

ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการล้างข้อต่อประสิทธิภาพของอัลตราฟิลเตรชันแบบเบรนต์นแบบในการผลิตน้ำประปา



นาย ศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF BACKWASH RATE ON PERFORMANCE OF PROTOTYPE ULTRAFILTRATION  
MEMBRANE FOR WATER SUPPLY PRODUCTION



Mr. Saksit Imman

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการล้างย้อนต่อประสิทธิภาพอัลตรา  
ฟิลเตรชันเมมเบรนต้นแบบในการผลิตน้ำประปา

โดย

นายศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

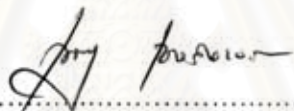
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

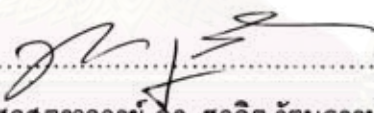
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

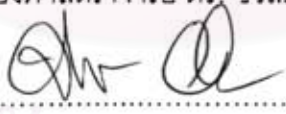
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนริญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. จินต์ อintah)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ)

ศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน : ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการล้างย้อนต่อประสิทธิภาพอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน  
 ดันแบบในการผลิตน้ำประปา. (EFFECT OF BACKWASH RATE ON PERFORMANCE OF  
 PROTOTYPE ULTRAFILTRATION MEMBRANE FOR WATER SUPPLY PRODUCTION) อ. ที่  
 ปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 140 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาอัตราการล้างย้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอัลตรา  
 ฟิลเตรชันเมมเบรนในการผลิตน้ำประปา โดยพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ คือ ความดัน อัตราการล้างย้อน การเดิน  
 ระบบระยะยาว และการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทำนายอัตราการผลิตน้ำที่ได้เปรียบเทียบกับ  
 ทดลองโดยใช้น้ำจากคลองประปาสามเสน

เครื่องดันแบบที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย โมดูลเมมเบรนสาม โมดูล ดึงเก็บน้ำดิบ และดึงเก็บน้ำ  
 ใส ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงความดันที่ใช้คือ 100 กิโลปาสกาล 110 กิโลปาสกาล 120 กิโลปาสกาล  
 130 กิโลปาสกาล 140 กิโลปาสกาล และ 150 กิโลปาสกาล ตามลำดับ และอัตราการล้างย้อนที่ใช้ คือ 7 ลบ.ม/  
 ชม. 4 ลบ.ม/ ชม. และ 2 ลบ.ม/ ชม. จากผลการทดลองที่ได้จะทำการเดินระบบด้วยความดันที่เหมาะสมและ  
 อัตราการล้างย้อนที่เหมาะสมคือ 150 กิโลปาสกาล และ 7 ลบ.ม/ตร.ม-ชม. ตามลำดับ โดยมีแรงเฉือนสูงสุด คือ  
 1607.14 ปาสกาล และได้มีการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับ  
 ความต้านทานทั้งหมด พบว่าสามารถนำไปทำนายถึงอัตราการล้างย้อนที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเกิดการอุดตัน  
 ของเมมเบรน นอกจากนั้นแล้ว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อนุกรมความต้านทานและแบบจำลองทาง  
 คณิตศาสตร์รูพรุน สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับการทดลองโดยใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนได้ดี

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
 ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

## 4970597821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: ULTRAFILTRATION/ WATER SUPPLY/ MEMBRANE / PROTOTYPE

SAKSIT IMMAN: EFFECT OF BACKWASH RATE ON PERFORMANCE OF PROTOTYPE ULTRAFILTRATION MEMBRANE FOR WATER SUPPLY PRODUCTION. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : ASSOC.PROF CHAVALIT RATANATAMSKUL, PH.D., 140 pp.

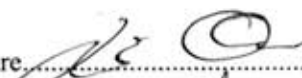
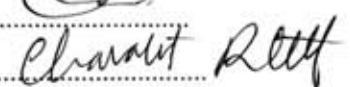
The purpose of this research is to study the effect of backwash rate on performance of prototype ultrafiltration membrane for water supply production, based on operating pressure, backwash rate, long-term operation and mathematical model to predict permeate flux, compared with the data from experimental. The experiment was conducted by using raw water from water supply canal at the Samsen.

The prototype system was composed of three of membrane modules, raw water tank and clear water tank. In this research, operating pressure were varied to 100, 110, 120, 130, 140 and 150 kPa, and backwash rates were varied to 7, 4 and 2 m<sup>3</sup>/hr. From the results, the optimum operating pressure and backwash rate were 150 kPa and 7 m<sup>3</sup>/hr, respectively. The highest shear rate was found to be 1,607.14 Pa. Moreover mathematical model was developed to describe relationships between shear rate and total resistance. The model simulation could predict optimum backwash rate in order to prevent membrane fouling. Furthermore resistance-in-series model and pore model could predict permeate flux satisfactorily. Then, there mathematical models can be applied for this ultrafiltration membrane application.

Department Environmental Engineering  
Field of study Environmental Engineering  
Academic year 2008

Student's signature.....

Principal Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล เป็นอย่างสูงที่ให้ความกรุณาในการให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการวิจัย พร้อมทั้งให้แนวคิดทางด้านวิชาการ ตลอดจนให้ความสนใจใส่ดูแล ตรวจสอบการเขียนวิทยานิพนธ์จนงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่มีส่วนได้ให้ความรู้แก่ตัวผู้วิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวงกตเจริญ กรรมการ รองศาสตราจารย์ จินต์ อโนทัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ ที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบ อนุมัติโครงสร้าง วิจัยและเป็นกรรมการในการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ พร้อมทั้งกรุณาให้คำชี้แนะแนวทางรวมถึงโอกาสที่ให้ผู้วิจัยสามารถเขียนและปรับปรุงแก้ไขจนการสอบ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ โรงกรองน้ำสามเสนและบริษัท แลม วอเตอร์ จำกัด ที่อนุเคราะห์ อุปกรณ์ สารเคมี และห้องปฏิบัติการสำหรับการดำเนินการวิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา

คุณความดีและประโยชน์ทั้งหลายอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้บิดา มารดา ซึ่งเป็นผู้ให้ทุกอย่างแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คุณสมบัติของน้ำดิบตามธรรมชาติ.....	4
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ.....	4
2.1.2 คุณสมบัติทางเคมี.....	8
2.2 การปรับปรุงคุณภาพน้ำ.....	10
2.2.1 กระบวนการบำบัดน้ำ.....	10
2.3 กระบวนการเมมเบรน.....	12
2.4 การจำแนกกระบวนการเมมเบรนทั้งหมดที่ได้พัฒนาขึ้น.....	14
2.4.1 กระบวนการไดอะไลซิส (Dialysis process).....	15
2.4.2 กระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis, ED).....	15
2.4.3 ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis, RO).....	16
2.4.4 อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF).....	16
2.4.5 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF).....	16
2.4.6 กระบวนการแยกก๊าซ (Gas separation).....	17
2.4.7 เพอเวปอเรชัน (Pervaporation, PV).....	17

	หน้า
2.5 อุปกรณ์แผ่นเมมเบรน (Membrane Module).....	19
2.5.1 โมดูลแบบแผ่นกรอง(Plate and Frame Module).....	19
2.5.2 โมดูลแบบท่อ (Tubular module).....	20
2.5.3 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module).....	20
2.5.4 โมดูลแบบท่อม้วน (Spiral Wound Module).....	21
2.6 กระบวนการเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน.....	22
2.6.1 อัตราการผลิตน้ำและการกักกัน (Water Flux).....	22
2.6.2 กลไกในการทำงานของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน.....	23
2.6.3 แบบจำลองการถ่ายเทมวล (Mass Transfer Model).....	25
2.6.4 คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน.....	29
2.6.5 การเกิดฟาวลิง (Fouling).....	30
2.7 การล้างย้อนและการทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน (Backwashing and Membrane Cleaning).....	32
2.7.1 การล้างย้อน (Backwashing).....	32
2.7.2 อัตราการล้างย้อน (Backwash rate).....	32
2.7.3 การทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน (Membrane Cleaning).....	39
2.8 การพัฒนาอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนเพื่อการกำจัดอนุภาค.....	44
2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	50
3.1 แผนการวิจัย.....	50
3.2 รายละเอียดอุปกรณ์ของระบบผลิตน้ำอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน.....	51
3.3 ขอบเขตการทำงานของระบบผลิตน้ำอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน.....	51
3.4 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลอง.....	52
3.5 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	53
3.5.1 การทดลองที่ 1.1.....	53
3.5.2 การทดลองที่ 1.2.....	54
3.6 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	58
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	59
4.1 ลักษณะของน้ำดิบที่ใช้ในการวิจัย.....	59



	หน้า
4.2 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่มีต่อสมรรถภาพของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน.....	62
4.2.1 ผลของความดันที่ใช้ในกระบวนการเมมเบรนต่ออัตราการผลิตน้ำ.....	62
4.2.2 ผลของความดันที่ใช้ในกระบวนการเมมเบรนต่อคุณภาพน้ำ.....	67
4.2.3 ผลของอัตราการล้างย้อนต่ออัตราการผลิตน้ำ.....	74
4.2.4 ผลของความดันเข้าต่อคุณภาพน้ำ.....	75
4.3 การเดินระบบระยะยาวที่มีต่อสมรรถภาพของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน.....	83
4.3.1 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด.....	84
4.3.2 ผลของการเดินระบบระยะยาวที่มีต่อคุณภาพน้ำ.....	85
4.3.3 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่ายูวี 280.....	86
4.3.4 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่าความขุ่น.....	87
4.3.5 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่าเหล็กและแมงกานีส.....	89
4.3.6 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อสภาพความเป็นด่าง.....	91
4.3.7 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่าสี.....	91
4.4 การวิเคราะห์หาอัตราการกรองน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	93
4.4.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์อนุกรมความต้านทาน (Resistance-in-series model).....	93
4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือนกับอัตราการผลิตน้ำ.....	94
4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการล้างย้อนกับค่าแรงเฉือน.....	98
4.4.4 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบรูพรุน (Pore model).....	98
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไป.....	102
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	102
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไป.....	103
รายการอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบผลการทดลอง.....	108
ภาคผนวก ข ข้อมูลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	134
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	140

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลความขุ่นของน้ำประเภทต่างๆ.....	6
ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำในชั้นต่างๆ.....	11
ตารางที่ 2.3 ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการแบบต่างๆ.....	18
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน.....	42
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างสารทำความสะอาดใช้เดี่ยวๆ หรือเป็นสารผสมเพื่อกำจัดสารอุดตันต่างๆ... 43	43
ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างช่วงความเข้มข้นของสารทำความสะอาด.....	43
ตารางที่ 3.1 รายการอุปกรณ์ที่สำคัญของระบบผลิตน้ำเมมเบรน.....	51
ตารางที่ 3.2 ขอบเขตการทำงานของระบบผลิตน้ำอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน.....	51
ตารางที่ 3.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการล้างย้อน (Backwash) ต่อประสิทธิภาพ อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน.....	56
ตารางที่ 3.4 คุณภาพน้ำดิบของคลองประปา.....	57
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรและวิธีที่ใช้ในการทดลอง.....	57
ตารางที่ 4.1 ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการล้างย้อน.....	95

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบการกรองน้ำผ่านแผ่นกรองธรรมดา กับแผ่นเมมเบรน.....	13
รูปที่ 2.2 หลักการของกระบวนการเมมเบรน.....	15
รูปที่ 2.3 โมดูลแบบแผ่นกรอง (Plate and Frame Module).....	19
รูปที่ 2.4 ลักษณะอุปกรณ์แบบท่อ.....	20
รูปที่ 2.5 โมดูลแบบเส้นใยกลวง.....	21
รูปที่ 2.6 โมดูลแบบท่อม้วน (Spiral Wound Module).....	22
รูปที่ 2.7 (ก) ออสโมซิส (ข) ออสโมซิสผันกลับ.....	24
รูปที่ 2.8 ความต้านทานต่างๆ ตามแบบจำลองอนุกรมความต้านทาน.....	27
รูปที่ 2.9 การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization) ที่เกิดขึ้นในระบบ.....	29
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตน้ำกับระยะเวลาในการเดินระบบ.....	30
รูปที่ 3.1 ผังการดำเนินการวิจัย.....	49
รูปที่ 3.2 ผังการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดในการ ทดลอง.....	51
รูปที่ 3.3 ผังขั้นตอนการทดลองที่ 1.1.....	52
รูปที่ 3.4 ผังผังขั้นตอนการทดลองที่ 1.2.....	53
รูปที่ 3.5 วิธีดำเนินการทดลอง.....	54
รูปที่ 4.1 ค่าพีเอชของน้ำดิบกับระยะเวลาที่เดินระบบ.....	59
รูปที่ 4.2 ค่าความขุ่นของน้ำดิบกับระยะเวลาในการเดินระบบ.....	60
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำ กับเวลาในการเดินระบบ.....	60
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์อิมัตและลิกนินกับระยะเวลาในการเดินระบบ.....	61
รูปที่ 4.5 ความเข้มสีกับระยะเวลาในการเดินระบบ.....	62
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำกับความดันที่ใช้.....	63
รูปที่ 4.7 อัตราการผลิตน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน ที่อัตราการกรอง 100 กิโลปาสกาล.....	64
รูปที่ 4.8 อัตราการผลิตน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน ที่อัตราการกรอง 110 กิโลปาสกาล.....	64
รูปที่ 4.9 อัตราการผลิตน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน ที่อัตราการกรอง 120 กิโลปาสกาล.....	65

รูปที่ 4.10 อัตราการผลิตน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน ที่อัตราการกรอง 130 กิโลปาสคาล.....	65
รูปที่ 4.11 อัตราการผลิตน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน ที่อัตราการกรอง 140 กิโลปาสคาล.....	66
รูปที่ 4.12 อัตราการผลิตน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน ที่อัตราการกรอง 150 กิโลปาสคาล.....	66
รูปที่ 4.13 ผลของความดันที่ใช้ในการกรองต่อค่าความขุ่น.....	67
รูปที่ 4.14 ร้อยละการกำจัดความขุ่น.....	68
รูปที่ 4.15 ผลของความดันเข้าต่อค่าสารอินทรีย์ทั้งหมด.....	69
รูปที่ 4.16 ร้อยละการกำจัดค่าสารอินทรีย์ทั้งหมด.....	69
รูปที่ 4.17 ผลของความดันเข้าต่อค่าสารอินทรีย์อีเอ็มเอสและลิกนิน.....	70
รูปที่ 4.18 ร้อยละการกำจัดค่าสารอินทรีย์อีเอ็มเอสและลิกนิน.....	71
รูปที่ 4.19 ผลของความดันเข้าต่อปริมาณเหล็ก.....	72
รูปที่ 4.20 ผลของความดันเข้าต่อแมงกานีส.....	72
รูปที่ 4.21 ร้อยละการกำจัดเหล็ก.....	73
รูปที่ 4.22 ร้อยละการกำจัดแมงกานีส.....	73
รูปที่ 4.23 ผลของความดันเข้าต่อสภาพความเป็นด่าง.....	74
รูปที่ 4.24 ผลของอัตราการล้างย้อนต่ออัตราการผลิตน้ำ.....	75
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการล้างย้อนกับความขุ่น.....	76
รูปที่ 4.26 ร้อยละการกำจัดความขุ่นกับอัตราการล้างย้อน.....	76
รูปที่ 4.27 ผลของอัตราล้างย้อนที่มีต่อการกำจัดสารอินทรีย์ทั้งหมด.....	77
รูปที่ 4.28 ร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ทั้งหมดของระบบ.....	78
รูปที่ 4.29 ผลของอัตราการล้างย้อนต่อการกำจัดสารอินทรีย์อีเอ็มเอสและลิกนิน.....	79
รูปที่ 4.30 ร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์อีเอ็มเอสและลิกนินที่อัตราการล้างย้อนต่างๆ.....	79
รูปที่ 4.31 ปริมาณความเข้มข้นเหล็กและแมงกานีสในน้ำดิบและน้ำกรอง.....	70
รูปที่ 4.32 ผลของอัตราล้างย้อนที่มีต่อการกำจัดเหล็ก.....	80
รูปที่ 4.33 ร้อยละการกำจัดเหล็กและแมงกานีส.....	81
รูปที่ 4.34 สภาพความเป็นด่างในน้ำดิบและน้ำกรองที่อัตราการล้างย้อนต่างๆ.....	82
รูปที่ 4.35 ผลของอัตราการล้างย้อนต่อการลดสี.....	83
รูปที่ 4.36 ร้อยละการกำจัดสี.....	83
รูปที่ 4.37 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด.....	84

	หน้า
รูปที่ 4.38 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อสารอินทรีย์ทั้งหมด.....	85
รูปที่ 4.39 ร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ทั้งหมด.....	86
รูปที่ 4.40 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อสารอินทรีย์อิวมีสและลิกนิน.....	85
รูปที่ 4.41 ร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์อิวมีสและลิกนิน.....	87
รูปที่ 4.42 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่าความขุ่น.....	88
รูปที่ 4.43 ร้อยละการกำจัดความขุ่น.....	88
รูปที่ 4.44 การเดินระบบระยะยาวต่อปริมาณเหล็ก.....	89
รูปที่ 4.45 ร้อยละการกำจัดเหล็ก.....	90
รูปที่ 4.46 การเดินระบบระยะยาวต่อปริมาณแมงกานีส.....	90
รูปที่ 4.47 ร้อยละการกำจัดแมงกานีส.....	90
รูปที่ 4.48 ผลของการเดินระบบต่อสภาพต่าง.....	91
รูปที่ 4.49 การเดินระบบระยะยาวต่อการกำจัดสี.....	92
รูปที่ 4.50 ร้อยละการกำจัดสี.....	93
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำสะอาดที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับการคำนวณ.....	94
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำกับแรงเฉือน.....	95
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับอัตราการผลิตน้ำ.....	96
รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทั้งหมดกับแรงเฉือน.....	97
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการล้างย้อนกับแรงเฉือน.....	98
รูปที่ 4.56 ภาพถ่ายชั้นเค้กที่ผิวเมมเบรนด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกลาดที่ กำลังขยาย 20000 เท่า.....	99
รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำกับเวลาเดินระบบ.....	100
รูปที่ 4.58 การเปรียบเทียบอัตราการผลิตน้ำที่ได้จากการคำนวณกับค่าจากการทดลอง.....	100
รูปที่ 4.59 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบ.....	101

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

เป็นระยะเวลานานกว่า 40 ปีมาแล้ว ที่การแยกส่วนของเมมเบรน (Membrane) ไม่ได้ได้รับการพิจารณาว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญมาก จนกระทั่งเมื่อประมาณ 30 ปีที่ผ่านมา เป็นเพราะอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมโรงเบียร์ อุตสาหกรรมเวชกรรม อุตสาหกรรมเกี่ยวกับน้ำมัน และการป้องกันสิ่งแวดล้อม และขั้นตอนปฏิบัติการที่สะดวก กระชับและประสบความสำเร็จในการแยกส่วน ทำให้เทคโนโลยีการแยกส่วนของแผ่นเมมเบรน ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วในธุรกิจ อุตสาหกรรมในการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนแหล่งน้ำ เทคโนโลยีการแยกส่วนของเมมเบรน ได้กลายเป็นส่วนประกอบที่สำคัญยิ่งในการใช้น้ำหมุนเวียนและการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่นั้น กระบวนการเมมเบรน ถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากโดยเฉพาะในพื้นที่ที่ขาดแคลนน้ำ ซึ่งนำมาซึ่งความสนใจของประชาชน

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน หรือที่เรียกว่าระบบ คอนเวนชันนอล (Conventional Process) ซึ่งประกอบไปด้วย กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) การรวมตะกอน (Flocculation) การตกตะกอน (Sedimentation) และการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Chlorination) ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในกระบวนการผลิตน้ำประปาได้หมดซึ่งทำให้ปริมาณคลอรีนที่ใช้มีปริมาณที่มาก Onodera และคณะ พบว่าผลผลิตพลอยได้ของสารฆ่าเชื้อนี้ นอกจากจะทำให้ระบบประสาท การทำงานของตับและไตและระบบสืบพันธุ์ของมนุษย์เกิดความผิดปกติแล้วยังเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์อีกด้วย

เนื่องจากน้ำประปาที่ผ่านการกรองทรายแล้วยังอาจมีสารอินทรีย์เหลืออยู่ ซึ่งอาจก่อให้เกิดสารพิษ เช่น สารไตรฮาโลมีเทนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง ย่อมมีผลต่อสุขภาพร่างกายของผู้บริโภค ถึงแม้จะมีปริมาณหลงเหลือไม่มาก ดังนั้นการเพิ่มระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดสารอินทรีย์ และสารลิกนินในน้ำดิบของระบบประปา จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในอนาคต

แผ่นเมมเบรน (Membrane) สามารถกรองสารออกจากกันด้วยคุณสมบัติการเลือกผ่าน (Semi-permeable) กระบวนการใช้แผ่นเมมเบรนแยกสารแบ่งเป็นหลายวิธีซึ่งเลือกใช้ตามคุณสมบัติของสารดังนี้ ถ้าต้องการแยกสารที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งจะไม่ใช่ความดันมาก (Pressure) ในการกรอง

แยก จะใช้แผ่นเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) หรือ อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) ถ้าเป็นสารโมเลกุลเล็กและต้องใช้ความดันเข้ามาช่วยจะใช้แผ่นเมมเบรน นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) และ ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) ทั้งนี้เทคโนโลยีเมมเบรนสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย ทั้งการทำของเหลวให้บริสุทธิ์ การสกัด การกลั่น และประยุกต์ใช้ทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม ด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตยา เครื่องสำอาง หรือด้านพลังงาน ตลอดจนกระบวนการแปรรูปอาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration membrane) เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถช่วยในการผลิตน้ำประปาได้เนื่องจากมีข้อดีหลายประการเช่น เมื่อมีการนำอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration membrane) มาใช้เป็นกระบวนการกรองขั้นต้นก่อน ก็จะสามารถลดมลสารต่างเช่น ความขุ่น รวมถึงสารอินทรีย์ในน้ำที่เป็นสาเหตุของมะเร็งได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration membrane) นั้น สูงกว่าระบบกรองทรายธรรมดาหลายเท่า และยังมีการใช้พื้นที่น้อยกว่าระบบทรายกรอง

ในปัจจุบันบางประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น เกาหลี ได้มีการนำเอากระบวนการเมมเบรนมาใช้ในการผลิตน้ำประปาโดยประยุกต์ใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration membrane) ร่วมกับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) (Shen และคณะ, 2003) และอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration membrane) ร่วมกับไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของความดันที่เข้าที่มีผลต่อการกรองน้ำโดยอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration membrane)
2. ศึกษาผลของอัตราการล้างย้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพเครื่องอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration membrane)
3. ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดความขุ่น สี เหล็ก และแมงกานีส ออกจากน้ำ โดยใช้น้ำซึ่งมาจากแหล่งน้ำดิบเดียวกับที่ใช้สำหรับผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน
4. ศึกษาการพัฒนาโมเดลเพื่อใช้อธิบายผลของความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ เช่น ค่า อัตราการผลิตน้ำ อัตราการล้างย้อน (Backwash Rate) เป็นต้น

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะครอบคลุมถึง

1. การผลิตน้ำประปาโดยใช้แหล่งน้ำดิบจากแหล่งน้ำดิบจากคลองประปา โดยใช้ระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration membrane) ซึ่งเป็น โมดูลชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Membrane) ซึ่งทำในระบบต้นแบบ
2. ศึกษาผลของความดันที่ใช้ในการกรองกับอัตราการล้างย้อนในกระบวนการเมมเบรนของระบบ โดยดูจากค่าอัตราการผลิตน้ำและประสิทธิภาพเมมเบรน
3. ศึกษาแบบจำลอง (Model) ในการอธิบายผลของอัตราการล้างย้อนกับค่าอัตราการผลิตน้ำที่เปลี่ยนแปลง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตน้ำประปาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration membrane)
2. สามารถรู้และเข้าใจปัญหาและแนวทางการแก้ไขปัญหาการอุดตันของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration membrane)
3. สามารถรู้และเข้าใจถึงปัจจัยที่ใช้แก้ไข ปรับปรุงระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนให้ดำเนินการได้นานยิ่งขึ้น
4. สามารถนำปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง ไปประยุกต์ใช้ในระดับการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. สามารถใช้แบบจำลอง (Model) ในการหาความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ ได้ เช่น ค่าอัตราการผลิตน้ำที่เพิ่มขึ้นและลดลง อัตราการล้างย้อน (Backwash Rate) เป็นต้น



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คุณสมบัติของน้ำดิบตามธรรมชาติ

คุณสมบัติของน้ำดิบตามธรรมชาติ สามารถจำแนกตามปริมาณและชนิดของสารเจือปนได้ เป็น 3 ประเภท คือ

- คุณสมบัติทางกายภาพ เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับ สี กลิ่น รส และความขุ่นของน้ำ
- คุณสมบัติทางเคมี เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับแร่ธาตุและสารต่างๆที่ละลายอยู่ในน้ำ
- คุณสมบัติทางแบคทีเรีย เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับเชื้อแบคทีเรียและจุลินทรีย์

##### 2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพ เป็นคุณสมบัติของน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีสิ่งบางสิ่งมาทำให้คุณสมบัติด้านนี้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพนี้เราสามารถทราบได้จากประสาทสัมผัสทั้ง 5 ของมนุษย์ และสามารถจะกำจัดออกได้โดยวิธีต่างๆ มากกว่าคุณสมบัติด้านอื่นๆ นอกจากนั้นยังเป็นอันตรายน้อยกว่าคุณสมบัติด้านอื่นๆ ถ้าหากมีความจำเป็นต้องบริโภคน้ำนั้นตัวอย่างเช่น น้ำผิวดิน โดยมากคุณสมบัติทางด้านกายภาพมักจะไม่ค่อยดีนัก เพราะมีตะกอนหรือความขุ่นมาก เนื่องจากน้ำได้พัดพาเอาอนุภาคของสารต่างๆ บนพื้นดินปะปนมา ซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาลด้วย เช่น ฤดูฝน น้ำผิวดินจะขุ่นมาก และมีผลกระทบต่อ การปรับปรุงคุณภาพน้ำอย่างมาก ในที่นี้จะขอกล่าวถึงคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำเฉพาะความขุ่นและสีเท่านั้น

