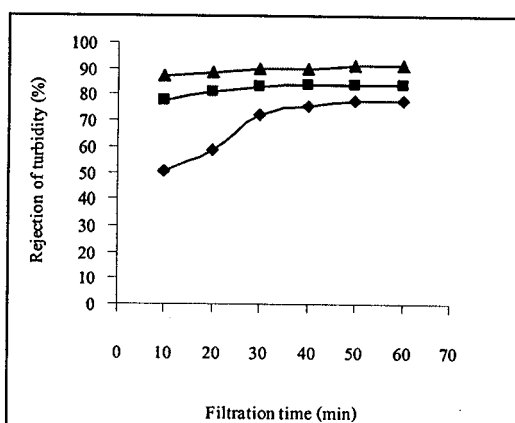
จากผลดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  ได้กำจัดอนุภาคออกไปเป็นส่วนใหญ่ทำให้ค่าการกำจัดเมื่อดำเนินระบบผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  มีอัตราเพิ่มสูงขึ้น ประกอบกับการเพิ่มแรงขับเคลื่อนและระยะเวลาในระบบมากขึ้นพบว่าอัตราการกำจัดความขุ่นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทั้งนี้อาจเกิดจากแรงขับเคลื่อนที่เพิ่มสูงขึ้นจะช่วยเร่งการอัดตัวของอนุภาคให้จับตัวกัน ประกอบกับการเพิ่มระยะเวลาในการดำเนินระบบการกรองอนุภาคจะเกิดการสะสมที่บริเวณผิวหน้าแผ่นเมมเบรนและในรูพรุน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนลินี, ปฏิรูปและชวลิต (2545) พบว่ากระบวนการ MF สามารถกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำดิบจากคลองประปาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถกำจัดความขุ่นได้มากกว่าร้อยละ 90 กล่าวคือ สามารถกำจัดความขุ่นได้ค่อนข้างสมบูรณ์และอนุภาคเหล่านั้นจะติดค้างที่ผิวหน้าและในช่องว่างของเมมเบรน



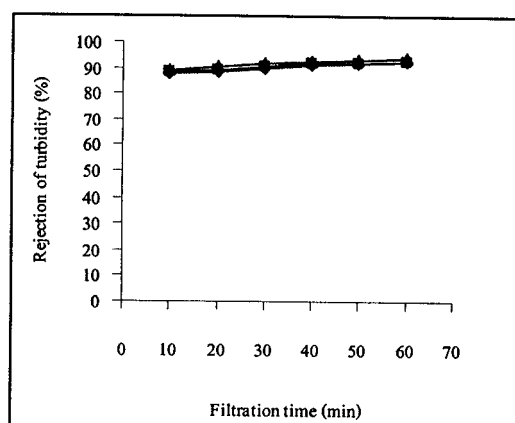
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจากการดำเนินระบบแบบอนุกรมที่ความดันต่างๆ

(ก) ความดัน 68.93 kPa (ข) ความดัน 103.39 kPa

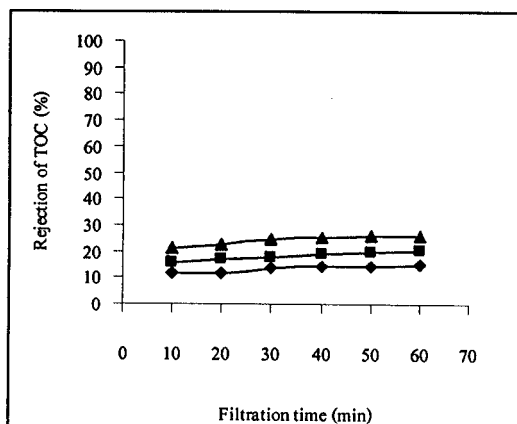
(ค) ความดัน 137.86 kPa (ง) ความดัน 172.32 kPa

◆ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$

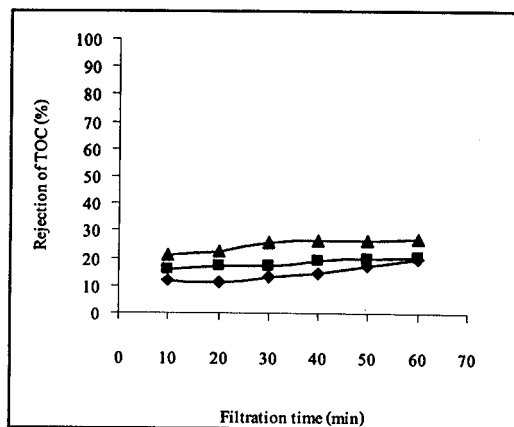
■ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$

▲ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$

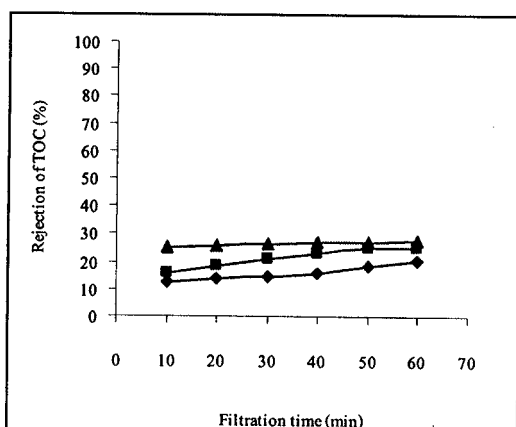
การลดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดจากการดำเนินระบบผ่านกระบวนการกรอง MF แบบอนุกรม โดยนำน้ำผิวดินตัวอย่างมาผ่านกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ แล้วนำน้ำเพอร์มิเททมาตรวจวัดปริมาณของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดซึ่งผลจากการดำเนินระบบแสดงไว้ดังภาพที่ 4.4 และจากภาพที่ 4.4 (ก) แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์จากการดำเนินระบบแบบ MF ที่ความดัน 68.93 kPa พบว่าจากการนำน้ำผิวดินที่มีปริมาณคาร์บอนทั้งหมดของสารอินทรีย์เท่ากับ 4.42  $\text{mg.L}^{-1}$  มาผ่านการดำเนินระบบเป็นระยะเวลา 60 นาที ผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดลดลงมาที่ 3.76  $\text{mg.L}^{-1}$  เมื่อกรองผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  , 3.52  $\text{mg.L}^{-1}$  เมื่อกรองผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  และ 3.27  $\text{mg.L}^{-1}$  เมื่อกรองผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  (ผลแสดงในภาคผนวก ข.1, ข.2, ข.3) สามารถคำนวณเป็นร้อยละต่อการกำจัดสารอินทรีย์ได้เท่ากับร้อยละ 14.93 เมื่อกรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , ร้อยละ 20.36 เมื่อกรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  และร้อยละ 26.01 เมื่อกรองผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ จากนั้นเพิ่มแรงขับดันขึ้นเป็น 103.39 kPa พบว่าเมื่อดำเนินระบบผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  เป็นเวลา 60 นาที ตรวจพบปริมาณคาร์บอนทั้งหมดของสารอินทรีย์ได้เท่ากับ 19.91  $\text{mg.L}^{-1}$  และ 3.52  $\text{mg.L}^{-1}$  และ 3.24  $\text{mg.L}^{-1}$  (ผลแสดงในภาคผนวก ข.ข.4, ข.5 และ ข.6) เมื่อดำเนินระบบผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ สามารถคำนวณเป็นร้อยละต่อการกำจัดสารอินทรีย์ทั้งหมดได้เท่ากับ ร้อยละ 26.69 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณคาร์บอนทั้งหมดของสารอินทรีย์เริ่มต้น ดังแสดงในภาพที่ 4.4 (ข) แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนทั้งหมดของสารอินทรีย์จากการดำเนินระบบแบบ MF ที่ความดัน 103.39 kPa จากนั้นเพิ่มแรงขับดันขึ้นเป็น 137.80 kPa และ 172.32 kPa ใช้ระยะเวลาในการดำเนินระบบ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพของเมมเบรนในการลดปริมาณคาร์บอนทั้งหมดสารอินทรีย์เท่ากับร้อยละ 27.82 (ผลแสดงในภาคผนวก ข.9) และ ร้อยละ 29.41 (ผลแสดงในภาคผนวก ข.12) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.4 (ค) แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จากการดำเนินระบบแบบ MF ที่ความดัน 137.86 kPa และแสดงในภาพที่ 4.4 (ง) แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จากการดำเนินระบบการกรองแบบ MF ที่ความดัน 172.32 kPa



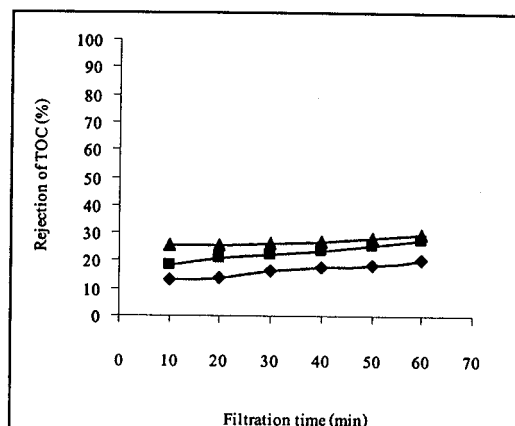
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดจากการดำเนินระบบแบบ MF ที่ความดันต่างๆ

(ก) ความดัน 68.93 kPa (ข) ความดัน 103.39 kPa

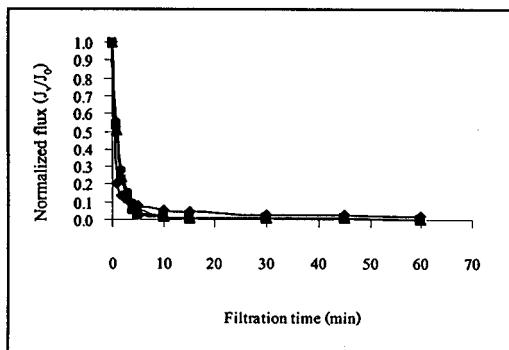
(ค) ความดัน 137.86 kPa (ง) ความดัน 172.32 kPa

- ◆ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$
- แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$
- ▲ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$

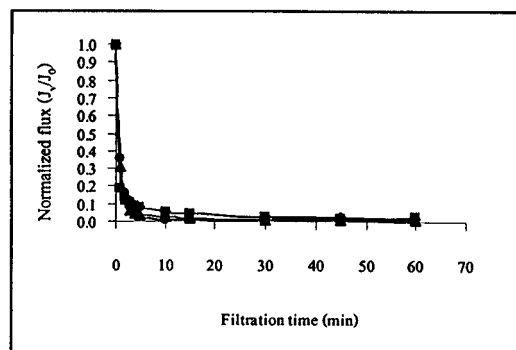
จากผลประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดจากการดำเนินระบบแบบ MF แบบอนุกรม พบว่าการเพิ่มแรงขับเคลื่อนสูงขึ้น อัตราการกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Schafer et al., (2000) ที่ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบการอุดตันต่อการกำจัดในกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนของแหล่งน้ำธรรมชาติ พบว่าการอุดตันของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในเมมเบรน กระทบต่อพฤติกรรมการกำจัดของเมมเบรนเป็นอย่างมาก การลดลงของขนาดของรูพรุนจากการอุดตันภายในรู และการสะสมในรูพรุนก็ทำให้ค่าการกำจัดเพิ่มขึ้น นอกเหนือจากการเพิ่มแรงขับเคลื่อน

#### 4.2.2 ผลจากการดำเนินระบบแบบกะ

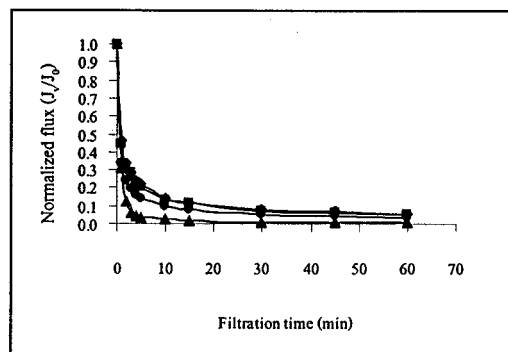
เมื่อนำน้ำผิวดินตัวอย่างมาผ่านกระบวนการกรองเมมเบรนแต่ละขนาดรูพรุน ซึ่งเลือกใช้ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  พบว่าที่ทุกความดันค่าฟลักซ์จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 5 นาทีแรก โดยค่าฟลักซ์จะลดลงเหลือต่ำกว่า ร้อยละ 10 ของค่าฟลักซ์เริ่มต้น หลังจากนั้น ค่าฟลักซ์ก็มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเวลาผ่านไป 30 นาที ค่าฟลักซ์จะลดลงต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์เริ่มต้น ดังแสดงในภาพที่ 4.5 (ก) แสดงการดำเนินระบบแบบกะผ่านเมมเบรนขนาด รูพรุน 5  $\mu\text{m}$  และ ภาพที่ 4.5 (ข) แสดงผลการดำเนินระบบแบบกะผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  สาเหตุที่ทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำผิวดินตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการอุดตันของสารแขวนลอยและคอลลอยด์ ซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่บริเวณรูพรุนของเยื่อแผ่นเมมเบรนส่วนน้ำผิวดินที่นำมากรองผ่านกระบวนการเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ค่าฟลักซ์จะลดลงต่ำกว่าร้อยละ 10 เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที หลังจากนั้นค่าฟลักซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างอนุกรม จนกระทั่งเวลาในการดำเนินระบบผ่านไป 60 นาที ค่าฟลักซ์ลดลงต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่า ฟลักซ์เริ่มต้นและจากภาพที่ 4.6 แสดงค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบแบบกะที่ความดันต่างๆ ซึ่งจากผลการดำเนินระบบความดัน 68.93 kPa พบว่าน้ำผิวดินตัวอย่างกรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  ค่าเพอร์มิเอท ฟลักซ์เริ่มต้นเท่ากับ 9.27  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$  และเพอร์มิเอทฟลักซ์เมื่อดำเนินระบบเป็นเวลา 60 นาที เท่ากับ 0.17  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$  และเมื่อนำน้ำผิวดินมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  เพอร์มิเอทฟลักซ์เริ่มต้นเท่ากับ 4.87  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$  และค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์สุดท้ายเท่ากับ 0.094  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$  ส่วนค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์เริ่มต้นของน้ำผิวดิน เมื่อกรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  เท่ากับ 1.84  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$  และเพอร์มิเอทฟลักซ์สุดท้ายเท่ากับ 0.11  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$  ดังภาพที่ 4.6 (ก) จากนั้นเพิ่มความดันในการดำเนินระบบสูงขึ้นเท่ากับ 103.34, 137.86 และ 172.32 kPa พบว่าค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นดังภาพที่ 4.6 (ข-ง)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.5 ผลการดำเนินระบบผ่าน MF แบบกะที่ความดันต่างๆ

(ก) เมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$

(ข) เมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$

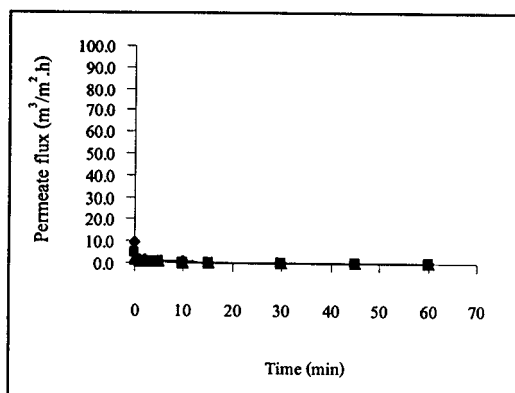
(ค) เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$

◆ แทนความดัน 68.93 kPa

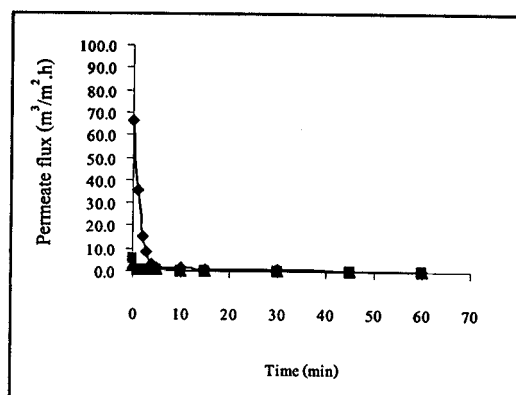
■ แทนความดัน 103.39 kPa

▲ แทนความดัน 137.86 kPa

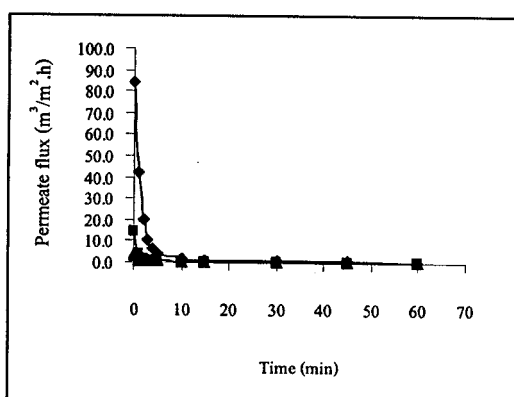
● แทนความดัน 172.32 kPa



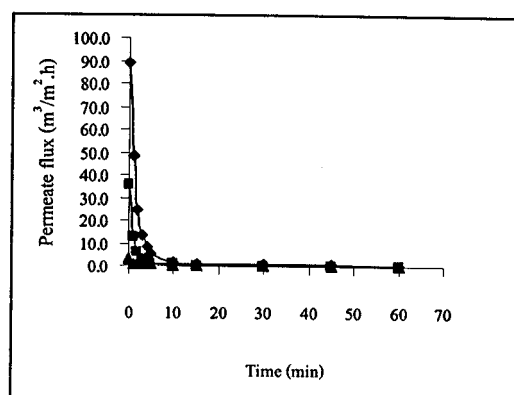
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 4.6 ค่าเพอร์มิเทฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบแบบกะที่ความดันต่างๆ

(ก) ความดัน 68.93 kPa (ข) ความดัน 103.39 kPa

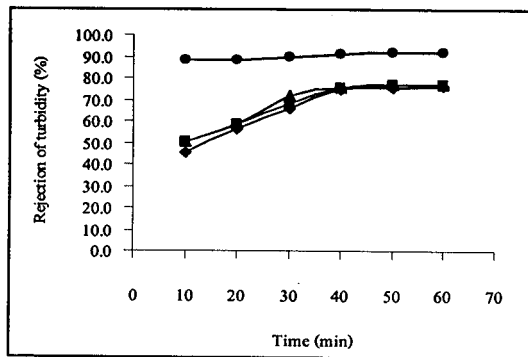
(ค) ความดัน 137.86 kPa (ง) ความดัน 172.32 kPa

◆ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$

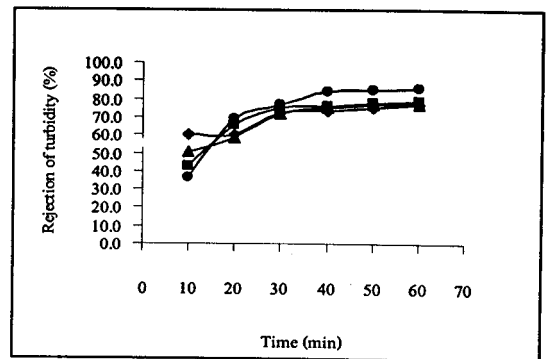
■ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$