##### 2.1.1.1 ความขุ่น

ความขุ่นในน้ำผิวดินเกิดจากการสลายตัวของดิน หิน โคลน ออกไซด์ของโลหะที่อยู่ในดิน เชื้อไม้ แพลงตอนและจุลินทรีย์ น้ำที่มาจากอาคารบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสารที่ทำให้เกิดความขุ่นได้มากมายหลายชนิด คอลลอยด์ที่คงตัวมักเกิดจากสบู่ ผงซักฟอก นอกจากนี้ ตัวทำอิมัลชัน (Emulsifying agents) ก็เป็นตัวทำให้เกิดความขุ่นด้วย

เราไม่นิยมวัดค่าของแข็งแขวนลอย ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดื่มมาใช้ เนื่องจากน้ำที่มีของแข็งแขวนลอยเท่ากัน อาจให้ความรู้สึกยอมรับต่างกัน ค่าความขุ่นจึงมีความสำคัญต่อทัศนคติต่อผู้ใช้น้ำมากกว่าปริมาณของแข็งแขวนลอย อย่างไรก็ตาม น้ำที่ขุ่นบางครั้งอาจไม่มีโทษต่อร่างกาย แต่จะทำให้ไม่น่าดื่มมาใช้ ในทางตรงกันข้ามน้ำใสสะอาดอาจจะไม่ปลอดภัยสำหรับดื่ม

ตัวอย่างเช่นน้ำที่มีแร่เหล็กอาจใสสะอาดในตอนแรกแต่จะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อนเมื่อสัมผัสกับอากาศในภายหลัง

ความขุ่นทำให้น้ำไม่เป็นที่น่ายอมรับเพราะสังเกตเห็นได้ทันทีถ้าบรรจุในภาชนะใส สารคอลลอยด์ที่ทำให้ความขุ่นจะเป็นตัวดูดซับสารเคมี อาจก่อให้เกิดสารอันตรายหรือทำให้เกิดกลิ่นและรสที่ไม่ต้องการ ความขุ่นในน้ำธรรมชาติมีสีน้ำตาล แต่อาจมีสีอื่นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของสารที่ก่อให้เกิดความขุ่น ความขุ่นจะบดบังการส่องผ่านของแสงลงสู่พื้นน้ำ มีผลให้การสังเคราะห์แสงของพืชในลำน้ำและทะเลสาปลดลง นอกจากนี้ความขุ่นที่ทับถมจมลงสู่ก้นลำน้ำหรือทะเลสาปจะจับตัวเป็นโคลนเลน และเปลี่ยนสภาพความเป็นอยู่ของสิ่งมีชีวิตในน้ำต่างๆ

ความขุ่นของน้ำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- ขนาดของสิ่งแขวนลอย (ละอียดหรือหยาบ)
- ปริมาณมากหรือน้อย
- ความกระจัดกระจายของอนุภาค
- คุณสมบัติของการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยเหล่านี้

ความขุ่นของน้ำมีความสำคัญเกี่ยวกับกิจการประปามาก กล่าวคือ

1. ประชาชนที่ใช้น้ำประปาต่างๆไป มักจะเข้าใจกันว่า ที่ขุ่นมักจะถูกปนเปื้อนมาจากพวกน้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือน เพราะส่วนมากแล้วน้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือนมักจะมีความขุ่นมาก ซึ่งจะก่อให้เกิดพิษภัยต่อสุขภาพได้ ทำให้ประชาชนไม่ยอมดื่มน้ำของการประปา หันไปใช้น้ำจากแหล่งอื่นที่อาจจะไม่ปลอดภัยพอก็ได้

2. น้ำที่มีความขุ่นสูง จะทำให้การกรองน้ำของกิจการประปาช้าลง และระยะเวลาในการใช้งานสั้นลง น้ำที่มีความขุ่นมากๆ จะใช้กับถังกรองแบบช้าไม่ได้เลย ต้องใช้กับถังกรองเร็วซึ่งถ้าใช้ถังกรองเร็วก็ขึ้นอยู่กับสารสร้างตะกอน (Coagulant) ว่าจะสามารถกำจัดความขุ่นได้มากน้อยเท่าไร อายุการใช้งานของเครื่องกรองจะไดยาวนานขึ้น

3. การฆ่าเชื้อโรค น้ำที่มีความขุ่นสูงๆ จะเป็นอุปสรรคต่อการฆ่าเชื้อโรคมาก เพราะแบคทีเรียอาจจะไปหลบอยู่ตามสารแขวนลอยเหล่านั้น ทำให้อายุการฆ่าเชื้อโรคเข้าไปทำลายไม่ถึง ทำให้การฆ่าเชื้อโรคไม่ได้ผลเต็มที่ และเป็นการเปลืองสารฆ่าเชื้อโรคด้วย

4. ตะกอนแขวนลอยที่ลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งโดยมากเป็นสารอินทรีย์ที่จะทำปฏิกิริยากับคลอรีนทำให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes) ซึ่งพบว่ามีความไว้มากที่จะก่อให้เกิดมะเร็งในร่างกาย

5. อาจเป็นตัวที่พาหรือเก็บสะสมสารพิษอันตรายได้ เช่น โลหะหนักต่างๆ

ความขุ่นของน้ำสามารถวัด โดยใช้หลักการให้แสงผ่านขวดแก้วใสที่บรรจุตัวอย่างน้ำ หากมีความขุ่นมากแสงก็จะผ่านได้ยากหรือน้อยลง การวัดความขุ่นของน้ำจะต้องมีค่าความขุ่นของน้ำมาตรฐานที่กำหนดขึ้นมา โดยใช้สารซีลิคาเป็นตัวแสดงความขุ่นมาตรฐาน คือมี 1 มก ซีลิคาไดออกไซด์/ลิตร จะเทียบเท่ากับค่าความขุ่น 1 หน่วย

วิธีวัดความขุ่นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีดังนี้

1. Jackson Candle Turbidimeter มีหน่วยเป็น JTU
2. Formazin Turbidimeter มีหน่วยเป็น FTU
3. Nephelometric Turbidimeter มีหน่วยเป็น NTU

ในปัจจุบันนี้นิยมใช้วิธี Nephelometric Turbidimeter เป็นเครื่องมือวัด โดยมีหน่วยเป็น Nephelometric Turbidity Units (NTU) เพราะเป็นเครื่องมือวัดที่ง่ายและได้ผลรวดเร็ว ตารางที่ 2.1 เป็นข้อมูลความขุ่นของน้ำประเภทต่างๆ สำหรับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาขององค์การอนามัยโลกได้กำหนดไว้ว่า น้ำประปาคควรมีค่าความขุ่นไม่เกิน 5 NTU

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลความขุ่นของน้ำประเภทต่างๆ (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2536)

น้ำประเภทต่างๆ	ความขุ่น (NTU)
น้ำผิวดินที่มีความขุ่นมาก	1000
แม่น้ำทั่วไป	100
ทะเลสาบ	10
หลังจากผ่านระบบการสร้างตะกอน และการรวมตะกอน แล้ว	1-5
หลังจากผ่านเครื่องกรองแล้ว	0.1

### 2.1.1.2 สี

สีของน้ำเกิดจากสาเหตุใหญ่ 2 ประการ คือ

1. เกิดจากการสลายตัวของพวกสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น ใบไม้เน่าเปื่อย โดยมากมักจะเป็นสีน้ำตาลปนเหลืองหรือสีชา ทั้งนี้เพราะเกิดสารประกอบของพวกกรดแทนนิก (Tannic acid)
2. เกิดจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมหรือเกิดจากน้ำทิ้งของฟาร์มต่างๆ สีของน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม มักจะมีสีตามน้ำทิ้งนั้น

ส่วนมากแล้วสารต่างๆ ที่ทำให้เกิดสีในน้ำ มักจะเป็นสารแขวนลอยที่มีประจุลบ ด้วยเหตุนี้เราจึงสามารถกำจัดสีของน้ำได้โดยใช้เกลือของธาตุที่มีวาเลนซ์ 3 ได้เช่น  $Al^{3+}$  และ  $Fe^{3+}$  เป็นต้น โดยมากน้ำผิวดินจะปรากฏว่ามีสีสูงมาก ทั้งนี้เพราะสารที่ทำให้เกิดสีสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ และน้ำผิวดินมีโอกาสที่จะถูกปนเปื้อนได้มากกว่าน้ำชนิดอื่น

สีของน้ำจะมีปรากฏอยู่ 2 ชนิดด้วยกัน คือ

1. **สีปรากฏ** เกิดจากสารพวกแขวนลอยต่างๆ ซึ่งสามารถจะกำจัดออกได้โดยการกรองหรือเหวี่ยง (Centrifugal)
2. **สีจริง** เกิดจากสารพวกที่ละลายได้เป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ

โดยปกติสีธรรมชาติของน้ำจะไม่เป็นอันตรายสำหรับการบริโภค แต่จะทำให้หน้ารังเกียจ น้ำที่มีสีไม่เหมาะที่จะใช้ซักล้างเสื้อผ้า อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมย้อมผ้า อุตสาหกรรมทำกระดาษ เป็นต้น ดังนั้นการกำจัดสีจึงเป็นเป้าหมายสำคัญในการผลิตน้ำใช้ทั้งในครัวเรือนและในอุตสาหกรรม สารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสีจริงในน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีน ทำให้ค่าความต้องการของคลอรีนของน้ำเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคลดลง นอกจากนี้สารประกอบคลอรีนกับกรดอินทรีย์บางตัวที่เกิดขึ้นมักเป็นสารก่อมะเร็งด้วย และสารประกอบพวกฟีนอลที่ได้จากการเน่าเปื่อยของผักผลไม้ สามารถรวมตัวกับคลอรีนเกิดเป็นสารประกอบที่มีกลิ่นและรสที่รุนแรง

สีสามารถวัดหาค่าความเข้มข้นของสีได้ด้วยเครื่องเทียบสีมาตรฐาน ที่ได้มาจากแพลตทินัม คือ 1 มก/ล ของแพลตทินัม ( $K_2PtCl_6$ ) จะมีความเข้มสีเท่ากับ 1 หน่วยโดยการเตรียมสารมาตรฐานนี้จะเติมสารโคบอลต์กลอไรด์ผสมลงไปด้วย การวัดสีไม่ควรเก็บตัวอย่างไว้นาน เพราะจุลชีพต่างๆ อาจมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพหรือทางกายภาพทำให้มีผลต่อสี ค่าที่อ่านได้อาจผิดพลาด จากค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาขององค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ว่า น้ำประปาควรมีความเข้มข้นของสีไม่เกิน 5 หน่วย

## 2.1.2 คุณสมบัติทางเคมี

คุณสมบัติทางเคมีเป็นคุณสมบัติที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือการสัมผัสอื่นๆ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อจะได้ทราบผล โดยจะสามารถบอกได้ว่า น้ำมีคุณภาพลักษณะใด คือ น้ำมีความกระด้างหรือเป็นน้ำอ่อน น้ำมีสภาพเป็นกรดหรือด่างมากน้อยเพียงใด น้ำมีแร่ธาตุอะไรละลายอยู่ มีสารพิษอันตรายปะปนอยู่หรือไม่ เมื่อทราบผลการวิเคราะห์น้ำแล้วจึงสามารถบอกได้ว่าน้ำมีคุณภาพไปในลักษณะใด จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดเป็นน้ำประปาด้วยวิธีใด และจะช่วยในการออกแบบโรงผลิตน้ำประปาด้วย ช่วยในการคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ต้องการผสมลงไปใต้น้ำดิบ ทั้งหมดนี้ต้องอาศัยความรู้ ประสบการณ์ต่างๆ ในการใช้ข้อมูลของคุณสมบัติทางเคมีมาพิจารณาในงานประปา ซึ่งจะขอกล่าวเฉพาะ เหล็ก แมงกานีส และสารอินทรีย์เท่านั้น

### 2.1.2.1 เหล็ก (Fe)

เหล็กมักจะพบในแหล่งน้ำทั่วไป โดยเฉพาะน้ำใต้ดิน เหล็กเกิดขึ้นในแหล่งธรรมชาติที่ชั้นใต้ดิน ซึ่งมีมากที่สุดแร่ธาตุหนึ่ง เหล็กที่อยู่ในน้ำจะมี 2 รูปคือ ในรูปของเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ซึ่งละลายน้ำได้ดี และในรูปของเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) ซึ่งจะไม่ละลายน้ำแต่จะตกตะกอนเป็นคราบอยู่ตามภาชนะ พวกเหล็กเฟอร์รัสจะพบได้มากในน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะน้ำบาดาล โดยละลายอยู่ในรูปของ  $Fe(HCO_3)_2$  และ  $FeCl_2$  จากคุณสมบัติทางเคมีของเฟอร์รัส ทำให้น้ำที่มี  $Fe^{2+}$  ยังคงเป็นน้ำใสอยู่ แต่เมื่อสูบน้ำขึ้นมา พวก  $Fe^{2+}$  จะไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งทำให้เกิดเป็น  $Fe^{3+}$  ที่ตกตะกอน ทำให้มีน้ำขุ่นขึ้นและมีสีสนิมเหล็กอยู่ในน้ำประปา

โดยทั่วไปเหล็กที่อยู่ในน้ำประปาจะไม่ส่งผลกระทบต่อผู้บริโภค ซึ่งค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาขององค์การอนามัยโลกได้กำหนดว่า น้ำประปาควรมีความเข้มข้นของเหล็กไม่เกิน 0.3 มก/ล ทั้งนี้เพื่อไม่ให้น้ำประปามีสีสนิมเหล็ก และอาจเป็นแหล่งอาหารให้แก่แบคทีเรียที่เจริญขยายพันธุ์ขึ้นในระบบท่อจ่ายน้ำประปาและในบ่อน้ำทั่วไป ซึ่งเรียกแบคทีเรียนี้ว่าไอรอนแบคทีเรีย (Iron Bacteria) เช่นพวกเกลลิโอเนลรา (Gallionella) ซึ่งทำให้น้ำประปาเกิดปัญหาทางที่ได้กล่าวแล้วข้างต้นและยังทำให้ท่อประปาอุดตันได้ พร้อมทั้งทำให้เครื่องสูบน้ำประปาเสียหายได้อีกด้วย

นอกจากนี้เหล็กเป็นธาตุที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต เพราะเป็นส่วนประกอบของเม็ดเลือดแดงของคนและสัตว์ ความต้องการของคนอยู่ในช่วง 7-35 มก/วัน ดังนั้นคนที่ขาดเหล็กมักจะเป็นโรค

โลหิตจาง แต่ถ้าน้ำดื่มมีเหล็กมากเกินไปอาจทำให้ผู้ที่ดื่มน้ำนั้นเป็นโรคเกี่ยวกับไตเพราะร่างกายไม่สามารถขับถ่ายออกได้หมด เหล็กก็จะถูกสะสมอยู่ที่ตับ ทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับตับอีกด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับและระยะเวลาที่ร่างกายได้รับเข้าไป ดังนั้นการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กในน้ำจึงนับว่าสำคัญมาก เหล็กสามารถถูกกำจัดได้ด้วยการเติมอากาศ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของการเติมอากาศ คือ



ซึ่งจะทำให้เหล็กเฟอร์รัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) กลายเป็นเหล็กเฟอร์ริก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) หากน้ำมีความกระด้างอยู่ด้วย เหล็กจะถูกกำจัดได้ง่ายมาก แต่น้ำมีกรดสูงเหล็กจะถูกกำจัดออกได้ยากกว่าเพราะน้ำที่มีค่าความเป็นกรดสูงเหล็กมักจะเกิดอยู่ในรูปเฟอร์รัส ดังนั้นเราต้องเติมด่างลงไปเพื่อยกระดับของพีเอชของน้ำให้มีค่าประมาณ 9 เสียก่อน จึงค่อยทำการเติมอากาศต่อไป

วิธีการตรวจวัดเหล็กที่ใช้กันมาก คือ วิธีฟีนแอนโทโรลีน (Phenanthroline) โดยวัดเหล็กในรูปเฟอร์รัสจะรวมตัวกับ 1, 10- phenanthroline ที่ pH 3.2-3.3 เกิดเป็นอิมอนเชิงซ้อนที่มีสีแดงส้ม วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) นำไปเทียบกับเส้นกราฟมาตรฐานก็จะหาความเข้มข้นของเหล็กในน้ำได้ นอกจากนี้ยังมีวิธีอะตอมมิกแอพซอร์พชันสเปกโตรเมตริก (Atomic Absorption Spectrometric) ซึ่งใช้วิเคราะห์เหล็กได้ทั้งในรูปเฟอร์รัสและเฟอร์ริก โดยทั้ง 2 วิธีเหมาะสำหรับน้ำธรรมชาติและน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

### 2.1.2.2 แมงกานีส (Mn)

แมงกานีสจะพบอยู่ในแหล่งน้ำทั่วไป โดยมักจะพบปะปนอยู่กับเหล็กเสมอ แต่โดยทั่วไปจะมีปริมาณที่น้อยกว่า แมงกานีสก็จะพบได้ในน้ำบาดาลมากกว่าน้ำผิวดิน แมงกานีสที่อยู่ในน้ำจะมี 2 รูปแบบ คือ  $\text{Mn}^{2+}$  ซึ่งไม่ละลายน้ำและ  $\text{Mn}^{4+}$  ซึ่งละลายน้ำ โดยแมงกานีสจะคงตัวไม่แปรเปลี่ยนรูปร่างง่ายของเหล็ก ทำให้การกำจัดแมงกานีสออกจากน้ำจึงกระทำได้ยากกว่า จำเป็นต้องมีทั้งออกซิเจนและคลอรีนมาช่วยในการกำจัดแมงกานีสออก

เนื่องจากแมงกานีสเป็นโลหะจำเป็นสำหรับการทำงานของเอนไซม์บางตัว ดังนั้นการรับแมงกานีสจากอาหารในระดับ 10 มก/ล จึงไม่ถือว่าเป็นอันตราย หากปริมาณมากกว่านี้อาจเป็นอันตรายได้ แต่กว่าจะถึงระดับนั้นมันจะก่อความรำคาญอย่างหนักขึ้นก่อน แมงกานีสความเข้มข้น

เกินกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือความเข้มข้นรวมกับเหล็กที่มากกว่า 0.3-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเริ่มสร้างปัญหา โดยแมงกานีสจะตกตะกอนแยกตัวจากน้ำถ้าสัมผัสกับออกซิเจนหรือคลอรีน เกิดเป็นคราบจับติดอยู่ภายในท่อ ซึ่งบางครั้งก็หลุดติดไปกับน้ำประปาด้วย คราบที่เกิดจากแมงกานีสไดออกไซด์มีสีดำ แต่ถ้ามีเหล็กอยู่ด้วยจะเป็นคราบสีน้ำตาลเข้ม ถ้าใช้น้ำประปาที่มีแมงกานีสเจือปนอยู่ซักผ้าสีอ่อนๆ จะมีรอยด่าง หรือถ้าใช้กับสุขภัณฑ์สีขาวจะมีคราบน้ำที่มีแมงกานีสอยู่ สำหรับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาขององค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ว่า น้ำประปาควรมีความเข้มข้นของแมงกานีสไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

## 2.2 การปรับปรุงคุณภาพน้ำ

องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้นิยามวัตถุประสงค์การปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคไว้ 3 ประการคือ

- ผลิตน้ำสะอาดเพื่อใช้ในการอุปโภคบริโภคได้โดยปลอดภัย (Safe and Wholesome)
- ผลิตน้ำให้พอกับความต้องการของผู้ใช้น้ำ (Adequate Quantity)
- ใช้งัต้นทุนในการผลิตต่ำและพร้อมที่จะจ่ายน้ำให้แก่ผู้ต้องการน้ำอย่างทั่วถึง (Readily Available Users)

### 2.2.1 กระบวนการบำบัดน้ำ

กระบวนการบำบัดน้ำประกอบด้วยหลายขั้นตอน คือ เต็มอากาศ ตกตะกอนธรรมชาติ ระบบทรายกรองเร็ว การแก้ความกระด้างและการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งประสิทธิภาพของแต่ละขั้นตอนแสดงในตารางที่ 2.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำในชั้นต่างๆ (โคมลอย คิวบอร์ และ คณะ, 2523)

คุณสมบัติ	กำจัดโดย				
	การเติม อากาศ (Aeration)	การ ตกตะกอน ธรรมดา	การตกตะกอนด้วย สารเคมีและกรอง อย่างรวดเร็ว	การแก้ความ กระด้างโดย ใช้ปูนขาว	การฆ่าเชื้อ โดย คลอรีน
จุลินทรีย์	ไม่ได้ผล	พอประมาณ	ดี	พอประมาณ (โดยการเติม ปูนขาวมาก เกินพอ)	ดี
สี	ไม่ได้ผล (ยกเว้น เหล็ก)	ไม่ได้ผล	ดี	ดี	ไม่มีผล (ยกเว้นใน กรณีความ เข้มข้น สูงๆ)
ความขุ่น	ไม่ได้ผล	พอประมาณ หรือดี	ดี	ดี	ดี(ถ้าใช้ คลอรีนใน ปริมาณ มาก)
กลิ่น สี	ดี	ไม่ได้ผล	ดี	ได้ผล เล็กน้อย	ไม่ได้ผล
ความกระด้าง	ได้ผล เล็กน้อย	ไม่ได้ผล	เปลี่ยนรูปของความ กระด้าง	ดี	ไม่ได้ผล
เหล็กและ แมงกานีส	ดี	ดี หลังจาก ผ่าน กระบวนการ เติมอากาศ			



จากผลการแก้ไขมาตรฐานน้ำดื่มที่ปลอดภัยของสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1986 ทำให้กฎข้อบังคับการทำความสะอาดน้ำผิวดิน (Surface Water Treatment Rule, SWTR) ซึ่งประกาศใช้โดยองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (USEPA) ได้บังคับให้องค์กรที่ผลิตน้ำสำหรับสาธารณูปโภค ซึ่งใช้ระบบการกรองแบบธรรมดาและกรองโดยตรง ต้องทำให้น้ำที่ผ่านการกรองมีความขุ่นไม่เกิน 0.5 NTU หรือต่ำกว่า และอาจจะถูกบังคับให้ผลิตน้ำกรองให้มีระดับของความขุ่นต่ำกว่า 0.2 NTU นอกจากนี้ค่ามาตรฐานต่างๆของน้ำประปาที่เคร่งครัดมากขึ้น จึงทำให้ค่าระดับความปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Contaminant Levels, MCLs) มีค่าต่ำลงมากและผลจากกฎข้อบังคับเหล่านี้ทำให้มีความสนใจในเทคโนโลยีการกรองอื่นๆ เพิ่มมากยิ่งขึ้น เช่น กระบวนการเมมเบรน เพื่อให้น้ำที่ผลิตได้มีคุณภาพยิ่งขึ้น

ในปี 1994 ที่อเมริกาเหนือ มีการสร้างระบบไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน (Microfiltration Membrane) ขนาดใหญ่แห่งแรกสำหรับบำบัดน้ำผิวดิน โดยออกแบบให้มีความจุ 5 มิลลิกรัม-วัน (19 มิลลิลิตร/วัน) ซึ่งสามารถบำบัดน้ำผิวดินที่มีความขุ่นมากกว่า 250 NTU ให้เหลือ 0.3 NTU การประยุกต์ใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Membrane) ในการบำบัดน้ำผิวดินจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา (Lozier และคณะ, 1997)

แม้ว่าในปัจจุบันกระบวนการเมมเบรนจะยังไม่นิยมใช้ในประเทศไทย เนื่องจากราคาที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับกระบวนการบำบัดธรรมดา แต่ในอนาคตข้างหน้าหากแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีคุณภาพเหมาะสมในการผลิตน้ำหายากขึ้น กระบวนการเมมเบรนจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ

### 2.3 กระบวนการเมมเบรน

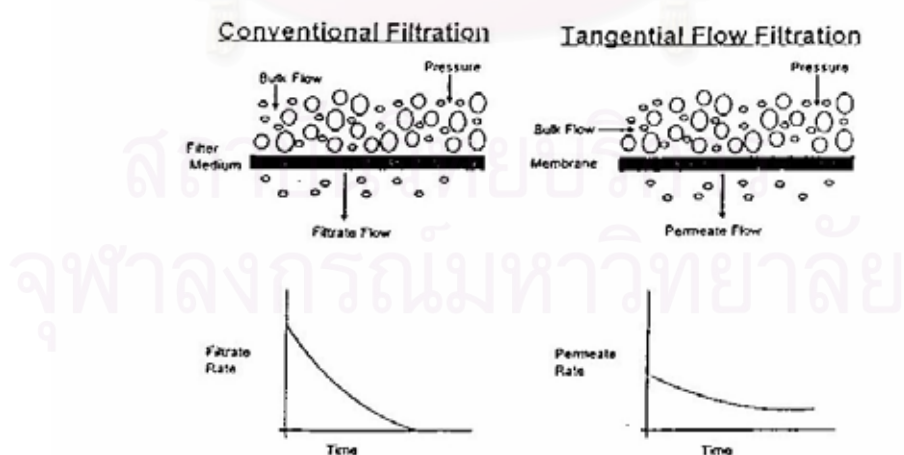
กระบวนการเมมเบรน หมายถึงกระบวนการต่างๆ ที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (Semipermeable Membrane) ในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลว (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2539)

การเกิดขึ้นของกระบวนการเมมเบรน สร้างมิติใหม่ในการแยกและทำให้บริสุทธิ์ (Purification) สำหรับทั้งระบบ ของแข็ง-ของเหลว และ ก๊าซ-ก๊าซ โดยกระบวนการเมมเบรนมีบทบาทที่สำคัญทั้งในการบำบัดน้ำดีและน้ำเสีย ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างกระบวนการผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน (Conventional Process) คือ การตกตะกอนด้วยสารเคมี และวิธีการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological Oxidation) กับกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน คือกระบวนการเมมเบรนจะ

แยกสิ่งเจือปนออกจากน้ำ โดยไม่มีการทำลายโครงสร้างของสิ่งเจือปนเหล่านั้น นอกจากนี้กระบวนการเมมเบรนยังมีข้อได้เปรียบที่สำคัญอื่นๆอีกคือ ใช้พลังงานต่ำ ต้องการพื้นที่น้อยสามารถใช้ได้ง่ายในการปรับปรุงให้ระบบที่มีอยู่แล้วให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น การแยกเป็นไปอย่างต่อเนื่องให้คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบที่ดี และหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีต่างๆ จึงไม่มีปัญหาเรื่องตะกอนเคมีที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการเมมเบรนเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ

เนื่องจากความต้องการที่เพิ่มขึ้นในการลดปริมาณของเสีย (Waste Minimization) ตลอดจนการนำกลับมาใช้ใหม่ ประกอบกับความต้องการน้ำที่ออกจากระบบที่มีคุณภาพดีตามมาตรฐานจึงทำให้มีการพัฒนากระบวนการเมมเบรนและเพิ่มจำนวนการใช้กระบวนการนี้ โดยการแยกและทำให้บริสุทธิ์ สามารถทำได้โดยใช้แรงขับ (Driving Forces) ที่แตกต่างกัน นั่นคือ แรงดัน ความเข้มข้น ศักย์ไฟฟ้า อุณหภูมิ และความดันออสโมติก

หลักการสำคัญของกระบวนการเมมเบรน คือ จะต้องมีความดันที่กระทำให้สารละลายไหลผ่านแผ่นเมมเบรน และเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้น หรือผลต่างของความดัน การกรองโดยใช้แผ่นเมมเบรนนี้มีข้อแตกต่างจากการกรองธรรมดา รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบการกรองน้ำผ่านแผ่นกรองธรรมดากับแผ่นเมมเบรนจะเห็นว่าทิศทางการไหลของน้ำแตกต่างกัน ทำให้การกรองแบบธรรมดามีการอุดตันของอนุภาคเร็วกว่าการกรองผ่านแผ่นเมมเบรน แผ่นเมมเบรนที่ใช้งานอยู่ทั้งหมด กล่าวได้ว่าเป็นแผ่นเมมเบรนที่มีการสังเคราะห์หรือผลิตขึ้น (Synthetic membrane) หรือทำจากแผ่นธรรมชาติ



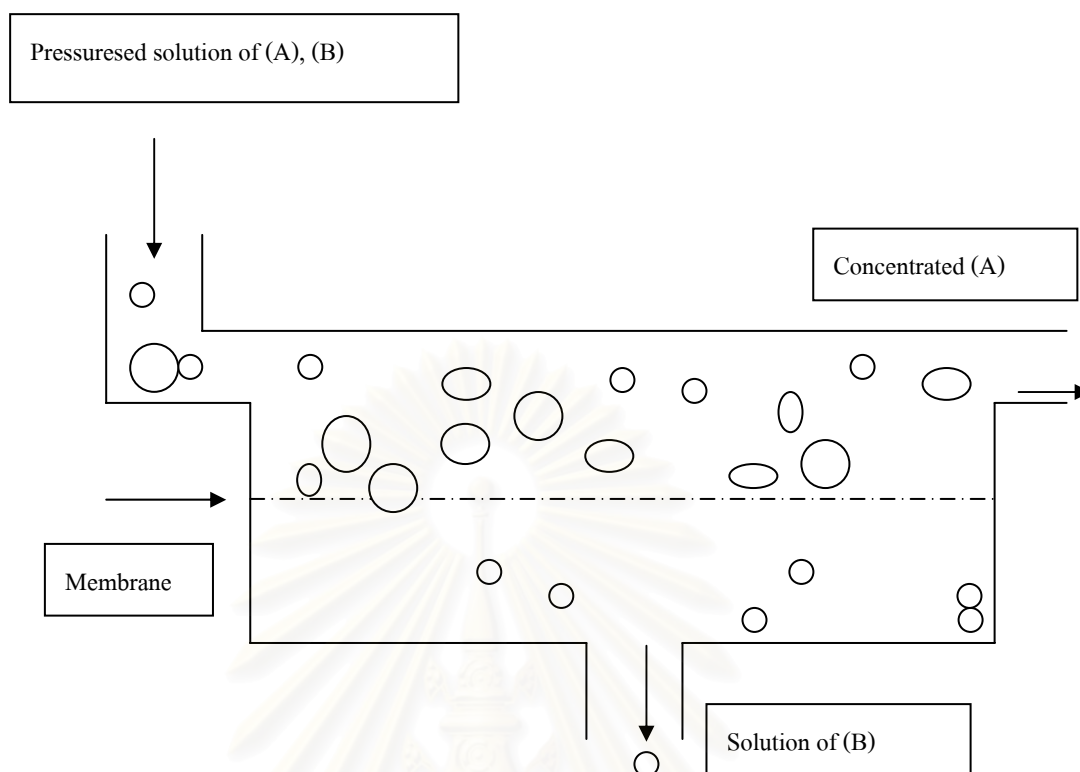
รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบการกรองน้ำผ่านแผ่นกรองธรรมดากับแผ่นเมมเบรน

(Williamson, 2007)

ถ้าจะให้คำจำกัดความอาจอธิบายได้ว่าแผ่นเมมเบรน คือ ตัวกลางซึ่งอาจเป็นฟิล์มบางๆ หรือหยดน้ำขนาดเล็กมากๆ ที่ทำหน้าที่ 2 เฟส โดยทั่วไปแผ่นเมมเบรน เป็นฟิล์มที่เป็นของแข็ง และอาจเป็นของเหลว ลักษณะที่สำคัญที่สุดของแผ่นเมมเบรน คือ คุณสมบัติในการเลือกผ่านสาร หนึ่งมากกว่าสารอื่น (Semi-permeable/permeableselective membrane) การเลือกผ่านสารเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมี หรือ ทางกายภาพ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากการมีค่าสัมพรรคภาพ (Affinity) ของแผ่นเมมเบรนของสารนั้นๆ หรือจากขนาดของรูพรุน หรือ จากการมีประจุของแผ่นเมมเบรน เป็นต้น

ในที่นี้ จะเปรียบเทียบกระบวนการเมมเบรนกับกระบวนการแยกอื่นๆ ให้เห็นชัดเจนขึ้นว่า กระบวนการเมมเบรนมีส่วนที่เหมือนหรือแตกต่างจากกระบวนการแยกอื่นๆ อย่างไร การจำแนกกระบวนการแยกตามขนาดของโมเลกุลหรืออนุภาค และตามตัวแปรที่สำคัญหรือสาเหตุที่ทำให้เกิดการแยกได้ โดยโมเลกุลขนาดเล็ก หรือ ไอออนที่มีขนาด  $10^{-17}$ – $10^{-16}$  นาโนเมตร หรือ 0.0001-0.001 ไมโครเมตร อาจแยกออกจากสารละลายได้โดยใช้ออสโมซิสผันทกลับ (Reverse osmosis, RO), ไดอะไลซิส (Dialysis, D) หรือ อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis, ED) โดยทั้ง 3 กระบวนการนี้จัดเป็นกระบวนการเมมเบรน ซึ่งตัวแปรที่ทำให้เกิดการแยกต่างจากการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange resin) และการกลั่นหรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอาจแยกโดยใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration Membrane) หรือใช้เจลโครมาโตกราฟี (Gel chromatography) เป็นต้น สำหรับอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่ ก็อาจแยกโดยใช้ไซโคลน (Cyclone) เครื่องแยกเหวี่ยง (Centrifuge) และไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน (Microfiltration Membrane) ซึ่งส่วนมากอาศัยผลของขนาดและความหนาแน่นในการแยก

**2.4 การจำแนกกระบวนการเมมเบรนทั้งหมดที่ได้พัฒนาขึ้น** โดยจำแนกตามหลักการของแรงขับเคลื่อน (เช่น ความเข้มข้น ความดัน ความต่างศักย์) สารที่ผ่านหรือถูกกักกันโดยแผ่นเมมเบรน รูปทั่วไปของกระบวนการเมมเบรน อาจพิจารณาจากรูป 2.2 ซึ่งสารละลายที่ป้อน (Feed) ไหลผ่านแผ่นเมมเบรน โดยแรงขับเคลื่อน สารละลายส่วนที่สามารถผ่านแผ่นเมมเบรนได้คือ เพอมิเอท (Permeate) และส่วนที่ไม่สามารถผ่านได้ คือ รีเทนเทท (Retentate หรือ Concentrate) ตัวแปรที่สำคัญที่แสดงความสามารถในการแยกคือ อัตราการไหลผ่านแผ่นเมมเบรน หรือ อัตราการผลิตน้ำ (ของเพอมิเอท) ซึ่งอาจมีหน่วยเป็นปริมาตร หรือน้ำหนัก หรือ โมล ของเพอมิเอทต่อเวลา ต่อหน่วยพื้นที่ของเมมเบรน



รูปที่ 2.2 หลักการของกระบวนการเมมเบรน (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2539)

**2.4.1 กระบวนการไดอะไลซิส (Dialysis process)** ไดอะไลซิสใช้ผลต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลายระหว่างสองด้านของแผ่นเมมเบรน ตัวถูกละลายขนาดเล็กจะถ่ายเทโดยการแพร่ผ่านเมมเบรนจากด้านที่มีความเข้มข้นสูง ไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำ ดังนั้น จึงสามารถใช้ในการแยกเกลือและตัวถูกละลายขนาดเล็กออกจากตัวถูกละลายขนาดใหญ่ การประยุกต์ใช้ที่สำคัญอันดับแรกคือ ใช้แผ่นเซลโลเฟน (Cellophane) เพื่อแยกเกลือและตัวถูกละลายขนาดเล็กออกจากโปรตีนและวัคซีนเซรุ่ม การใช้งานหลักทางการแพทย์คือ การทำเลือดให้บริสุทธิ์ (ไตเทียม) โดยแยกยูเรีย กรดยูริก และสารอื่นจากเลือด แต่การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมไม่มากนัก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ช้ามากเพราะใช้ผลต่างความเข้มข้นเป็นแรงขับเคลื่อน และแผ่นเมมเบรน มีความสามารถในการแยกต่ำคือ ไม่สามารถแยกโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกันได้

**2.4.2 กระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis, ED)** อิเล็กโตรไดอะไลซิสเป็นกระบวนการแยกตัวประกอบที่มีประจุ (ไอออน) จากสารละลายอิเล็กโตรไลต์ โดยใช้แผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนมาต่ออนุกรมกันและอยู่ระหว่างขั้วบวก (Anode) และลบ (Cathode) มีความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดเป็นแรงขับเคลื่อนร่วมกับการเลือกผ่านไอออนของแผ่นเมมเบรนทำให้เกิดการแยก โดยไอออนบวกจะผ่านแผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนบวก ส่วนไอออนลบก็จะผ่าน

แผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนลบเท่านั้น เป็นผลให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสูง และสารละลายเจือจาง การใช้งานที่สำคัญของกระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส คือ การผลิตน้ำดื่มจากน้ำกร่อย หรือน้ำทะเล การบำบัดน้ำเสีย เช่น การแยกโลหะไอออนกลับคืนในอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ (Electroplating)

**2.4.3 ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis, RO) หรืออาจเรียกว่าไฮเปอร์ฟิลเตรชัน (Hyperfiltration)** เป็นกระบวนการแยกสารละลายโดยใช้ผลต่างของความดันระหว่างแผ่นเมมเบรนเป็นแรงขับเคลื่อน แผ่นออสโมซิสผันกลับ มีความสามารถในการกักกันโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น เกลือ น้ำตาล (น้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 1000 หรือมีขนาด 0.1-1.0 นาโนเมตร) แต่ยอมให้น้ำผ่านได้ และเป็นแผ่นที่มีโครงสร้างแน่นหรือไม่มีรูพรุนการผ่านแผ่นของสารเกิดจากความสามารถในการละลายและการแพร่ (Solution-diffusion) ในแผ่น และเนื่องจากสารละลายของตัวถูกละลายโมเลกุลเล็กมีความดันออสโมติกสูง ทำให้ความดันที่ใช้ในการป้อนสารละลายต้องมีค่าสูง คืออยู่ระหว่าง 1-10 เมกะปาสคาล หรือ 10-100 บรรยากาศ

การประยุกต์ใช้ที่แพร่หลายของกระบวนการออสโมซิสผันกลับ คือ การแยกเกลือจากน้ำกร่อย น้ำทะเล เพื่อผลิตน้ำจืด การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้ การผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง ตลอดจนการบำบัดน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักเจือปนเช่น จากอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ

**2.4.4 อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF)** เป็นกระบวนการที่ใช้แผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) สำหรับแยกสารโมเลกุลใหญ่ คอลลอยด์ ออกจากน้ำและสารโมเลกุลเล็กผ่านแผ่นอัลตราฟิลเตรชัน มีขนาดรูพรุนประมาณ 2-20 นาโนเมตร (20-2000 อังสตรอม) แรงขับเคลื่อนที่ใช้ในการแยกต่ำกว่าออสโมซิสผันกลับ คือ 100-800 กิโลปาสคาล (1-8 บรรยากาศ) การใช้งานหลักๆ คือ การแยกหรือเพิ่มความเข้มข้น โปรตีน คอลลอยด์ การบำบัดน้ำทิ้ง ทำน้ำให้บริสุทธิ์ การทำน้ำผลไม้ให้ใส เป็นต้น

**2.4.5 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF)** เป็นกระบวนการที่ใช้แผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดค่อนข้างใหญ่ (0.1-10 ไมโครเมตร) สำหรับแยกโมเลกุลใหญ่ สารแขวนลอยหรืออนุภาคขนาดเล็กๆ ออกจากของเหลว โดยช่วงความดันหรือแรงขับเคลื่อนในการป้อนสารละลายต่ำกว่าออสโมซิสผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน คืออยู่ในช่วง 100-500 กิโลปาสคาล (1-5 บรรยากาศ) ถ้าใช้ไมโครฟิลเตรชันในลักษณะ Dead-end จะทำให้เกิดการสะสมของเค้ก (Cake) บนผิวของเมมเบรน ดังนั้นการออกแบบการไหลผ่านแผ่นเมมเบรนในลักษณะการไหลขวางซึ่งเรียกกันทั่วไปว่า Cross flow microfiltration (CFMF) จะเหมาะสมกว่าในแง่ช่วยลดการสะสมของเค้ก การใช้งานที่

แพร่หลาย คือ การบำบัดน้ำทิ้ง ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ใช้ในเทคโนโลยีชีวภาพ อาจร่วมกับกระบวนการหมักเพื่อแยกเซลล์จากผลิตภัณฑ์

**2.4.6 กระบวนการแยกก๊าซ (Gas separation)** เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกก๊าซผสม แบ่งเป็น 2 แบบ แบบแรกคือ ก๊าซเพอเมชัน (Gas permeation, GP) ซึ่งโมเลกุลของก๊าซหรือไอผ่านแผ่นเมมเบรนแบบแน่น/ไม่มีรูพรุน ด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ (คล้ายกับในออสโมซิสผันกลับ) แรงขับเคลื่อนในการแยกคือ ความดันหรือความดันย่อย ซึ่งอาจต่ำเพียง 100 กิโลปาสคาล หรือสูงถึง 10 เมกกะปาสคาล แบบที่สองคือ ก๊าซดิฟฟิวชัน (Gas diffusion, GD) เป็นการแยกก๊าซผ่านแผ่นเมมเบรนรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งแรงขับเคลื่อนอาจเป็นผลต่างของความเข้มข้นหรือความดันย่อยก็ได้ ตัวอย่างของแบบที่สองคือ การเพิ่มความเข้มข้นของไอโซโทป (Isotopes) ของยูเรเนียม ส่วนอุตสาหกรรมการใช้ส่วนใหญ่เป็นก๊าซเพอเมชัน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เติบโตเร็ว ตัวอย่างเช่น การแยกฮีเลียม ไฮโดรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซผสม

**2.4.7 เพอเวปอเรชัน (Pervaporation, PV)** เป็นการแยกองค์ประกอบหนึ่งๆ ออกจากสารละลายผ่านแผ่นเมมเบรนแบบแน่นด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ องค์ประกอบที่ผ่านเมมเบรน (ด้านเพอเมอเท) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากควบคุมความดันด้านเพอเมอเทให้ต่ำกว่าความดันย่อยของสารที่ผ่านเมมเบรน และการเก็บตัวอย่างที่เป็นไอสามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิให้สารนั้นกลั่นตัวเป็นของเหลว หรืออาจใช้ carrier gas เช่น  $N_2$  เป็นตัวพาไอของสารผลิตภัณฑ์ผ่านแผ่นเมมเบรนที่ใช้ในกระบวนการเพอเวปอเรชันอาจเป็นแผ่นชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งจะเลือกผ่านน้ำ ดังนั้นการประยุกต์ใช้จึงเป็นการแยกน้ำ (Dehydration) เพื่อผลิตสารอินทรีย์เช่น แอลกอฮอล์ ความเข้มข้นสูง หรือการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์เจือจาง

การแยกด้วยแผ่นของเหลว (Liquid membrane, LM) เป็นการแยกผ่านแผ่นเมมเบรนที่มีลักษณะเป็นของเหลว แผ่นของเหลวอาจมีลักษณะเป็นอิมัลชัน (Emulsion) หรือเป็นฟิล์มของเหลวที่เกาะหรือพองตัวอยู่บนแผ่นธรรมดา (Supported liquid membrane) ซึ่งข้อมูลทั่วไปของกระบวนการ เพอเวปอเรชัน (Pervaporation, PV) และเมมเบรนชนิดต่างๆ สามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการเมมเบรนแบบต่างๆ (Reutenbach และ Albrecht, 1989)

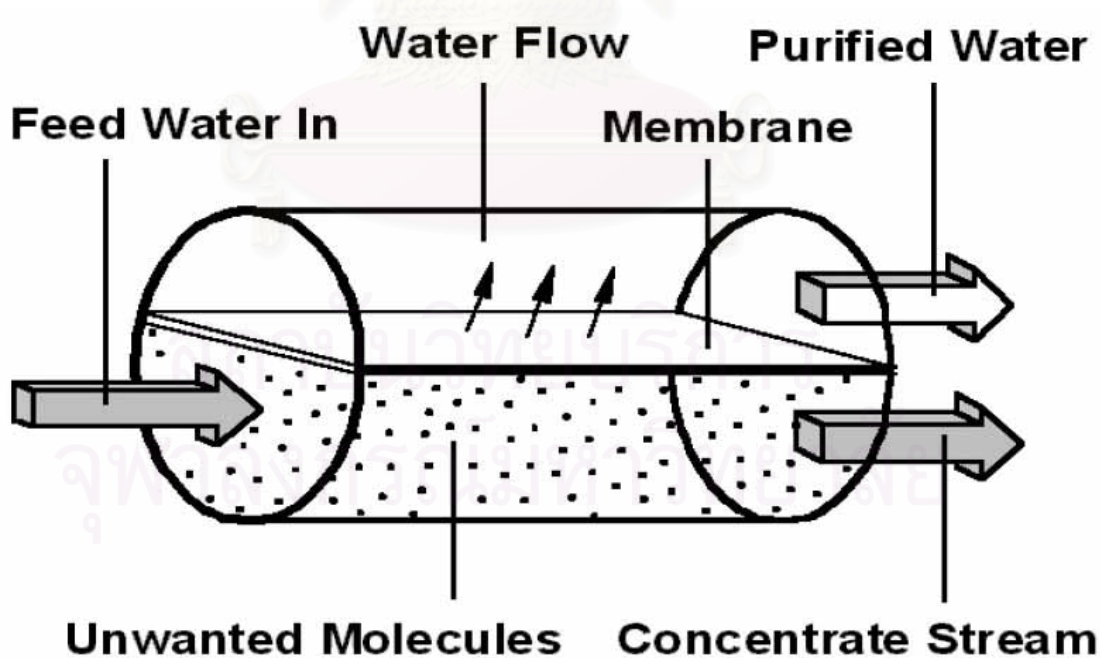
Membrane Process	Separation potential for	Driving Force	Permeating Component
Microfiltration	Suspention, emulsions	Pressure(0.1-500 kPa)	Solvent
Ultrafiltration	Macromolecular solution, emulsions	Pressure(100-1000kPa)	Solvent
Nanofiltration	Di and multivalentions, macromolecules, organics	Pressure(300-1400 kPa)	Solvent
Reverse Osmosis	Aqueous low molecular mass solution, organics solution	Pressure(1000-10000kPa)	Solvent
Osmosis	Aqueous solution	Concentration	Solvent
Dialysis	Aqueous solution	Concentration	Solute(ions)
Electrodialysis	Aqueous solution	Electric potential	Solute(ions)
Gas separation	Gas mixtures, water vapour gas mixture	Pressure(100-10000kPa)	Preferably Permeating Component
Pervaporation	Organic mixture, aqueous organic mixture	Activity	Preferably Permeating Component
Membrane distillation	Ions	Temperature	Solute(ions)
Pertraction	Metal from water	Concentration	Solute(metals)
Liquid membrane	Aqueous low molecular solution	Concentration	Solute(ions)

## 2.5 อุปกรณ์แผ่นเมมเบรน (Membrane Module)

แผ่นเมมเบรนที่ผลิตขึ้นอาจมีรูปร่างต่างกัน เช่น เป็นเมมเบรนแผ่นเรียบ หรือเป็นท่อในการใช้งานต้องบรรจุหรือประกอบแผ่นเมมเบรนในหน่วยอุปกรณ์ให้มีพื้นที่แผ่นเมมเบรนตามต้องการ ซึ่งเรียกว่าโมดูล (Module) ได้มีการออกแบบอุปกรณ์ที่มีรูปร่างต่างกันโดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ แบบแผ่นกรอง แบบท่อ แบบเส้นใยกลาง และแบบท่อม้วน หลักในการออกแบบต้องคำนึงถึงการใช้งาน คือ ต้องมีอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรน กะทัดรัด คือ มีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง เป็นต้น

### 2.5.1 โมดูลแบบแผ่นกรอง(Plate and Frame Module)

เทคนิคนี้เป็นการจัดแผ่นเมมเบรนที่ง่ายที่สุด โมดูลที่ใช้เทคนิคนี้มีลักษณะการทำงานคล้ายเครื่องกรองแบบอัดความดัน (Filter press) แผ่นเมมเบรนวางอยู่บนแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน (Porous Plate) หรือแผ่นรองรับที่มีร่องให้น้ำไหลออกได้ ดังรูปที่ 2.3 เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางซ้อนและสลับกัน น้ำถูกบังคับให้ซึมผ่านเมมเบรนและแผ่นรองรับและไหลออกจากโมดูล โมดูลแบบนี้ต้องเสียดำติดตั้ง และดูแลรักษาแพงมาก

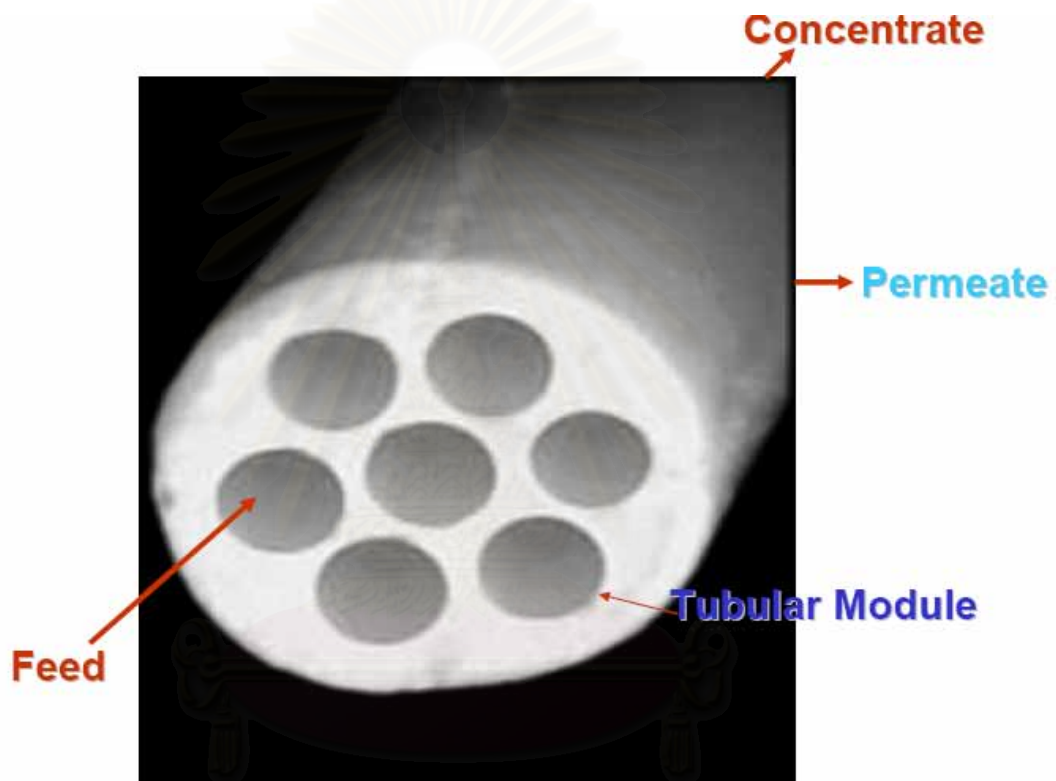


รูปที่ 2.3 โมดูลแบบแผ่นกรอง (Plate and Frame Module) (Mayarovich และ Knyazkova, 1999)



### 2.5.2 โมดูลแบบท่อ (Tubular Module)

เมมเบรนแบบท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 มิลลิเมตร โดยปกติในตัวบรรจุ (Housing) จะประกอบด้วยท่อเมมเบรนหลายๆ ท่อ (ขึ้นอยู่กับพื้นที่แผ่นเมมเบรนที่ต้องการ) สารป้อนไหลเข้าในท่อและเพอมีเอท ซึ่งไหลผ่านแผ่นเมมเบรนจะถูกเก็บมารวมกัน ดังรูปที่ 2.4 นอกจากตัวบรรจุแล้วก็ต้องมีอุปกรณ์อื่นๆ ชุดอุปกรณ์แบบนี้มีพื้นที่เมมเบรนต่อหน่วยปริมาตรอุปกรณ์ต่ำกว่าแบบแผ่น นอกจากแผ่นเมมเบรน โพลีเมอร์แล้วยังนิยมผลิตเมมเบรนเซรามิกส์แบบท่อ และอาจจะเป็นแบบโมนอลิท