▲ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$

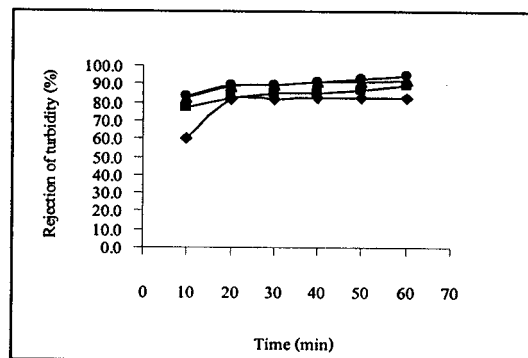
จากการศึกษาการลดความขุ่นจากการดำเนินระบบผ่านกระบวนการกรองแบบกะโดยนำน้ำผิวดินตัวอย่างมาผ่านกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนแต่ละขนาดรูพรุน ซึ่งเลือกใช้เมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  โดยประสิทธิภาพของการคำนวณเป็นค่าการกำจัดจากสมการ 2.3 ในการศึกษากระบวนการกรองน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  ที่แรงดัน 68.93 kPa, 103.34 kPa, 137.86 kPa และ 172.32 kPa พบว่าที่ความดัน 172.32 kPa มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุด โดยมีค่ากำจัดความขุ่นเท่ากับร้อยละ 92.12 ซึ่งความขุ่นเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 4.85 NTU เมื่อดำเนินการผ่านเมมเบรนดังกล่าวข้างต้นเป็นระยะเวลา 60 นาที แล้วนำน้ำตัวอย่างมาตรวจวัดค่าความขุ่น อ่านค่าได้เท่ากับ 0.32 NTU ส่วนที่ความดัน 137.86 kPa, 103.34 kPa และ 68.93 kPa สามารถคำนวณเป็นร้อยละต่อการกำจัดความขุ่นได้เท่ากับร้อยละ 77.3 ร้อยละ 77.13 และร้อยละ 76 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.7 (ก) ในขณะที่การกรองน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  ดังแสดงในภาพ 4.7(ข) และ 4.7(ค) พบว่าที่แรงดัน 172.32 kPa ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นก็ยิ่งสูงกว่าแรงดันที่ระดับ 137.86 kPa, 103.34 kPa และ 68.93 kPa สามารถคำนวณเป็นค่าการกำจัดความขุ่นได้เท่ากับร้อยละ 85.77 และร้อยละ 95 ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด จากการศึกษพบว่าเมื่อดำเนินระบบผ่านกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  ซึ่งเลือกศึกษาที่สภาวะความดันในการดำเนินระบบเท่ากับ 172.32 kPa เนื่องจากสภาวะดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงสุดโดยค่าการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 20.36 เมื่อดำเนินระบบผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  ส่วนเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  มีค่าการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 27.80 และ 30.32 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.8



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจากการดำเนินระบบแบบกะผ่านเมมเบรน MF ขนาดต่างๆ

(ก) เมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$

(ข) เมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$

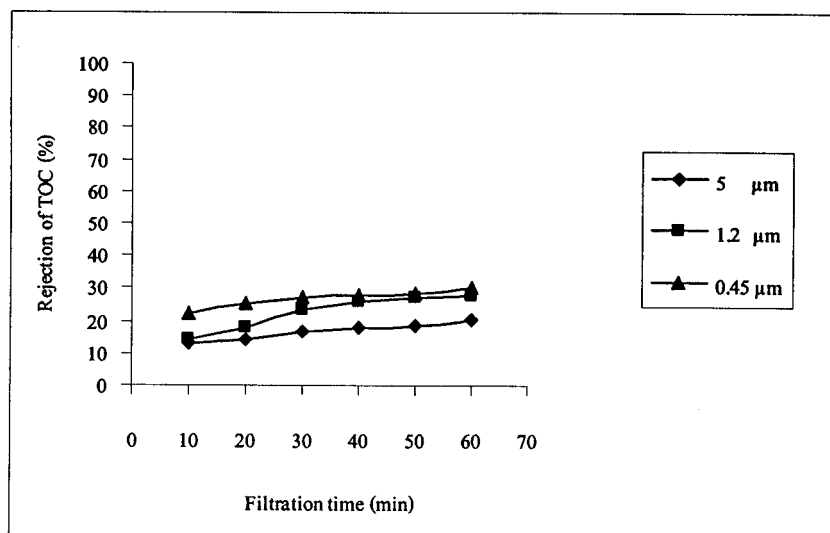
(ค) เมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$

◆ แทนความดัน 68.93 kPa

■ แทนความดัน 103.39 kPa

▲ แทนความดัน 137.86 kPa

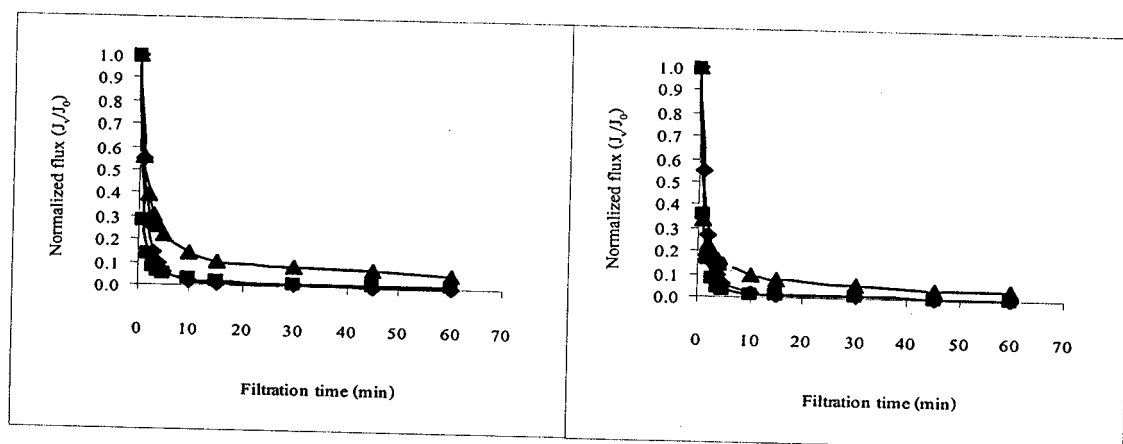
● แทนความดัน 172.32 kPa



ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดจากการดำเนินระบบแบบ M ผ่านกระบวนการกรองแบบกะ ที่ความดัน 172.32 kPa

เมื่อนำผลจากการศึกษาในการดำเนินระบบการกรองแบบอนุกรมและแบบกะมาเปรียบเทียบผลการดำเนินระบบ โดยเปรียบเทียบที่สภาวะแรงที่ขับเคลื่อน 172.32 kPa เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าว ค่าเพอร์มิเอฟลักซ์ค่าการกำจัดของความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดมีค่าสูง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ค่าฟลักซ์จากการดำเนินระบบแบบกะเมื่อกรองน้ำผิวดินตัวอย่างผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ค่าฟลักซ์ลดลงมากกว่าร้อยละ 99 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์เริ่มต้น และเมื่อนำน้ำผิวดินมากรองผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ค่าฟลักซ์ก็จะลดลงมากกว่าร้อยละ 99 เช่นกัน ส่วนเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ค่าฟลักซ์จะเริ่มลดลงต่ำกว่าร้อยละ 10 ของฟลักซ์เริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที จากนั้นค่าฟลักซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างอนุกรมจนกระทั่งเวลาผ่านไปประมาณ 60 นาที ค่าฟลักซ์จึงลดลงมากกว่าร้อยละ 99 ดังภาพที่ 4.9 ส่วนค่าการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดแบบกะจากภาพที่ 4.7 และภาพที่ 4.8 พบว่าการดำเนินระบบแบบกะมีค่าการกำจัดความขุ่นเท่ากับร้อยละ 95 และค่าการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำผิวดินเริ่มต้น จากการดำเนินระบบการกรองแบบอนุกรม เมื่อกรองน้ำผิวดินตัวอย่างผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  ค่าฟลักซ์จากการดำเนินระบบจะมีค่าใกล้เคียงกับการดำเนินระบบแบบกะ จากนั้นนำน้ำตัวอย่างจากการกรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  มากรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ค่าฟลักซ์จะลดลงมากกว่าร้อยละ 99 เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที จากนั้นนำน้ำตัวอย่างมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ค่าฟลักซ์จะเริ่มลดลงต่ำกว่าร้อยละ 10 เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนค่าการกำจัดความขุ่นเมื่อดำเนินระบบแบบอนุกรมที่ความดัน 172.32 kPa. พบว่ามีอัตราการกำจัดมากกว่าร้อยละ 80 เมื่อ

ดำเนินระบบการกรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  และ 1.2  $\mu\text{m}$  เมื่อนำน้ำตัวอย่างไปกรองผ่านเมมเบรนขนาด รูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  พบว่าสามารถกำจัดความขุ่นออกจากน้ำผิวดินได้ถึงร้อยละ 93 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำผิวดินเริ่มต้น ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (ก-ค) ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบการกรองแบบอนุกรมที่ความดัน 172.32 kPa พบว่าสามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดออกจากน้ำผิวดินได้ร้อยละ 29 ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการกำจัดแบบกะจะใกล้เคียงกับแบบอนุกรมและค่าฟลักซ์จากการดำเนินระบบการกรองแบบกะจะลดลงเร็วกว่าการดำเนินระบบแบบอนุกรมอันเนื่องมาจากอนุภาคของสารแขวนลอยและคอลลอยด์ที่อนุภาคใหญ่กว่าหรือเท่ากับขนาดรูพรุนจะตกค้างบนเยื่อแผ่นเมมเบรนหรือผ่านเข้าไปค้างในเมมเบรนอาจส่งผลทำให้ขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นเริ่มเล็กลงและที่ผิวเยื่อแผ่นก็เริ่มมีการสะสมของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนและตัวถูกละลายอื่นๆที่ไม่สามารถผ่านรูพรุนไปได้ ประกอบกับการเพิ่มแรงขับเคลื่อนจะทำให้เกิดการอัดตัวของชั้นตัวถูกละลายที่ผิวของเยื่อแผ่นและภายในรูพรุนให้แน่นมากขึ้นขนาดรูพรุนก็จะยังมีขนาดเล็กลงสารละลายจึงผ่านไปได้น้อยลงนอกจากนี้ยังพบว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่มีอัตราการอุดตันมากกว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็ก Paudel (1991) ดังภาพที่ 4.9 และภาพที่ 4.10



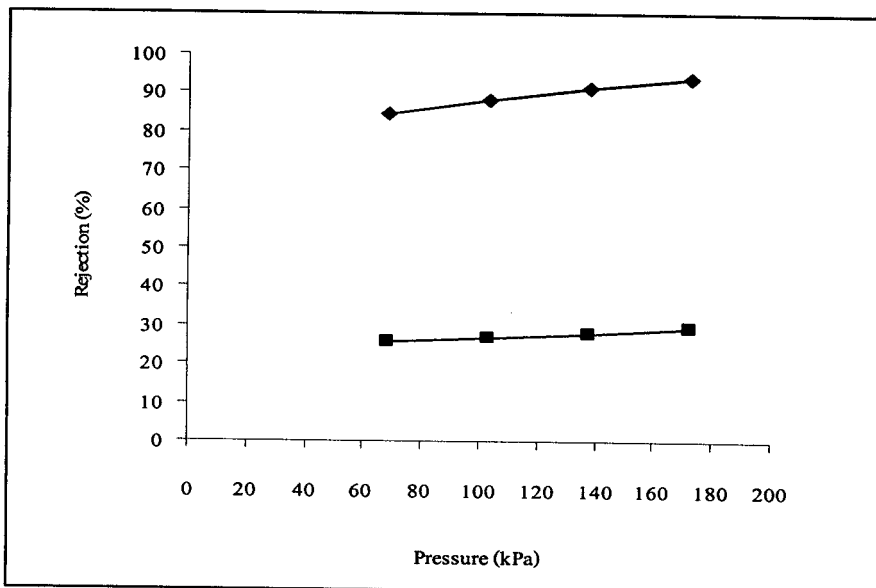
(ก)

(ข)

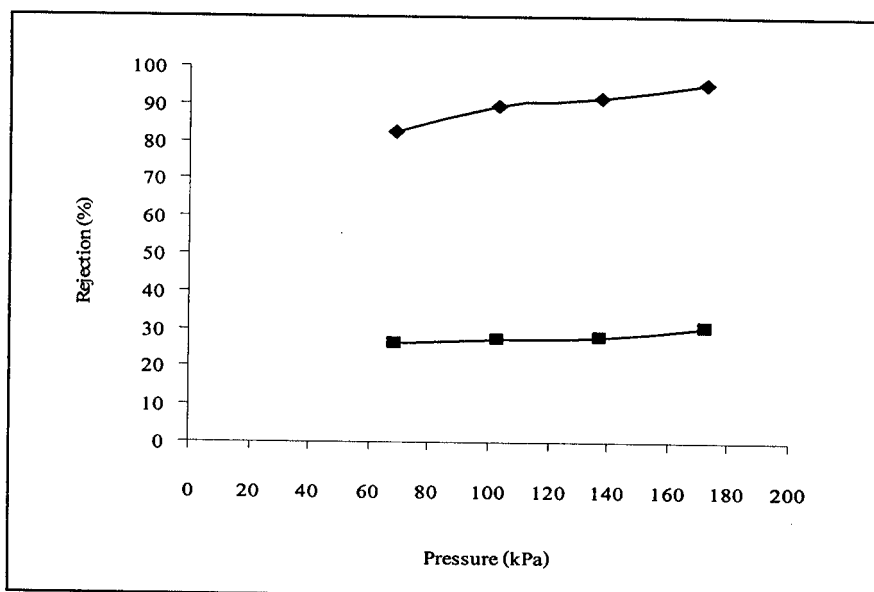
ภาพที่ 4.9 ค่าฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบผ่านเมมเบรนขนาดต่างๆ ที่ความดัน 172.32 kPa

(ก) แสดง การดำเนินระบบแบบอนุกรม (ข) แสดงการดำเนินระบบแบบกะ

- ◆ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$
- แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$
- ▲ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของระบบMF

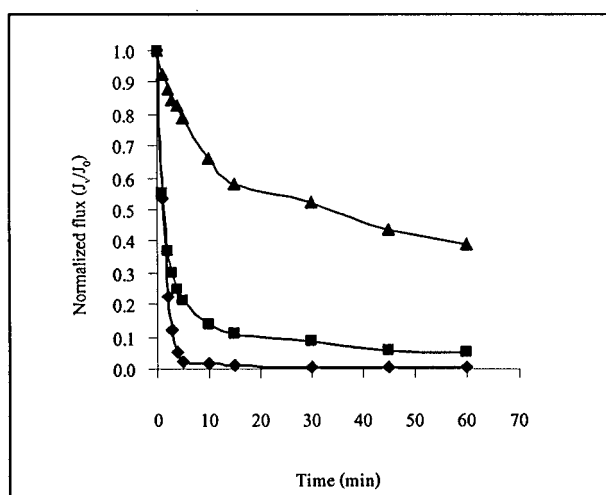
(ก) ดำเนินระบบแบบอนุกรม (ข) ดำเนินระบบแบบกะ

◆ แทนความขุ่น

■ แทนสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด

#### 4.2.3 ผลเปรียบเทียบจากการดำเนินระบบแบบอนุกรมของน้ำผิวดินตัวอย่างและน้ำสังเคราะห์ความขุ่น

จากการศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการกรองเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน ในการดำเนินระบบการกรองจากน้ำสังเคราะห์ที่มีส่วนผสมของสารสร้างความขุ่นเกาหลิน (kaolin) ให้มีความขุ่นเท่ากับน้ำผิวดิน แล้วนำมาดำเนินระบบการไหลตามแนวดิ่งในการเปรียบเทียบครั้งนี้ จะเปรียบเทียบที่สภาวะแรงขับเคลื่อน 172.32 kPa ซึ่งจากผลการศึกษาการกรองน้ำสังเคราะห์ความขุ่น พบว่า เมื่อดำเนินระบบการกรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  และ 1.2  $\mu\text{m}$  เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ค่าฟลักซ์จะลดลงต่ำกว่าร้อยละ 10 ของฟลักซ์เริ่มต้น จากนั้นค่าฟลักซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจากนั้นนำน้ำตัวอย่างสังเคราะห์มาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ค่าฟลักซ์จะลดลงต่ำกว่าร้อยละ 50 ของฟลักซ์เริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไป 40 นาที ดังภาพที่ 4.11 และเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินตัวอย่างจากภาพที่ 4.9 พบว่าน้ำสังเคราะห์ความขุ่นเกิดการอุดตันบนแผ่นเมมเบรนช้ากว่าน้ำผิวดิน ทั้งนี้เกิดจากในน้ำผิวดินมีสิ่งต่างๆปะปนอยู่ เช่น สารอินทรีย์ธรรมชาติและกรดต่างๆเป็นต้น โดยสังเกตได้จากค่าฟลักซ์ซึ่งค่าฟลักซ์ของน้ำสังเคราะห์ความขุ่นเมื่อดำเนินระบบผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  จะมีค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากเมมเบรน ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  และ 1.2  $\mu\text{m}$  ได้กำจัดสารสร้างความขุ่นเกาหลินออกจากสารละลายได้มากกว่า ร้อยละ 90



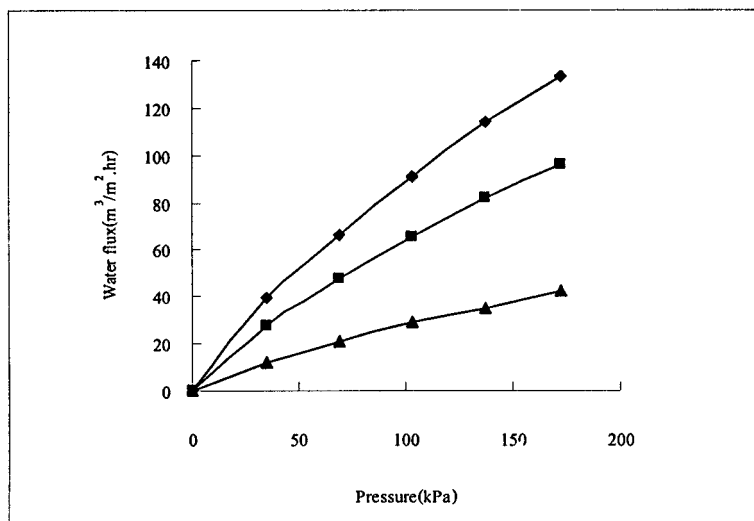
ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพการดำเนินระบบแบบอนุกรมผ่านกระบวนการกรองแบบ MF ของน้ำสังเคราะห์ความขุ่น ที่ความดัน 172.32 kPa

- ◆ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$       ■ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$
- ▲ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$

#### 4.2.4 ผลจากการทำความสะอาดเมมเบรนหลังจากการดำเนินระบบการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

การนำเมมเบรนไปใช้งานในการแยกสารละลายที่เป็นของเหลว ถึงแม้จะมีการบำบัดสารละลายมีการแยกออกแบบโมดูลของเมมเบรน ตลอดจนมีการเลือกสภาวะดำเนินระบบที่ทำให้ลดการเกิด Concentration polarization ก็ยังพบว่ามีเกิดการอุดตัน เป็นผลทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายในการดำเนินระบบลดต่ำลง ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มค่าฟลักซ์สารละลายให้กับระบบ ตลอดจนยืดอายุการใช้งาน จึงมีความจำเป็นต้องทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีที่เหมาะสมเป็นระยะๆ เพื่อให้เมมเบรนมีสภาพใกล้เคียงเยื่อแผ่นใหม่มากที่สุด ซึ่งการทำความสะอาดเมมเบรนสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักได้แก่ วิธีกายภาพ และวิธีเคมี ซึ่งการทำความสะอาดวิธีกายภาพเป็นการทำความสะอาดที่ใช้การเปลี่ยนแปลง สภาวะการทำงานเป็นหลัก เพื่อกำจัดอนุภาคที่อยู่บนผิวเมมเบรนให้หลุดไปกับสารละลาย แต่ก็ลดการอุดตันได้ระดับหนึ่งเท่านั้น ส่วนการทำความสะอาดแบบวิธีเคมีเป็นการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมี ซึ่งสารเคมีจะช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้สารอุดตันพองตัว หดตัวละลายเกิดการหลุดออก ส่วนสารเคมีที่ใช้ในการทำทำความสะอาดเมมเบรนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สารทำความสะอาดที่มีสภาพเป็นกรด ซึ่งสารทำความสะอาดจำพวกกรดจะทำความสะอาดตะกอนที่เป็นสารอนินทรีย์ได้ดี และสารทำความสะอาดที่มีสภาพเป็นเบส โดยสารทำความสะอาดจำพวกเบส ซึ่งจะทำความสะอาดตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์ได้ดี (Lindau, J. and Jonsson, A-S., 1993) ดังนั้นการทำความสะอาดให้มีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องทำความสะอาดด้วยสารทำความสะอาดที่มีสภาพทั้งกรดและเบส การคำนวณหาค่าความต้านทานของเมมเบรนอันเนื่องมาจากระบบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

ค่าความต้านทานเริ่มต้นของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน จากการดำเนินระบบสามารถหาได้จากการดำเนินระบบด้วยน้ำปราศจากไอออน จากผลการศึกษาพบว่าค่าแรงดันและปริมาณของน้ำปราศจากไอออนผ่านเมมเบรนได้ ความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าค่า ฟลักซ์แปรผันตามความดันผ่านเมมเบรน และค่าความต้านทานเริ่มต้นของเมมเบรนขนาดรูพรุน  $5\ \mu\text{m}$  มีค่าเท่ากับ  $5.38 \times 10^9\ \text{m}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ 26.2 องศาเซลเซียส ส่วนเมมเบรนขนาดรูพรุน  $1.2\ \mu\text{m}$  และ  $0.45\ \mu\text{m}$  มีความต้านทานเริ่มต้นเท่ากับ  $7.46 \times 10^9\ \text{m}^{-1}$  และ  $1.71 \times 10^{10}\ \text{m}^{-1}$  ตามลำดับ ค่าความต้านทานเมมเบรนจะมีคุณลักษณะเฉพาะของเยื่อแผ่นแต่ละชนิดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อแผ่น ความหนาแน่นของรูพรุน ขนาดรูพรุนและความหนาของเยื่อแผ่น



ภาพที่ 4.12 ผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ของระบบเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันแต่ละขนาดรูพรุน

- ◆ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$
- แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$
- ▲ แทนเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$

การนำแผ่นเมมเบรนมาทำความสะอาดหลังจากการดำเนินระบบผ่านน้ำผิวดินด้วยวิธีการกายภาพและวิธีเคมี เพื่อให้แผ่นเมมเบรนมีประสิทธิภาพการซึมผ่านของน้ำมีสภาพใกล้เคียงกับแผ่นเมมเบรนใหม่มากที่สุด จากการทดลองใช้วิธีทำความสะอาดเมมเบรนด้วย water cleaning ด้วยสารละลายทำความสะอาด ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน สำหรับวิธีการกายภาพ ส่วนวิธีเคมี จะใช้สารละลายที่มีสภาพเป็นกรด โดยมีส่วนผสมของ Hydrochloric acid (Zhang, G. and Liu, Z., 1996) ที่มีพีเอชเท่ากับ 4 และสารละลายที่มีสภาพเป็นเบส โดยมีส่วนผสมของ Sodium hydroxide ที่มีพีเอชเท่ากับ 10 จากผลการทดลองพบว่าที่ความดัน 172.33 kPa ค่า Water flux of new membrane สำหรับเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  มีค่าฟลักซ์เท่ากับ  $133282 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  ส่วนเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  มีค่าฟลักซ์เท่ากับ  $96120 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  และ  $42143 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  ตามลำดับและจากการศึกษา ยังพบว่าการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีเคมีจะมีประสิทธิภาพการซึมผ่านของน้ำสูงกว่าวิธีการกายภาพ (พินิตดา ศรีกิตติพงศ์ และคณะ, 2545) water flux หลังการทำความสะอาดเมมเบรนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอันเป็นผลมาจากเกิดการสะสมอนุภาคของสารแขวนลอย คอลลอยด์บริเวณผิวหน้าเมมเบรนเป็นจำนวนมาก ผลแสดงดังตารางที่ 4.2 , 4.3 และภาพที่ 4.13, 4.14

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าการซึมผ่านของเมมเบรนหลังการทำความสะอาดเมมเบรน  
แบบ Water cleaning และ Chemical ของน้ำฟิวคินเมื่อผ่านการดำเนินระบบ  
แบบอนุกรม ที่ความดัน 172.33 kPa

| ขนาดรูพรุนของเมมเบรน<br>$\mu\text{m}$ | $\frac{L_{pn}}{L_{po}}$ | $\frac{L_{pc}}{L_{po}}$ |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 5 $\mu\text{m}$                       | 0.008                   | 0.013                   |
| 1.2 $\mu\text{m}$                     | 0.005                   | 0.022                   |
| 0.45 $\mu\text{m}$                    | 0.013                   | 0.018                   |

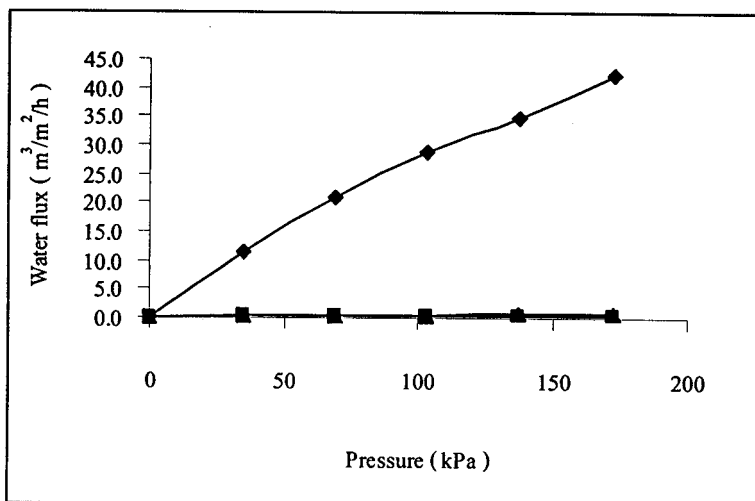
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบร้อยละค่าการซึมผ่านของเมมเบรนหลังการทำความสะอาดเมมเบรน  
แบบ Water cleaning และ Chemical ของน้ำฟิวคินเมื่อผ่านการดำเนินระบบ  
แบบกะ ที่ความดัน 172.33 kPa

| ขนาดรูพรุนของเมมเบรน<br>$\mu\text{m}$ | $\frac{L_{pn}}{L_{po}}$ | $\frac{L_{pc}}{L_{po}}$ |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 5 $\mu\text{m}$                       | 0.008                   | 0.013                   |
| 1.2 $\mu\text{m}$                     | 0.005                   | 0.050                   |
| 0.45 $\mu\text{m}$                    | 0.011                   | 0.023                   |

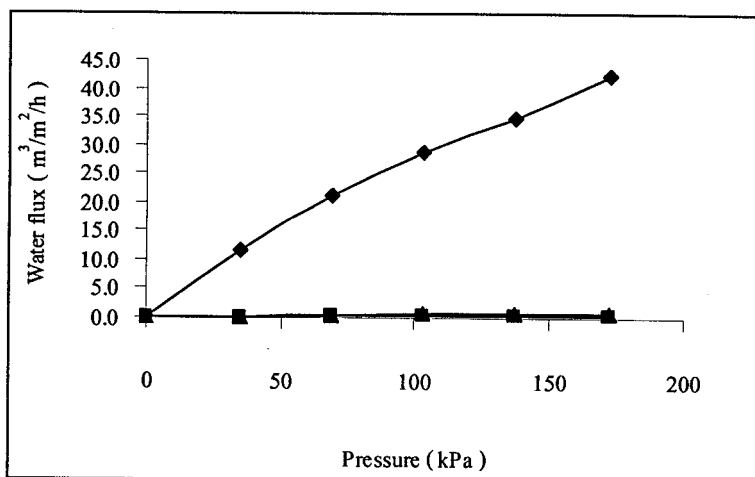
$L_{po}$  คือ การซึมผ่านของเมมเบรนก่อนดำเนินระบบด้วยน้ำฟิวคิน ( $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ )

$L_{pn}$  คือ ค่าการซึมผ่านของเมมเบรนหลังทำความสะอาดแบบ Water cleaning ( $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ )

$L_{pc}$  คือ ค่าการซึมผ่านของเมมเบรนหลังทำความสะอาดแบบ Chemical ( $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ )



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอร์มิเทฟลักซ์กับความดันของเมมเบรนขนาดรูพรุน  $0.45 \mu\text{m}$

(ก) ดำเนินระบบแบบอนุกรม

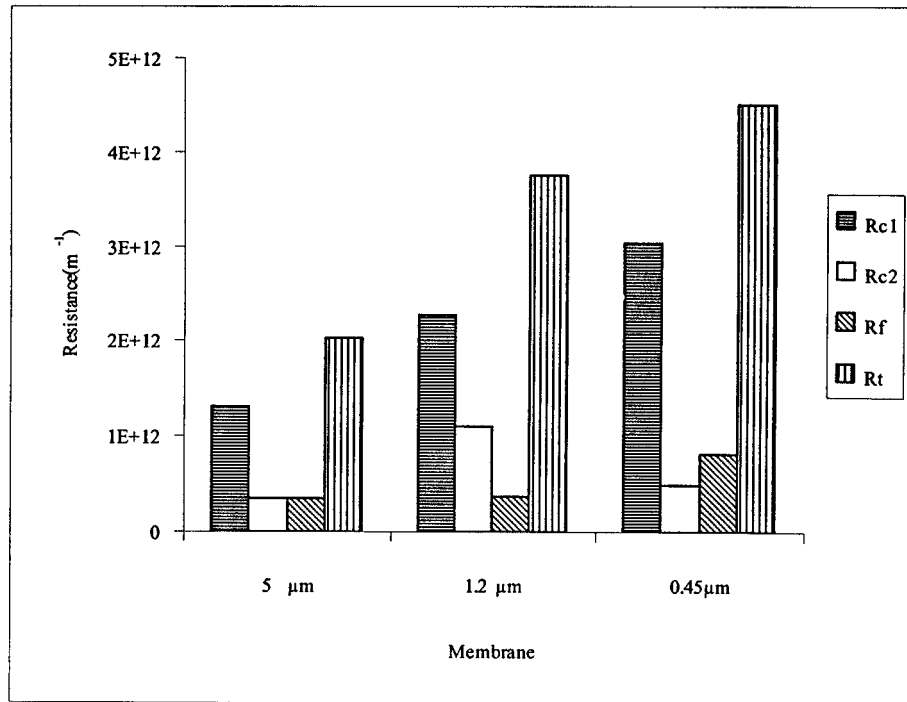
(ข) ดำเนินระบบแบบกะ

◆ after compaction

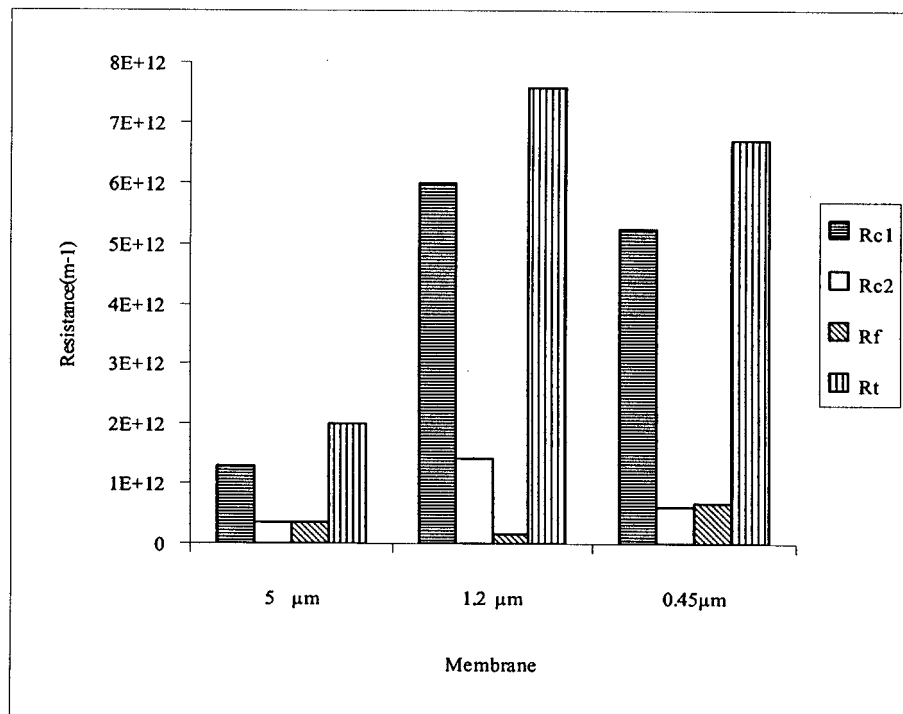
■ after water cleaning

▲ after chemical cleaning

การคำนวณหาค่าความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม สำหรับการดำเนินระบบ น้ำผิวดินแบบอนุกรมและแบบกะ แสดงผลไว้ ดังตารางที่ ก.2 แสดงผลค่าความต้านทาน สำหรับการดำเนินระบบน้ำผิวดินแบบอนุกรม พบว่าเมมเบรนขนาดรูพรุน  $0.45\ \mu\text{m}$  มีค่าความต้านทานของการอุดตันหลังจากการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ( $R_{ci}$ ) โดยเป็นความต้านทานที่อาจเกิดจากชั้นเค้กที่สูง ซึ่งเกิดจากอนุภาคของสารแขวนลอย คอลลอยด์ ตลอดจนสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดที่มีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่าหรือเท่ากับขนาดรูพรุนของเมมเบรน จึงเกิดการสะสมตัวในรูพรุน หรือเคลือบติดแน่นบริเวณผิวหน้าในลักษณะการเกิดเจลซึ่งความต้านทานที่เกิดจากชั้นเค้ก มีความสำคัญและมีอิทธิพลต่อการเกิดการอุดตันบนเยื่อเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันอย่างมากและความต้านทานที่เกิดขึ้นจากชั้นเค้กนี้ ยังมีความสัมพันธ์ต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ ส่วนความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันอย่างถาวรหรือไม่สามารถล้างออกได้ ( $R_p$ ) ก็มีปริมาณที่สูง เนื่องจากอนุภาคเกิดการสะสมตัวและติดแน่นใน รูพรุน ตลอดจนมีบางส่วนที่เกิดการอุดตันบนผิวหน้าเยื่อแผ่นเมมเบรนมากเกินไปจนไม่สามารถจะล้างออกได้ ทั้งนี้ยังพบว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนที่มีขนาดเล็กจะมีค่า  $R_p$  สูงกว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อผ่านการบำบัดน้ำผิวดินเบื้องต้นมาแล้วก็ยังคงมีอนุภาคขนาดเล็กผ่านการกรองมาด้วย จึงเกิดการสะสมตัวและติดแน่นใน รูพรุนขนาด  $0.45\ \mu\text{m}$  ส่วนการดำเนินระบบน้ำผิวดินแบบกะ แสดงผลไว้ ดังตารางที่ ก.3 พบว่า ค่าความต้านทานของการอุดตันที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับการดำเนินระบบน้ำผิวดินแบบอนุกรม และจากผลในการศึกษาพบว่า ค่าความต้านทานรวม ( $R_T$ ) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อนำน้ำผิวดินมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนของเมมเบรนเล็กลงมา อาจเป็นผลมาจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน คือ การสะสมอนุภาคของสารแขวนลอย คอลลอยด์ ตลอดจนสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดบริเวณผิวของเยื่อกรองภายในชั้น Boundary Layer ซึ่งเป็นชั้นที่ใกล้ผิวหน้าของเยื่อกรองจะอยู่เป็นอิสระและทำการขัดขวางการไหลผ่านเยื่อกรอง ดังภาพที่ 4.14 และ 4.15



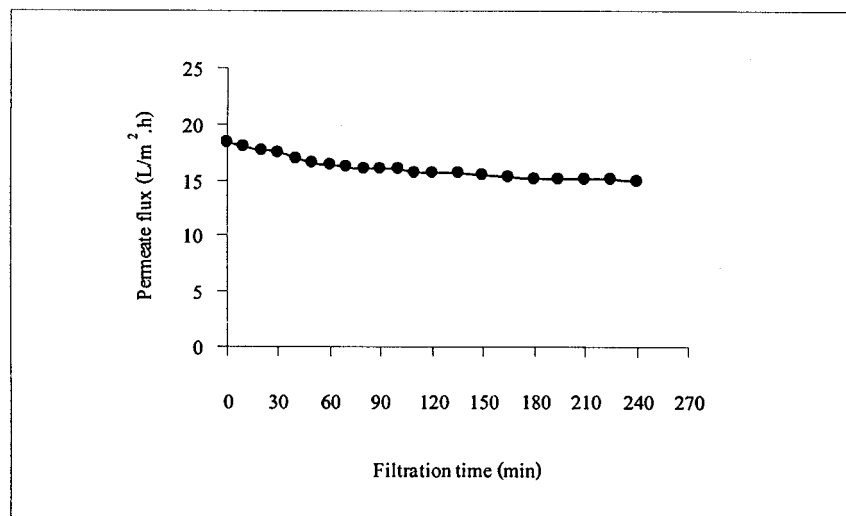
ภาพที่ 4.14 ความต้านทานการอุดตันของเมมเบรนแต่ละขนาดรูพรุนเมื่อดำเนินระบบแบบอนุกรมที่ความดัน 172.32 kPa



ภาพที่ 4.15 ความต้านทานการอุดตันของเมมเบรนแต่ละขนาดรูพรุนเมื่อดำเนินระบบแบบกะที่ความดัน 172.32 kPa

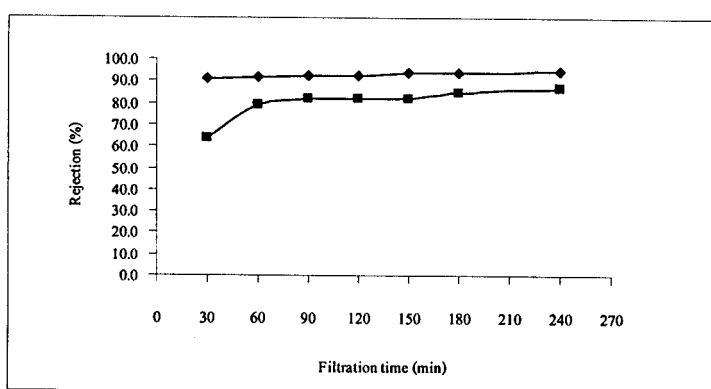
### 4.3 ผลจากการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ

เมื่อนำตัวอย่างน้ำผิวดินที่มีส่วนผสมของสารแขวนลอย คอลลอยด์ และสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด ซึ่งมีความขุ่นเท่ากับ 4.85 NTU มาผ่านกระบวนการกรองเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ โดยมีวิธีการดำเนินระบบแบบไหลขวาง และมีช่วงระยะเวลาในการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านกระบวนการดังกล่าวเท่ากับ 240 นาที ที่ความดัน 482.51 kPa หรือ 70 psi วัดอัตราการไหลทุก 10 นาที ในช่วงเวลา 1-120 นาทีและวัดอัตราการไหลทุก 15 นาทีในช่วงเวลา 121-240 นาที โดยรองรับน้ำที่ผ่านเมมเบรนออกมาทางเพอร์มิเอทและรองรับน้ำที่ผ่านออกมาทางรีเทนเททเป็นระยะเวลา 1 นาที พร้อมกัน จากนั้นนำไปชั่งเพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของเพอร์มิเอทและเปอร์เซ็นต์การไหลย้อนกลับ โดยอัตราการไหลย้อนกลับถูกกำหนดให้อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 85 ซึ่งผลจากการดำเนินระบบพบว่า ช่วงแรกเริ่มต้น เพอร์มิเอทฟลักซ์มีค่าเท่ากับ  $18.3 \text{ L.M}^2.\text{H}^{-1}$  และเมื่อดำเนินระบบผ่านไปเป็นเวลา 120 นาที เพอร์มิเอทฟลักซ์ลดลงมาที่  $15.68 \text{ L.M}^2.\text{h}^{-1}$  จากนั้นดำเนินระบบต่อไปถึงระยะเวลา 240 นาที ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ลดลงมาที่  $15.10 \text{ L.M}^2.\text{h}^{-1}$  แสดงให้เห็นว่าน้ำผิวดินตัวอย่างเมื่อนำมาดำเนินระบบออสโมซิสย้อนกลับ เป็นระยะเวลา 240 นาที ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์มีแนวโน้มลดลงมากกว่าร้อยละ 18 อันเป็นผลมาจากสารแขวนลอย คอลลอยด์ ตลอดจนสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเป็นต้น ดังภาพที่ 4.16 แสดงผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ



ภาพที่ 4.16 ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ ที่ความดัน 482.51 kPa