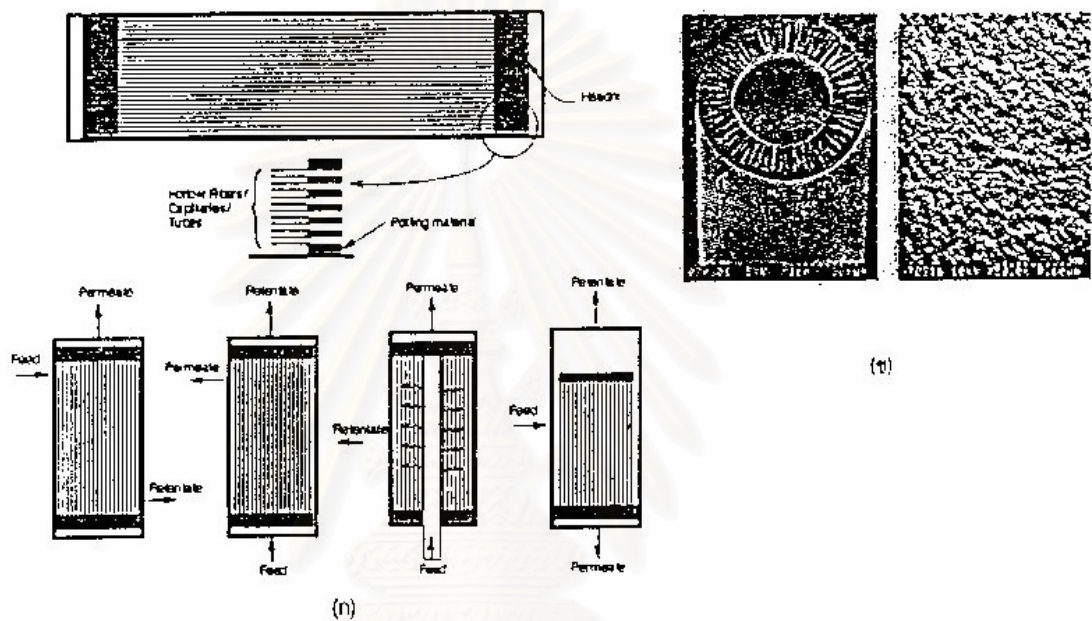


รูปที่ 2.4 ลักษณะอุปกรณ์แบบท่อ (Reutenbach และ Albrecht, 1989)

### 2.5.3 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module)

โมดูลแบบเส้นใยกลวงหรือ Hollow Fiber Module ทำมาจากวัสดุในลอนจำพวกโพลีเอไมด์ (Polyamide) ซึ่งสร้างโดยบริษัทดูปองด์ (Du Pont Co.) ต่อมาภายหลังบริษัทดาวเคมี (Dow Chemical Co.) ได้พัฒนาเมมเบรนที่ทำด้วยเซลลูโลสไตรอะเซเตต (Cellulose Triacetate) และสร้างเป็นเส้นใยกลวงได้ เส้นใยกลวงที่ทำจากโพลีเอไมด์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 50-80 ไมโครเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณครึ่งหนึ่งของภายนอก ส่วนเส้นใยกลวงที่ทำมาจากเซลลูโลสไตรอะเซเตต มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 200-300 ไมโครเมตร

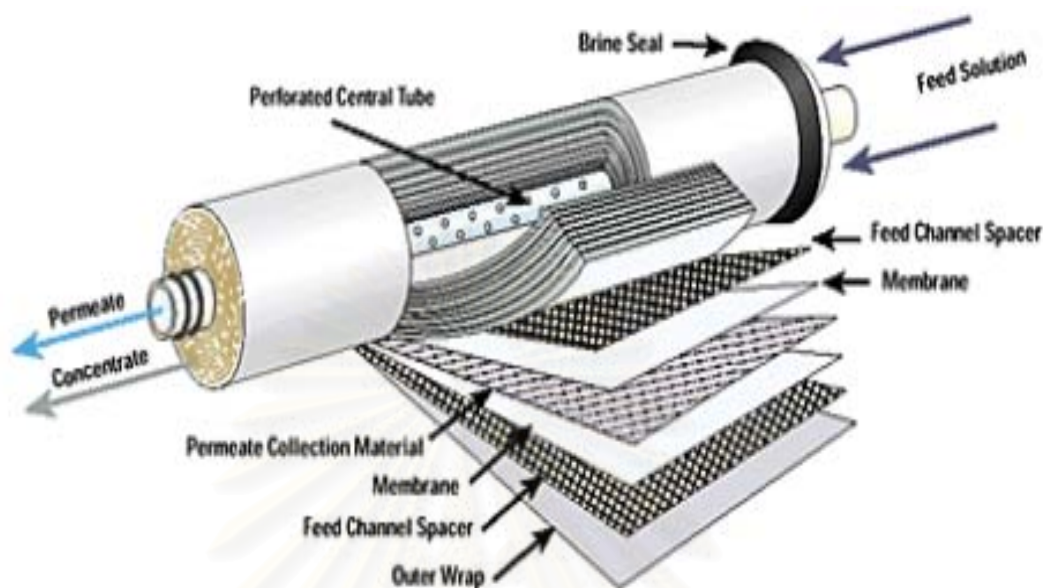
วิธีนำเมมเบรนแบบเส้นใยคางมาใช้ประโยชน์กระทำโดยนำมารวมกันเป็นมัด ๆ และงอพับให้เป็นรูปเกือกม้าหรือตัว U ปลายทั้งสองข้างของเส้นใยทั้งหมดมัด ถูกตรึงติดอยู่กับทางน้ำออก เส้นใยเมมเบรนทั้งหมดวางอยู่ในถังรูปทรงกระบอก น้ำดิบเข้ามาทางท่อเจาะรู ซึ่งวางอยู่ตรงกลางของถังทรงกระบอก และกระจายน้ำไปยังส่วนต่าง ๆ แรงดันทำให้น้ำซึมเข้าเส้นใยเมมเบรนและทะลุถึงภายในน้ำบริสุทธิ์จะซึมตามรูกลวงของเส้นใยและไปรวมกันที่ทางออก ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Hollow Fiber Module (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2539)

#### 2.5.4 โมดูลแบบท่อม้วน (Spiral Wound Module)

โมดูลแบบนี้ประกอบด้วยเมมเบรน 2 แผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่กลางระหว่างแผ่นเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นแบนทั้งสามรอบท่อเจาะรู โดยมีแผ่นตะแกรงทำด้วยโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) คลุมปิดอยู่ด้านนอก ขอบของแผ่นเมมเบรนทั้งสามด้านถูกอุดไว้ด้วยกาวพิเศษ ขอบที่เหลือปล่อยให้เปิดตามปกติและยึดติดกับท่อเจาะรู ลักษณะเช่นนี้ทำให้น้ำถูกบังคับให้ไหลไปยังท่อเจาะรูเสมอ การม้วนเมมเบรน แผ่นรองรับ และตะแกรงพลาสติก ทำให้ได้โมดูลรูปทรงกระบอกที่สามารถบรรจุไว้ในท่อโลหะธรรมดาได้ โมดูลแบบนี้อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 10 20 หรือ 30 เซนติเมตรตามลำดับ และมีความยาวต่าง ๆ กันแต่ไม่เกิน 1 เมตร น้ำดิบถูกบังคับให้ไหล (ในแนวแกนของโมดูล) เข้าไปตามแผ่นตะแกรง จากนั้นแรงอัดทำให้น้ำซึมผ่านทะลุเมมเบรน (ตามแนวรัศมีของโมดูล) ลงไปถึงแผ่นรองรับซึ่งทำหน้าที่ส่งน้ำบริสุทธิ์ไปยังท่อเจาะรู เพื่อรับน้ำออกจากโมดูล ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โมดูลแบบทอมีวน (Spiral Wound Module) (Reutenbach และ Albrecht, 1989)

## 2.6 กระบวนการเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane Process)

เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันเป็นกระบวนการแยกสาร โมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน เอ็นไซม์ และ แป้ง ออกจากน้ำและสาร โมเลกุลเล็กอื่น ๆ ตัวอย่างสารละลายที่อาจแยก หรือเพิ่มความเข้มข้นได้โดยกระบวนการนี้ ได้แก่ นํ้านม นํ้าผลไม้ สารละลายเอ็นไซม์ สารปฏิชีวนะ ในการดำเนินงาน ใช้ความดันในการป้อนสารละลายผ่านแผ่นเมมเบรนในช่วง 2-10 บรรยากาศ แผ่นเมมเบรนที่ใช้เป็นแผ่นเมมเบรนไม่สมมาตรที่ชั้นผิวหนา 0.1-2 ไมโครเมตร

### 2.6.1 อัตราการผลิตน้ำและการกักกัน (Water Flux)

ในกระบวนการเมมเบรน อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane) อัตราการผลิตน้ำและค่าการกักกันเป็นค่าที่แสดงสมรรถนะของกระบวนการเช่นเดียวกับการออสโมซิสผันกลับ สมการของ อัตราการผลิตน้ำเขียนในรูปของแรงขับเคลื่อนและความต้านทานต่อการไหล เป็นดังนี้

$$J_v = (\Delta P - \Delta \pi) / \mu_v R_t \quad (2.2)$$

เมื่อ  $J_v$  = อัตราการผลิตน้ำของการละลายผ่านแผ่นเมมเบรน (ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร·วินาที)

$\Delta P$  = ผลต่างความดันที่ใช้ให้กับสารละลาย (ปาสคาล)

$\Delta \pi$  = ผลต่างความดันออสโมติกของสารละลาย (ปาสคาล)

$\mu_v$  = ความหนืดของสารละลายที่ผ่านแผ่นเมมเบรน (ปาสคาล·วินาที)

$R_t$  = ความต้านทานรวมต่อการไหลผ่าน (ต่อเมตร)

สำหรับสารละลายของสารโมเลกุลใหญ่ค่า  $\Delta P \gg \Delta \pi$  จึงอาจตัดเทอมของ  $\Delta \pi$  ที่สมการ 2.2 ลดรูปเป็น

$$J_v = \Delta P / \mu_v R_t \quad (2.3)$$

สำหรับกลไกที่แผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันสามารถกักกันตัวถูกละลายได้เป็นกลไกการคัดขนาด (Molecular sieving) โดยอัลตราฟิลเตรชันส่วนมากมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนคือประกอบด้วยตัวถูกละลายที่มีขนาดต่างกัน ปริมาณที่ต่างกันด้วย

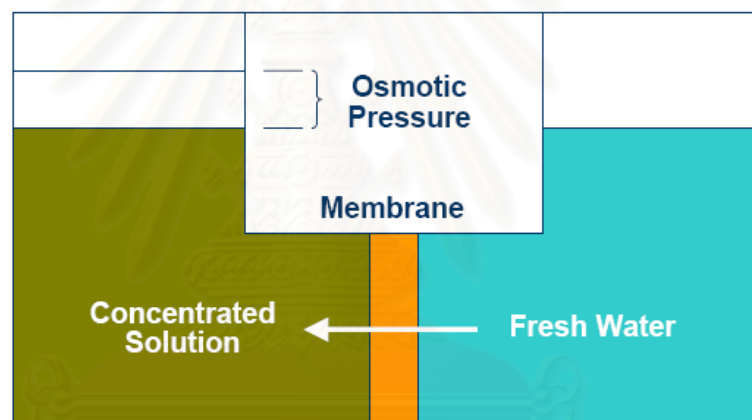
### 2.6.2 กลไกในการทำงานของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration Membrane)

กลไกในการทำงานของกระบวนการเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane) เหมือนกันกับการทำงานของ RO ต่างกันที่แรงขับที่ใช้ คือ เมมเบรน อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane) จะใช้แรงดันที่ต่ำกว่ากระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายแตกต่างกัน ซึ่งโมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module) การทำงานของเมมเบรนทั้งสองชนิดนี้เกี่ยวข้องกันโดยตรงกับกระบวนการออสโมซิส (Osmosis)

ออสโมซิส (Osmosis) หมายถึง การเคลื่อนที่ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติของน้ำผ่านเยื่อเมมเบรนบาง (Semi Permeable Membrane) จากสารละลายเจือจางไปยังสารละลายเข้มข้น (รูปที่

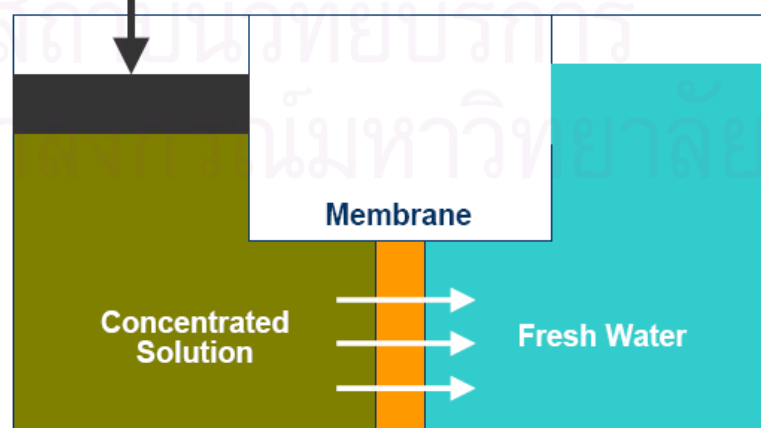
2.7) เชื้อเมมเบรนในอุดมคติยอมให้น้ำไหลผ่านได้เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติ โมเลกุลหรือไอออนบางชนิดอาจไหลผ่านได้เช่นกันถ้าจัดระบบออสโมซิสให้มีการไหลเป็นแบบที่แสดงในรูปที่ 2.7 ก. เมื่อปล่อยให้มีการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนจนกระทั่งถึงจุดสมดุล (ไม่มีการไหลอีก) ระดับน้ำในด้านซ้ายซึ่งเป็นสารละลายเข้มข้นจะสูงกว่าระดับน้ำในด้านขวาซึ่งเป็นน้ำจืด ผลต่างของระดับน้ำนี้เรียกว่า แรงดันออสโมซิส (Osmosis Pressure) ปฏิกิริยาการออสโมซิสเกิดขึ้นเนื่องจากสารละลายเข้มข้นมีความดันไอต่ำกว่าสารละลายเจือจาง ระดับน้ำในทั้งสองด้านของเมมเบรนจึงมีการปรับตัว จนกระทั่งแรงดันบนผิวน้ำทั้งสองมีค่าเท่ากัน ถ้ามีแรงดันที่มีค่าสูงกว่าแรงดันออสโมซิสมากระทำต่อด้านที่มีสารละลายเข้มข้น น้ำจะไหลย้อนกลับ (รูปที่ 2.7 ข.) ซึ่งเป็นการกระทำที่ไหลธรรมชาติ

(ก)



(ข)

pressure to high concentration solution



รูปที่ 2.7 (ก) ออสโมซิส (ข) ออสโมซิสผันกลับ (Reutenbach และ Albrecht, 1989)

วิธีดังกล่าวนี้วิศวกรได้นำมาใช้เพื่อแยกน้ำออกจากสารละลายเข้มข้นต่าง ๆ และเรียกว่า ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) ดังนั้นกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) และ เมมเบรน อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane) จึงอาศัยปัจจัยสำคัญ 2 อย่าง คือ แรงดันและเมมเบรน

แรงดันออสโมซิส ( $\pi$ ) เป็นคุณสมบัติของสารละลายที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นดังอาจแสดงด้วยสมการดังนี้

$$\pi = nCRT \quad (2.4)$$

โดยที่  $\pi$  = แรงดันออสโมติก (บรรยากาศ)

$n$  = จำนวนไอออนในสารประกอบ เช่น NaCl มี  $n = 2$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  มี  $n = 3$  เป็นต้น

$C$  = ความเข้มข้นของสารละลาย (โมล/ลิตร)

$R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ = 0.082 บรรยากาศ-ลิตร/โมล

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) = 273 + °C

### 2.6.3 แบบจำลองการถ่ายเทมวล (Mass Transfer Model)

การเสนอแบบจำลองถ่ายเทมวลในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตน้ำ และเข้าใจกลไกการถ่ายเทของโมเลกุลผ่านเมมเบรนหรือการกักกันโมเลกุลโดยผ่านเมมเบรน แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในช่วงแรก ๆ ได้แก่ แบบจำลองรูพรุน (Pore Model) ซึ่งสมมติว่ารูพรุนเป็นทรงกระบอกและอนุภาคเป็นทรงกลม อัตราการผลิตน้ำของตัวถูกละลายเกิดจากการแพร่ผ่านรูพรุนและการกรองโดยการคัดขนาด และมีผลของการบดบังและแรงเสียดทานที่เกิดจากรูพรุนด้วย อย่างไรก็ตามสมการที่เกี่ยวข้องค่อนข้างซับซ้อน ถึงแม้ว่าจะมีการดัดแปลงให้เหมาะสมขึ้นก็ยังพบว่าไม่มีความถูกต้องเพียงพอในการอธิบายผลการทดลอง แบบจำลองที่ศึกษากันเป็นส่วนใหญ่มีดังต่อไปนี้

- **แบบจำลองเจลโพลาริเซชัน (Gel polarization model : GP)** แบบจำลองนี้อธิบายว่าการลดลงของอัตราการผลิตน้ำเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดเจลที่ผิวหน้าเมมเบรน
- **แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Pore model** แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบรูพรุนเป็นการอธิบายถึงอนุภาคต่างๆ ที่เกาะตัวอยู่บนผิวของเมมเบรนในลักษณะของเค้กซึ่งเป็นรูปแบบของการอุดตัน (Fouling) แบบหนึ่ง ซึ่งอธิบายได้โดยใช้สมการของ Kozeny-Carman ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$\alpha_{cake} = \frac{180}{\rho_p d_p^2} \left( \frac{1 - \varepsilon_{cake}}{\varepsilon_{cake}^2} \right) \quad (2.5)$$

โดย  $\alpha_{cake}$  คือ ความต้านทานที่เกิดขึ้นจากอนุภาคต่างๆ บนผิวเมมเบรนในลักษณะของเค้ก

$\varepsilon_{cake}$  คือ ความพรุนของเค้กบนผิวหน้าเมมเบรน

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค (กก./ลบ.ม)

$d_p^2$  คือ ขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยในน้ำดิบ (ม)

$$\frac{J_v}{J_0} = \left( 1 + \frac{2\alpha_{cake} J_0 C_b t}{R_m} \right)^{-1/2} \quad (2.6)$$

โดย  $J_v$  คือ อัตราการผลิตน้ำ (ลบ.ม/ตร.ม-ชม.)

$J_0$  คือ อัตราการผลิตน้ำของเมมเบรนก่อนการใช้งาน (ลบ.ม/ตร.ม-ชม.)

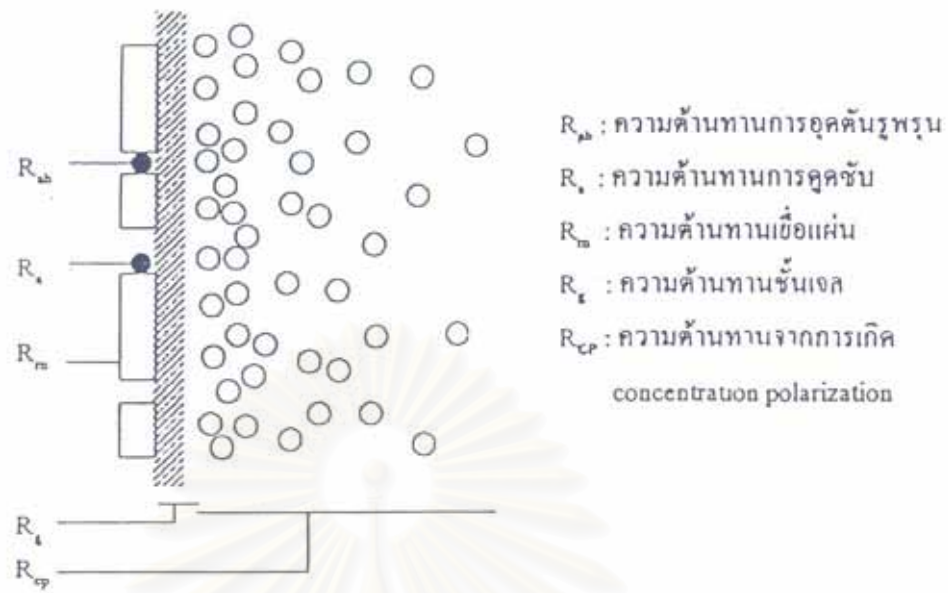
$\alpha_{cake}$  คือ ความต้านทานที่เกิดขึ้นจากอนุภาคต่างๆ บนผิวเมมเบรนในลักษณะของเค้ก (ม./กก.)

$C_b$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำดิบ (มก./ล)

$R_m$  คือ ความต้านทานเมมเบรน (ต่อเมตร)

$t$  คือ เวลาเดินระบบ (นาที)

- **แบบจำลองความดันออสโมติก (Osmotic Pressure model)** แบบจำลองความดันออสโมติก อธิบายว่าการที่อัตราการผลิตน้ำลดลง เกิดจากความดันออสโมติกที่เพิ่มขึ้น ทำให้แรงขับเคลื่อน ( $\Delta P - \Delta \pi$ ) ลดลง โดยทั่วไปความดันออสโมติกของสารโมเลกุลใหญ่มีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น เกลือ น้ำตาล ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ดังนั้น การคำนวณอัตราการผลิตน้ำในอัลตราฟิลเตรชันจึงมักตัดค่า  $\Delta \pi$  ออก
- **แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (Resistance-in-series model)** แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน อธิบายการลดลงของอัตราการผลิตน้ำว่าเกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานในการไหลเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความต้านทานต่างๆตามแบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2539)

สมการ 2.2  $R_t$  คือความต้านทานรวมในการไหลซึ่งเป็นผลบวกของความต้านทานเมมเบรน ( $R_m$ ) และความต้านทานที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ความต้านทานที่เพิ่มขึ้นจาก 1) ความต้านทานจากการเกิดโพลาไรเซชัน ( $R_p$ ) ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานเนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ( $R_{cp}$ ) และเจล ( $R_g$ ) 2) ความต้านทานเนื่องจากการเกิด การอุดตัน (Fouling) ( $R_f$ ) ซึ่งได้แก่ ความต้านทานเนื่องจากการดูดซับ ( $R_a$ ) และความต้านทานเนื่องจากการอุดตันรูพรุนของตัวถูกละลาย  $R_{pb}$  เป็นต้น ดังนั้น

$$R_t = R_m + (R_{cp} + R_g) + (R_a + R_{pb} + \dots) \tag{2.7}$$

$$R_t = R_m + R_p + R_f \tag{2.8}$$

ดังนั้นความต้านทานรวมจึงเป็นผลบวกของความต้านทานย่อย

โพลาไรเซชันเป็นกระบวนการที่ผันกลับหรือสามารถล้างออกด้วยน้ำกลั่น ไม่ว่าจะใช้สถานะใด ซึ่งเมื่อใช้น้ำทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน จะสามารถกำจัดเฉพาะชั้นโพลาไรซ์ออกไปเท่านั้น แต่ไม่อาจทำลายชั้นที่อุดตัน (Fouling) ได้ ดังนั้น ความต้านทานการไหลของน้ำ สำหรับแผ่นเมมเบรน ที่ใช้แล้วหลังจากล้างด้วยน้ำกลั่น คือ ความต้านทานของเยื่อแผ่น  $R_m$  และ  $R_f$



$$J'_w = \Delta P / \mu_w (R_m + R_f) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $J'_w$  คือ อัตราการผลิตน้ำของน้ำหลังการล้างแผ่นเมมเบรนที่ใช้แล้วด้วยน้ำ  
 $R_m$  คำนวณจากสมการ 2.8 เมื่อสารละลายเป็นน้ำสะอาด โดย

$$J'_w = \Delta P / \mu_w R_m \quad (2.10)$$

สมการ (2.7-2.10) แสดงขั้นตอนการคำนวณความต้านทานต่าง ๆ จากผลการทดลอง เมื่อล้างแผ่นเมมเบรนด้วยสารทำความสะอาด และด้วยขั้นตอนที่เหมาะสม จะสามารถกำจัด  $R_f$  โดยทดสอบค่าอัตราการผลิตน้ำของน้ำสะอาดว่าใกล้เคียงกับแผ่นเมมเบรนที่ยังไม่ได้ใช้งานหรือไม่

แบบจำลองอนุกรมความต้านทานเป็นแบบจำลองที่ง่าย เมื่อนำไปอธิบายผลการทดลอง และคำนวณค่าความต้านทานหลัก ๆ ออกมา (ได้แก่  $R_m$ ,  $R_p$  และ  $R_f$ ) จะทำให้เข้าใจกลไก หรือการลดลงของอัตราการผลิตน้ำได้ชัดเจนขึ้นว่า ขึ้นอยู่กับตัวแปรอะไรบ้าง ปกติ  $R_m$  มีค่าต่ำ คือไม่เกิน 10% ของความต้านทานรวม ส่วน  $R_p$  และ  $R_f$  นั้นขึ้นอยู่กับสภาวะการดำเนินงาน (เช่น ความดันความเร็วที่ป้อนสารละลายผ่านแผ่นเมมเบรน) และชนิดของสารละลายนั้นว่ามีส่วนประกอบอย่างไร จากขั้นตอนการคำนวณความต้านทานที่อธิบายมาแล้วขั้นต้น จะเห็นได้ว่าเราสามารถแยก  $R_{cp}$  ออกจาก  $R_g$  เพราะคาดว่าชั้นของตัวถูกละลายที่สะสมเป็นเจล สามารถละลายน้ำได้  $R_f$  ก็เช่นเดียวกัน เกิดจากกลไกที่ซับซ้อน

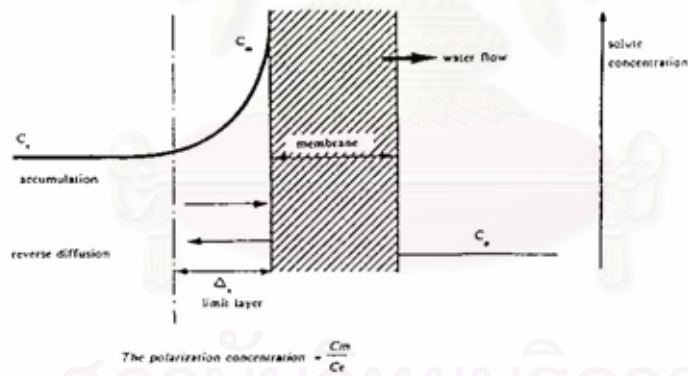
การวิเคราะห์ความต้านทานต่าง ๆ เป็นฟังก์ชันกับตัวแปรในการดำเนินงานทำให้ทราบว่าความต้านทานใด มีผลต่อการลดลงของอัตราการผลิตน้ำมากกว่ากัน และควรปรับเปลี่ยนสภาวะการทดลองอย่างไร เพื่อให้ได้ค่าอัตราการผลิตน้ำสูงสุด การเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนน้ำนมด้วยแผ่นเมมเบรนเส้นใยกลวง (โพลีซัน โพล) และพบว่า  $R_p$  แปรผันตรงกับความดัน ส่วน  $R_f$  ไม่ขึ้นกับสภาวะการทำงาน และเป็นความต้านทานหลักที่มีผลต่ออัตราการผลิตน้ำ