จากผลการศึกษา พบว่าถ้าใช้ระยะเวลาในการดำเนินระบบเพิ่มขึ้น ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเมื่อนำน้ำเพอร์มิเอทมาตรวจวิเคราะห์หาปริมาณความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด พบว่าจากกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับสามารถกำจัดความขุ่นออกจากน้ำฟีดวอดจ์กล่าวมากกว่าร้อยละ 90 ดังแสดงในภาพที่ 4.17 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำฟีดวอดจ์ กล่าวคือ น้ำฟีดวอดจ์มีความขุ่นเท่ากับ 4.85 NTU จากนั้นนำไปดำเนินระบบผ่านกระบวนการกรองดังกล่าวพบว่าเมื่อดำเนินระบบผ่านไปเป็นเวลา 30 นาที นำน้ำเพอร์มิเอท มาตรวจวัดค่าความขุ่นพบว่าน้ำเพอร์มิเอท ณ เวลา 30 นาที มีค่าความขุ่นเท่ากับ 0.436 NTU และเมื่อดำเนินระบบต่อไปจนกระทั่งเวลาผ่านไป 240 นาที นำน้ำเพอร์มิเอทมาตรวจวัดค่าความขุ่น พบว่าน้ำเพอร์มิเอท ณ เวลา 240 นาที มีค่าความขุ่นเท่ากับ 0.256 NTU และในกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ สามารถกำจัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดได้มากกว่าร้อยละ 80 ดังแสดงในภาพที่ 4.17 น้ำฟีดวอดจ์เริ่มต้นได้ตรวจพบปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเท่ากับ  $4.42 \text{ mg.L}^{-1}$  จากนั้นนำน้ำฟีดวอดจ์ไปดำเนินระบบผ่านกระบวนการกรองดังกล่าว เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ได้ตรวจพบปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของน้ำเพอร์มิเอทเท่ากับ  $1.615 \text{ mg.L}^{-1}$  จากนั้นนำน้ำเพอร์มิเอทจากการดำเนินระบบ ณ เวลา 60, 90, 120, 150, 180 และ 240 นาที มาตรวจวัดค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด พบว่ามีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในน้ำเพอร์มิเอทเท่ากับ  $0.92 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $0.81 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $0.802 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $0.799 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $0.676 \text{ mg.L}^{-1}$  และ  $0.583 \text{ mg.L}^{-1}$  จากผลดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาในการดำเนินระบบเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น



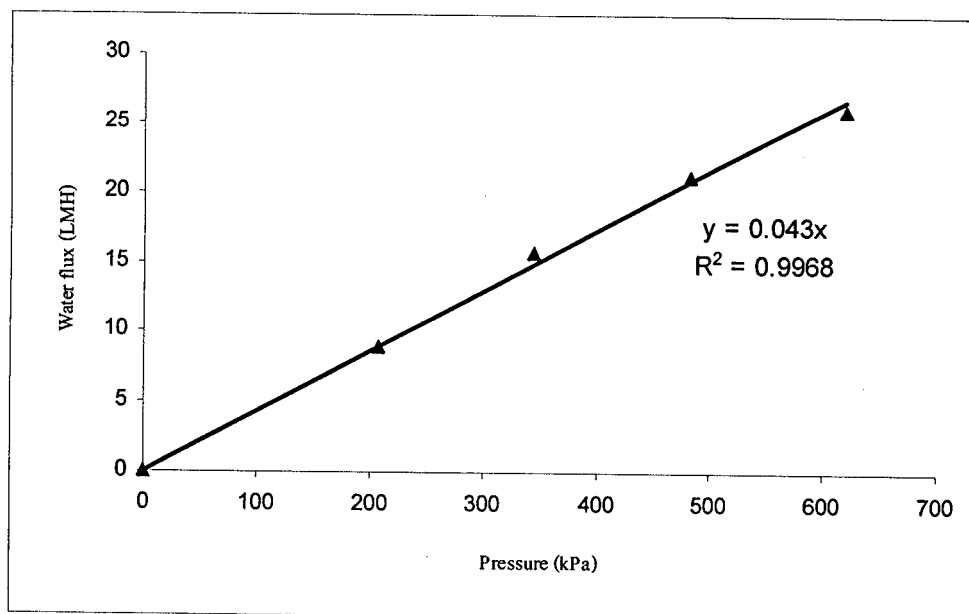
ภาพที่ 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดจากการดำเนินระบบการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับที่ความดัน 482.51 kPa

◆ แทนความขุ่น

■ แทนสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด

#### 4.4 ผลจากการดำเนินระบบผ่านกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับของน้ำผิวดินที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจากกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

ผลการทดสอบเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ โดยการใช้ น้ำปราศจากไอออนเป็นน้ำตัวอย่างในการทดสอบ ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มิเอทที่ผ่านมาเพื่อนำไปคำนวณค่า water flux (ฟลักซ์ของน้ำ) ที่ความดัน 206.79 kPa, 344.65 kPa, 482.51 kPa และ 620.37 kPa ตามลำดับ พบว่า ค่า water flux จะมีความสัมพันธ์กับค่าของความดัน ดังแสดงในภาพที่ 4.18

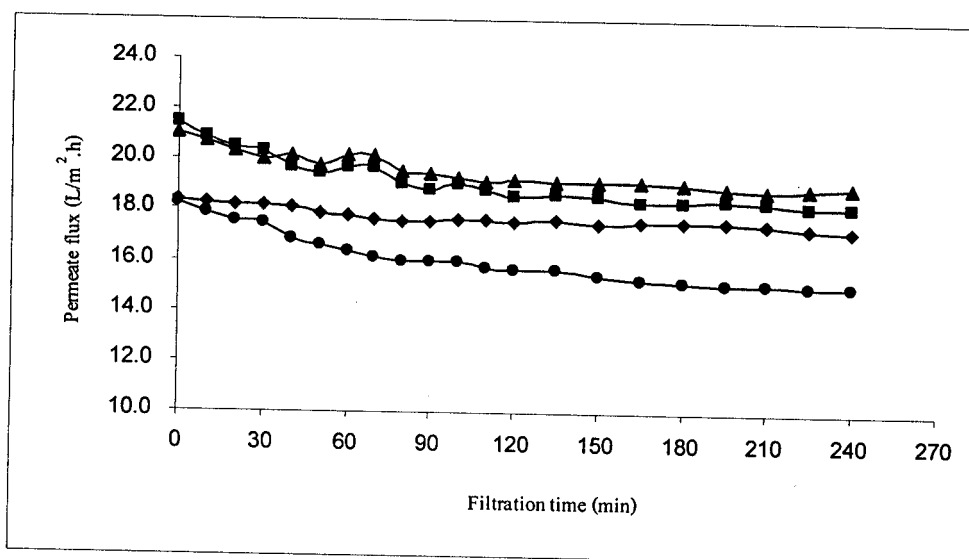


ภาพที่ 4.18 ผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ ของระบบเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ

จากการทดสอบพบว่าค่า water flux เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของความดันที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9968 ค่าการซึมผ่านของน้ำเพอร์มิเอท หาได้จากสมการที่ 2.6 สามารถคำนวณหาการซึมผ่านของน้ำเพอร์มิเอทได้เท่ากับ  $0.043 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{kPa}^{-1}$

เมื่อนำตัวอย่างน้ำผิวดินที่ผ่านการบำบัดน้ำเบื้องต้นจากกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน โดยมีวิธีการดำเนินการระบบการไหลตามแนวตั้งผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน  $5 \mu\text{m}$ ,  $1.2 \mu\text{m}$  และ  $0.45 \mu\text{m}$  มาผ่านกระบวนการกรองเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ โดยมีวิธีการดำเนินการระบบแบบไหลขวางและใช้ระยะเวลาในการดำเนินการระบบผ่านกระบวนการดังกล่าวเท่ากับ 240 นาที จากการศึกษพบว่า เมื่อนำน้ำผิวดินตัวอย่างที่ยังไม่ได้ผ่านการบำบัดมาดำเนินการระบบผ่านกระบวนการกรองดังกล่าวพบว่า ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $18.3 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  และเมื่อดำเนินการระบบผ่านไป 240 นาที พบว่าเพอร์มิเอทฟลักซ์มีค่าเท่ากับ  $15 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  แสดงให้เห็น

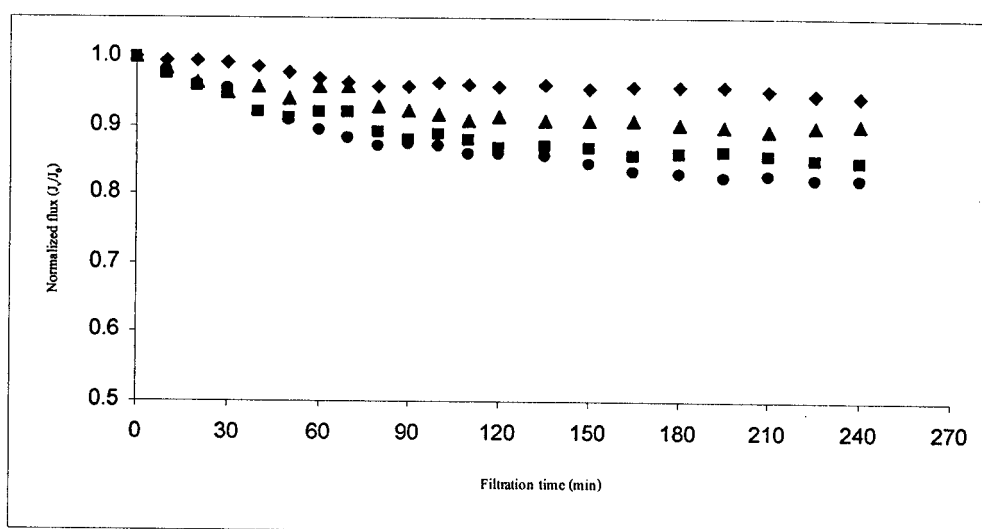
ว่าเมื่อนำน้ำฟิวดินตัวอย่างมาผ่านกระบวนการค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ จะลดลงกว่าร้อยละ 18 ของค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์เริ่มต้น จากนั้นนำตัวอย่างที่กรองผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน ขนาดรูพรุน  $5\ \mu\text{m}$  มาดำเนินการระบบผ่านกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ เพอร์มิเอทฟลักซ์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $18.3\ \text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  และค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงระยะเวลา 240 นาที ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ลดลงเท่ากับ  $17.27\ \text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  และเมื่อนำตัวอย่างจากการบำบัดผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน  $1.2\ \mu\text{m}$  มาผ่านกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ เพอร์มิเอทฟลักซ์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $21.43\ \text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  และเพอร์มิเอทฟลักซ์สุดท้ายมีค่าเท่ากับ  $18.17\ \text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  ส่วนค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์เริ่มต้นของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดจากเมมเบรนขนาดรูพรุน  $0.45\ \mu\text{m}$  เท่ากับ  $21.08\ \text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  และเพอร์มิเอทฟลักซ์สุดท้ายเท่ากับ  $18.99\ \text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  ดังภาพที่ 4.19 แสดงผลเพอร์มิเอทฟลักซ์ จากการดำเนินการระบบการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับของน้ำฟิวดินที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจากกระบวนการ MF



ภาพที่ 4.19 ผลเพอร์มิเอทฟลักซ์ จากการ ดำเนินระบบการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ ของน้ำฟิวดินที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจากกระบวนการ MF

- แทนการดำเนินการระบบของน้ำฟิวดิน
- ◆ แทนการดำเนินการระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน  $5\ \mu\text{m}$
- แทนการดำเนินการระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน  $1.2\ \mu\text{m}$
- ▲ แทนการดำเนินการระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน  $0.45\ \mu\text{m}$

จากผลการศึกษาพบว่า การนำน้ำฟิวดินมาผ่านกระบวนการบำบัดแบบ MF ผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  เบื้องต้นก่อนจากนั้นนำมาดำเนินระบบแบบออสโมซิสย้อนกลับ ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น อันเป็นผลมาจาก กระบวนการกรองแบบ MF ได้กำจัดสารแบบแขวนลอย คอลลอยด์ ตลอดจนสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดออกไปจำนวนหนึ่งและอีกจำนวนหนึ่งจะถูกกำจัดโดยกระบวนการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ ซึ่งมีผลทำให้ผลการลดลงของ Normalized flux ซึ่งมีส่วนในการลดลงของค่าฟลักซ์จะไม่ค่อยสูงมากนัก ดังแสดงในภาพที่ 4.20



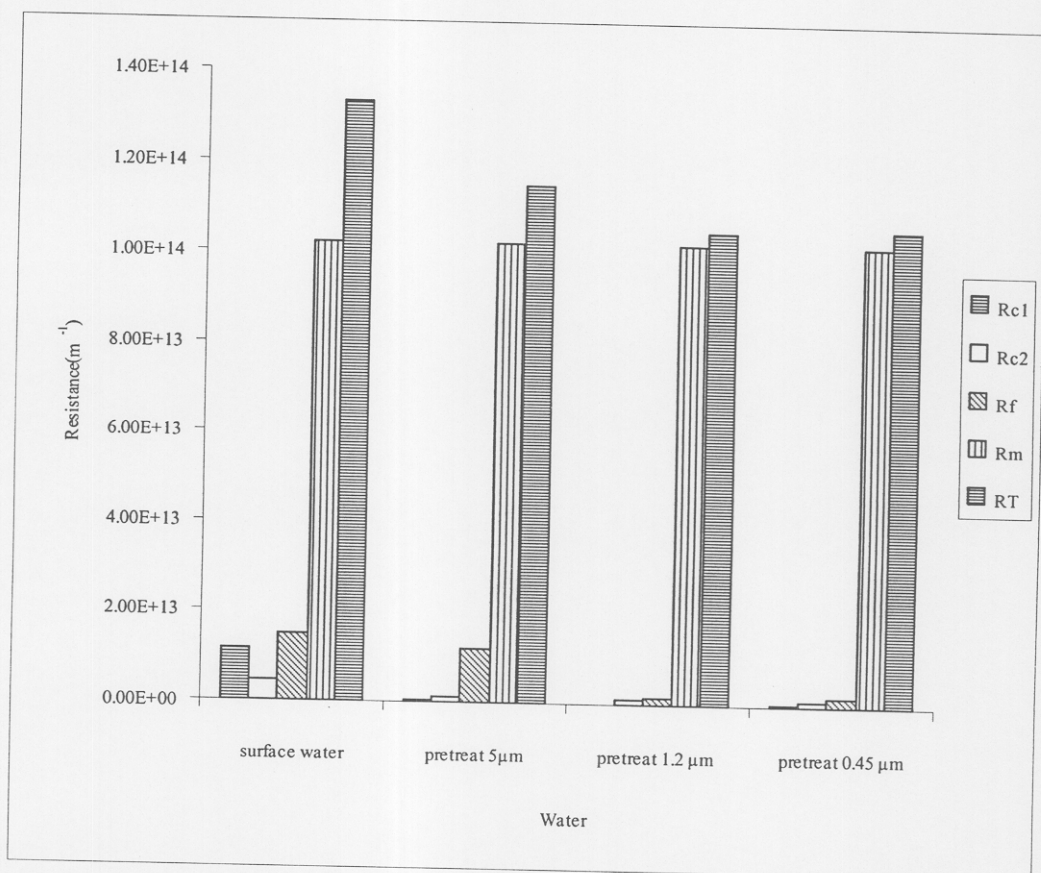
ภาพที่ 4.20 ผลค่าฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบออสโมซิสย้อนกลับของน้ำฟิวดินที่ความดัน 482.51 kPa

- แทนการดำเนินระบบของน้ำฟิวดิน
- ◆ แทนการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$
- แทนการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$
- ▲ แทนการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$

#### 4.5 ผลจากการทำความสะอาดเมมเบรนหลังจากการดำเนินระบบการกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ

ผลการวิเคราะห์ความต้านทานของการดำเนินระบบการกรองน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับที่ความดัน 482.51 kPa พบว่าค่าความต้านทานถาวรเมื่อดำเนินระบบด้วยน้ำดิบฟิวดินจะมีค่าสูงสุด เนื่องจากอนุภาคเกิดการสะสมที่บริเวณผิวเมมเบรนมากขึ้นและมีการอุดตัน

แน่นขึ้น รวมถึงส่งผลทำให้เกิดการเกาะตัวของอนุภาคในรูพรุนจึงทำให้ค่าความต้านทานถาวรสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า  $R_c$  สูงมากขึ้นด้วย ส่วนค่าความต้านทานของเมมเบรนจากการดำเนินระบบน้ำผิวดิน ที่ผ่านการบำบัดจากกระบวนการ MF อันเป็นผลมาจากอนุภาคได้ถูกกำจัดออกไปบางส่วนจากการ บำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการ MF ดังแสดงในภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 ความต้านทานการอุดตันของเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการไมโครฟิลเตรชันที่ความดัน 482.51 kPa.

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการกรองเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำผิวดินเบื้องต้นและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการกรองในการดำเนินระบบแบบอนุกรมและการดำเนินระบบแบบกะ ตลอดจนศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการกรองเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ เพื่อเปรียบเทียบน้ำผิวดินตามธรรมชาติที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น โดยสามารถสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลจากการดำเนินระบบบำบัดน้ำผิวดินเบื้องต้นผ่านกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน

##### 5.1.1.1 ผลของการดำเนินระบบแบบอนุกรม

พบว่า ค่าฟลักซ์จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 10 นาทีแรก โดยค่าฟลักซ์จะลดลงน้อยกว่าร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์เริ่มต้น หลังจากนั้นค่าฟลักซ์ก็มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเวลาผ่านไป 60 นาที ค่าฟลักซ์ลดลงเหลือน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับฟลักซ์เริ่มต้น สาเหตุที่ทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำผิวดินมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดการสะสมสารแขวนลอย และคอลลอยด์ ซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่บริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นเมมเบรนทำให้เกิดการอุดตัน ทั้งนี้ยังพบว่าการเพิ่มความดันสูงขึ้นเป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด ซึ่งที่ระดับความดัน 172.32 kPa มีค่าการกำจัดความขุ่นสูงกว่าร้อยละ 93 และมีค่าการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 29

##### 5.1.1.2 ผลของการดำเนินระบบแบบกะ

พบว่า ค่าฟลักซ์จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 5 นาทีแรก โดยค่าฟลักซ์จะลดลงน้อยกว่าร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์เริ่มต้น หลังจากนั้นค่าฟลักซ์ก็มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเวลาผ่านไป 30 นาที ค่าฟลักซ์ลดลง เหลือน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับฟลักซ์เริ่มต้นเนื่องจากอนุภาคของสารแขวนลอยและคอลลอยด์ที่อนุภาคใหญ่กว่าหรือเท่ากับขนาดรูพรุนจะตกค้างบนเมมเบรนหรือผ่านเข้าไปค้างในเมมเบรนอาจส่งผลทำให้

ขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นเริ่มเล็กลงและที่ผิวเยื่อแผ่นก็เริ่มมีการสะสมของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนและตัวถูกละลายอื่นๆที่ไม่สามารถผ่านรูพรุนไปได้ประกอบกับการเพิ่มแรงขับเคลื่อนจะทำให้เกิดการอุดตันของชั้นตัวถูกละลายที่ผิวของเยื่อแผ่นและภายในรูพรุนให้แน่นมากขึ้นขนาดรูพรุนก็จะยังมีขนาดเล็กลงสารละลายจึงผ่านไปได้น้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มสูงขึ้นกว่าร้อยละ 95 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์เท่ากับร้อยละ 30

5.1.2 ผลจากการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านกระบวนการกรองเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ

จากผลการศึกษาพบว่า สารแขวนลอย คอลลอยด์และสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดการอุดตันบนแผ่นเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ เมื่อนำน้ำผิวดินมาดำเนินผ่านระบบ เพอร์มิเอทฟลักซ์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $18.3 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  จากนั้นดำเนินระบบต่อไป เพอร์มิเอทฟลักซ์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งที่ระยะเวลา 240 นาที ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ลดลงมามีค่าเท่ากับ  $15 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละพบว่า ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ลดลงกว่าร้อยละ 18 เมื่อเปรียบเทียบกับเพอร์มิเอทฟลักซ์เริ่มต้น เมื่อนำน้ำผิวดินที่บำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการ MF ผ่านกระบวนการกรองแบบอนุกรมด้วยเมมเบรนขนาดรูพรุน  $5 \mu\text{m}$ ,  $1.2 \mu\text{m}$  และ  $0.45 \mu\text{m}$  ตามลำดับมาดำเนินผ่านระบบพบว่าเพอร์มิเอท ฟลักซ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นโดยค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ของน้ำผิวดินที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยเมมเบรนขนาดรูพรุน  $0.45 \mu\text{m}$  เท่ากับ  $21.08 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละพบว่า ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 15 เมื่อเปรียบเทียบกับเพอร์มิเอทฟลักซ์เริ่มต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการนำน้ำผิวดินมาผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ MF จะช่วยเพิ่มค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ และช่วยลดการเกิดการอุดตันบนผิวเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับได้ด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาเพิ่มเติมกับแหล่งน้ำผิวดินอื่นๆ

5.2.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงประสิทธิภาพในการกำจัดปัจจัยอื่นๆ เช่น สี แบคทีเรีย เป็นต้น

5.2.3 ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงลักษณะการอุดตันของเมมเบรนเพื่อนำไปวิเคราะห์กับโมเดล

จำลองการอุดตัน

เอกสารอ้างอิง

## เอกสารอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2550. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : หจก.สยามสเตชันเนอรี่ซ์พลาซัส.
- จันทร์ทอง สุนทรภา. 2545. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คณินทร์ บุญศาสตร์. 2546. ผลของโซเดียมไฮโปคลอไรต์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการล้างไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนในกระบวนการเอ็คคิเว็คเต็คสลัดจ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- นลินี เหลืองรุ่งรอง. 2544. กระบวนการไมโครฟิลเตรชันในการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นลินี เหลืองรุ่งรอง, ปฏิรูป ผลจันทร์ และชวลิต รัตนธรรมสกุล. 2545. “กระบวนการเมมเบรนในการผลิตน้ำประปา”, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อม. 412-421.
- พินิตดา ศรีกิตติพงศ์, บงกช โรจน์ศิริประภา และน้ำผึ้ง เทียนนิมิต. 2545. การล้างเยื่อแผ่นชนิดนาโนฟิลเตรชันที่เกิดฟาวลิงเนื่องจากสีย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มันสิน ดันทุลเวศน์. 2539. วิศวกรรมประปา เล่ม 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ดันทุลเวศน์. 2546. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. 2543. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- รัตนา จิระรัตนานนท์ และดุขฎิ อุดภาพ. 2536. “การศึกษา Fouling และ ความต้านทานต่อการไหลในระบบ Cross-flow microfiltration (CFMF)”, เอกสารการประชุมทางวิศวกรรมเคมีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3. 286 – 305.
- สุพัฒน์พงษ์ มัตราข. 2548. “Water and Wastewater Treatment for environmental engineering semester”, เอกสารประกอบการบรรยาย. อุบลราชธานี : ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- อุคร จารุรัตน์และจารุรัตน์ วรรณิสากุล. 2537. วิศวกรรมการประปา. กรุงเทพฯ : เรือนแก้วการพิมพ์.
- At kinson, S. 2002. US membrane Separation technology markets analyzed. Membrane Technology.Issue. 9: 10-12.

## เอกสารอ้างอิง) ต่อ)

- David Waite, T., and et al. 1999. Colloidal Fouling of Ultrafiltration Membranes : Impact of Aggregate Structure and Size.
- Defrise D. and Gekas V. 1988. Microfiltration Membranes and The Problem of Microbial Adhesion. A Literature Survey, Process Biochemistry. 23: 105-116,
- Feuillat, M. and Bernard, P. 1985. Influence de la filtration tangentielle des mouts et des vins sur leur composition en collides.: U.F. et Microfiltration tangentielle en Oenologic. Institute technique de la Vigne et du Vin. 225.
- Jui-Fang, L. 1996. Evaluation on the Factors Affecting Membrane Flux. Master's Thesis, Thailand: Asian Institute of Technology.
- Karimi, A.A., Vickers, J.C. and Harasick, R.F. 1999. Hollywood the Los Angeles experience Journal AWWA. 6: 90-103.
- Lin, J. 1996. Evaluation on the Factors Affecting Membrane Flux. Master's Thesis, Thailand: Asian Institute of Technology.
- Lindau, J. and Jonsson, A.S., 1994. Cleaning of ultrafiltration membranes after treatment of oily waste water. Journal of Membrane Science. 87: 71-78.
- Marcel, M. 1996. "Characterrisation of Membranes", in Basic Principle of Membrane Technology. Netherlands: University of Twente Enschede.
- Paudel, A. B. 1991. Influence of ionic strength and Cleaning of Membrane on crossflow microfiltration. Master's Thesis, Thailand: Asian Institute of Technology.
- Schafer, A.I., Fane, A.G. and Waite, T.D. 2000. Fouling effect on rejection in the membrane filtration of natural waters. Desalination.
- Wei Yuan. and Andrew, L. 1999. Humic acid fouling during microfiltration, Journal of membrane science.
- Zhang, G. and Liu, Z. 2003. Membrane Fouling and Cleaning in ultrafiltration of Wastewater from Banknote Printing Works. Journal of Membrane and Science. 235-249.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน  
และออสโมซิสย้อนกลับ

**ภาคผนวก ก**  
**ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน**  
**และออสโมซิสย้อนกลับ**

**ตารางที่ ก.1 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$**   
**ความดัน 68.93 kPa**

| Time (min) | Time (hour) | Temp (°C) | Permeate $\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane $\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|------------|-------------|-----------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5      | 2.68                                       | 1.74                                               | 9.27                                                    | 9.27  | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5      | 0.55                                       | 1.74                                               | 1.90                                                    | 9.27  | 0.21      |
| 2          | 0.03        | 26.5      | 0.36                                       | 1.74                                               | 1.24                                                    | 9.27  | 0.13      |
| 3          | 0.05        | 26.5      | 0.29                                       | 1.74                                               | 1.00                                                    | 9.27  | 0.11      |
| 4          | 0.07        | 26.5      | 0.24                                       | 1.74                                               | 0.83                                                    | 9.27  | 0.09      |
| 5          | 0.08        | 26.5      | 0.21                                       | 1.74                                               | 0.73                                                    | 9.27  | 0.08      |
| 10         | 0.17        | 26.5      | 0.14                                       | 1.74                                               | 0.48                                                    | 9.27  | 0.05      |
| 15         | 0.25        | 26.5      | 0.11                                       | 1.74                                               | 0.38                                                    | 9.27  | 0.04      |
| 30         | 0.50        | 26.5      | 0.08                                       | 1.74                                               | 0.28                                                    | 9.27  | 0.03      |
| 45         | 0.75        | 26.5      | 0.06                                       | 1.74                                               | 0.21                                                    | 9.27  | 0.02      |
| 60         | 1.00        | 26.5      | 0.05                                       | 1.74                                               | 0.17                                                    | 9.27  | 0.02      |

**ตารางที่ ก.2 ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  แล้วนำมา**  
**ดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ความดัน 68.93 kPa**

| Time (min) | Time (hour) | Temp (°C) | Permeate $\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane $\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|------------|-------------|-----------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5      | 19.23                                      | 1.74                                               | 66.52                                                   | 66.52 | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5      | 10.28                                      | 1.74                                               | 35.56                                                   | 66.52 | 0.53      |
| 2          | 0.03        | 26.5      | 4.30                                       | 1.74                                               | 14.87                                                   | 66.52 | 0.22      |
| 3          | 0.05        | 26.5      | 2.31                                       | 1.74                                               | 8.00                                                    | 66.52 | 0.12      |
| 4          | 0.07        | 26.5      | 0.96                                       | 1.74                                               | 3.32                                                    | 66.52 | 0.05      |
| 5          | 0.08        | 26.5      | 0.48                                       | 1.74                                               | 1.66                                                    | 66.52 | 0.03      |
| 10         | 0.17        | 26.5      | 0.33                                       | 1.74                                               | 1.13                                                    | 66.52 | 0.02      |
| 15         | 0.25        | 26.5      | 0.22                                       | 1.74                                               | 0.77                                                    | 66.52 | 0.01      |
| 30         | 0.50        | 26.5      | 0.13                                       | 1.74                                               | 0.46                                                    | 66.52 | 0.01      |
| 45         | 0.75        | 26.5      | 0.10                                       | 1.74                                               | 0.35                                                    | 66.52 | 0.01      |
| 60         | 1.00        | 26.5      | 0.08                                       | 1.74                                               | 0.28                                                    | 66.52 | 0.00      |

ตารางที่ ก.3 ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  แล้วนำมา  
ดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ความดัน 68.93 kPa

| Time<br>(min) | Time<br>(hour) | Temp<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate<br>$\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane<br>$\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ )<br>( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ) | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0             | 0.00           | 26.5                           | 24.30                                         | 1.74                                                  | 84.02                                                        | 84.02 | 1.00      |
| 1             | 0.02           | 26.5                           | 12.20                                         | 1.74                                                  | 42.18                                                        | 84.02 | 0.50      |
| 2             | 0.03           | 26.5                           | 5.72                                          | 1.74                                                  | 19.77                                                        | 84.02 | 0.24      |
| 3             | 0.05           | 26.5                           | 2.91                                          | 1.74                                                  | 10.07                                                        | 84.02 | 0.12      |
| 4             | 0.07           | 26.5                           | 1.74                                          | 1.74                                                  | 6.01                                                         | 84.02 | 0.07      |
| 5             | 0.08           | 26.5                           | 1.18                                          | 1.74                                                  | 4.08                                                         | 84.02 | 0.05      |
| 10            | 0.17           | 26.5                           | 0.42                                          | 1.74                                                  | 1.44                                                         | 84.02 | 0.02      |
| 15            | 0.25           | 26.5                           | 0.28                                          | 1.74                                                  | 0.95                                                         | 84.02 | 0.01      |
| 30            | 0.50           | 26.5                           | 0.16                                          | 1.74                                                  | 0.55                                                         | 84.02 | 0.01      |
| 45            | 0.75           | 26.5                           | 0.12                                          | 1.74                                                  | 0.41                                                         | 84.02 | 0.00      |
| 60            | 1.00           | 26.5                           | 0.10                                          | 1.74                                                  | 0.34                                                         | 84.02 | 0.00      |

ตารางที่ ก.4 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$   
ความดัน 103.39 kPa

| Time<br>(min) | Time<br>(hour) | Temp<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate<br>$\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane<br>$\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ )<br>( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ) | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0             | 0.00           | 26.5                           | 25.69                                         | 1.74                                                  | 88.83                                                        | 88.83 | 1.00      |
| 1             | 0.02           | 26.5                           | 14.01                                         | 1.74                                                  | 48.45                                                        | 88.83 | 0.55      |
| 2             | 0.03           | 26.5                           | 7.00                                          | 1.74                                                  | 24.19                                                        | 88.83 | 0.27      |
| 3             | 0.05           | 26.5                           | 3.81                                          | 1.74                                                  | 13.17                                                        | 88.83 | 0.15      |
| 4             | 0.07           | 26.5                           | 2.36                                          | 1.74                                                  | 8.16                                                         | 88.83 | 0.09      |
| 5             | 0.08           | 26.5                           | 1.59                                          | 1.74                                                  | 5.51                                                         | 88.83 | 0.06      |
| 10            | 0.17           | 26.5                           | 0.45                                          | 1.74                                                  | 1.57                                                         | 88.83 | 0.02      |
| 15            | 0.25           | 26.5                           | 0.28                                          | 1.74                                                  | 0.98                                                         | 88.83 | 0.01      |
| 30            | 0.50           | 26.5                           | 0.16                                          | 1.74                                                  | 0.55                                                         | 88.83 | 0.01      |
| 45            | 0.75           | 26.5                           | 0.12                                          | 1.74                                                  | 0.41                                                         | 88.83 | 0.00      |
| 60            | 1.00           | 26.5                           | 0.10                                          | 1.74                                                  | 0.35                                                         | 88.83 | 0.00      |

ตารางที่ ก.5 ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  แล้วนำมา  
ดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ความดัน 103.39 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane $\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|------------|-------------|-----------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 6.00                                       | 1.74                                               | 20.76                                                   | 20.76 | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 2.33                                       | 1.74                                               | 8.07                                                    | 20.76 | 0.39      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 1.30                                       | 1.74                                               | 4.51                                                    | 20.76 | 0.22      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 0.84                                       | 1.74                                               | 2.91                                                    | 20.76 | 0.14      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.59                                       | 1.74                                               | 2.06                                                    | 20.76 | 0.10      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.44                                       | 1.74                                               | 1.51                                                    | 20.76 | 0.07      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.17                                       | 1.74                                               | 0.58                                                    | 20.76 | 0.03      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.11                                       | 1.74                                               | 0.37                                                    | 20.76 | 0.02      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.07                                       | 1.74                                               | 0.23                                                    | 20.76 | 0.01      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.05                                       | 1.74                                               | 0.18                                                    | 20.76 | 0.01      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.04                                       | 1.74                                               | 0.15                                                    | 20.76 | 0.01      |

ตารางที่ ก.6 ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  แล้วนำมา  
ดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ความดัน 103.39 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane $\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|------------|-------------|-----------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 8.02                                       | 1.74                                               | 27.75                                                   | 27.75 | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 3.41                                       | 1.74                                               | 11.79                                                   | 27.75 | 0.42      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 1.57                                       | 1.74                                               | 5.42                                                    | 27.75 | 0.20      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 0.87                                       | 1.74                                               | 3.00                                                    | 27.75 | 0.11      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.55                                       | 1.74                                               | 1.91                                                    | 27.75 | 0.07      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.39                                       | 1.74                                               | 1.34                                                    | 27.75 | 0.05      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.17                                       | 1.74                                               | 0.58                                                    | 27.75 | 0.02      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.11                                       | 1.74                                               | 0.39                                                    | 27.75 | 0.01      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.08                                       | 1.74                                               | 0.26                                                    | 27.75 | 0.01      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.06                                       | 1.74                                               | 0.21                                                    | 27.75 | 0.01      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.06                                       | 1.74                                               | 0.21                                                    | 27.75 | 0.01      |

ตารางที่ ก.7 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$   
ความดัน 137.86 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4} (\text{m}^3)$ | Area of membrane $\times 10^{-3} (\text{m}^2)$ | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ ) | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 7.87                                   | 1.74                                           | 27.22                                               | 27.22 | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 4.15                                   | 1.74                                           | 14.36                                               | 27.22 | 0.53      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 2.31                                   | 1.74                                           | 8.01                                                | 27.22 | 0.29      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 1.47                                   | 1.74                                           | 5.09                                                | 27.22 | 0.19      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.97                                   | 1.74                                           | 3.36                                                | 27.22 | 0.12      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.68                                   | 1.74                                           | 2.34                                                | 27.22 | 0.09      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.22                                   | 1.74                                           | 0.76                                                | 27.22 | 0.03      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.14                                   | 1.74                                           | 0.49                                                | 27.22 | 0.02      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.08                                   | 1.74                                           | 0.29                                                | 27.22 | 0.01      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.06                                   | 1.74                                           | 0.22                                                | 27.22 | 0.01      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.05                                   | 1.74                                           | 0.19                                                | 27.22 | 0.01      |

ตารางที่ ก.8 ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  แล้วนำมา  
ดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ความดัน 137.86 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4} (\text{m}^3)$ | Area of membrane $\times 10^{-3} (\text{m}^2)$ | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ ) | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 5.79                                   | 1.74                                           | 20.01                                               | 20.01 | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 1.63                                   | 1.74                                           | 5.64                                                | 20.01 | 0.28      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 0.78                                   | 1.74                                           | 2.68                                                | 20.01 | 0.13      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 0.47                                   | 1.74                                           | 1.63                                                | 20.01 | 0.08      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.34                                   | 1.74                                           | 1.16                                                | 20.01 | 0.06      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.27                                   | 1.74                                           | 0.92                                                | 20.01 | 0.05      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.15                                   | 1.74                                           | 0.51                                                | 20.01 | 0.03      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.12                                   | 1.74                                           | 0.43                                                | 20.01 | 0.02      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.08                                   | 1.74                                           | 0.28                                                | 20.01 | 0.01      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.07                                   | 1.74                                           | 0.23                                                | 20.01 | 0.01      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.05                                   | 1.74                                           | 0.19                                                | 20.01 | 0.01      |

ตารางที่ ก.9 ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  แล้วนำมา  
ดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ความดัน 137.86 kPa

| Time<br>(min) | Time<br>(hour) | Temp<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate<br>$\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane<br>$\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ )<br>( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ) | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0             | 0.00           | 26.5                           | 2.02                                          | 1.74                                                  | 7.00                                                         | 7.00  | 1.00      |
| 1             | 0.02           | 26.5                           | 0.99                                          | 1.74                                                  | 3.42                                                         | 7.00  | 0.49      |
| 2             | 0.03           | 26.5                           | 0.57                                          | 1.74                                                  | 1.99                                                         | 7.00  | 0.28      |
| 3             | 0.05           | 26.5                           | 0.36                                          | 1.74                                                  | 1.23                                                         | 7.00  | 0.18      |
| 4             | 0.07           | 26.5                           | 0.25                                          | 1.74                                                  | 0.87                                                         | 7.00  | 0.12      |
| 5             | 0.08           | 26.5                           | 0.20                                          | 1.74                                                  | 0.70                                                         | 7.00  | 0.10      |
| 10            | 0.17           | 26.5                           | 0.12                                          | 1.74                                                  | 0.43                                                         | 7.00  | 0.06      |
| 15            | 0.25           | 26.5                           | 0.10                                          | 1.74                                                  | 0.35                                                         | 7.00  | 0.05      |
| 30            | 0.50           | 26.5                           | 0.07                                          | 1.74                                                  | 0.25                                                         | 7.00  | 0.04      |
| 45            | 0.75           | 26.5                           | 0.06                                          | 1.74                                                  | 0.20                                                         | 7.00  | 0.03      |
| 60            | 1.00           | 26.5                           | 0.05                                          | 1.74                                                  | 0.18                                                         | 7.00  | 0.03      |

ตารางที่ ก.10 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$   
ความดัน 172.32 kPa

| Time<br>(min) | Time<br>(hour) | Temp<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate<br>$\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane<br>$\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ )<br>( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ) | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0             | 0.00           | 26.5                           | 2.26                                          | 1.74                                                  | 7.83                                                         | 7.83  | 1.00      |
| 1             | 0.02           | 26.5                           | 1.31                                          | 1.74                                                  | 4.52                                                         | 7.83  | 0.58      |
| 2             | 0.03           | 26.5                           | 0.71                                          | 1.74                                                  | 2.44                                                         | 7.83  | 0.31      |
| 3             | 0.05           | 26.5                           | 0.44                                          | 1.74                                                  | 1.52                                                         | 7.83  | 0.19      |
| 4             | 0.07           | 26.5                           | 0.31                                          | 1.74                                                  | 1.06                                                         | 7.83  | 0.14      |
| 5             | 0.08           | 26.5                           | 0.23                                          | 1.74                                                  | 0.80                                                         | 7.83  | 0.10      |
| 10            | 0.17           | 26.5                           | 0.12                                          | 1.74                                                  | 0.42                                                         | 7.83  | 0.05      |
| 15            | 0.25           | 26.5                           | 0.09                                          | 1.74                                                  | 0.32                                                         | 7.83  | 0.04      |
| 30            | 0.50           | 26.5                           | 0.06                                          | 1.74                                                  | 0.22                                                         | 7.83  | 0.03      |
| 45            | 0.75           | 26.5                           | 0.05                                          | 1.74                                                  | 0.19                                                         | 7.83  | 0.02      |
| 60            | 1.00           | 26.5                           | 0.04                                          | 1.74                                                  | 0.15                                                         | 7.83  | 0.02      |