การเกิดการอุดตัน (Fouling) ในการกรองน้ำเสาวรส โดยวิเคราะห์ความต้านทานต่าง ๆ และพบว่า  $R_p$  และ  $R_f$  เพิ่มขึ้นกับความดัน เพราะที่ความดันสูงเกิดคอนเซนเตรชันโพลาริเซชัน (Concentration Polarization) มาก และโมเลกุลถูกพาไปสะสมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น และในรูปรุนแรงมากขึ้น การเพิ่มอัตราไหลช่วยลดคอนเซนเตรชันโพลาริเซชัน (Concentration Polarization) จึงลด

ความต้านทานทั้ง  $R_p$  และ  $R_f$  ความเข้มข้นที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยความต้านทานเนื่องจากชั้น โพลาริเซชันเป็นความต้านทานหลักที่ทำให้อัตราการผลิตน้ำลดลง

#### 2.6.4 คอนเซนเตรชันโพลาริเซชัน

ในระบบไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic) ได้รวมทั้งระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration Membrane) จะมีชั้นน้ำที่เรียกว่า ชั้นติดขอบเมมเบรน (Boundary Layer) อยู่ติดกับผิวหน้าของเมมเบรน ชั้นน้ำดังกล่าวนี้จะอยู่เป็นอิสระโดยไม่ผสมกับน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ภายนอก ความหนาของชั้นติดขอบเมมเบรน (Boundary Layer) แปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำและความปั่นป่วน น้ำสะอาดถูกบังคับให้ออกจากชั้นนี้และกระจายซึมผ่านเมมเบรนออกไปภายนอก ทำให้มีการสะสมตัวของสารละลายต่าง ๆ เกิดขึ้นภายในชั้นติดขอบเมมเบรน (Boundary Layer) (รูปที่ 2.9) จนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำดิบหลายเท่า ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดคอนเซนเตรชันโพลาริเซชัน (Concentration Polarization) ระดับของการเกิด คอนเซนเตรชันโพลาริเซชัน (Concentration Polarization) อาจแสดงได้ด้วยอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นสูงสุด (ที่ผิวของเมมเบรน) ของสารละลายในชั้นติดขอบเมมเบรน (Boundary Layer) และความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำดิบ



รูปที่ 2.9 เกิดคอนเซนเตรชันโพลาริเซชัน (Concentration Polarization) ที่เกิดขึ้นในระบบ (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2539)

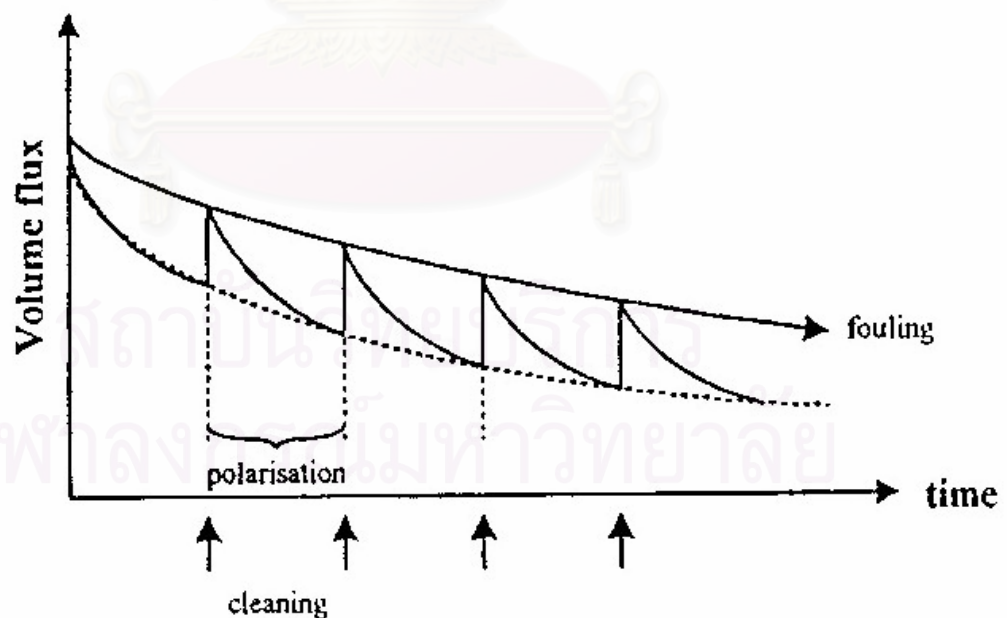
สมรรถนะในการกำจัดสารละลายของเมมเบรนขึ้นอยู่กับคอนเซนเตรชันโพลาริเซชัน (Concentration Polarization) เป็นอย่างมาก เนื่องจากการสะสมตัวของเกลือแร่ในชั้นติดขอบเมมเบรน (Boundary Layer) ทำให้เกิดผลเสียต่าง ๆ ต่อระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration Membrane) ที่กำลังทำงานอยู่ดังต่อไปนี้

1. ทำให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้น เป็นผลให้อัตราการผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) ลดลง

2. ทำให้การรั่วไหลของสารละลายผ่านเมมเบรน (Salt Flux) เพิ่มขึ้น เป็นผลให้น้ำที่ผลิตได้มีมลทินมากขึ้น
3. เร่งเมมเบรนให้เสื่อมสภาพเร็วขึ้น
4. ทำให้การตกผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต และ/หรือ แคลเซียมซัลเฟต หรือสารประกอบอื่น ๆ

### 2.6.5 การเกิดฟาวลิง (Fouling)

การอุดตันของเมมเบรน (Membrane Fouling) จะใช้สำหรับอธิบายการสูญเสียสภาพการกรองแบบไม่สามารถฟื้นสภาพได้ (Irreversible) ซึ่งไม่สามารถแก้ไขสภาพให้เหมือนเดิมได้โดยใช้แรงดันของน้ำหรือสารเคมี ซึ่งจะแตกต่างจากการเกิด คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Concentration Polarization) ที่สามารถแก้ไขได้ด้วยการล้างย้อนหรือการทำความสะอาดดังรูปที่ 2.10 อัตราการผลิตน้ำที่ลดลงเนื่องจากเกิดคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Concentration Polarization) จะเกิดขึ้นค่อนข้างเร็วและเมื่อทำการล้างย้อนหรือทำความสะอาดเมมเบรนและอัตราการผลิตน้ำก็จะเพิ่มกลับมาได้อีก แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น อัตราการผลิตน้ำที่กลับคืนมาได้จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จึงทำให้ค่าอัตราการผลิตน้ำที่กลับคืนมาได้จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จึงทำให้ค่าอัตราการผลิตน้ำโดยรวมมีค่าลดลง



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตน้ำกับระยะเวลาในการเดินระบบ (มันลีน ตัณฑุลเวศม์, 2539)

การอุดตัน (Fouling) ที่เกิดบนเมมเบรนส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการเกาะของสารอินทรีย์ในรูพรุนของเมมเบรน ทำให้ลดอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน และไม่สามารถทำให้กลับมาใช้งานได้ดีเหมือนเดิม ซึ่งอาจจะเกิดได้จากการอุดตันของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

1. การอุดตันบนด้านนอก (External Surface Fouling) ซึ่งจะเกิดจากการก่อตัวของชั้นเค้ก (cake) หรือเจล (gel) บนผิวหน้าของเมมเบรนด้านน้ำดิบ ซึ่งการอุดตันในลักษณะนี้คือการเกิด คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Concentration Polarization)
2. การอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรน (Pore Blocking Fouling) เป็นการอุดตันที่เกิดจากอนุภาคเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนของตัวเมมเบรน ซึ่งการอุดตันแบบนี้ยังสามารถแบ่งได้อีก 3 กรณีคือ
  - การอุดตันอย่างสมบูรณ์ (Complete Pore Blocking) เกิดจากอนุภาคขนาดเท่า ๆ กับรูพรุนลงไปอุดตัน และไม่สามารถหลุดออกมาได้อีก และน้ำผ่านได้น้อยมาก
  - การอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ (Intermediate Pore Blocking) อนุภาคที่อุดตันมีขนาดใกล้เคียงกับรูพรุน แต่น้ำยังสามารถผ่านไปได้อย่างพอสมควร
  - การอุดตันแบบธรรมดา (Standard Pore Blocking) เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กกว่ารูพรุนเข้าไปติดค้างอัดตัวอยู่ในรูพรุนของเมมเบรน

การอุดตันแบบภายในรูพรุนของเมมเบรน (Pore Blocking Fouling) แต่ละชนิดนั้นจะสามารถแก้ไขได้ด้วยการเปลี่ยนลักษณะการไหลของของเหลว เช่น การล้างย้อน หรือการทำความสะอาด และการอุดตันลักษณะนี้จะทำให้อัตราการผลิตน้ำมีค่าลดลงตั้งแต่ 5-20% จนกระทั่ง 80-95% หรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของเมมเบรนและชนิดของสารละลาย โมเดลการเกิด fouling นั้นไม่สามารถหาได้ง่ายนัก ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยแบบเชิงประจักษ์ (Empirical) โมเดลหนึ่ง (Maynarovich และ Knyazkova, 1999) ที่ใช้แสดงการเกิด การอุดตัน (Fouling) ได้แก่

$$J_v(t) = J_{ss} + ae^{-bt} \quad (2.11)$$

3. สมการที่ 2.11 เป็นสมการของอัตราการผลิตน้ำที่สภาวะคงที่ (Steady State) ได้จากค่าของคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Concentration Polarization) รวมกับการลดลงในแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) ซึ่งค่าคงที่ a และ b สามารถหาได้จากการทดลองแยกสารละลายของเมมเบรนที่สภาวะต่าง ๆ กัน สมการทำนายการเกิดอุดตัน (Fouling) ถือว่ามีความสำคัญมากในการ

ออกแบบระบบเมมเบรนอย่างมากเพื่อที่จะให้เกิดอุดตัน (Fouling) กับระบบน้อยที่สุดและยืดอายุการใช้งานของระบบเมมเบรนอีกด้วย

## 2.7 การล้างย้อนและการทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน (Backwashing and Membrane Cleaning)

### 2.7.1 การล้างย้อน (Backwashing)

การอุดตันเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสารแขวนลอยทำให้รูของเมมเบรนลดลง และยังเป็น การสูญเสียพลังงาน (Head loss) อีกด้วย ก่อนที่ระดับของการสูญเสียพลังงาน (Head loss) จะถึง ระดับหนึ่งหรือเกิดการอุดตันมากขึ้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการล้างย้อน เพื่อเป็นการล้างเมมเบรนเพื่อกำจัดสิ่งอุดตันออกและเพื่อให้เมมเบรนให้กลับมาทำงานได้ตามปกติ

ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการล้างเมมเบรนอาจนำไปสู่ปัญหาหลายอย่าง เช่น อาจทำให้เกิดการอุดตันเนื่องจากโคลนที่ก่อตัวขึ้นที่พื้นผิวของเมมเบรน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญในการที่ทำให้การสูญเสียพลังงาน (Head loss) เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการหดตัวของตัวเมมเบรนเองก็เป็นสาเหตุของการเกิดไหลลัดวงจร (short circuiting) ในขณะที่มีการกรองอยู่ได้ ซึ่งผลที่ตามมาคือการลดลงของอัตราการกรองน้ำ แต่การอุดตันของสารแขวนลอยนั้นสามารถแก้ไขได้ด้วยการล้างย้อน การที่จะเลือกวิธีการล้างย้อนนั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบว่าอาจจะเป็นแบบไหลจากข้างในออกข้างนอก (In-side out) หรือ จากข้างนอกเข้าข้างใน (Out - side in) แผ่นเมมเบรนและยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ออกแบบ ทิศทางการไหลของน้ำ และอัตราการใช้น้ำขณะการล้างย้อน

### 2.7.2 อัตราการล้างย้อน (Backwash rate)

อัตราการล้างย้อนอาจจะแสดงในหน่วยของ อัตราการไหลต่อพื้นที่ผิว หรือเป็นความเร็ว น้ำที่เพิ่มขึ้น เช่น ฟุต/วินาที ฟุต/นาทีก หรือ นิ้ว/นาทีกก็ได้ อัตราการล้างย้อนนอกจากจะขึ้นกับการออกแบบแล้วยังต้องคำนึงถึง อุณหภูมิ ชนิดของเมมเบรน และวิธีการล้างย้อนด้วยเช่นกัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ความหนืดลดลง อัตราการล้างย้อนที่สูงก็จะทำให้เกิดการขยายตัวของเมมเบรนด้วยเช่นกัน แต่ละอองสาเซลล์เซียนั้นจะป้องกันการลดลงของการขยายตัวของเมมเบรนได้ ดังนั้นในการออกแบบระบบการล้างย้อนน้ำที่ใช้ควรจะเป็นน้ำที่อุ่นแต่โดยทั่วไปแล้วในการใช้งานจริงจะไม่ได้คำนึงถึงจุดนี้เพราะการที่จะไปควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการล้างย้อนนั้นกระทำได้ยาก ปัจจัยหนึ่งที่มีผลคือ ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนนั้นก็มีผลต่ออัตราการล้างย้อนเช่นกัน เช่น ความหนาแน่นที่ใช้ผลิตเมมเบรนแต่ละชนิด ขนาดรูของเมมเบรน นอกจากนั้นแล้ว อัตราการล้างย้อนและเวลาในการล้างย้อนก็ยังขึ้นกับวิธีการเลือกการล้างย้อนด้วยเช่นกัน ซึ่งวิธีการที่เหมาะสมนั้นต้องคำนึงหลายปัจจัยเช่น คุณภาพของน้ำเข้า ชนิดของเมมเบรน วัสดุที่ใช้ทำเมม

เบรน เป็นต้น การออกแบบการกรองนั้นต้องพิจารณาถึงคุณภาพน้ำที่ออกมาที่ยอมรับได้ และการสูญเสียการสูญเสียพลังงาน (Head loss) ที่เกิดขึ้นนั้นก็มีมากน้อยเพียงใดซึ่งรวมถึงข้อจำกัดด้านการล้างย้อน

Amirtharajah (1985) ได้สรุปไว้ว่าในระหว่างที่มีการล้างย้อนนั้นจะไม่มีการเกิดปฏิกิริยาใดขึ้น นอกจากนั้นแล้วตัวแปรที่สำคัญอีกอย่างในการล้างย้อนคือแรงเฉือนที่เกิดจากการไหลของน้ำ (hydrodynamic shear, T). Amirtharajah (1985) ได้เสนอทฤษฎีที่ว่า ค่าสูงสุดของ คือ การไหลของน้ำ (hydrodynamic shear) นั้นจะเกิดขึ้นเมื่อการขยายตัวของเม็ดมีเดียมีค่าความพรุน ( $\epsilon$ ) = 0.70 สมการสำหรับการล้างย้อนแสดงดังข้างล่าง

$$\frac{(dV')}{(dl)} = \left[ \frac{gV'}{v} \left( \frac{dh}{dz} \right) \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $\frac{(dV')}{(dl)}$  = Velocity gradient ภายในรูพรุน

$g$  = ความเร็วเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

$V$  = สัมประสิทธิ์ความหนืด

$\frac{dh}{dz}$  = การสูญเสียพลังงาน (Head loss)

จากนั้นได้สร้างสมการความสัมพันธ์ของการสูญเสียพลังงาน (Head loss) เมื่อน้ำผ่านตัวกลางดังนี้

$$dh \rho_f g = dz(\rho_s - \rho_f) g (1 - \epsilon) \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\rho_s, \rho_f$  = ความหนาแน่นของ solid และ ตัว fluid

และได้นำมีการประยุกต์เพื่อทำนายการขยายตัวของชั้นตัวกลาง (fluidized bed) ดังสมการข้างล่างนี้

$$V' = k\epsilon^{(n-1)} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $k$  = ค่าคงที่

$n$  = สัมประสิทธิ์การขยายตัว

และการไหลของน้ำ (hydrodynamic shear) สามารถหาได้โดย

$$T = \mu \frac{(dV')}{(dl)} \quad (2.15)$$

จากสมการ (2.12) กับ (2.15) จะได้

$$T = \left[ \mu \frac{gV'}{v} \left( \frac{dh}{dz} \right) \right]^{1/2} \quad (2.16)$$

แทนค่า  $V'$  และ  $(dh/dz)$  จากสมการที่ 2.15 และ 2.16 ลงในสมการที่ 2.14 จะได้

$$T = K[\mathcal{E}^{(n-1)} - \mathcal{E}^n]^{1/2} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $K$  = ค่าคงที่ของระบบ (constant for a system)

Xu และคณะ, (1995) ได้ทำการศึกษาถึงช่วงการล้างย้อน (Backwash) เพื่อกำจัดตะกอกที่ผิวหน้าเมมเบรนเพื่อคืนสภาพเมมเบรน เวลาที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณของน้ำที่กรองและอัตราการไหลในการล้างย้อน

$$t_b = \frac{V_b}{Q_b} \quad (2.18)$$

ต่อมาได้ทำการหาความดันที่ใช้ระหว่างการล้างย้อนในรูปของ  $\Delta P_b$  และความต้านทานจากตัวเมมเบรนเอง

$$Q_b = \frac{\Delta P_b}{uR_m} \Omega \quad (2.19)$$

และความดันที่ใช้สำหรับการล้างย้อนในเมมเบรนนั้นจัดอยู่ในรูปดังสมการข้างล่าง

$$\Delta P_b = \rho \Delta P \quad (2.20)$$

บางครั้งการทำความสะอาดก็ยังไม่สมบูรณ์ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการอุดตัน (Fouling) ได้และส่งผลให้เป็นการเพิ่มความต้านทานของตัวเมมเบรนขึ้นได้ ( $R_m$ ) ความต้านทานนี้จะเพิ่มขึ้นจากรอบต่อรอบของการล้างย้อน ซึ่งสามารถประมาณค่าระดับของการเกิดการอุดตัน (Fouling factor) ได้ (ซึ่งแทนด้วย  $r$  โดยถ้า  $r = 0$  นั่นคือประสิทธิภาพการล้างย้อนสมบูรณ์ และถ้า  $r > 0$  แสดงว่าประสิทธิภาพการล้างย้อนไม่สมบูรณ์) ความต้านทานของตัวเมมเบรนนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวของเมมเบรนกับจำนวนรอบของการล้างย้อน ดังนี้

$$R_{m,i} = (1+r)R_{m,i-1} = \dots = (1+r)^i R_{m,0} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $I$  คือ รอบของการล้างย้อน (Backwash),  $r$  คือ ระดับการเกิดการอุดตัน (Fouling) หลังจากการล้างย้อน (Backwash),  $R_{m,0}$  คือ ความต้านทานเริ่มต้นของการล้างย้อน (Backwash) ของเมมเบรน และ  $R_{m,i}$  คือ ความต้านทานของเมมเบรนที่รอบการล้างย้อน (Backwash) ที่  $i$  เวลาที่ต้องการในการล้างย้อน (Backwash) เป็นดังสมการข้างล่าง

$$t_{bi} = nV_c \frac{uR_{m,i}}{\Omega\Delta P_b} = nV_c \frac{uR_{m,0} (1+r)^i}{\Omega\Delta P} \quad (2.22)$$

$$= \frac{nV_c (1+r)^i}{Q_0} \frac{1}{p} \quad (2.23)$$

$$\text{เมื่อ} \quad Q_0 = \frac{\Omega\Delta P}{uR_{m,0}} \quad (2.24)$$

จากสมการข้างบนนำไปหาเวลาในการกรองได้ (The optimum time for filtration)

$$t_{opt,i} = \frac{nV_c (1+r)^i}{Q_0} \frac{1}{p} + \frac{2A}{B^{1/2}} \left[ \frac{nV_c (1+r)^i}{Q_0} \frac{1}{p} \right]^{1/2} \quad (2.25)$$

ในขณะที่มีการล้างย้อนนั้นก็จะเกิดการแรงเฉือนขึ้นที่บริเวณผิวของเมมเบรน ซึ่งแรงเฉือนนี้จะทำให้ชั้นของเค้ก (cake formation) ที่ก่อตัวบนผิวของเมมเบรนหลุดออกจากนั้นก็จะทำให้การอุดตันที่รูของแผ่นเมมเบรน (pore blocking) นั้นหลุดออก Ahere และคณะ (2005) ได้ทดลองและหาความสัมพันธ์ของค่าแรงเฉือน (shear) ดังสมการข้างล่างนี้



$$\tau_w = d_H \frac{(P_i - P_o)}{4L} \quad (2.26)$$

\

เมื่อ

$\tau_w$  = แรงเฉือน (ปาสคาล)

$P_i$  = ความดันที่เข้า (ปาสคาล)

$P_o$  = ความดันที่ออก (ปาสคาล)

$L$  = ความยาวของเมมเบรน (เมตร)

$d_H$  = ไฮโดรลิกไดมิเตอร์ (เมตร)

โดยที่  $d_H$  สามารถหาค่าได้จากสมการข้างล่างดังนี้

$$d_H = \frac{4ab}{2(a+b)} \quad (2.27)$$

เมื่อ

$a$  = ความกว้างของทางน้ำเข้า (เมตร)

$b$  = ความสูงของทางน้ำเข้า (เมตร)

นอกจากนั้นยังได้ทำการหาค่า แรงเฉือน ( $\tau_w$ ) ซึ่งแสดงดังสมการข้างล่างนี้

$$\tau_w = \mu\gamma \quad (2.28)$$

เมื่อ

$\mu$  = Dynamic viscosity (ปาสคาล·วินาที)

$\gamma$  = Shear rate (ต่อวินาที)

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว Carrère (2000) กล่าวว่าในการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายผ่านเมมเบรนไม่ว่าจะอยู่ในช่วงการกรอง (filtration) หรือการล้างย้อน (Backwash) มีปัจจัยหลักที่สำคัญอยู่ 4 ปัจจัยที่เกิดขึ้นคือ ความเร็วไหลผ่าน (Cross-flow velocity) แรงเสียดทานที่ผนัง (Wall shear stress) เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) และอัตราแรงเฉือนที่ผนัง (Wall shear rate)

### 1. ความเร็วไหลผ่าน (Cross-flow velocity)

ค่าของความเร็วไหลผ่าน (Cross-flow velocity) เป็นค่าของความเร็วเฉลี่ยและสามารถหาค่าความเร็วเฉลี่ยนี้ได้จากค่าของอัตราการไหล ( $Q_r$ ) ของน้ำที่ใช้ในการกรอง (filtration) หรือการล้างย้อน (Backwash) สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

$$V = \frac{Q_r}{N\pi\left(\frac{d^2}{4}\right)} \quad (2.29)$$

เมื่อ

$V$  = Cross-flow velocity (เมตรต่อวินาที)

$d$  = ขนาดท่อด้านใน (เมตร)

$N$  = จำนวนทางน้ำเข้าหรือท่อน้ำเข้า

$Q_r$  = อัตราการไหลของน้ำที่ใช้ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

### 2. เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)

Ahere และคณะ, (2005) ได้แสดงค่าของเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ในการล้างย้อนหรือการกรอง ในสภาวะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ดังสมการข้างล่าง

$$Re' = \frac{8^{1-n} \rho d^n U^{2-n}}{K} \left( \frac{4n}{1+3n} \right)^n \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\rho$  = fluid density ( $\text{kgm}^{-3}$ )

$U$  = mean cross-flow velocity ( $\text{ms}^{-1}$ )

$K$  = consistency of fluid ( $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ )

$n$  = structure indexes of the fluid

Ahere และคณะ, (2005) กล่าวว่าคุณสมบัติของสารที่ไม่ผ่านเมมเบรน (retentate) ส่วนใหญ่แล้วจะพิจารณาถึงเรื่องของความหนืดที่มี แต่เรื่องของความเข้มข้นของโพราไรเซชัน (Polarization) หรือชั้นของเค้ก (cake layer) นั้นต้องดูถึงขนาดของชั้น โครงสร้างของเมมเบรน และดัชนีความหนาแน่น (consistency index) ของแผ่นเมมเบรน ซึ่งแต่ละค่าจะมีความหนืดที่ผิวของเมมเบรนต่างกัน ซึ่งในระหว่างที่มีการกรองหรือการล้างย้อนนั้นค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นสามารถ

คำนวณได้จากค่าความดันที่ลดลงในแต่ละการกรองหรือล้างย้อนสำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

$$\frac{f}{2} = \frac{\Delta P d}{4 \rho v^2 L} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $\frac{f}{2} = \frac{8}{Re'}$  (2.32)

$\rho$  = ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$d$  = ขนาดท่อด้านใน (เมตร)

$L$  = ความยาวของเมมเบรน (เมตร)

$\Delta P$  = ความดันที่สูญเสียไปตามแนวยาวของเมมเบรน (ปาสกาล)

### 3. อัตราแรงเฉือนที่ผนัง (Wall shear rate)

อัตราแรงเฉือนที่ผนัง (wall shear rate,  $\gamma_w$ ) ที่แสดงดังสมการที่ 2.28 สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

$$\gamma_w = \frac{3n_{bl} + 1}{4n_{bl}} \times \frac{8v}{d} \quad (2.33)$$

เมื่อ  $n$  = structure indexes of the fluid

$V$  = Cross-flow velocity ( $ms^{-1}$ )

$bl$  = boundary layer

ค่าแรงเสียดทานที่ผนัง (wall shear rate,  $\gamma_w$ ) เป็นค่าที่เกิดที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน

### 4. แรงเสียดทานที่ผนัง (Wall shear stress)

ค่าแรงเสียดทานที่ผนัง (Wall shear stress,  $\tau_w$ ) สามารถคำนวณจากค่าความดันที่ลดลงดังสมการที่ 2.34

$$\tau_w = \frac{\Delta P d}{4L} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $\Delta P$  = ความดันที่สูญเสียไปตามแนวยาวของเมมเบรน (ปาสกาล)

$L$  = ความยาวของเมมเบรน (เมตร)

$d$  = ขนาดท่อค้ำใน (เมตร)

จากทั้ง 4 พารามิเตอร์ที่ได้กล่าวมาแล้ว ค่าของความเร็วไหลผ่าน (Cross-flow velocity) จะมีการใช้อย่างค่อนข้างแพร่หลายเนื่องจากวัดได้ง่าย ค่าของเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) โดยทั่วไปจะถูกใช้กับแบบจำลองทฤษฎีฟิล์ม (Film theory-model) ส่วนค่าของค่าแรงเสียดทานที่ผนัง (Walls shear rate) ที่ปรากฏนั้นในบางครั้งก็ได้ถูกพัฒนาและประยุกต์ใช้สำหรับการกรองแบบความเร็วไหลผ่าน (Cross-flow) แต่ถ้าใช้สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) จะมีความซับซ้อนขึ้นซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.35

$$\gamma_w = \left( \frac{\tau_w}{K_w} \right)^{1/n_w} \quad (2.35)$$

เมื่อ

$\tau_w$  = wall shear stress

$K_w$  = consistency of fluid at membrane wall ( $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ )

$n_w$  = structure indexes of the fluid at membrane wall

### 2.7.3 การทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน (Membrane Cleaning)

Lindua (1994) ได้กล่าวว่า การนำแผ่นเมมเบรนไปใช้งานในการแยกสารละลายที่เป็นของเหลว เช่น ในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration Membrane) และไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน (Microfiltration Membrane) ถึงแม้ว่าจะมีการบำบัดเบื้องต้น (pretreatment) เพื่อแยกองค์ประกอบที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นเมมเบรนและเพื่อยืดอายุการใช้งานของแผ่นเมมเบรน มีการออกแบบหน่วยอุปกรณ์ตลอดจนเลือกสถานะดำเนินการที่ลดการเกิด คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization) ก็ยังพบว่าเกิดการอุดตัน (Fouling) ส่งผลให้ค่าอัตราการผลิตน้ำลดลง ค่าการกักกันเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงต้องมีความจำเป็นต้องทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีที่เหมาะสมเป็นระยะๆ เพื่อให้แผ่นเมมเบรนมีสภาพใกล้เคียงแผ่นเมมเบรนใหม่มากที่สุด และเพื่อยืดอายุการใช้งาน

การอุดตัน (Fouling) เกิดจากองค์ประกอบในสารละลายที่ไปสะสมอยู่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน และในรูพรุน และอาจเกิดจากจุลินทรีย์ที่ปนอยู่ในสารละลาย การเลือกวิธีการล้างและการทำความสะอาดเมมเบรนจึงต้องพิจารณาชนิดของสารอุดตัน (Foulant) วัสดุที่ผลิตแผ่นเมมเบรนและ

รูปแบบของอุปกรณ์ ตลอดจนค่าใช้จ่าย ความยากง่าย และระยะเวลาในการล้างประกอบด้วย วิธีการทำความสะอาดแผ่นเมมเบรนแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีกายภาพและวิธีเคมี

**2.7.3.1 วิธีกายภาพ (Physical methods)** หมายถึงการทำความสะอาดที่ใช้การเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานเป็นหลัก เช่นการเพิ่มอัตราการไหล ซึ่งจะเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าแผ่นเมมเบรน แต่ก็ลดการสะสม/การอุดตันได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น วิธีที่อ้างกันอยู่เสมอคือการดูดชั้นที่สะสมออกจากผิวหน้าแผ่นเมมเบรนด้วยฟองน้ำ (Sponge balls) ใช้กับแผ่นเมมเบรนแบบท่อโดยการใส่ก้อนฟองน้ำที่มีขนาดพอๆ กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแผ่นเมมเบรน เข้าไปในน้ำหรือสารละลายที่ไหลผ่านแผ่นเมมเบรนเพื่อให้ก้อนฟองน้ำดูดชั้นสะสมออก แต่ปัจจุบันวิธีนี้กล่าวได้ว่าไม่มีการใช้กันเลย

วิธีกายภาพที่แพร่หลายและได้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือ การล้างย้อน (Backwashing) ซึ่งทำได้โดยการเติมสารละลายภายใต้ความดันเข้าทางด้านเพอมีเอทซึ่งจะทำให้สารละลายดันสารอุดตันหลุดออกจากแผ่นเมมเบรน การล้างย้อนกลับอาจทำระหว่างการกรอง เช่น กรอง 30 นาที แล้วป้อนสารละลายกลับทาง 2-3 นาที เป็นต้น หรืออาจทำเมื่อเสร็จสิ้นการกรองคือ ล้างย้อนกลับด้วยน้ำหรือสารทำความสะอาด ตัวอย่างเช่น ในการทำงานปกติ ถ้าใช้แผ่นเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงเป็นการป้อนสารละลายด้านในเส้นใย แต่ในการล้างย้อนกลับเป็นการป้อนสารทำความสะอาดด้านนอกเส้นใย ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ อุปกรณ์จะต้องมีการออกแบบเฉพาะให้มีการล้างย้อนกลับได้

วิธีกายภาพใช้ได้ผลดีกรณีที่มีการสะสมที่ผิวหน้าแผ่นเมมเบรนมากกว่าการอุดตันในรูพรุน หลังจากการล้างย้อนกลับ อัตราการผลิตน้ำอาจมีค่าสูงขึ้นในระดับที่น่าพอใจ ขึ้นอยู่กับชนิดสารอุดตัน แต่ในระยะยาวแล้วอาจพบว่า อัตราการผลิตน้ำยังคงลดลงอยู่ การล้างด้วยวิธีทางเคมีจึงมีความจำเป็นที่นิยมใช้และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีกว่า

**2.7.3.2 วิธีเคมี (Chemical Methods)** การทำความสะอาดแผ่นเมมเบรนด้วยวิธีเคมี สารเคมีอาจช่วยให้มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพโดยสารเคมีอาจทำให้สารอุดตันพองตัว หดตัว ละลาย เกิดการหลุดออก (desorption) หรือสารเคมีที่ใช้ อาจทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอุดตัน เช่น การเกิดไฮโดรไลซิส การย่อยสลายพันธะเปปไทด์ของโปรตีน และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นต้น สารเคมีที่ใช้ควรมีคุณสมบัติดังนี้

- ละลายสารอุดตันหรือทำให้สารอุดตันเกาะตัวกันน้อยลงด้วยกลไกทางกายภาพหรือทางเคมี
- รักษาสภาพการกระจายตัวของสารอุดตันไม่ให้กลับไปสะสมอีก
- ไม่เป็นสารที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันเสียเอง

- ไม่ทำให้แผ่นเมมเบรนเสื่อมสภาพ

สารเคมีใช้ทำความสะอาดสามารถแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ดังนี้

- กรด ใช้ได้ทั้งกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ เช่น กรดเกลือ (hydrochloric acid) กรดซัลฟูริก (sulfuric acid) กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) กรดออกซาลิก (oxalic acid) และกรดซิตริก (citric acid) เป็นต้น ใช้ได้ผลดีในการละลายตะกอนที่เป็นโลหะออกไซด์ เกลือคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารอุดตันที่พบในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ แต่ใช้ไม่ได้ผลกับสารอุดตันที่เป็นซิลิกา ซิลิเกต คอลลอยด์ และจุลินทรีย์
- ด่าง ที่ใช้กันแพร่หลาย คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต และ ฟอสเฟต ใช้ได้ผลดีกับสารอุดตันที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน เพคติน เซลลูโลส ดังนั้น จึงนิยมใช้ล้างแผ่นเมมเบรนที่ใช้ในอุตสาหกรรม อาหาร และน้ำผลไม้
- เอนไซม์ (enzyme) ใช้สำหรับทำความสะอาดสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน โดยทำให้เกิดการแตกตัว ทำลายพันธะ เป็นโมเลกุลที่เล็กลง โดยต้องเลือกเอนไซม์ที่เหมาะสม เช่น ถ้าสารอุดตันเป็นโปรตีน ควรใช้เอนไซม์โปรติเอส (protease) ถ้าเป็นแป้งควรใช้อะไมเลส (amylase) หรือควรใช้ไลเปส (lipase) ถ้าสารอุดตันเป็นไขมัน บางทีอาจต้องใช้หลายตัวผสมกัน หรือหาสูตรที่เหมาะสม เอนไซม์จัดเป็นสารทำความสะอาดที่อ่อน ไม่เป็นอันตรายต่อเยื่อแผ่น แต่มีราคาแพง
- สารลดแรงตึงผิว (surfactants) เป็นสาร โมเลกุลใหญ่ที่ประกอบไปด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งเป็นส่วนที่เมื่ออยู่ในน้ำจะแสดงปะจูปรูป กระจุก หรือเป็นกลาง ขึ้นอยู่กับชนิดของสารลดแรงตึงผิว ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวที่ใช้เป็นสารทำความสะอาดแสดงในตารางที่ 2.4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน (Lindua, 1994)

ชนิดของสารลดแรงตึงผิว	ตัวอย่างสาร
ประจุบวก (Cationic surfactant)	- สารประกอบแอมโมเนียม (quaternary ammonium compound) มีประสิทธิภาพในการทำสะอาดต่ำกว่าสารลดแรงตึงผิว
ประจุลบ (Anionic surfactant)	- สบู่ดีเทอเจนต์ (alkyl benzene sulfonate) มีประสิทธิภาพดีกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่นๆ
ไม่มีประจุ (non-ionic surfactant)	- เอทิลีนออกไซด์ (ethylene oxide) มีประสิทธิภาพปานกลาง (ต่ำกว่าสารลดแรงตึงผิวประจุลบ)

สารลดแรงตึงผิวสามารถเข้าถึงส่วนต่างๆ ของแผ่นเมมเบรนได้ดี (เกิด wetting) จึงสัมผัสกับสารอุดตันได้ดี ล้างออกได้ง่าย แต่ควรเลือกอย่างระมัดระวัง เพราะสารลดแรงตึงผิวอาจถูกดูดซับได้ด้วยแผ่นเมมเบรนบางชนิด จึงอาจกลายเป็นสารอุดตันเสียเอง ตัวอย่างเช่น สารลดแรงตึงผิวที่เป็นสารต้านฟอง (Antifoam) ที่ใช้ในกระบวนการหมัก

- สารฆ่าเชื้อ (Disinfectant) สารฆ่าเชื้อส่วนมากเป็นตัวออกซิเดนต์ (Oxidant) เช่น คลอรีน (Chlorine) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) สารพวกไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite) เป็นสารที่ออกฤทธิ์แรง จึงควรใช้ด้วยความระมัดระวัง เพราะอาจมีผลเสียต่อเมมเบรนและส่วนอื่นๆ ของหน่วยอุปกรณ์ นอกจากจะใช้ทำความสะอาดแล้ว ยังนิยมใช้เป็นสารเก็บรักษาแผ่นเมมเบรนด้วย
- สารทำความสะอาดกำหนดสูตร (Formula cleaner) เป็นสารที่มีผู้จำหน่ายกำหนดส่วนประกอบขึ้น โดยอาจใช้สารหลายชนิดผสมกันให้มีความเหมาะสมกับชนิดของสารอุดตันและแผ่นเมมเบรน ค่อนข้างมีราคาแพง ตัวอย่างชื่อทางการค้าของสารเหล่านี้ เช่น GB Fuller Ultrasil และ Klensade Argo Scientific ตารางที่ 2.5 สรุปสารทำความสะอาดที่ใช้ตามความเข้มข้นที่ระบุเพื่อกำจัดสารอุดตัน โดยบางตัวเป็นสารผสม ในกรณีที่ใช้สารทำความสะอาดเดี่ยวๆ ช่วงความเข้มข้นที่ใช้แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างสารทำความสะอาดใช้เดี่ยวๆ หรือเป็นสารผสมเพื่อกำจัดสารอุดตันต่างๆ (Lindua, 1994)

สารทำความสะอาด	สารอุดตัน		
	ตะกรันเกลือออกไซด์ ของโลหะ	คอลลอยด์	จุลินทรีย์
กรดเกลือ 0.5% (wt)	√		
กรดซัลฟิวริกผสมกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (pH 4)	√		
กรดฟอสฟอริก 0.5%(wt)	√		
โซเดียมไฮดรอกไซด์ pH 11-11.9		√	√
ไตรโซเดียมฟอสเฟต 1%(wt) ผสมกับเกลือโซเดียมของ EDTA 1% (wt) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ pH 11-11.9		√	√
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% (wt)	√		
กรดซัลฟิวริก 2.5% (wt) และแอมโมเนียมไบฟลูออไรด์	√	√	

\*EDTA = ethylenediamine tetra acetic acid

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างช่วงความเข้มข้นของสารทำความสะอาด (Lindua, 1994)

ชื่อสาร	ความเข้มข้น (%wt)
โซเดียมไฮดรอกไซด์	0.5-1.0
EDTA	0.5-1.0
กรดไนตริก	0.3-0.5
คลอรีน	0.002-0.02
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	0.1
โซเดียมไบซัลไฟท์	0.25



### 2.7.3.3 ขั้นตอนการทำความสะอาด (Cleaning sequences)

การล้างแผ่นเมมเบรนเป็นสิ่งสำคัญและอาจต้องใช้เวลาาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารละลายแผ่นเมมเบรน อาจมีความจำเป็นที่จะต้องใช้เวลาทำความสะอาดมากกว่า 1 ชนิด เช่น ถ้าสารอุดตันมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ก็ควรล้างด้วยทั้งกรดและด่าง อาจจำเป็นต้องล้างมากกว่า 1 รอบ เพื่อให้แผ่นเมมเบรนมีสมรรถนะกลับไปใกล้เคียงกับก่อนเริ่มใช้งานมากที่สุด จึงจำเป็นต้องศึกษาเป็นแต่ละกรณีไป วิธีปฏิบัติใช้ค่าอัตราการผลิตน้ำของน้ำที่สภาวะหนึ่ง เป็นค่าอ้างอิง เมื่อทราบอัตราการผลิตน้ำของแผ่นเมมเบรนใหม่ หลังจากการผ่านขั้นตอนการล้างแล้วจึงจำเป็นต้องทดสอบอัตราการผลิตน้ำของน้ำซึ่งหลังจากการล้างค่าอัตราการผลิตน้ำของน้ำควรสูงกว่า 85% ของค่าเริ่มต้น ขั้นตอนในการล้างที่ปฏิบัติโดยทั่วไปมีดังนี้

- 1 นำสารละลายออกจากระบบ
- 2 ล้างทิ้งด้วยน้ำสะอาด
- 3 ล้างด้วยสารทำความสะอาดในลักษณะไหลวนอยู่ในระบบ และถ้าใช้สารทำความสะอาดมากกว่า 1 ชนิด ต้องทำซ้ำในขั้นตอนนี้
- 4 ล้างทิ้งด้วยน้ำเพื่อกำจัดสารทำความสะอาด
- 5 ทดสอบค่าอัตราการผลิตน้ำของน้ำ ถ้ายังไม่ได้ค่าที่พอใจ (เช่น 85 % ของค่าเริ่มต้น) ให้ทำซ้ำข้อ 3-4

นอกจากขั้นตอนแล้ว ยังต้องพิจารณาเวลาในการล้างของแต่ละขั้นตอน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสารละลาย หรือน้ำขณะที่ล้างทิ้ง หรือล้างแบบไหลวน ว่ามีความขุ่น-ใส เพราะช่วยบอกให้ทราบว่า สามารถแยกสารอุดตันออกได้เพียงใด นอกจากนี้ สภาวะในการล้างซึ่งหมายถึงความเร็วในการป้อนสารทำความสะอาดผ่านแผ่นเมมเบรน ความดันในการป้อนสารละลาย ตลอดจนอุณหภูมิก็มีความสำคัญ การล้างที่ความเร็วสูง และ ความดันต่ำ ให้ประสิทธิภาพในการล้างได้ดีกว่าเพราะที่ความเร็วสูง แรงเฉือนระหว่างสารละลายและแผ่นเมมเบรนช่วยให้สารอุดตันหลุดออก ที่ความดันต่ำช่วยไม่ให้เกิดการอัดแน่นของสารอุดตัน หรือการสะสมกลับเข้าไปในแผ่นเมมเบรน การล้างที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้ละลายสารอุดตันหลุดออกได้ดีขึ้น โดยต้องพิจารณาความคงทนต่ออุณหภูมิของแผ่นเมมเบรน

## 2.8 การพัฒนาอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนเพื่อการกำจัดอนุภาค

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการเพิ่มความสนใจในการใช้เทคโนโลยีเมมเบรน สำหรับการกำจัดอนุภาคจากน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำดื่ม ในฝรั่งเศสได้มีความพยายามอย่างจริงจังต่อเป้าหมายนี้ โดย Lyonnaise des Eaux (LDE) และ Generale des Eaux (CGE) ซึ่งอาศัยเงินทุนจากโครงการของ

EEC เรียกว่า BRITE (Basic Research for Industrial Technology in Europe) โดยเริ่มวิจัยในพื้นที่แห่งนี้ในปี ค.ศ. 1986

โรงผลิตน้ำดื่มระบบอัลตราฟิลเตรชันที่ใหญ่ที่สุดในโลกซึ่งใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันแบบเส้นใยกลวง (hollow-fiber) ซึ่งทำจากอแกนิคโพลิเมอร์ (Organic Polymer) เพื่อผลิตน้ำดื่มอยู่ในเมือง Douchy ประเทศฝรั่งเศสโดยมีกำลังการผลิตปกติ คือ 1200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โรงงานแห่งนี้ใช้น้ำดิบจากใต้ดินซึ่งซึมขึ้นมาบนผิวดิน ทำให้ได้รับผลกระทบอย่างมากจากน้ำฝนที่ไหลเข้ามา เป็นเหตุให้ความขุ่นของน้ำดิบสูงเพิ่มขึ้นเป็น 20 NTU อย่างไรก็ตาม ความขุ่นของน้ำที่กรองแล้วเหลือต่ำกว่า 0.1 NTU ความดันที่ใช้สำหรับ UF ค่อนข้างต่ำ ทำให้เทคโนโลยีนี้มีความน่าสนใจขึ้นในด้านของความเสี่ยงของพลังงานที่ต่ำ ตัวอย่างเช่น ความดันที่ใส่เข้าไปในเมมเบรนสำหรับการทำงานปกติที่โรงผลิตน้ำ Douchy อยู่ในช่วง 0.3 – 0.7 บาร์ โรงผลิตประเภทเดียวกัน แต่มีขนาดเล็กกว่า กำลังเดินระบบอยู่ที่ Amoncourt (240 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน), Le Brasil (120 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน) และ Gracay (720 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน) นอกจากนี้โรงผลิตน้ำ CGE ขนาด 2400 – 3600 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้เมมเบรนเซรามิกใน กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ได้ถูกใช้งานมาตั้งแต่เดือนธันวาคม 1990

จากผลของการแก้ไขมาตรฐานน้ำดื่มที่ปลอดภัยของสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1986 ทำให้กฎข้อบังคับการทำความสะอาดน้ำผิวดิน (Surface Water Treatment Rule, SWTR) ซึ่งประกาศใช้โดย USEPA ได้บังคับให้องค์กรที่ผลิตน้ำสำหรับสาธารณูปโภค เพื่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค และการกรอง โดยต้องสามารถหยุดยั้งหรือกำจัดไวรัสได้อย่างน้อยที่สุด 99.99% และสามารถหยุดยั้ง หรือกำจัด Giardia (ปรสิตของโปรโตซัว) อย่างน้อยที่สุด 99.9% นอกจากนี้ SWTR ยังต้องการให้ระบบซึ่งใช้การกรองแบบธรรมดา และกรองโดยตรงต้องทำให้น้ำที่ผ่านการกรองมีความขุ่นไม่เกิน 0.5 NTU สำหรับ 65% ของตัวอย่างที่เก็บมาในแต่ละเดือน นอกจากนี้ระบบที่ใช้ในการกรองแบบธรรมดา และกรองโดยตรง ซึ่งบำบัดน้ำดิบที่มีระดับความขุ่น 1 NTU หรือต่ำกว่า อาจจะถูกบังคับให้ผลิตน้ำกรองให้มีระดับของความขุ่นต่ำกว่า 0.2 NTU (USEPA, 1989) และผลจากกฎข้อบังคับเหล่านี้ ทำให้มีความสนใจในด้านเทคโนโลยีการกรองอื่น ๆ เพิ่มมากยิ่งขึ้น อาทิ กระบวนการเมมเบรน อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane) และเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration Membrane) สำหรับการกำจัดอนุภาคออกจากน้ำดื่ม

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ ซึ่งมีความเป็นไปได้จากฝรั่งเศส ทำให้เกิดการทดลองขึ้นมากมายในสหรัฐอเมริกา จากการใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration membrane) ชนิดเส้นใยกลวง (hollow-fibre membrane) ซึ่งทำมาจากเซลลูโลส Jacangelo และคณะ (1995) ได้แสดงให้เห็นว่า เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration membrane) สามารถลดความขุ่นของน้ำผิวดินทั้งสองแห่งทางตอนเหนือของแคลิฟอร์เนียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยน้ำผลิตที่ได้มีความขุ่นต่ำกว่า 0.05

NTU ถึงแม้ว่าคุณภาพของน้ำดิบจะแปรผันมากก็ตาม นอกจากนั้นความเข้มข้นของอนุภาคทั้งหมดในน้ำที่เข้าสู่ระบบซึ่งมีมากกว่า 30,000 อนุภาคต่อมิลลิลิตรยังถูกกำจัดจนเหลืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.2 ไมครอนเพียง 1 อนุภาคซึ่งมีมากกว่า 4 ล็อก ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการพิสูจน์ว่าระบบ อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration membrane) สามารถกำจัด Giardia จากน้ำผิวดินได้

มีการศึกษาในลักษณะเดียวกันอย่างต่อเนื่องในเมือง Boise รัฐ Idaho การวิจัยนี้ได้รับทุนส่วนหนึ่งจาก American Water Works Association Research Foundation. โดยได้ทำการศึกษากิจการกำจัดอนุภาคในน้ำผิวดิน และในน้ำใต้ดินด้วย ข้อมูลการทดลองล่าสุดแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration membrane) ชนิดเส้นใยกลวง (hollow-fibre) มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่น อนุภาคของแข็งแขวนลอย และจุลชีพบ่งชี้ที่ทำการเลือกไว้ได้

นอกจากการผลิตน้ำดื่มแล้ว ระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน ยังมีความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งไม่สามารถบำบัดได้โดยอาศัยระบบธรรมดาทั่ว ๆ ไป มีงานวิจัยซึ่งกำลังอยู่ระหว่างการดำเนินการอย่างต่อเนื่องในประเทศสเปน เป็นการบำบัดของเสียจากนํ้ามันมะกอก เป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของประเทศต่าง ๆ ในแถบเมดิเตอร์เรเนียน การบำบัดด้วยวิธีธรรมดา มักจะไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ หรือมีค่าใช้จ่ายที่แพงเกินไป เนื่องจากงานวิจัยนี้อยู่ภายใต้โปรแกรมของ BRITE ความพยายามในการวิจัยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดของเสียจากนํ้ามันมะกอก พร้อมทั้ง สามารถนำสารเคมีที่สกัดออกมาได้ไปขาย เพื่อนำรายได้มาใช้ในการเดินระบบเมมเบรน

## 2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lanie และคณะ, (1989) ได้ทดลองกรองน้ำผิวดินด้วยอัลตราฟิลเตรชันชนิดต่างๆเพื่อศึกษาผลของการกำจัดความขุ่น สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) พบว่าสามารถกำจัด TOC ได้ 40 % โดยไม่ขึ้นกับขนาดช่องว่างของเมมเบรน สำหรับความขุ่นถูกกำจัดได้มากกว่า 98 %

Knocke และคณะ, (1994) ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ และโรงฟอกขาวโดยใช้สารเคมีทำให้ตกตะกอน และเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน พบว่าเมื่อใช้สารส้มและเกลือของเหล็กในการกำจัดสี มีประสิทธิภาพมากกว่า 90-95 % ที่พีเอช 5.0-5.5 สำหรับสารส้ม และที่พีเอช 4 สำหรับเกลือของเหล็ก และเมื่อใช้อัลตราฟิลเตรชันขนาด 10,000 mass unit ความดัน 25-90 psig ที่อัตราการไหลต่างๆพบว่าสามารถกำจัดสีได้เฉลี่ย 90 % และกำจัด TOC ได้ประมาณ 70 % และได้ทดลองนำสารส้มมากำจัดสี ก่อนเข้าระบบเมมเบรน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดด้วยสารส้มก่อน เนื่องจาก สารส้ม

สามารถกำจัดสิ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลใหญ่เท่านั้น (molecular weight) แต่เมมเบรนสามารถกำจัดได้ใน ช่วงกว้างกว่า

Jacangelo และคณะ, (1995) ได้ทำการทดลองโดยใช้ Low-Pressure hollow-fiber UF ขนาด 0.1 ไมครอน ซึ่งทำงานโดยอาศัยความดันในช่วง 10-40 psi หรือ 0.7-2.8 บาร์ เพื่อกำจัด แบคทีเรีย และไวรัสออกจากน้ำเพื่อให้ผ่านมาตรฐานของ Surface Water treatment Rule (SWTR) โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้น้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ 4 แห่งซึ่งประกอบด้วยแหล่งน้ำจาก Northern California 2 แห่ง จากเมือง Boise และเมือง Idaho พบว่าประสิทธิภาพของ UF สามารถผ่านมาตรฐานของ SWTR ได้โดยปราศจากการฆ่าเชื้อโรคทางเคมีช่วย ในการทดลองพบว่า น้ำ กรองที่ได้ตรวจไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียไวรัสและ Giardia ในทุกกรณี โดยประสิทธิภาพในการ กำจัด Giardia มากกว่าเท่ากับ 4 ล็อก ในขณะที่ลดแบคทีเรียได้ 4 ล็อก และลดไวรัสได้มากกว่า 6.5 ล็อก โดยที่คุณภาพของน้ำดิบที่แตกต่างกันของแหล่งน้ำทั้ง 4 แห่งไม่ส่งผลต่อความสามารถในการ กำจัดจุลชีพของเมมเบรน

Chmiel และคณะ, (2003) ได้ทำการทดลองโดยใช้โอโซนร่วมกับอัลตราฟิลเตรชัน ร่วมกับไมโครฟิลเตรชัน โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้เมมเบรนเซรามิกส์มีขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอนเป็น แบบขนาดทดลองในห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ใช้เบนโทไนท์ และกรดฮิวมิก ผลปรากฏว่าการ เติมโอโซนระหว่างไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันจะลดการเกิดการอุดตัน (Fouling) ของ เมมเบรนไมโครพอร์สที่มีขนาดรูพรุน 10-50 นาโนเมตร เป็นขนาดที่ดีที่สุด