ตารางที่ ก.11 ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  แล้วนำมา  
ดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ความดัน 172.32 kPa

| Time<br>(min) | Time<br>(hour) | Temp<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate<br>$\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane<br>$\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ )<br>( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0             | 0.00           | 26.5                           | 1.82                                          | 1.74                                                  | 6.31                                                       | 6.31  | 1.00      |
| 1             | 0.02           | 26.5                           | 0.62                                          | 1.74                                                  | 2.16                                                       | 6.31  | 0.34      |
| 2             | 0.03           | 26.5                           | 0.35                                          | 1.74                                                  | 1.20                                                       | 6.31  | 0.19      |
| 3             | 0.05           | 26.5                           | 0.24                                          | 1.74                                                  | 0.82                                                       | 6.31  | 0.13      |
| 4             | 0.07           | 26.5                           | 0.18                                          | 1.74                                                  | 0.63                                                       | 6.31  | 0.10      |
| 5             | 0.08           | 26.5                           | 0.15                                          | 1.74                                                  | 0.52                                                       | 6.31  | 0.08      |
| 10            | 0.17           | 26.5                           | 0.09                                          | 1.74                                                  | 0.32                                                       | 6.31  | 0.05      |
| 15            | 0.25           | 26.5                           | 0.08                                          | 1.74                                                  | 0.27                                                       | 6.31  | 0.04      |
| 30            | 0.50           | 26.5                           | 0.06                                          | 1.74                                                  | 0.19                                                       | 6.31  | 0.03      |
| 45            | 0.75           | 26.5                           | 0.05                                          | 1.74                                                  | 0.16                                                       | 6.31  | 0.03      |
| 60            | 1.00           | 26.5                           | 0.04                                          | 1.74                                                  | 0.14                                                       | 6.31  | 0.02      |

ตารางที่ ก.12 ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMFขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  แล้ว  
นำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ความดัน 172.32 kPa

| Time<br>(min) | Time<br>(hour) | Temp<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate<br>$\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane<br>$\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ )<br>( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0             | 0.00           | 26.5                           | 0.82                                          | 1.74                                                  | 2.82                                                       | 2.82  | 1.00      |
| 1             | 0.02           | 26.5                           | 0.45                                          | 1.74                                                  | 1.57                                                       | 2.82  | 0.56      |
| 2             | 0.03           | 26.5                           | 0.32                                          | 1.74                                                  | 1.12                                                       | 2.82  | 0.40      |
| 3             | 0.05           | 26.5                           | 0.25                                          | 1.74                                                  | 0.87                                                       | 2.82  | 0.31      |
| 4             | 0.07           | 26.5                           | 0.21                                          | 1.74                                                  | 0.72                                                       | 2.82  | 0.26      |
| 5             | 0.08           | 26.5                           | 0.18                                          | 1.74                                                  | 0.62                                                       | 2.82  | 0.22      |
| 10            | 0.17           | 26.5                           | 0.12                                          | 1.74                                                  | 0.40                                                       | 2.82  | 0.14      |
| 15            | 0.25           | 26.5                           | 0.09                                          | 1.74                                                  | 0.31                                                       | 2.82  | 0.11      |
| 30            | 0.50           | 26.5                           | 0.07                                          | 1.74                                                  | 0.25                                                       | 2.82  | 0.09      |
| 45            | 0.75           | 26.5                           | 0.06                                          | 1.74                                                  | 0.21                                                       | 2.82  | 0.08      |
| 60            | 1.00           | 26.5                           | 0.05                                          | 1.74                                                  | 0.16                                                       | 2.82  | 0.06      |

ตารางที่ ก.13 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$   
ความดัน 68.93 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane $\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|------------|-------------|-----------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 2.68                                       | 1.74                                               | 9.26                                                    | 9.26  | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 0.55                                       | 1.74                                               | 1.91                                                    | 9.26  | 0.21      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 0.36                                       | 1.74                                               | 1.25                                                    | 9.26  | 0.14      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 0.29                                       | 1.74                                               | 0.99                                                    | 9.26  | 0.11      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.24                                       | 1.74                                               | 0.84                                                    | 9.26  | 0.09      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.21                                       | 1.74                                               | 0.74                                                    | 9.26  | 0.08      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.14                                       | 1.74                                               | 0.49                                                    | 9.26  | 0.05      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.11                                       | 1.74                                               | 0.37                                                    | 9.26  | 0.04      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.08                                       | 1.74                                               | 0.27                                                    | 9.26  | 0.03      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.06                                       | 1.74                                               | 0.21                                                    | 9.26  | 0.02      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.05                                       | 1.74                                               | 0.19                                                    | 9.26  | 0.02      |

ตารางที่ ก.14 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$   
ความดัน 68.93 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane $\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|------------|-------------|-----------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 19.23                                      | 1.74                                               | 66.52                                                   | 66.52 | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 10.28                                      | 1.74                                               | 35.56                                                   | 66.52 | 0.53      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 4.30                                       | 1.74                                               | 14.87                                                   | 66.52 | 0.22      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 2.31                                       | 1.74                                               | 8.00                                                    | 66.52 | 0.12      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.96                                       | 1.74                                               | 3.32                                                    | 66.52 | 0.05      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.48                                       | 1.74                                               | 1.66                                                    | 66.52 | 0.03      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.33                                       | 1.74                                               | 1.13                                                    | 66.52 | 0.02      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.22                                       | 1.74                                               | 0.77                                                    | 66.52 | 0.01      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.13                                       | 1.74                                               | 0.46                                                    | 66.52 | 0.01      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.10                                       | 1.74                                               | 0.35                                                    | 66.52 | 0.01      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.08                                       | 1.74                                               | 0.28                                                    | 66.52 | 0.00      |

ตารางที่ ก.15 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$   
ความดัน 68.93 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4} (\text{m}^3)$ | Area of membrane $\times 10^{-3} (\text{m}^2)$ | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ) | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 24.30                                  | 1.74                                           | 84.02                                                     | 84.02 | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 12.20                                  | 1.74                                           | 42.18                                                     | 84.02 | 0.50      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 5.72                                   | 1.74                                           | 19.77                                                     | 84.02 | 0.24      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 2.91                                   | 1.74                                           | 10.07                                                     | 84.02 | 0.12      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 1.74                                   | 1.74                                           | 6.01                                                      | 84.02 | 0.07      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 1.18                                   | 1.74                                           | 4.08                                                      | 84.02 | 0.05      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.42                                   | 1.74                                           | 1.44                                                      | 84.02 | 0.02      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.28                                   | 1.74                                           | 0.95                                                      | 84.02 | 0.01      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.16                                   | 1.74                                           | 0.55                                                      | 84.02 | 0.01      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.12                                   | 1.74                                           | 0.41                                                      | 84.02 | 0.00      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.10                                   | 1.74                                           | 0.34                                                      | 84.02 | 0.00      |

ตารางที่ ก.16 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$   
ความดัน 103.39 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4} (\text{m}^3)$ | Area of membrane $\times 10^{-3} (\text{m}^2)$ | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ) | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 25.69                                  | 1.74                                           | 88.83                                                     | 88.83 | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 14.01                                  | 1.74                                           | 48.45                                                     | 88.83 | 0.55      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 7.00                                   | 1.74                                           | 24.19                                                     | 88.83 | 0.27      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 3.81                                   | 1.74                                           | 13.17                                                     | 88.83 | 0.15      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 2.36                                   | 1.74                                           | 8.16                                                      | 88.83 | 0.09      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 1.59                                   | 1.74                                           | 5.51                                                      | 88.83 | 0.06      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.45                                   | 1.74                                           | 1.57                                                      | 88.83 | 0.02      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.28                                   | 1.74                                           | 0.98                                                      | 88.83 | 0.01      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.16                                   | 1.74                                           | 0.55                                                      | 88.83 | 0.01      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.12                                   | 1.74                                           | 0.41                                                      | 88.83 | 0.00      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.10                                   | 1.74                                           | 0.35                                                      | 88.83 | 0.00      |

ตารางที่ ก.17 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$   
ความดัน 103.39 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4} (\text{m}^3)$ | Area of membrane $\times 10^{-3} (\text{m}^2)$ | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ ) | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 1.41                                   | 1.74                                           | 4.87                                                | 4.87  | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 0.26                                   | 1.74                                           | 0.90                                                | 4.87  | 0.19      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 0.19                                   | 1.74                                           | 0.67                                                | 4.87  | 0.14      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 0.17                                   | 1.74                                           | 0.57                                                | 4.87  | 0.12      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.13                                   | 1.74                                           | 0.44                                                | 4.87  | 0.09      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.12                                   | 1.74                                           | 0.41                                                | 4.87  | 0.08      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.08                                   | 1.74                                           | 0.27                                                | 4.87  | 0.05      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.06                                   | 1.74                                           | 0.21                                                | 4.87  | 0.04      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.04                                   | 1.74                                           | 0.12                                                | 4.87  | 0.03      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.04                                   | 1.74                                           | 0.13                                                | 4.87  | 0.03      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.03                                   | 1.74                                           | 0.09                                                | 4.87  | 0.02      |

ตารางที่ ก.18 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$   
ความดัน 103.39 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4} (\text{m}^3)$ | Area of membrane $\times 10^{-3} (\text{m}^2)$ | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ ) | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 1.54                                   | 1.74                                           | 5.31                                                | 5.31  | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 0.29                                   | 1.74                                           | 1.00                                                | 5.31  | 0.19      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 0.21                                   | 1.74                                           | 0.73                                                | 5.31  | 0.14      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 0.17                                   | 1.74                                           | 0.58                                                | 5.31  | 0.11      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.14                                   | 1.74                                           | 0.48                                                | 5.31  | 0.09      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.12                                   | 1.74                                           | 0.42                                                | 5.31  | 0.08      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.08                                   | 1.74                                           | 0.27                                                | 5.31  | 0.05      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.07                                   | 1.74                                           | 0.26                                                | 5.31  | 0.05      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.04                                   | 1.74                                           | 0.14                                                | 5.31  | 0.03      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.03                                   | 1.74                                           | 0.11                                                | 5.31  | 0.02      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.04                                   | 1.74                                           | 0.13                                                | 5.31  | 0.02      |

ตารางที่ ก.19 ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$   
ความดัน 137.86 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4} (\text{m}^3)$ | Area of membrane $\times 10^{-3} (\text{m}^2)$ | Flux ( $J_v$ ) $(\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h})$ | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 4.12                                   | 1.74                                           | 14.24                                             | 14.24 | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 1.26                                   | 1.74                                           | 4.36                                              | 14.24 | 0.31      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 0.51                                   | 1.74                                           | 1.78                                              | 14.24 | 0.12      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 0.27                                   | 1.74                                           | 0.94                                              | 14.24 | 0.07      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.18                                   | 1.74                                           | 0.63                                              | 14.24 | 0.04      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.15                                   | 1.74                                           | 0.51                                              | 14.24 | 0.04      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.10                                   | 1.74                                           | 0.33                                              | 14.24 | 0.02      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.08                                   | 1.74                                           | 0.26                                              | 14.24 | 0.02      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.05                                   | 1.74                                           | 0.19                                              | 14.24 | 0.01      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.05                                   | 1.74                                           | 0.19                                              | 14.24 | 0.01      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.04                                   | 1.74                                           | 0.13                                              | 14.24 | 0.01      |

ตารางที่ ก.20 ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$   
ความดัน 137.86 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4} (\text{m}^3)$ | Area of membrane $\times 10^{-3} (\text{m}^2)$ | Flux ( $J_v$ ) $(\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h})$ | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 10.32                                  | 1.74                                           | 35.70                                             | 35.70 | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 3.68                                   | 1.74                                           | 12.74                                             | 35.70 | 0.36      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 1.68                                   | 1.74                                           | 5.82                                              | 35.70 | 0.16      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 0.82                                   | 1.74                                           | 2.82                                              | 35.70 | 0.08      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.44                                   | 1.74                                           | 1.51                                              | 35.70 | 0.04      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.26                                   | 1.74                                           | 0.91                                              | 35.70 | 0.03      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.11                                   | 1.74                                           | 0.37                                              | 35.70 | 0.01      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.08                                   | 1.74                                           | 0.28                                              | 35.70 | 0.01      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.06                                   | 1.74                                           | 0.21                                              | 35.70 | 0.01      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.05                                   | 1.74                                           | 0.16                                              | 35.70 | 0.00      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.04                                   | 1.74                                           | 0.14                                              | 35.70 | 0.00      |

ตารางที่ ก.21 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนแบบMF กระดาษรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$   
ความดัน 137.86 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4} (\text{m}^3)$ | Area of membrane $\times 10^{-3} (\text{m}^2)$ | Flux ( $J_v$ ) $(\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h})$ | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 0.53                                   | 1.74                                           | 1.84                                              | 1.84  | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 0.24                                   | 1.74                                           | 0.84                                              | 1.84  | 0.46      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 0.18                                   | 1.74                                           | 0.62                                              | 1.84  | 0.34      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 0.15                                   | 1.74                                           | 0.52                                              | 1.84  | 0.28      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.13                                   | 1.74                                           | 0.44                                              | 1.84  | 0.24      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.12                                   | 1.74                                           | 0.40                                              | 1.84  | 0.22      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.08                                   | 1.74                                           | 0.26                                              | 1.84  | 0.14      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.06                                   | 1.74                                           | 0.21                                              | 1.84  | 0.12      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.04                                   | 1.74                                           | 0.15                                              | 1.84  | 0.08      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.04                                   | 1.74                                           | 0.13                                              | 1.84  | 0.07      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.03                                   | 1.74                                           | 0.11                                              | 1.84  | 0.06      |

ตารางที่ ก.22 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกระดาษรูพรุน 5  $\mu\text{m}$   
ความดัน 172.32 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4} (\text{m}^3)$ | Area of membrane $\times 10^{-3} (\text{m}^2)$ | Flux ( $J_v$ ) $(\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h})$ | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 0.56                                   | 1.74                                           | 1.94                                              | 1.94  | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 0.25                                   | 1.74                                           | 0.85                                              | 1.94  | 0.44      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 0.18                                   | 1.74                                           | 0.62                                              | 1.94  | 0.32      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 0.16                                   | 1.74                                           | 0.55                                              | 1.94  | 0.28      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.13                                   | 1.74                                           | 0.45                                              | 1.94  | 0.23      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.12                                   | 1.74                                           | 0.40                                              | 1.94  | 0.21      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.08                                   | 1.74                                           | 0.27                                              | 1.94  | 0.14      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.06                                   | 1.74                                           | 0.22                                              | 1.94  | 0.11      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.04                                   | 1.74                                           | 0.15                                              | 1.94  | 0.07      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.03                                   | 1.74                                           | 0.12                                              | 1.94  | 0.06      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.03                                   | 1.74                                           | 0.09                                              | 1.94  | 0.05      |

ตารางที่ ก.23 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$   
ความดัน 172.32 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4} (\text{m}^3)$ | Area of membrane $\times 10^{-3} (\text{m}^2)$ | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ ) | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 0.83                                   | 1.74                                           | 2.89                                                | 2.89  | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 0.28                                   | 1.74                                           | 0.96                                                | 2.89  | 0.33      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 0.20                                   | 1.74                                           | 0.69                                                | 2.89  | 0.24      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 0.16                                   | 1.74                                           | 0.56                                                | 2.89  | 0.19      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.14                                   | 1.74                                           | 0.48                                                | 2.89  | 0.16      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.12                                   | 1.74                                           | 0.43                                                | 2.89  | 0.15      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.08                                   | 1.74                                           | 0.29                                                | 2.89  | 0.10      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.07                                   | 1.74                                           | 0.24                                                | 2.89  | 0.08      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.05                                   | 1.74                                           | 0.16                                                | 2.89  | 0.06      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.04                                   | 1.74                                           | 0.14                                                | 2.89  | 0.05      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.03                                   | 1.74                                           | 0.12                                                | 2.89  | 0.04      |

ตารางที่ ก.24 ผลการดำเนินระบบของน้ำฟิวคินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$   
ความดัน 172.32 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4} (\text{m}^3)$ | Area of membrane $\times 10^{-3} (\text{m}^2)$ | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ ) | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 0.86                                   | 1.74                                           | 2.97                                                | 2.97  | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 0.29                                   | 1.74                                           | 1.00                                                | 2.97  | 0.34      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 0.20                                   | 1.74                                           | 0.70                                                | 2.97  | 0.23      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 0.17                                   | 1.74                                           | 0.57                                                | 2.97  | 0.19      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 0.14                                   | 1.74                                           | 0.48                                                | 2.97  | 0.16      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 0.12                                   | 1.74                                           | 0.43                                                | 2.97  | 0.14      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 0.09                                   | 1.74                                           | 0.30                                                | 2.97  | 0.10      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 0.07                                   | 1.74                                           | 0.24                                                | 2.97  | 0.08      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 0.05                                   | 1.74                                           | 0.16                                                | 2.97  | 0.05      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 0.04                                   | 1.74                                           | 0.13                                                | 2.97  | 0.04      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 0.03                                   | 1.74                                           | 0.11                                                | 2.97  | 0.04      |

ตารางที่ ก.25 ผลการดำเนินระบบของน้ำสังเคราะห์ผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน  
5  $\mu\text{m}$  ความดัน 172.32 kPa

| Time<br>(min) | Time<br>(hour) | Temp<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate<br>$\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane<br>$\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ )<br>( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0             | 0.00           | 26.5                           | 19.23                                         | 1.74                                                  | 66.52                                                      | 66.52 | 1.00      |
| 1             | 0.02           | 26.5                           | 10.28                                         | 1.74                                                  | 35.56                                                      | 66.52 | 0.53      |
| 2             | 0.03           | 26.5                           | 4.30                                          | 1.74                                                  | 14.87                                                      | 66.52 | 0.22      |
| 3             | 0.05           | 26.5                           | 2.31                                          | 1.74                                                  | 8.00                                                       | 66.52 | 0.12      |
| 4             | 0.07           | 26.5                           | 0.96                                          | 1.74                                                  | 3.32                                                       | 66.52 | 0.05      |
| 5             | 0.08           | 26.5                           | 0.48                                          | 1.74                                                  | 1.66                                                       | 66.52 | 0.03      |
| 10            | 0.17           | 26.5                           | 0.33                                          | 1.74                                                  | 1.13                                                       | 66.52 | 0.02      |
| 15            | 0.25           | 26.5                           | 0.22                                          | 1.74                                                  | 0.77                                                       | 66.52 | 0.01      |
| 30            | 0.50           | 26.5                           | 0.13                                          | 1.74                                                  | 0.46                                                       | 66.52 | 0.01      |
| 45            | 0.75           | 26.5                           | 0.10                                          | 1.74                                                  | 0.35                                                       | 66.52 | 0.01      |
| 60            | 1.00           | 26.5                           | 0.08                                          | 1.74                                                  | 0.28                                                       | 66.52 | 0.00      |

ตารางที่ ก.26 ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  แล้วนำมา  
ดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ความดัน 172.32 kPa

| Time<br>(min) | Time<br>(hour) | Temp<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate<br>$\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane<br>$\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ )<br>( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) | $J_0$ | $J_v/J_0$ |
|---------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0             | 0.00           | 26.5                           | 9.98                                          | 1.74                                                  | 34.51                                                      | 34.51 | 1.00      |
| 1             | 0.02           | 26.5                           | 5.53                                          | 1.74                                                  | 19.13                                                      | 34.51 | 0.55      |
| 2             | 0.03           | 26.5                           | 3.66                                          | 1.74                                                  | 12.67                                                      | 34.51 | 0.37      |
| 3             | 0.05           | 26.5                           | 2.96                                          | 1.74                                                  | 10.23                                                      | 34.51 | 0.30      |
| 4             | 0.07           | 26.5                           | 2.49                                          | 1.74                                                  | 8.59                                                       | 34.51 | 0.25      |
| 5             | 0.08           | 26.5                           | 2.13                                          | 1.74                                                  | 7.37                                                       | 34.51 | 0.21      |
| 10            | 0.17           | 26.5                           | 1.35                                          | 1.74                                                  | 4.66                                                       | 34.51 | 0.14      |
| 15            | 0.25           | 26.5                           | 1.06                                          | 1.74                                                  | 3.67                                                       | 34.51 | 0.11      |
| 30            | 0.50           | 26.5                           | 0.87                                          | 1.74                                                  | 3.00                                                       | 34.51 | 0.09      |
| 45            | 0.75           | 26.5                           | 0.58                                          | 1.74                                                  | 1.99                                                       | 34.51 | 0.06      |
| 60            | 1.00           | 26.5                           | 0.50                                          | 1.74                                                  | 1.72                                                       | 34.51 | 0.05      |

ตารางที่ ก.27 ผลการดำเนินระบบแบบอนุกรมกรองผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  แล้ว  
นำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ความดัน 172.32 kPa

| Time (min) | Time (hour) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Permeate $\times 10^{-4}$ ( $\text{m}^3$ ) | Area of membrane $\times 10^{-3}$ ( $\text{m}^2$ ) | Flux ( $J_v$ ) ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) | $J_o$ | $J_v/J_o$ |
|------------|-------------|-----------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|-----------|
| 0          | 0.00        | 26.5                        | 9.50                                       | 1.74                                               | 32.86                                                   | 32.86 | 1.00      |
| 1          | 0.02        | 26.5                        | 8.77                                       | 1.74                                               | 30.32                                                   | 32.86 | 0.92      |
| 2          | 0.03        | 26.5                        | 8.35                                       | 1.74                                               | 28.87                                                   | 32.86 | 0.88      |
| 3          | 0.05        | 26.5                        | 8.03                                       | 1.74                                               | 27.75                                                   | 32.86 | 0.84      |
| 4          | 0.07        | 26.5                        | 7.88                                       | 1.74                                               | 27.26                                                   | 32.86 | 0.83      |
| 5          | 0.08        | 26.5                        | 7.47                                       | 1.74                                               | 25.83                                                   | 32.86 | 0.79      |
| 10         | 0.17        | 26.5                        | 6.26                                       | 1.74                                               | 21.64                                                   | 32.86 | 0.66      |
| 15         | 0.25        | 26.5                        | 5.52                                       | 1.74                                               | 19.09                                                   | 32.86 | 0.58      |
| 30         | 0.50        | 26.5                        | 4.98                                       | 1.74                                               | 17.24                                                   | 32.86 | 0.52      |
| 45         | 0.75        | 26.5                        | 4.15                                       | 1.74                                               | 14.34                                                   | 32.86 | 0.44      |
| 60         | 1.00        | 26.5                        | 3.73                                       | 1.74                                               | 12.88                                                   | 32.86 | 0.39      |

ตารางที่ ก.28 ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแบบ RO ที่ความดัน 482.51 kPa.

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Pave. (psi) | Permeate $\times 10^2$ (L) | Qp (L/h) | Flux ( $\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) |
|------------|-----------------------------|-------------|----------------------------|----------|---------------------------------------------|
| 0          | 26.2                        | 70          | 0.43                       | 0.26     | 18.30                                       |
| 10         | 26.2                        | 70          | 0.42                       | 0.25     | 17.91                                       |
| 20         | 26.2                        | 70          | 0.41                       | 0.25     | 17.57                                       |
| 30         | 26.3                        | 70          | 0.41                       | 0.24     | 17.44                                       |
| 40         | 26.1                        | 70          | 0.39                       | 0.24     | 16.84                                       |
| 50         | 26.1                        | 70          | 0.39                       | 0.23     | 16.59                                       |
| 60         | 26.6                        | 70          | 0.38                       | 0.23     | 16.33                                       |
| 70         | 26.6                        | 70          | 0.38                       | 0.23     | 16.11                                       |
| 80         | 26.6                        | 70          | 0.37                       | 0.22     | 15.94                                       |
| 90         | 26.6                        | 70          | 0.37                       | 0.22     | 15.99                                       |
| 100        | 26.6                        | 70          | 0.37                       | 0.22     | 15.94                                       |
| 110        | 26.6                        | 70          | 0.37                       | 0.22     | 15.73                                       |
| 120        | 26.6                        | 70          | 0.37                       | 0.22     | 15.69                                       |
| 135        | 26.6                        | 70          | 0.37                       | 0.22     | 15.64                                       |
| 150        | 26.6                        | 70          | 0.36                       | 0.22     | 15.43                                       |
| 165        | 26.6                        | 70          | 0.36                       | 0.21     | 15.26                                       |
| 180        | 26.6                        | 70          | 0.35                       | 0.21     | 15.17                                       |
| 195        | 26.6                        | 70          | 0.35                       | 0.21     | 15.09                                       |
| 210        | 26.6                        | 70          | 0.35                       | 0.21     | 15.13                                       |
| 225        | 26.6                        | 70          | 0.35                       | 0.21     | 15.04                                       |
| 240        | 26.6                        | 70          | 0.35                       | 0.21     | 15.00                                       |

ตารางที่ ก.29 ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยเมมเบรน MF ขนาด  
รูพรุน 5  $\mu\text{m}$  แล้วนำมากรองผ่านเมมเบรนแบบ RO ที่ความดัน 482.51 kPa.

| Time<br>(min) | Temp<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Pave.<br>(psi) | Permeate $\times 10^2$<br>(L) | Qp (L/h) | Flux<br>( $\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) |
|---------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|----------|------------------------------------------------|
| 0             | 26.2                           | 70             | 0.43                          | 0.26     | 18.34                                          |
| 10            | 26.2                           | 70             | 0.43                          | 0.26     | 18.26                                          |
| 20            | 26.2                           | 70             | 0.43                          | 0.26     | 18.21                                          |
| 30            | 26.3                           | 70             | 0.42                          | 0.25     | 18.17                                          |
| 40            | 26.1                           | 70             | 0.42                          | 0.25     | 18.09                                          |
| 50            | 26.1                           | 70             | 0.42                          | 0.25     | 17.91                                          |
| 60            | 26.6                           | 70             | 0.42                          | 0.25     | 17.79                                          |
| 70            | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.25     | 17.66                                          |
| 80            | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.25     | 17.53                                          |
| 90            | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.25     | 17.53                                          |
| 100           | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.25     | 17.66                                          |
| 110           | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.25     | 17.61                                          |
| 120           | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.25     | 17.53                                          |
| 135           | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.25     | 17.61                                          |
| 150           | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.25     | 17.49                                          |
| 165           | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.25     | 17.53                                          |
| 180           | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.25     | 17.57                                          |
| 195           | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.25     | 17.53                                          |
| 210           | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.24     | 17.44                                          |
| 225           | 26.6                           | 70             | 0.41                          | 0.24     | 17.36                                          |
| 240           | 26.6                           | 70             | 0.40                          | 0.24     | 17.27                                          |

ตารางที่ ก.30 ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยเมมเบรน MF ขนาด  
รูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  แล้วนำมากรองผ่านเมมเบรนแบบ RO ที่ความดัน 482.51 kPa.

| Time<br>(min) | Temp<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Pave<br>(psi). | Permeate $\times 10^2$<br>(L) | Qp (L/h) | Flux<br>( $\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) |
|---------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|----------|------------------------------------------------|
| 0             | 26.2                           | 70             | 0.50                          | 0.30     | 21.43                                          |
| 10            | 26.2                           | 70             | 0.49                          | 0.29     | 20.87                                          |
| 20            | 26.2                           | 70             | 0.48                          | 0.29     | 20.49                                          |
| 30            | 26.3                           | 70             | 0.47                          | 0.28     | 20.31                                          |
| 40            | 26.1                           | 70             | 0.46                          | 0.28     | 19.71                                          |
| 50            | 26.1                           | 70             | 0.46                          | 0.27     | 19.50                                          |
| 60            | 26.6                           | 70             | 0.46                          | 0.28     | 19.71                                          |
| 70            | 26.6                           | 70             | 0.46                          | 0.28     | 19.67                                          |
| 80            | 26.6                           | 70             | 0.45                          | 0.27     | 19.07                                          |
| 90            | 26.6                           | 70             | 0.44                          | 0.26     | 18.86                                          |
| 100           | 26.6                           | 70             | 0.44                          | 0.27     | 19.03                                          |
| 110           | 26.6                           | 70             | 0.44                          | 0.26     | 18.86                                          |
| 120           | 26.6                           | 70             | 0.43                          | 0.26     | 18.60                                          |
| 135           | 26.6                           | 70             | 0.44                          | 0.26     | 18.64                                          |
| 150           | 26.6                           | 70             | 0.43                          | 0.26     | 18.56                                          |
| 165           | 26.6                           | 70             | 0.43                          | 0.26     | 18.34                                          |
| 180           | 26.6                           | 70             | 0.43                          | 0.26     | 18.39                                          |
| 195           | 26.6                           | 70             | 0.43                          | 0.26     | 18.43                                          |
| 210           | 26.6                           | 70             | 0.43                          | 0.26     | 18.34                                          |
| 225           | 26.6                           | 70             | 0.43                          | 0.26     | 18.21                                          |
| 240           | 26.6                           | 70             | 0.42                          | 0.25     | 18.17                                          |

ตารางที่ ก.31 ผลการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยเมมเบรน MF ขนาด  
รูพรุน  $0.45\ \mu\text{m}$  แล้วนำมากรองผ่านเมมเบรนแบบ RO ที่ความดัน  $482.51\ \text{kPa}$ .

| Time<br>(min) | Temp<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Pave.<br>(psi) | Permeate $\times 10^2$<br>(L) | Qp (L/h) | Flux<br>( $\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) |
|---------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|----------|------------------------------------------------|
| 0             | 26.2                           | 70             | 0.49                          | 0.30     | 21.09                                          |
| 10            | 26.2                           | 70             | 0.48                          | 0.29     | 20.74                                          |
| 20            | 26.2                           | 70             | 0.47                          | 0.28     | 20.31                                          |
| 30            | 26.3                           | 70             | 0.47                          | 0.28     | 20.01                                          |
| 40            | 26.1                           | 70             | 0.47                          | 0.28     | 20.14                                          |
| 50            | 26.1                           | 70             | 0.46                          | 0.28     | 19.80                                          |
| 60            | 26.6                           | 70             | 0.47                          | 0.28     | 20.14                                          |
| 70            | 26.6                           | 70             | 0.47                          | 0.28     | 20.14                                          |
| 80            | 26.6                           | 70             | 0.46                          | 0.27     | 19.54                                          |
| 90            | 26.6                           | 70             | 0.45                          | 0.27     | 19.46                                          |
| 100           | 26.6                           | 70             | 0.45                          | 0.27     | 19.33                                          |
| 110           | 26.6                           | 70             | 0.45                          | 0.27     | 19.16                                          |
| 120           | 26.6                           | 70             | 0.45                          | 0.27     | 19.24                                          |
| 135           | 26.6                           | 70             | 0.45                          | 0.27     | 19.11                                          |
| 150           | 26.6                           | 70             | 0.45                          | 0.27     | 19.16                                          |
| 165           | 26.6                           | 70             | 0.45                          | 0.27     | 19.11                                          |
| 180           | 26.6                           | 70             | 0.44                          | 0.27     | 19.03                                          |
| 195           | 26.6                           | 70             | 0.44                          | 0.27     | 18.94                                          |
| 210           | 26.6                           | 70             | 0.44                          | 0.26     | 18.86                                          |
| 225           | 26.6                           | 70             | 0.44                          | 0.27     | 18.94                                          |
| 240           | 26.6                           | 70             | 0.44                          | 0.27     | 18.99                                          |

ภาคผนวก ข

ผลการกำจัดความชื้นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด  
เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน  
และออสโมซิสย้อนกลับ

## ภาคผนวก ข

**ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด  
เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน  
และออสโมซิสย้อนกลับ**

**ตารางที่ ข.1** ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดิน  
ผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  ความดัน 68.93 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Turbidity (NTU) | Rejection Turbidity (%) | UV ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection UV (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------|
| 0          | 25.6                        | 4.85            | 0.00                    | 0.15                    | 0.00             | 4.42       | 0.00              |
| 10         | 25.6                        | 2.68            | 44.82                   | 0.14                    | 2.70             | 3.92       | 11.31             |
| 20         | 25.6                        | 2.14            | 55.98                   | 0.14                    | 4.73             | 3.90       | 11.76             |
| 30         | 25.6                        | 1.64            | 66.16                   | 0.14                    | 6.76             | 3.81       | 13.80             |
| 40         | 25.6                        | 1.22            | 74.93                   | 0.13                    | 11.49            | 3.80       | 14.03             |
| 50         | 25.6                        | 1.18            | 75.71                   | 0.12                    | 16.22            | 3.78       | 14.48             |
| 60         | 25.6                        | 1.16            | 76.00                   | 0.12                    | 16.89            | 3.76       | 14.93             |

**ตารางที่ ข.2** ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่าน  
เมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรน MF  
ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ความดัน 68.93 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Turbidity (NTU) | Rejection Turbidity (%) | UV ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection UV (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------|
| 0          | 25.8                        | 4.85            | 0.00                    | 0.15                    | 0.00             | 4.42       | 0.00              |
| 10         | 25.8                        | 1.10            | 77.28                   | 0.12                    | 18.24            | 3.73       | 15.61             |
| 20         | 25.8                        | 0.91            | 81.22                   | 0.12                    | 19.59            | 3.66       | 17.19             |
| 30         | 25.8                        | 0.89            | 81.65                   | 0.12                    | 20.27            | 3.64       | 17.65             |
| 40         | 25.8                        | 0.87            | 82.06                   | 0.12                    | 20.95            | 3.59       | 18.78             |
| 50         | 25.8                        | 0.86            | 82.27                   | 0.12                    | 20.95            | 3.54       | 19.91             |
| 60         | 25.8                        | 0.85            | 82.47                   | 0.12                    | 21.62            | 3.52       | 20.36             |

**ตารางที่ ข.3** ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่าน  
เมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรน  
MF ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ความดัน 68.93 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Turbidity (NTU) | Rejection Turbidity (%) | UV ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection UV (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------|
| 0          | 25.7                        | 4.85            | 0.00                    | 0.15                    | 0.00             | 4.42       | 0.00              |
| 10         | 25.7                        | 0.79            | 83.71                   | 0.12                    | 21.62            | 3.50       | 20.81             |
| 20         | 25.7                        | 0.76            | 84.27                   | 0.12                    | 22.30            | 3.42       | 22.62             |
| 30         | 25.7                        | 0.76            | 84.37                   | 0.11                    | 23.65            | 3.33       | 24.66             |
| 40         | 25.7                        | 0.75            | 84.45                   | 0.11                    | 24.32            | 3.31       | 25.11             |
| 50         | 25.7                        | 0.75            | 84.56                   | 0.11                    | 25.68            | 3.27       | 26.02             |
| 60         | 25.7                        | 0.74            | 84.70                   | 0.11                    | 26.35            | 3.27       | 26.02             |

**ตารางที่ ข.4** ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดิน  
ผ่าน เมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  ความดัน 103.39 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Turbidity (NTU) | Rejection Turbidity (%) | UV ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection UV (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------|
| 0          | 4.850                       | 4.85            | 0.00                    | 0.15                    | 0.00             | 4.42       | 0.00              |
| 10         | 2.413                       | 2.41            | 50.25                   | 0.14                    | 4.73             | 3.91       | 11.54             |
| 20         | 2.011                       | 2.01            | 58.54                   | 0.14                    | 5.41             | 3.92       | 11.43             |
| 30         | 1.532                       | 1.53            | 68.41                   | 0.14                    | 8.11             | 3.83       | 13.35             |
| 40         | 1.198                       | 1.20            | 75.30                   | 0.13                    | 14.19            | 3.79       | 14.25             |
| 50         | 1.110                       | 1.11            | 77.11                   | 0.13                    | 14.86            | 3.66       | 17.19             |
| 60         | 1.109                       | 1.11            | 77.13                   | 0.12                    | 18.24            | 3.54       | 19.91             |

**ตารางที่ ข.5** ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่าน  
เมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF  
ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ความดัน 103.39 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Turbidity (NTU) | Rejection Turbidity (%) | UV ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection UV (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------|
| 0          | 25.7                        | 4.85            | 0.00                    | 0.15                    | 0.00             | 4.42       | 0.00              |
| 10         | 25.7                        | 1.10            | 77.26                   | 0.12                    | 16.89            | 3.72       | 15.84             |
| 20         | 25.7                        | 0.91            | 81.32                   | 0.12                    | 20.95            | 3.67       | 16.97             |
| 30         | 25.7                        | 0.89            | 81.73                   | 0.12                    | 20.27            | 3.65       | 17.42             |
| 40         | 25.7                        | 0.88            | 81.84                   | 0.12                    | 21.62            | 3.58       | 19.00             |
| 50         | 25.7                        | 0.86            | 82.29                   | 0.12                    | 21.62            | 3.54       | 19.91             |
| 60         | 25.7                        | 0.85            | 82.54                   | 0.11                    | 22.97            | 3.52       | 20.36             |

**ตารางที่ ข.6** ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่าน  
เมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรนMF  
ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ความดัน 103.39 kPa

| Time<br>(min) | Temp<br>(°C ) | Turbidity<br>(NTU) | Rejection<br>Turbidity (%) | UV<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection<br>UV (%) | TOC<br>(mg/l) | Rejection<br>TOC (%) |
|---------------|---------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|---------------|----------------------|
| 0             | 25.7          | 4.85               | 0.00                       | 0.15                       | 0.00                | 4.42          | 0.00                 |
| 10            | 25.7          | 0.68               | 85.96                      | 0.11                       | 22.97               | 3.48          | 21.27                |
| 20            | 25.7          | 0.67               | 86.29                      | 0.11                       | 22.97               | 3.44          | 22.17                |
| 30            | 25.7          | 0.64               | 86.74                      | 0.11                       | 24.32               | 3.29          | 25.57                |
| 40            | 25.7          | 0.61               | 87.38                      | 0.11                       | 25.00               | 3.27          | 26.02                |
| 50            | 25.7          | 0.60               | 87.71                      | 0.11                       | 26.35               | 3.25          | 26.47                |
| 60            | 25.7          | 0.58               | 88.00                      | 0.11                       | 27.03               | 3.24          | 26.70                |

**ตารางที่ ข.7** ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดิน  
ผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  ความดัน 137.86 kPa

| Time<br>(min) | Temp<br>(°C ) | Turbidity<br>(NTU) | Rejection<br>Turbidity (%) | UV<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection<br>UV (%) | TOC<br>(mg/l) | Rejection<br>TOC (%) |
|---------------|---------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|---------------|----------------------|
| 0             | 25.6          | 4.85               | 0.00                       | 0.15                       | 0.00                | 4.42          | 0.00                 |
| 10            | 25.6          | 2.42               | 50.10                      | 0.14                       | 4.73                | 3.86          | 12.67                |
| 20            | 25.6          | 2.00               | 58.72                      | 0.14                       | 6.08                | 3.82          | 13.57                |
| 30            | 25.6          | 1.37               | 71.79                      | 0.14                       | 7.43                | 3.77          | 14.71                |
| 40            | 25.6          | 1.20               | 75.34                      | 0.13                       | 12.84               | 3.72          | 15.84                |
| 50            | 25.6          | 1.10               | 77.26                      | 0.12                       | 16.89               | 3.61          | 18.33                |
| 60            | 25.6          | 1.10               | 77.30                      | 0.12                       | 18.92               | 3.51          | 20.59                |

**ตารางที่ ข.8** ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่าน  
เมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรน  
ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ความดัน 137.86 kPa

| Time<br>(min) | Temp<br>(°C ) | Turbidity<br>(NTU) | Rejection<br>Turbidity (%) | UV<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection<br>UV (%) | TOC<br>(mg/l) | Rejection<br>TOC (%) |
|---------------|---------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|---------------|----------------------|
| 0             | 25.5          | 4.85               | 0.00                       | 0.15                       | 0.00                | 4.42          | 0.00                 |
| 10            | 25.5          | 1.09               | 77.48                      | 0.12                       | 20.27               | 3.71          | 16.02                |
| 20            | 25.5          | 0.93               | 80.80                      | 0.12                       | 21.62               | 3.59          | 18.71                |
| 30            | 25.5          | 0.82               | 83.07                      | 0.11                       | 22.97               | 3.48          | 21.31                |
| 40            | 25.5          | 0.81               | 83.38                      | 0.11                       | 22.97               | 3.41          | 22.85                |
| 50            | 25.5          | 0.79               | 83.67                      | 0.11                       | 23.65               | 3.32          | 24.89                |
| 60            | 25.5          | 0.78               | 83.84                      | 0.11                       | 24.32               | 3.32          | 24.93                |

**ตารางที่ ข.9** ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่าน  
เมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรน  
MF ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ความดัน 137.86 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Turbidity (NTU) | Rejection Turbidity (%) | UV ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection UV (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------|
| 0          | 25.6                        | 4.85            | 0.00                    | 0.15                    | 0.00             | 4.42       | 0.00              |
| 10         | 25.6                        | 0.64            | 86.82                   | 0.11                    | 25.68            | 3.31       | 25.11             |
| 20         | 25.6                        | 0.57            | 88.35                   | 0.11                    | 27.03            | 3.29       | 25.57             |
| 30         | 25.6                        | 0.51            | 89.51                   | 0.11                    | 27.03            | 3.27       | 26.02             |
| 40         | 25.6                        | 0.49            | 89.92                   | 0.11                    | 27.70            | 3.24       | 26.70             |
| 50         | 25.6                        | 0.44            | 90.99                   | 0.11                    | 28.38            | 3.23       | 26.92             |
| 60         | 25.6                        | 0.43            | 91.11                   | 0.11                    | 28.38            | 3.19       | 27.83             |