Kerry และMarkm, (2007) ได้ทำการศึกษาระบบ กลไกและส่วนประกอบของน้ำ ธรรมชาติที่จะก่อให้เกิดการอุดตัน (Fouling) น้ำธรรมชาติจากแหล่งน้ำ 5 แห่งได้ถูกนำมากรองใน ระบบแบบตั้งโต๊ะ ( Benchtop) การกรองตามลำดับได้ถูกใช้ในการทดลองนี้ การกรองขั้นแรกนั้น เพื่อที่จะกำจัดองค์ประกอบที่มีขนาดใหญ่โดยการตกตะกอนด้วยความถ่วงจำเพาะที่มาก (Specific components) ออกจากน้ำ และขั้นตอนการกรองในขั้นถัดมาเพื่อที่จะหาการเกิดการอุดตัน (Fouling) ของเมมเบรน พบว่าขนาดของอนุภาค (ใหญ่กว่า 0.45 ไมครอน) ไม่ได้ทำให้เกิดการ (Fouling) เมื่อ เปรียบเทียบกับสารที่ละลายน้ำ คอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กที่อยู่ในช่วง 3-20 นาโนเมตร จะส่งผลต่อ การอุดตัน (Fouling) ในเมมเบรน ในการทดลองนี้สารคอลลอยด์ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตัน (Fouling) ก็ได้แก่ สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แต่ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นสารอินทรีย์มากกว่าที่เป็น สาเหตุให้เกิดการอุดตัน (Fouling) เมื่อคอลลอยด์เหล่านี้ถูกกำจัดออกไปแล้วก็ยังเหลือสาร คอลลอยด์ที่ละลายน้ำอยู่ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 3 นาโนเมตร ซึ่งมีประมาณ 85-90 เปอร์เซ็นต์ ของสาร คอลลอยด์ละลายน้ำทั้งหมด

Lee และคณะ, (2001) ได้ทำการศึกษาความสามารถของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration Membrane) แบบไหลผ่าน (Cross-flow) ร่วมกับปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลต์ดิก

(Photocatalytic) เพื่อที่จะแยกไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดในกระบวนการผลิตน้ำดื่ม ผลของสารอินทรีย์ในธรรมชาติ เช่นกรดฮิวมิกและความเร็วในการกรอง และการกำจัดสารอินทรีย์ ได้ถูกทำการตรวจสอบทั้งที่มียูวี (Ultraviolet) และแบบที่ไม่มียูวี (Non-Ultraviolet) ในถึงปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic) ปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย 2 ตัวในระบบคือ กรดฮิวมิกและไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) มีนัยสำคัญคือจะทำให้เกิดเค้กที่ผิวของเมมเบรนซึ่งจะทำให้ค่าอัตราการผลิตน้ำในการกรองลดลง จากการสังเกตการใช้เมมเบรนและการประมาณความเร็วย้อนกลับของสารละลาย ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ก็จะติดค้างบนพื้นผิวของเมมเบรนรวมทั้งกรดฮิวมิก

Smith และคณะ, (2005) ได้ศึกษาการอุดตัน (Fouling) การนำน้ำเพอเมทกลับคืนสู่ระบบ (Permeate flux recovery) และเทคนิคในการควบคุมการล้างย้อน (Backwash) ซึ่งได้พิจารณาถึงการลดลงของการเกิด fouling เป็นหลัก โดยได้ทดลองกับเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง (Hollow fiber membranes) และพบว่าวิธีการควบคุมการล้างย้อน (Backwash) ที่ใช้นั้น สามารถลดการใช้น้ำในการล้างย้อน (Backwash) ได้ถึง 40 %

Bowen และคณะ, (1994) ได้ทำการศึกษาผลของการล้างย้อนที่มีต่อเมมเบรน โดยการใช้การล้างย้อนแบบ Electric fields และ Electroosmotic backwashing. และพบว่าการใช้วิธีแบบ Electroosmotic backwashing นั้นทำให้เกิดแรงเฉือนที่ผนังของรูพรุนของเมมเบรนได้มากที่สุดและอัตราการกรองน้ำเพิ่มขึ้นถึง 95 % และยังสรุปว่าการล้างย้อนเมมเบรนแบบ Electroosmotic backwashing มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้แรงดันในการล้างย้อน

Xu และคณะ (2007) ได้นำเอาอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration membrane) แบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber membrane) มาใช้ในการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) ในการกระบวนการ Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) ที่อำเภอ Qingdao Jiaozhou ที่ทะเลเหลืองของประเทศจีน และได้เจาะจงลงไปถึงการออกแบบที่เหมาะสมของระบบที่รวมเอาอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนและออสโมซิสผันกลับ (Hybrid UF-RO) โดยเน้นเรื่องของจำนวนของผลผลิตหรือน้ำสะอาดที่ออกมามากที่สุด เช่น ความเหมาะสมของค่าช่วงการกรองและการล้างย้อน เป็นต้น จากการทดลองพบว่าการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration Membrane) กับระบบ SWRO นั้นสามารถทำให้ระบบออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยในช่วงการทดลองไม่มีการเติมสารเคมีลงไปในระบบที่รวมเอาอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนและออสโมซิสผันกลับ (Hybrid UF-RO) ซึ่งผลที่ได้ นั่น คือ อัตราการกรองน้ำของระบบอัลตราฟิลเตรชัน นั้น (กำหนดให้ระยะเวลาในการล้างย้อน = 45 วินาที) เมื่อช่วงการกรองเท่ากับ 20 นาที อัตราการกรองน้ำลดลงจาก 60 ลิตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง เป็น 56.8 ลิตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 5.3 จากนั้นเมื่อเพิ่มช่วงการกรองเป็น 40 นาที พบว่าอัตราการ

กรองน้ำลดลงจาก 60 ลิตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง เป็น 54.5 ลิตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง และเมื่อเพิ่ม  
ช่วงการกรองอีกเป็น 60 นาที และ 90 นาที อัตราการกรองน้ำก็ลดลงเป็น 10 % และ 14.2 %  
ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อยืดเวลาการกรองออกไปจะทำให้อัตราการกรองน้ำลดลงด้วย



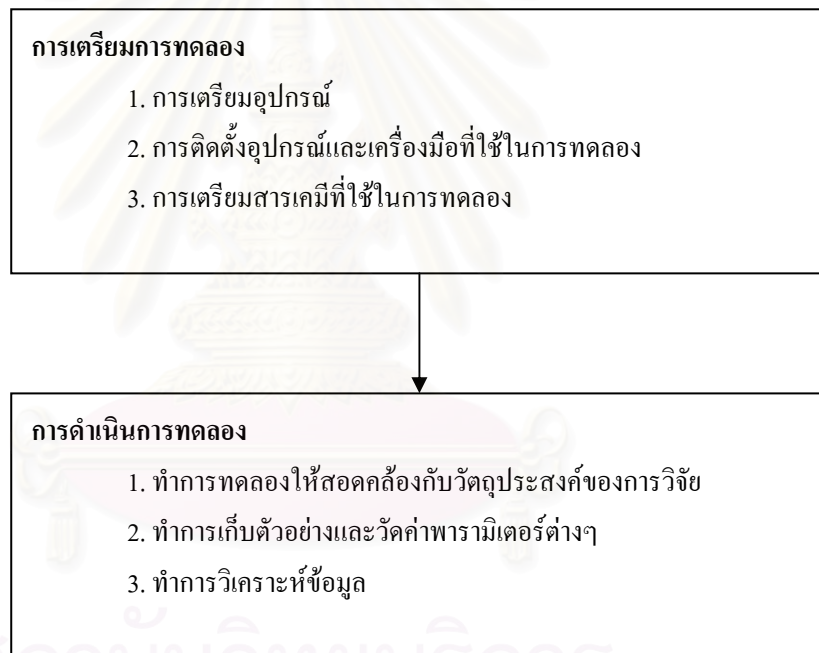
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการวิจัย

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการพัฒนาระบบอัลตราฟิลเตรชันสำหรับการผลิตน้ำประปา รวมทั้งศึกษาถึงปัญหาและแนวทางการแก้ไขการอุดตันของเมมเบรนในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน และการล้างเมมเบรนที่เหมาะสมด้วยสารเคมี โดยทำการติดตั้งชุดการทดลองในขนาดทดสอบที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน ซึ่งรับน้ำดิบจากถังพักน้ำดิบโดยทำการวัดคุณภาพตัวอย่างน้ำ สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำกระทำที่ห้องปฏิบัติการของโรงกรองน้ำประปาสามเสนแผนการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผังการดำเนินการวิจัย

### 3.2 รายละเอียดอุปกรณ์ของระบบผลิตน้ำอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

ตารางที่ 3.1 รายการอุปกรณ์ที่สำคัญของระบบผลิตน้ำอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

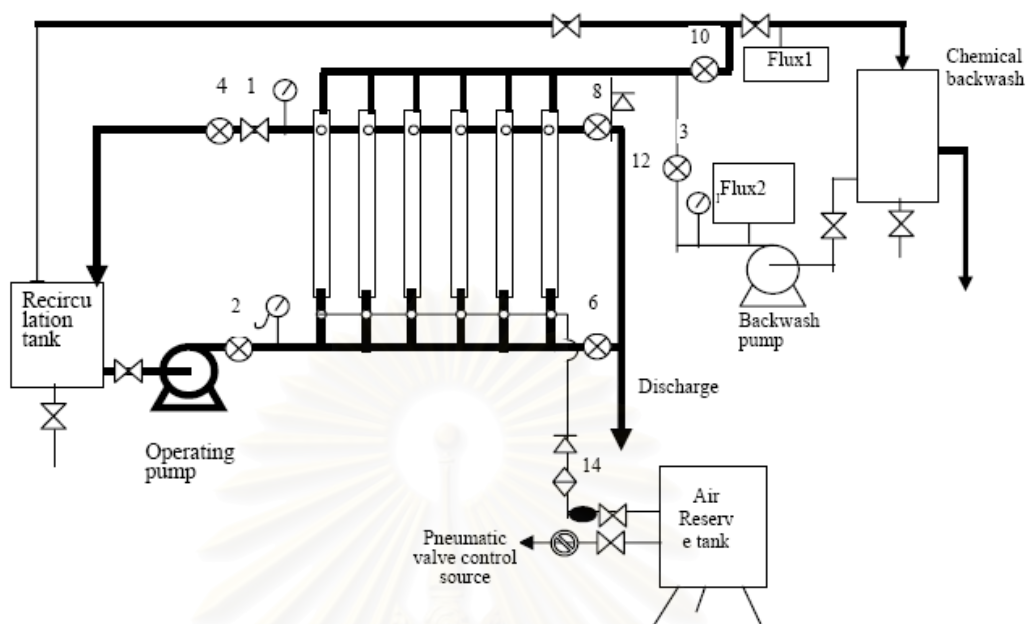
อุปกรณ์	รายละเอียด
เมมเบรน	- ชนิด Ultrafiltration (MF) ทำจากวัสดุ Poly Vinylidene Difluoride (PVDF)
โมดูล (Module)	- ใช้บรรจุเมมเบรน ซึ่งภายในบรรจุ 1 % NaHSO <sub>4</sub> เพื่อรักษาสภาพเมมเบรน
ปั๊มน้ำ	- จำนวน 2 ตัว ขนาด 0.75 Kw, 10 m <sup>3</sup> /hr
เครื่องอัดลม	- ขนาด 1.5 Kw, 0.7เมกะปาสคาล
ระบบแผงควบคุม	- ระบบ PLC, touch ปาสคาล nel (MT-506L), Transducer
ท่อต่างๆในระบบ	- วัสดุชนิด PVC และ UPVC
ถังน้ำดิบ	- ขนาด 1 ลบ.ม. ทำจาก PVC
ถังน้ำล้างย้อน	- ขนาด 1 ลบ.ม. ทำจาก PVC

### 3.3 ขอบเขตการทำงานของระบบผลิตน้ำอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

ตารางที่ 3.2 ขอบเขตการทำงานของระบบผลิตน้ำอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

สถานะในการเดินระบบ	รายละเอียด
อัตราการกรองน้ำเฉลี่ย	- อัตรา 2 m <sup>3</sup> /hr-Module เป็นเวลา 20 นาที ก่อนการล้างย้อน
อัตราการล้างย้อนเฉลี่ย ครั้งที่ 1	- อัตรา 0.9 m <sup>3</sup> /hr-Module เป็นเวลา 20 วินาที
อัตราการล้างย้อนเฉลี่ย ครั้งที่ 2	- อัตรา 6.9 m <sup>3</sup> /hr-Module เป็นเวลา 20 วินาที
พีเอชที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	- พีเอช 2 – 10





รูปที่ 3.2 ผังการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดในการทดลอง

### 3.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรที่พิจารณาในการทดลองประกอบด้วยตัวแปรคงที่ (Fixed Variables) ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) และตัวแปรตาม (Dependent Variables) ซึ่งในการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

ตัวแปรคงที่ คือตัวแปรที่กำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง ประกอบด้วย

- ชนิดและขนาดของเมมเบรนที่ใช้ คือ เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน แบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module) ชนิด SKUC-306-0830

- พื้นที่ผิวประสิทธิผลของเมมเบรน 42.2 ตารางเมตร

- สารที่ใช้ล้างเมมเบรนและเวลาในการล้างย้อน

ตัวแปรอิสระ คือ ปัจจัยในการดำเนินระบบต่างๆ ที่ทำการแปรค่าในการทดลอง ประกอบด้วย

- อัตราน้ำที่ใช้ในการล้างย้อน

- ความดันน้ำที่เข้าเมมเบรน 100-150 กิโลปาสกาล

ตัวแปรตาม คือ ตัวแปรที่จะเปลี่ยนแปลงเมื่อตัวแปรอิสระเปลี่ยนแปลงประกอบด้วย

- ค่าฟลักซ์: คือ ค่าปริมาณน้ำที่ผลิตได้ ต่อพื้นที่ผิวประสิทธิผลของเมมเบรนต่อเวลา

(ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมง)

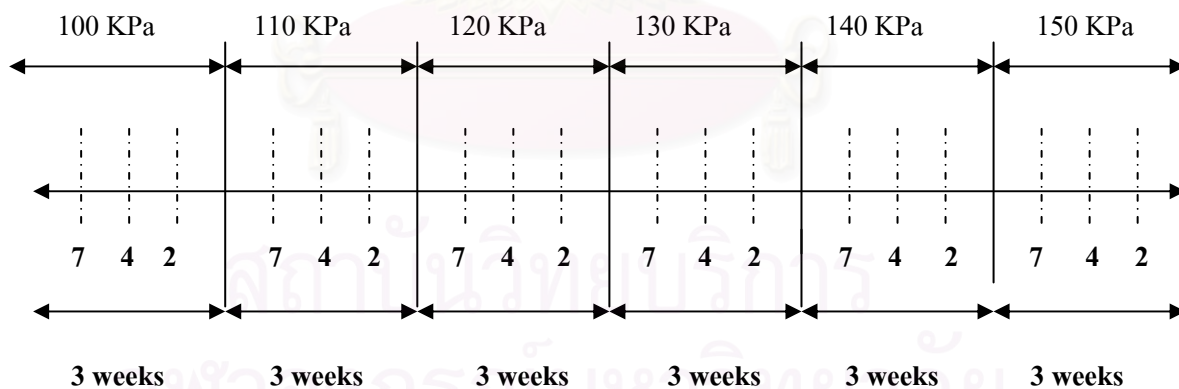
- ประสิทธิภาพการดูดซับรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (ซึ่งเป็นค่าของตัวแทนสารอินทรีย์) และ ประสิทธิภาพการดูดซับรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร (ซึ่งเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์และลิกนินในน้ำ)

- พีเอช และ อุณหภูมิ
- ความขุ่น (NTU)
- ค่าความนำไฟฟ้า
- ความเป็นด่าง

### 3.5 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

#### 3.5.1 การทดลองที่ 1.1 : การทดลองในระบบต้นแบบ

ติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือในการดำเนินระบบ ทำการเดินระบบด้วยความดันคงที่ที่ 100 กิโลปาสกาล ที่อัตราการล้างย้อนคงที่ที่ 7 4 และ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร·ชั่วโมงเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ตามลำดับ และทำการเปลี่ยนค่าความดันที่เข้าเป็น 110 120 130 140 และ 150 กิโลปาสกาล ตามลำดับ โดยทำการเปลี่ยน อัตราการล้างย้อน เหมือนกับการทดลองที่ 100 กิโลปาสกาล เป็นเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 3.3 ผังขั้นตอนการทดลองที่ 1.1

### 3.5.2 การทดลองที่ 1.2

**ช่วงที่ 1 :** ศึกษาการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนในระยะยาว

จากการทดลองที่ 1.1 พิจารณาเลือกค่าอัตราการล้างย้อนที่เหมาะสมมา 2 กรณีศึกษา โดยพิจารณาจากค่า อัตราการกรองน้ำ และคุณภาพของน้ำสะอาดที่ได้ เพื่อใช้ทำการทดลองในระยะยาว โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองได้แก่

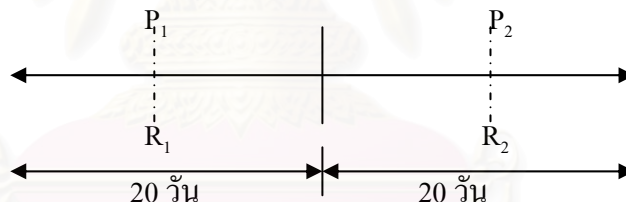
การทดลองที่ 1.2.1) อัตราการล้างย้อน  $R_1$  และ ความดันที่เข้า  $P_1$

ระยะเวลาในการเดินระบบประมาณ 20 วัน

การทดลองที่ 1.2.2) อัตราการล้างย้อน  $R_2$  และ ความดันที่เข้า  $P_2$

ระยะเวลาในการเดินระบบประมาณ 20 วัน

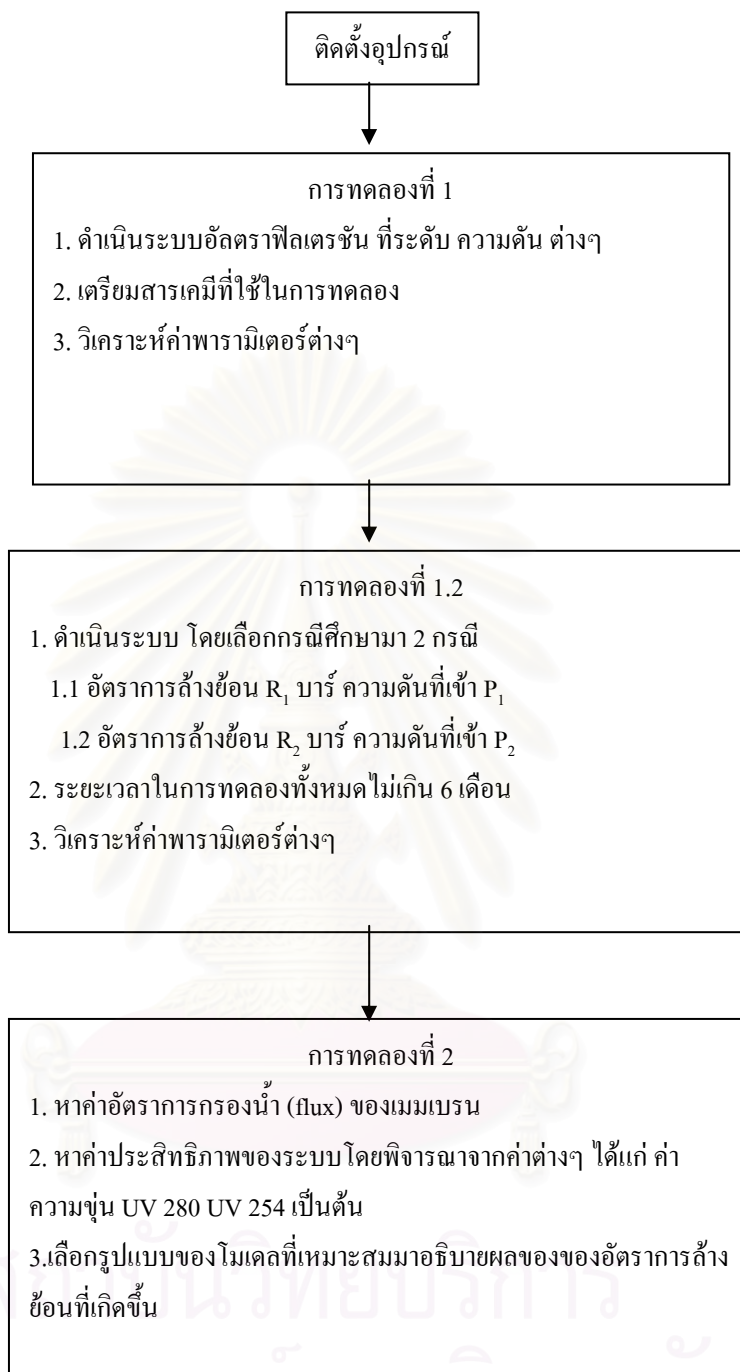
จากกรณีศึกษาที่ทำการเลือกมานำมาดำเนินการเดินระบบ โดยเริ่มทำการทดลองที่ 1.2.1 ก่อนเป็นเวลา 20 วัน จากนั้นล้าง เมมเบรนด้วยกรด ไฮดรอกลอริกเข้มข้น 35 % จากนั้นเริ่มทำการทดลองที่ 1.2.2 เป็นเวลา 20 วัน เช่นเดียวกับการทดลองแรก ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนำมาทำการศึกษาค่าอัตราการกรองน้ำ (Flux) ของเมมเบรน ประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์ต่างๆ และคุณภาพน้ำที่ได้ในระยะยาว



รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 1.2

**ช่วงที่ 2 :** การศึกษาโมเดลทำนายการลดลงของอัตราการกรองน้ำและการฟื้นฟูสภาพการกรอง เนื่องจากการล้างย้อน

เป็นการนำเอาผลการทดลองมาวิเคราะห์โดยเลือกใช้โมเดลที่เหมาะสมในการอธิบายผลของอัตราการกรองน้ำและการฟื้นฟูสภาพการกรองเนื่องจากการล้างย้อน เช่น แบบจำลองสมการรูพรุน แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (Resistance-in-series model) รวมถึงการพิจารณาถึงสมการล้างย้อน (Backwash) และสมการของแรงเฉือน (shear) ที่เกิดขึ้นจากการล้างย้อน (Backwash) เพื่ออธิบายถึงความสัมพันธ์ต่างๆ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการล้างย้อน (Backwash) กับค่าของแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของค่าอัตราการผลิตน้ำ อัตรการกรองน้ำและการลดลงของอัตราการผลิตน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 3.5 วิธีดำเนินการทดลอง

ตารางที่ 3.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการล้างย้อน (Backwash) ต่อประสิทธิภาพ  
อัตราฟیلเตรชันเมมเบรน

ความดันที่เข้า (กิโลปาสกาล)	อัตราการล้างย้อน (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)
	7
100	4
	2
	7
110	4
	2
	7
120	4
	2
	7
130	4
	2
	7
140	4
	2
	7
150	4
	2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 คุณภาพน้ำดิบของคลองประปา

พารามิเตอร์	หน่วย	ก.ค. 50	ส.ค. 50	สูงสุด	ต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	มาตรฐาน น้ำผิวดิน
สีจริง	แพลตินัม- โคบอลต์	20.0	16.0	-	-	-	-
กลิ่น		ดิน(แรง)	ดิน	ดิน(แรง)	ดิน	ดิน	-
ความขุ่น	เอ็นทียู	171	83	171.0	16.9	59.2	-
ความนำ จำเพาะ	ไมโครโมล/ ชม.	219	274	283	167	245	-
ความเป็น ด่างทั้งหมด	มก./ล.	66	78	108	66	86	-
แคลเซียม	มก./ล.	20.0	22.4	28.8	20.0	24.4	-
เหล็ก	มก./ล.	1.81	1.09	1.81	0.19	0.86	0.3
แมงกานีส	มก./ล.	0.13	0.04	0.22	0.00	0.08	1.0

แหล่งที่มา : <http://www.mwa.co.th> [2007, September 26]

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรและวิธีที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่ วิเคราะห์	วิธีวัด	ความถี่
ความดัน	เกจวัดความดัน	ทุก 2 วัน
อัตราการไหลเข้า	เครื่องวัดอัตราการไหล	ทุก 2 วัน
พีเอช และ อุณหภูมิ	พีเอชมิเตอร์	ทุก 2 วัน
ความนำไฟฟ้า	เครื่องวัดความนำไฟฟ้า	ทุก 2 วัน
ความขุ่น	เครื่องวัดความขุ่น	ทุก 2 วัน
เหล็ก	เครื่องมือวิเคราะห์โลหะหนัก (ICP)	ทุก 2 วัน
แมงกานีส	เครื่องมือวิเคราะห์โลหะหนัก (ICP)	ทุก 2 วัน
สารอินทรีย์ประเภท ชีวมีสและลิกนิน	สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	ทุก 2 วัน
สารอินทรีย์ในน้ำ	สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	ทุก 2 วัน
ความเป็นด่าง	ไตเตรทด้วย กรดซัลฟูริก	ทุก 2 วัน

### 3.6 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

- 1) ถังพักน้ำขนาด 1000 ลิตร จำนวน 2 ถัง
- 2) เครื่องสูบน้ำ 2 เครื่อง
- 3) ท่อน้ำ ข้อต่อและวาล์วต่างๆ
- 4) เครื่องวัดความดัน (Pressure Gauge) 2 ตัว ตัวที่ 1 วัดความดันทางเข้า ตัวที่ 2 วัดความดันน้ำที่กลับเข้าถังน้ำดิบ (Concentrate)
- 5) มาตรวัดอัตราการไหล (Flow meter) 2 ตัว
- 6) พีเอชมิเตอร์
- 7) เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า
- 8) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 9) เทอร์โมมิเตอร์
- 10) ชุดเครื่องแก้ว
- 11) ชุดเครื่องมือในการไตเตรท
- 12) เครื่องมือวิเคราะห์โลหะหนัก (Inductively Couple Plasma, ICP) สำหรับวัดปริมาณของเหล็ก และแมงกานีส

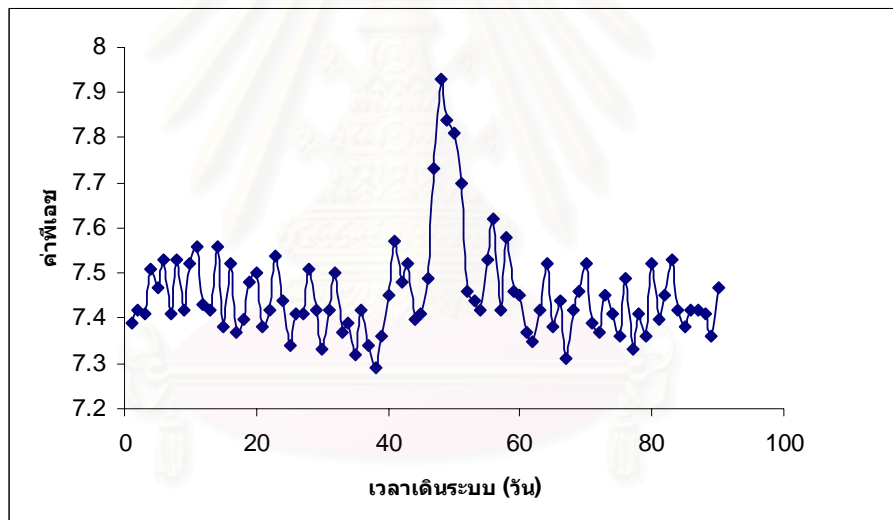
## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ลักษณะของน้ำดิบที่ใช้ในการวิจัย