**ตารางที่ ข.10** ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดิน  
ผ่านเมมเบรนMFแบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  ความดัน 172.32 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Turbidity (NTU) | Rejection Turbidity (%) | UV ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection UV (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------|
| 0          | 26                          | 4.85            | 0.00                    | 0.15                    | 0.00             | 4.42       | 0.00              |
| 10         | 26                          | 0.58            | 87.96                   | 0.14                    | 5.41             | 3.84       | 13.12             |
| 20         | 26                          | 0.56            | 88.41                   | 0.14                    | 7.43             | 3.80       | 14.03             |
| 30         | 26                          | 0.49            | 89.84                   | 0.14                    | 7.43             | 3.69       | 16.52             |
| 40         | 26                          | 0.42            | 91.34                   | 0.13                    | 11.49            | 3.63       | 17.87             |
| 50         | 26                          | 0.40            | 91.86                   | 0.13                    | 14.19            | 3.61       | 18.33             |
| 60         | 26                          | 0.38            | 92.12                   | 0.12                    | 17.57            | 3.52       | 20.36             |

**ตารางที่ ข.11** ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่านเมม  
เบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรน MF  
ขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ความดัน 172.32 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Turbidity (NTU) | Rejection Turbidity (%) | UV ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection UV (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------|
| 0          | 26.5                        | 4.85            | 0.00                    | 0.15                    | 0.00             | 4.42       | 0.00              |
| 10         | 26.5                        | 0.56            | 88.39                   | 0.12                    | 20.95            | 3.61       | 18.24             |
| 20         | 26.5                        | 0.52            | 89.24                   | 0.12                    | 22.30            | 3.51       | 20.68             |
| 30         | 26.5                        | 0.47            | 90.23                   | 0.11                    | 23.65            | 3.44       | 22.17             |
| 40         | 26.5                        | 0.40            | 91.67                   | 0.11                    | 24.32            | 3.38       | 23.53             |
| 50         | 26.5                        | 0.39            | 91.98                   | 0.11                    | 25.00            | 3.30       | 25.38             |
| 60         | 26.5                        | 0.37            | 92.47                   | 0.11                    | 25.68            | 3.22       | 27.13             |

ตารางที่ ข.12 ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบกรองผ่านเมมเบรนMF แบบอนุกรมขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  แล้วนำมาดำเนินระบบผ่านเมมเบรน MF ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  ความดัน 172.32 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Turbidity (NTU) | Rejection Turbidity (%) | UV ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection UV (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------|
| 0          | 26.5                        | 4.85            | 0.00                    | 0.15                    | 0.00             | 4.42       | 0.00              |
| 10         | 26.5                        | 0.54            | 88.85                   | 0.11                    | 25.68            | 3.29       | 25.57             |
| 20         | 26.5                        | 0.46            | 90.45                   | 0.11                    | 25.68            | 3.29       | 25.57             |
| 30         | 26.5                        | 0.41            | 91.59                   | 0.11                    | 27.03            | 3.26       | 26.24             |
| 40         | 26.5                        | 0.38            | 92.23                   | 0.11                    | 27.70            | 3.23       | 26.92             |
| 50         | 26.5                        | 0.35            | 92.82                   | 0.11                    | 28.38            | 3.18       | 28.05             |
| 60         | 26.5                        | 0.31            | 93.57                   | 0.11                    | 29.05            | 3.12       | 29.41             |

ตารางที่ ข.13 ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนMF แบบกะขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$  ความดัน 172.32 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Turbidity (NTU) | Rejection Turbidity (%) | UV ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection UV (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------|
| 0          | 26                          | 4.85            | 0.00                    | 0.15                    | 0.00             | 4.42       | 0.00              |
| 10         | 26                          | 2.68            | 44.82                   | 0.14                    | 2.70             | 3.92       | 11.31             |
| 20         | 26                          | 2.14            | 55.98                   | 0.14                    | 4.73             | 3.90       | 11.76             |
| 30         | 26                          | 1.64            | 66.16                   | 0.14                    | 6.76             | 3.81       | 13.80             |
| 40         | 26                          | 1.22            | 74.93                   | 0.13                    | 11.49            | 3.80       | 14.03             |
| 50         | 26                          | 1.18            | 75.71                   | 0.12                    | 16.22            | 3.78       | 14.48             |
| 60         | 26                          | 1.16            | 76.00                   | 0.12                    | 16.89            | 3.76       | 14.93             |

ตารางที่ ข.14 ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนMFแบบกะขนาดรูพรุน 1.2  $\mu\text{m}$  ความดัน 172.32 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Turbidity (NTU) | Rejection Turbidity (%) | UV ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection UV (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------|
| 0          | 26.5                        | 4.85            | 0.00                    | 0.15                    | 0.00             | 4.42       | 0.00              |
| 10         | 26.5                        | 1.94            | 60.00                   | 0.13                    | 14.56            | 3.73       | 15.61             |
| 20         | 26.5                        | 1.92            | 60.41                   | 0.12                    | 16.17            | 3.66       | 17.19             |
| 30         | 26.5                        | 1.31            | 72.99                   | 0.12                    | 16.62            | 3.64       | 17.65             |
| 40         | 26.5                        | 1.29            | 73.40                   | 0.12                    | 17.77            | 3.59       | 18.78             |
| 50         | 26.5                        | 1.21            | 75.05                   | 0.12                    | 18.91            | 3.54       | 19.91             |
| 60         | 26.5                        | 1.13            | 76.70                   | 0.12                    | 19.37            | 3.52       | 20.36             |

ตารางที่ ข.15 ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนMFแบบกะขนาครูปรู้น 0.45  $\mu\text{m}$  ความดัน 172.32 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Turbidity (NTU) | Rejection Turbidity (%) | UV ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Rejection UV (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------|-------------------|
| 0          | 26.5                        | 4.85            | 0.00                    | 0.15                    | 0.00             | 4.42       | 0.00              |
| 10         | 26.5                        | 1.91            | 60.56                   | 0.12                    | 19.83            | 3.50       | 20.81             |
| 20         | 26.5                        | 0.89            | 81.57                   | 0.12                    | 21.66            | 3.42       | 22.62             |
| 30         | 26.5                        | 0.88            | 81.84                   | 0.11                    | 23.73            | 3.33       | 24.66             |
| 40         | 26.5                        | 0.86            | 82.23                   | 0.11                    | 24.18            | 3.31       | 25.11             |
| 50         | 26.5                        | 0.85            | 82.45                   | 0.11                    | 25.10            | 3.27       | 26.02             |
| 60         | 26.5                        | 0.84            | 82.68                   | 0.11                    | 25.10            | 3.27       | 26.02             |

ตารางที่ ข.16 ผลการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับ ที่ความดัน 482.51 kPa

| Time (min) | Temp ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Tubidity) (NTU) | Rejection (%) | TOC (mg/l) | Rejection TOC (%) |
|------------|-----------------------------|-----------------|---------------|------------|-------------------|
| 0          | 26.6                        | 4.85            | 0.00          | 0.15       | 0.00              |
| 30         | 26.6                        | 2.41            | 50.25         | 0.14       | 4.73              |
| 60         | 26.6                        | 2.01            | 58.54         | 0.14       | 5.41              |
| 90         | 26.6                        | 1.53            | 68.41         | 0.14       | 8.11              |
| 120        | 26.6                        | 1.20            | 75.30         | 0.13       | 14.19             |
| 150        | 26.6                        | 1.11            | 77.11         | 0.13       | 14.86             |
| 180        | 26.6                        | 1.11            | 77.13         | 0.12       | 18.24             |
| 240        | 26.6                        | 4.85            | 0.00          | 0.15       | 0.00              |

**ภาคผนวก ก**

**ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของน้ำดิบผิวดินทั่วไปและค่าความต้านทาน  
ของเยื่อแผ่นเมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน  
และออสโมซิสย้อนกลับ**

## ภาคผนวก ก

ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของน้ำดิบผิวดินทั่วไปและค่าความต้านทาน  
ของเยื่อแผ่นเมื่อดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชัน  
และออสโมซิสย้อนกลับ

ตารางที่ ก.1 คุณภาพน้ำผิวดินทั่วไป

| คุณภาพ                     | ขนาด | คุณภาพ                | ขนาด |
|----------------------------|------|-----------------------|------|
| ทางกายภาพ :                |      |                       |      |
| ความขุ่น , NTU             | 50   | สี, หน่วยสี           | 50   |
| ตะกอนละลายน้ำ, มก/ลิตร TDS | 150  |                       |      |
| ทางเคมี :                  |      |                       |      |
| ไนโตรเจน , มก/ลิตร N       | 3    | ฟอสฟอรัส, มก/ลิตร     | 0.05 |
| ความกระด้าง , มก/ลิตร      | 90   | ความเป็นด่าง, มก/ลิตร | 100  |
| PH                         | 7.5  | แคลเซียม, มก/ลิตร     | 30   |
| แมกนีเซียม , มก/ลิตร       | 20   | โซเดียม, มก/ลิตร      | 20   |
| โปแตสเซียม , มก/ลิตร       | 2    | เหล็ก, มก/ลิตร        | 0.5  |
| ไบคาร์บอเนต, มก/ลิตร       | 90   | คลอไรด์, มก/ลิตร      | 25   |
| ซัลเฟต, มก/ลิตร            | 20   | ไนเตรท, มก/ลิตร       | 0.5  |
| ฟลูออไรด์, มก/ลิตร         | 0.2  | แมงกานีส, มก/ลิตร     | 0.02 |
| ทางชีววิทยา :              |      |                       |      |
| โคไลฟอร์ม, MPN/100 มล.     | 2000 | ไวรัส, pfu/100 มล.    | 10   |

ตารางที่ ค.2 ค่าความต้านทานสำหรับการดำเนินระบบน้ำผิวดินแบบต่อเนื่องผ่านเมมเบรน MF ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  ที่มีความขุ่น 4.85 NTU ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 4.42  $\text{Mg.L}^{-1}$  ผ่านกระบวนการกรองแบบ MF ที่ความดัน 172.32 kPa

| ขนาดรูพรุนของเมมเบรน ( $\mu\text{m}$ ) | ความต้านทานที่เกิดขึ้น $\times 10^{12} (\text{m}^{-1})$ |          |       |       |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------|-------|-------|
|                                        | $R_{c1}$                                                | $R_{c2}$ | $R_f$ | $R_T$ |
| 5 $\mu\text{m}$                        | 1.31                                                    | 0.35     | 0.36  | 2.02  |
| 1.2 $\mu\text{m}$                      | 2.27                                                    | 1.10     | 0.37  | 3.74  |
| 0.45 $\mu\text{m}$                     | 3.03                                                    | 0.49     | 0.82  | 4.51  |

ตารางที่ ค.3 ค่าความต้านทานสำหรับการดำเนินระบบน้ำผิวดินแบบกะผ่านเมมเบรน MF ขนาดรูพรุน 5  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  และ 0.45  $\mu\text{m}$  ที่มีความขุ่น 4.85 NTU ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 4.42  $\text{Mg.L}^{-1}$  ผ่านกระบวนการกรองแบบ MF ที่ความดัน 172.32 kPa

| ขนาดรูพรุนของเมมเบรน ( $\mu\text{m}$ ) | ความต้านทานที่เกิดขึ้น $\times 10^{12} (\text{m}^{-1})$ |          |       |       |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------|-------|-------|
|                                        | $R_{c1}$                                                | $R_{c2}$ | $R_f$ | $R_T$ |
| 5 $\mu\text{m}$                        | 1.31                                                    | 0.35     | 0.36  | 2.02  |
| 1.2 $\mu\text{m}$                      | 5.99                                                    | 1.42     | 0.16  | 7.57  |
| 0.45 $\mu\text{m}$                     | 5.24                                                    | 0.62     | 0.69  | 6.72  |

ตารางที่ ค.4 ค่าความต้านทานสำหรับการดำเนินระบบของน้ำผิวดินผ่านเมมเบรนแบบออสโมซิสย้อนกลับที่ความดัน 482.51 kPa

| น้ำตัวอย่าง                 | ความต้านทานที่เกิดขึ้น $\times 10^{14} (\text{m}^{-1})$ |          |        |        |        |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------|----------|--------|--------|--------|
|                             | $R_{c1}$                                                | $R_{c2}$ | $R_f$  | $R_m$  | $R_T$  |
| surface water               | 0.1200                                                  | 0.0440   | 0.1500 | 1.0200 | 1.3300 |
| pretreat 5 $\mu\text{m}$    | 0.0039                                                  | 0.0110   | 0.1200 | 1.0200 | 1.1500 |
| pretreat 1.2 $\mu\text{m}$  | 0.0010                                                  | 0.0120   | 0.0180 | 1.0200 | 1.0500 |
| pretreat 0.45 $\mu\text{m}$ | 0.0044                                                  | 0.0120   | 0.0220 | 1.0200 | 1.0600 |

**ภาคผนวก ง**  
**ตัวอย่างการคำนวณ**

## ภาคผนวก ง

### ตัวอย่างการคำนวณ

#### ง.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด

เปอร์เซ็นต์การกำจัด กรณีใช้น้ำผิวดินตัวอย่างที่มีความขุ่น 4.85 NTU ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเท่ากับ 4.42mg/L ที่ความดัน 172.32 kPa

$$\text{จากสมการ} \quad R_{\text{turbidity}} = \left(1 - \frac{C_{\text{perm}}}{C_{\text{feed}}}\right) \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{ที่เวลา 10 นาที} \quad R_{\text{turbidity}} &= \left(1 - \frac{0.81}{4.85}\right) \times 100 \\ R_{\text{turbidity}} &= 83.30\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่เวลา 20 นาที} \quad R_{\text{turbidity}} &= \left(1 - \frac{0.52}{4.85}\right) \times 100 \\ R_{\text{turbidity}} &= 89.26\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่เวลา 30 นาที} \quad R_{\text{turbidity}} &= \left(1 - \frac{0.49}{4.85}\right) \times 100 \\ R_{\text{turbidity}} &= 89.73\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่เวลา 40 นาที} \quad R_{\text{turbidity}} &= \left(1 - \frac{0.42}{4.85}\right) \times 100 \\ R_{\text{turbidity}} &= 91.28\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่เวลา 50 นาที} \quad R_{\text{turbidity}} &= \left(1 - \frac{0.33}{4.85}\right) \times 100 \\ R_{\text{turbidity}} &= 93.24\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่เวลา 60 นาที} \quad R_{\text{turbidity}} &= \left(1 - \frac{0.24}{4.85}\right) \times 100 \\ R_{\text{turbidity}} &= 95.05\% \end{aligned}$$

$$\text{จากสมการ} \quad R_{TOC} = \left(1 - \frac{C_{perm}}{C_{feed}}\right) \times 100$$

$$\text{ที่เวลา 10 นาที} \quad R_{TOC} = \left(1 - \frac{3.45}{4.42}\right) \times 100$$

$$R_{TOC} = 21.95\%$$

$$\text{ที่เวลา 20 นาที} \quad R_{TOC} = \left(1 - \frac{3.31}{4.42}\right) \times 100$$

$$R_{TOC} = 25.11\%$$

$$\text{ที่เวลา 30 นาที} \quad R_{TOC} = \left(1 - \frac{3.22}{4.42}\right) \times 100$$

$$R_{TOC} = 27.15\%$$

$$\text{ที่เวลา 40 นาที} \quad R_{TOC} = \left(1 - \frac{3.19}{4.42}\right) \times 100$$

$$R_{TOC} = 27.83\%$$

$$\text{ที่เวลา 50 นาที} \quad R_{TOC} = \left(1 - \frac{3.16}{4.42}\right) \times 100$$

$$R_{TOC} = 28.51\%$$

$$\text{ที่เวลา 60 นาที} \quad R_{TOC} = \left(1 - \frac{3.08}{4.42}\right) \times 100$$

$$R_{TOC} = 30.32\%$$

## ง.2 ตัวอย่างการคำนวณความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม

กรณีใช้น้ำผิวดินตัวอย่างที่มีความขุ่น 4.85 NTU ปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติเท่ากับ 4.42 mg/L ที่ความดัน 172.32 kPa

### 1. สำหรับเมมเบรนที่สะอาด

$$\text{โดยที่ } J_v = 133282 \text{ LMH}$$

$$\Delta P = 25 \text{ psi}$$

$$\mu = 8.65 \times 10^{-4} \text{ (kg / m - s)}$$

$$\text{จาก } J_v = \frac{\Delta P}{\mu R_m}$$

$$R_m = \frac{25 \text{ psi} \times \left( \frac{1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \times 101.325 \times 1000}{(14.7 \text{ psi})} \right)}{133282 \left( \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right) \times \left( \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) \times \left( \frac{1 \text{ h}}{60 \times 60 \text{ s}} \right) \times \left( 8.65 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right)}$$

$$R_m = 5.38 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$$

### 2. เมมเบรนที่มีการอุดตันด้วยสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด สารแขวนลอยและคอลลอยด์

$$\text{จาก } J_v = \frac{\Delta P}{\mu R_T} = \frac{\Delta P}{\mu (R_m + R_{c1} + R_{c2} + R_f)}$$

$$R_T = R_m + R_{c1} + R_{c2} + R_f$$

$$5.38 \times 10^9 \text{ m}^{-1} + R_{c1} + R_{c2} + R_f = \frac{25 \text{ psi} \times \left( \frac{1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \times 101.325 \times 1000}{(14.7 \text{ psi})} \right)}{350 \left( \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right) \times \left( \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) \times \left( \frac{1 \text{ h}}{60 \times 60 \text{ s}} \right) \times \left( 8.71 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right)}$$

$$R_{c1} + R_{c2} + R_f = 2.02 \times 10^{12} \text{ m}^{-1} \quad (1)$$

3. เมื่อทำความสะอาดด้วยน้ำ

$$\text{โดยที่ } J_v = 1003 \text{ LMH}$$

$$\Delta P = 25 \text{ psi}$$

$$\mu = 8.65 \times 10^{-4} \text{ (kg / m - s)}$$

$$R_m + R_{c2} + R_f = \frac{25 \text{ psi} \times \left( \frac{1 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}^2} \times 101.325 \times 1000}{(14.7 \text{ psi})} \right)}{1003 \left( \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right) \times \left( \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) \times \left( \frac{1 \text{ h}}{60 \times 60 \text{ s}} \right) \times \left( 8.65 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right)}$$

$$R_{c2} + R_f = 7.1 \times 10^{11} \text{ m}^{-1} \quad (2)$$

4. เมื่อทำความสะอาดด้วยสารเคมี

$$\text{โดยที่ } J_v = 1972 \text{ LMH}$$

$$\Delta P = 25 \text{ psi}$$

$$\mu = 8.65 \times 10^{-4} \text{ (kg / m - s)}$$

$$R_m + R_f = \frac{25 \text{ psi} \times \left( \frac{1 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}^2} \times 101.325 \times 1000}{(14.7 \text{ psi})} \right)}{1972 \left( \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right) \times \left( \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) \times \left( \frac{1 \text{ h}}{60 \times 60 \text{ s}} \right) \times \left( 8.65 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right)}$$

$$\therefore R_f = 3.58 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$$

5. แทนค่า  $R_f$  ในสมการที่ (2)

$$R_{c2} = 3.52 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$$

6. แทนค่า  $R_{c2}$  และ  $R_f$  ในสมการที่ (1)

$$R_{c1} = 1.31 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

โดยสรุป ค่าความต้านทานการดูดตันในลักษณะต่างๆมีค่าดังนี้

$$R_m = 5.38 \times 10^9 m^{-1}$$

$$R_{cl} = 1.31 \times 10^{12} m^{-1}$$

$$R_{c2} = 3.52 \times 10^{11} m^{-1}$$

$$R_f = 3.58 \times 10^{11} m^{-1}$$

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ

นายภานุวัฒน์ สีทา

ประวัติการศึกษา

ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง จังหวัดบุรีรัมย์

พ.ศ. 2535

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ พ.ศ. 2546

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2538 – ปัจจุบัน

บริษัท ที.เอส.ซัพพลายเอนด์คอนสตรัคชั่น จำกัด

จังหวัดกรุงเทพฯ