ในการทดลองใช้น้ำดิบจากคลองประปาซึ่งไหลผ่านโรงกรองน้ำสามเสนในการทดลองนี้ ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาเดินระบบ

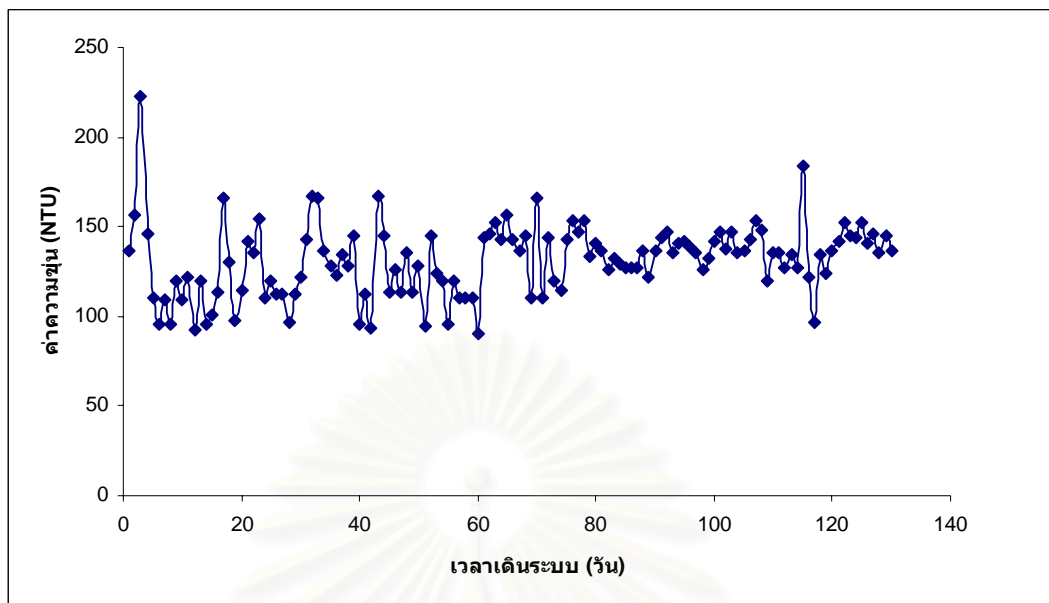
ค่าพีเอชที่เข้าสู่ระบบมีค่าอยู่ในช่วง 7.22 – 7.93 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 ในวันที่ 47 – 51 ค่าพีเอชจะมีค่าในช่วงที่สูงเนื่องจากว่าได้มีการใช้ปูนขาวมากขึ้นในถังพักน้ำดิบของโรงกรองน้ำสามเสนแต่ไม่กระทบกับการทำงานของเมมเบรนที่ควรอยู่ในช่วงพีเอช 2-11



รูปที่ 4.1 ค่าพีเอชของน้ำดิบกับระยะเวลาที่เดินระบบ

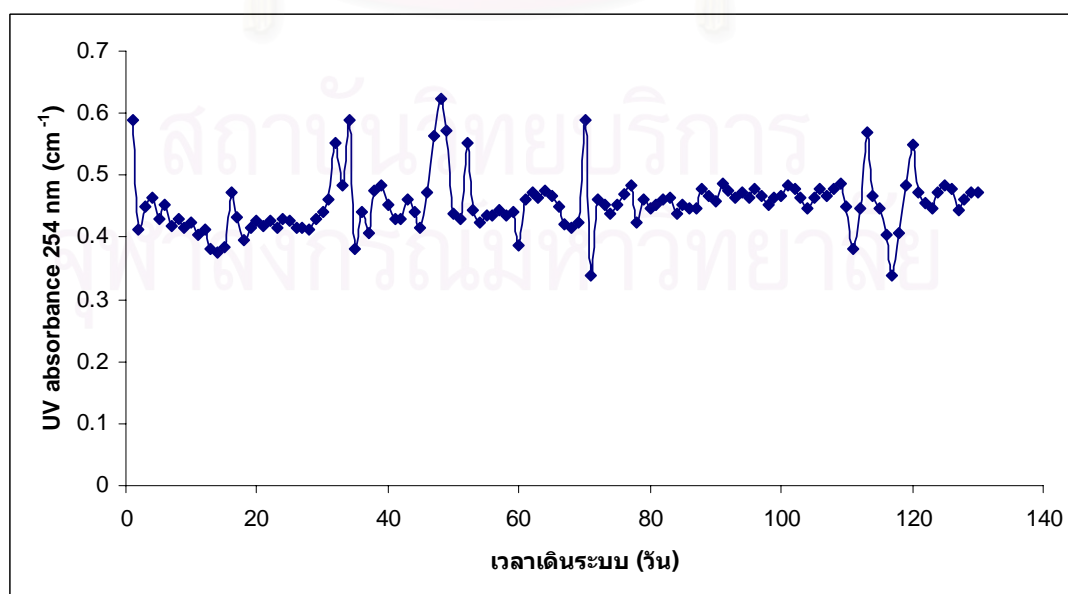
ความขุ่นของน้ำที่เข้าเมมเบรนสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าว่ามีความขุ่นที่สูงมาก ตลอดการทดลองนั้นไม่สามารถที่จะควบคุมความขุ่นให้คงที่ได้ จากกราฟที่ 4.2 พบว่าช่วงความขุ่นตลอดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 90 -184 NTU ซึ่งความขุ่นส่วนใหญ่เกิดจากสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ที่อยู่ในน้ำดิบที่ใช้ และบางส่วนเป็นตะกอนดินที่ไหลมากับลำน้ำ





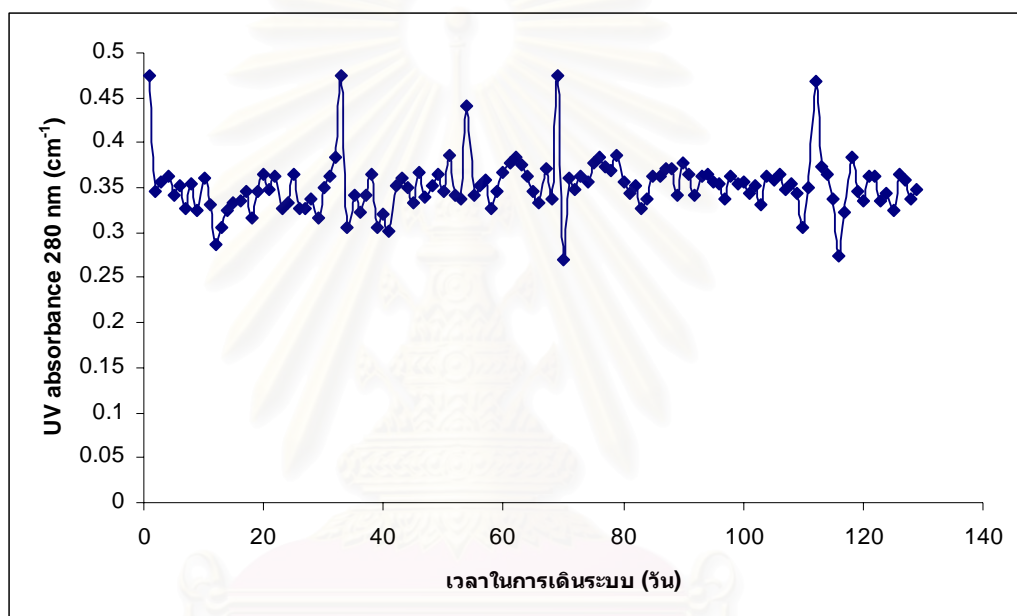
รูปที่ 4.2 ค่าความขุ่นของน้ำดิบกับระยะเวลาในการเดินระบบ

ค่าสารอินทรีย์ในน้ำ เป็นค่าตัวแทนของสารอินทรีย์ในน้ำดิบ ซึ่งในการทดลองได้ทำการหาค่าสารอินทรีย์ในน้ำ เช่นกัน โดยแสดงดังรูปที่ 4.3 จากกราฟสามารถสังเกตได้ว่าค่าสารอินทรีย์ในน้ำ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละวันขึ้นอยู่กับปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำดิบ สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำดิบมาจากตะกอนดิน เศษกิ่งไม้ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำดิบที่เกิดการสลายตัว ซึ่งค่าสารอินทรีย์ในน้ำตลอดการทดลองอยู่ในช่วง 0.34 – 0.624 ต่อเมตร ซึ่งค่าสารอินทรีย์ในน้ำ นั้นเป็นค่าตัวแทนของสารอินทรีย์ที่ดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร



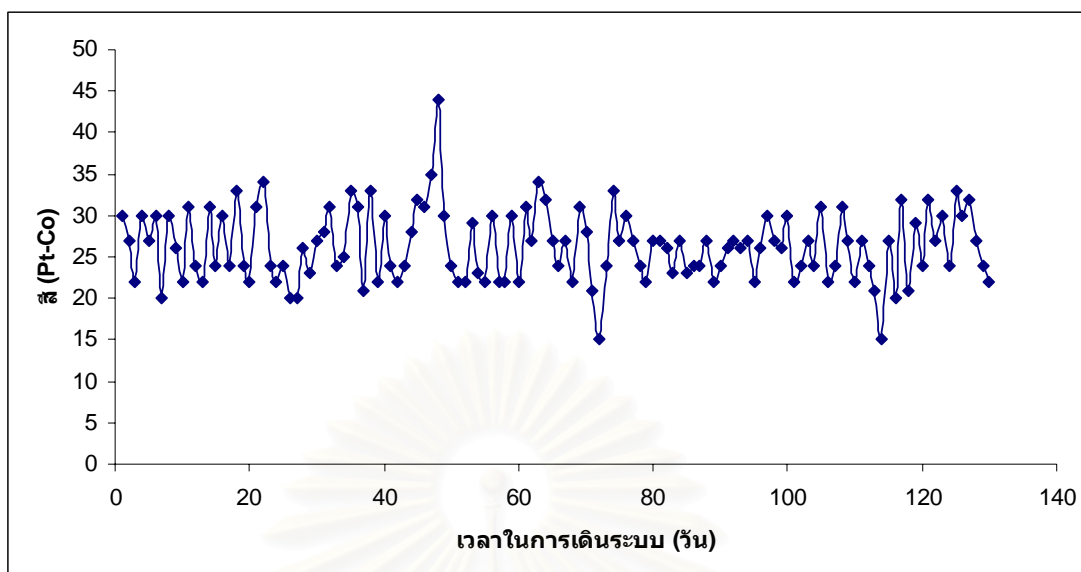
รูปที่ 4.3 ค่าสารอินทรีย์ในน้ำ กับเวลาในการเดินระบบ

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเอาค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน ใช้เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์จำพวกลิกนินและฮิวมัส ส่วนใหญ่มาจากการนำเปื้อยของซากอินทรีย์ต่างเป็นส่วนใหญ่เช่น เศษสิ่งมีชีวิต เศษกิ่งไม้ใบไม้ เป็นต้น โดยในการทดลองนี้ได้ทำการหาค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน เพื่อหาปริมาณของลิกนินและฮิวมัสในน้ำดิบเช่นกัน โดยค่ายูวี280 ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 ตลอดช่วงการทดลองนั้นค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน นั้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.275 – 0.474 ต่อเมตร



รูปที่ 4.4 ค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน กับระยะเวลาในการเดินระบบ

คุณสมบัติอีกประการหนึ่งทางกายภาพคือสี สีของน้ำดิบนั้นเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่านั้นมีลักษณะสีน้ำตาลอ่อนเป็นหลักเนื่องจากเป็นสีของดินตะกอน สารอินทรีย์และของแข็งแขวนลอยต่างๆ เกิดการสะท้อนแสงเข้าสู่ตามนุษย์ ซึ่งความเข้มสีที่สังเกตได้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการสะท้อนแสงของสารแขวนลอย ถ้ามีมากความทึบสูงสีที่สังเกตเห็นจะค่อนข้างทึบ ความเข้มสีตลอดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5



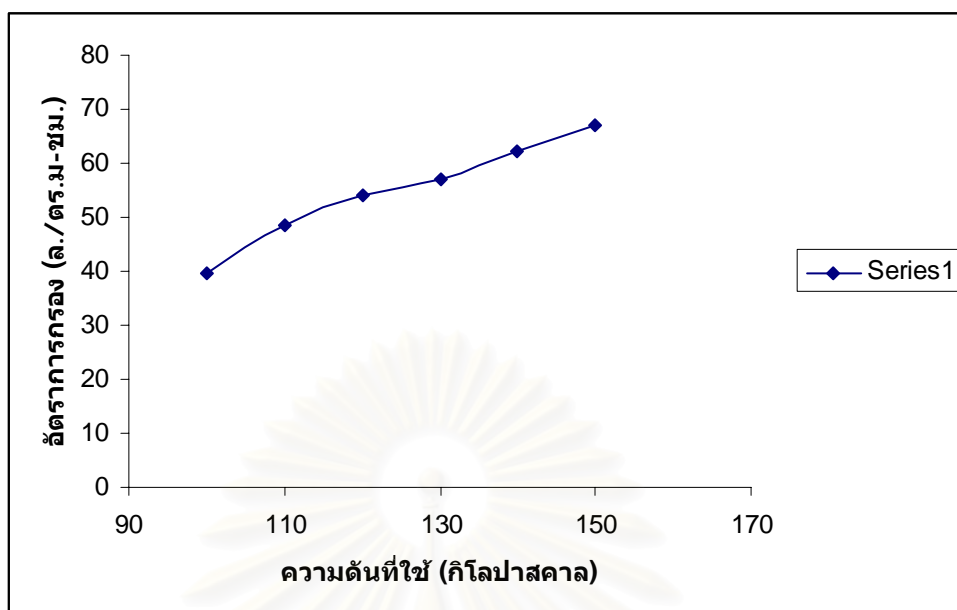
รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นกับระยะเวลาในการเดินระบบ

จากข้อมูลข้างต้นจะสังเกตว่าคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำดิบนั้นมีค่าที่ไม่แน่นอนขึ้นกับลักษณะน้ำในแต่ละวันรวมไปถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในน้ำดิบเช่น สารอินทรีย์ สารแขวนลอย อัตราการไหลของน้ำ รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล ในแต่ละฤดูกาลค่าต่างๆ ในน้ำที่วัดได้ถึงแม้จะเป็นน้ำจากแหล่งเดียวกัน ก็มีค่าที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นการเก็บพารามิเตอร์ต่างๆ มาทำการวิเคราะห์ไม่ควรใช้เวลาในการเก็บรักษานานเกินไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพในน้ำอาจส่งผลต่อคุณภาพที่จะทำการวัดได้ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูง

#### 4.2 การศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่มีต่อสมรรถภาพของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

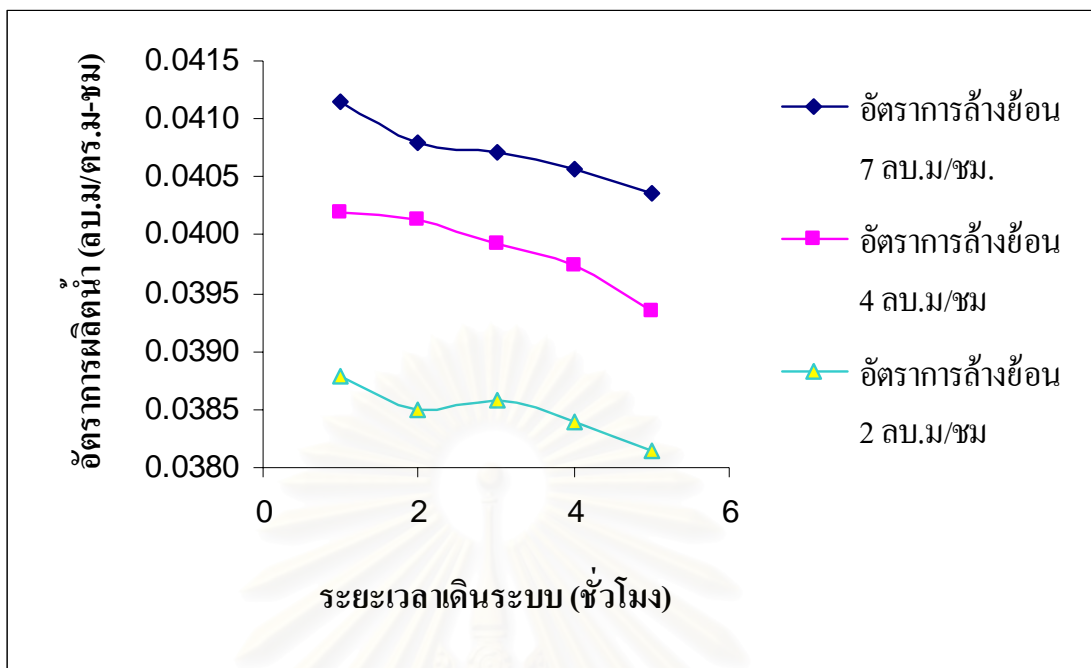
##### 4.2.1 ผลของความดันที่ใช้ในกระบวนการเมมเบรนต่ออัตราการผลิตน้ำ

จากการทดลองพบว่าอัตราการผลิตน้ำที่ได้ นั้น จะแปรผันตรงกับความดันที่ใช้ในระบบ ในการใช้ความดันในการเดินระบบแต่ละค่าตลอดระยะเวลาการทดลองแต่ละชุด อัตราการผลิตน้ำตลอดการทดลองไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากว่าช่วงเวลาในการทดลองไม่ยาวนาน และความดันที่ใช้ยิ่งมากจะยิ่งทำให้ค่าความเร็วในแนวการไหล (Crossflow Velocity) นั้นมีค่าสูงและเป็นการป้องกันการเกิด คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Concentration Polarization) ได้ตลอดช่วงการทดลองได้อีกด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างความดันต่ออัตราการผลิตน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.6

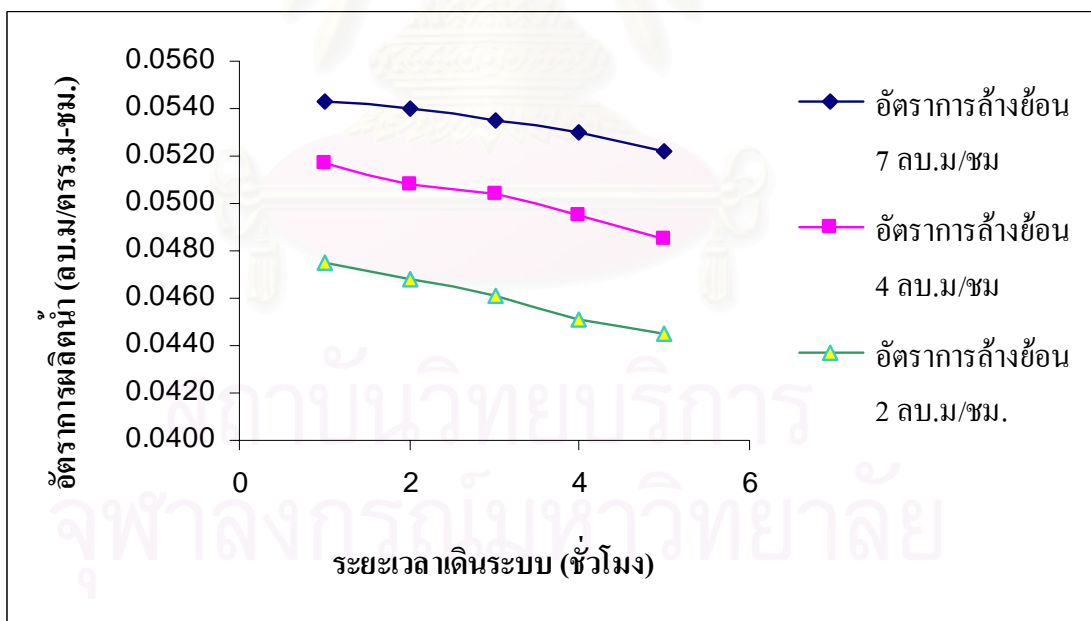


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำกับความดันที่ใช้

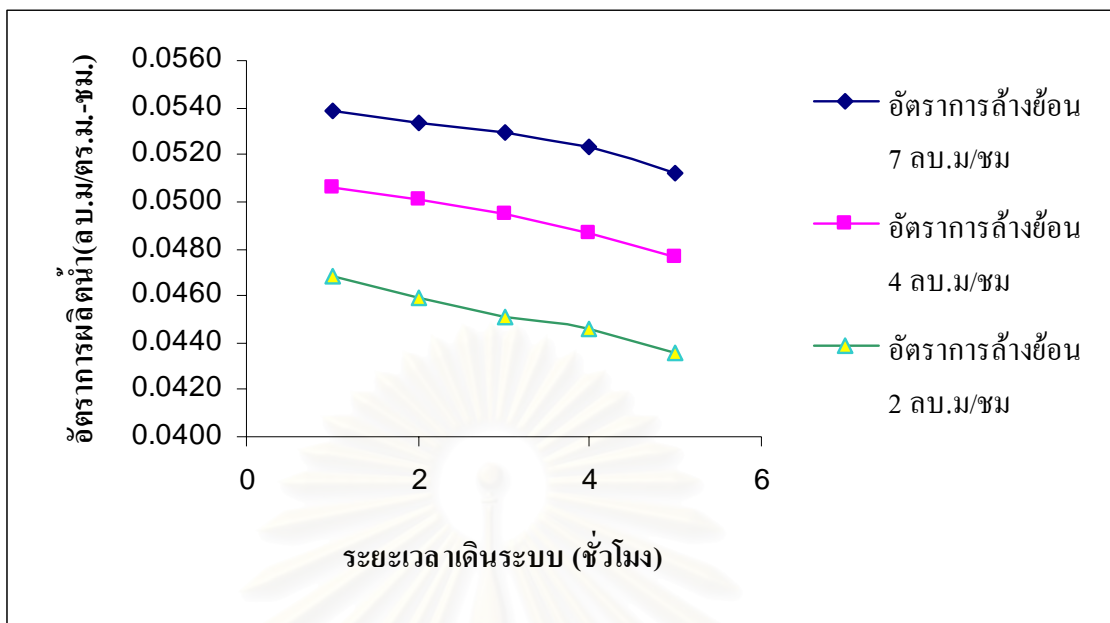
รูปที่ 4.7-4.12 แสดงอัตราการผลิตน้ำสะอาดของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนกับระยะเวลาในการเดินระบบ จากการทดลองจะ สังเกตได้ว่าอัตราการกรองของเมมเบรนนั้นมีค่าลดลงเนื่องจากเริ่มเกิดการอุดตันที่ผิวของเมมเบรนซึ่งการล้างย้อนแบบธรรมดาไม่สามารถที่จะกำจัดออกได้วิธีที่สามารถกำจัดออกได้คือการล้างเมมเบรนด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียมไว้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการกรองเป็น 110 กิโลปาสกาล 120 กิโลปาสกาล 130 กิโลปาสกาล 140 กิโลปาสกาล และ 150 กิโลปาสกาล พบว่าการลดลงของอัตราการผลิตน้ำนั้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับช่วงเริ่มเดินระบบเริ่มต้น โดยที่ขณะเปลี่ยนอัตราการกรองนั้นได้มีการล้างเมมเบรนด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 35 เปอร์เซ็นต์ สังเกตได้ว่าเมื่อล้างเมมเบรนแล้วนำมาประกอบและทำการเดินระบบต่อ นั้นอัตราการกรองน้ำที่ได้เพิ่มขึ้นดังเช่นเริ่มเดินระบบเนื่องจากกรดที่ใช้ในการล้างได้นั้นสามารถกำจัดสิ่งอุดตันที่น้ำธรรมดาไม่สามารถกำจัดออกได้ทำให้อัตราการกรองน้ำสูงขึ้นและหลังจากนั้นจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากการอุดตัน



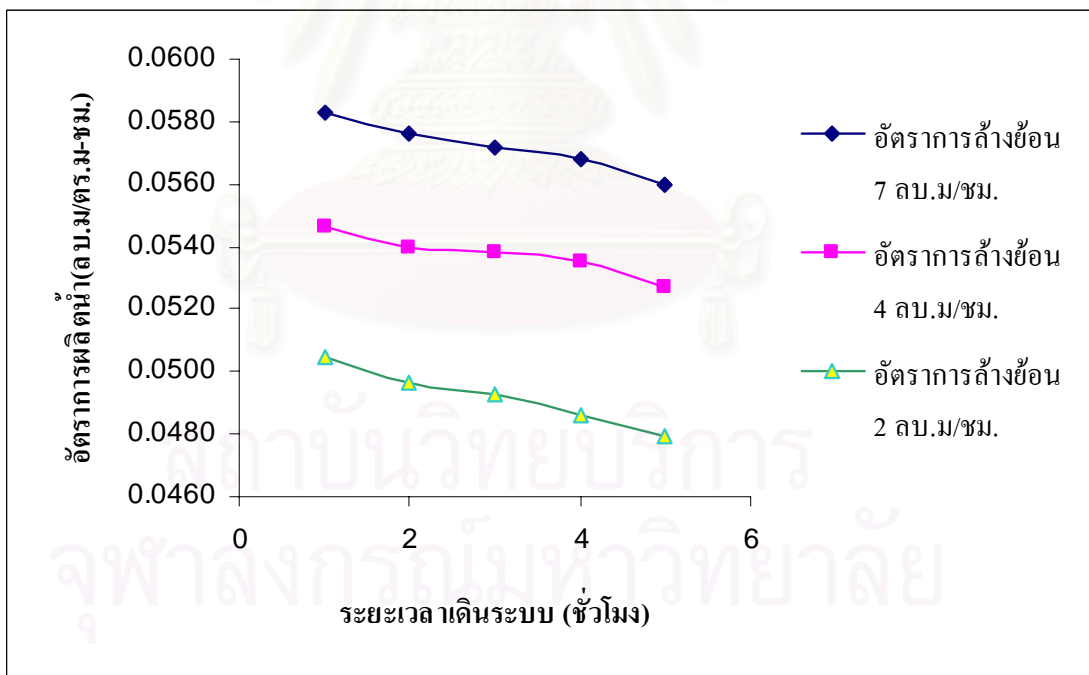
รูปที่ 4.7 อัตราการผลิตน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่อัตราการกรอง 100 กิโลปาสกาล



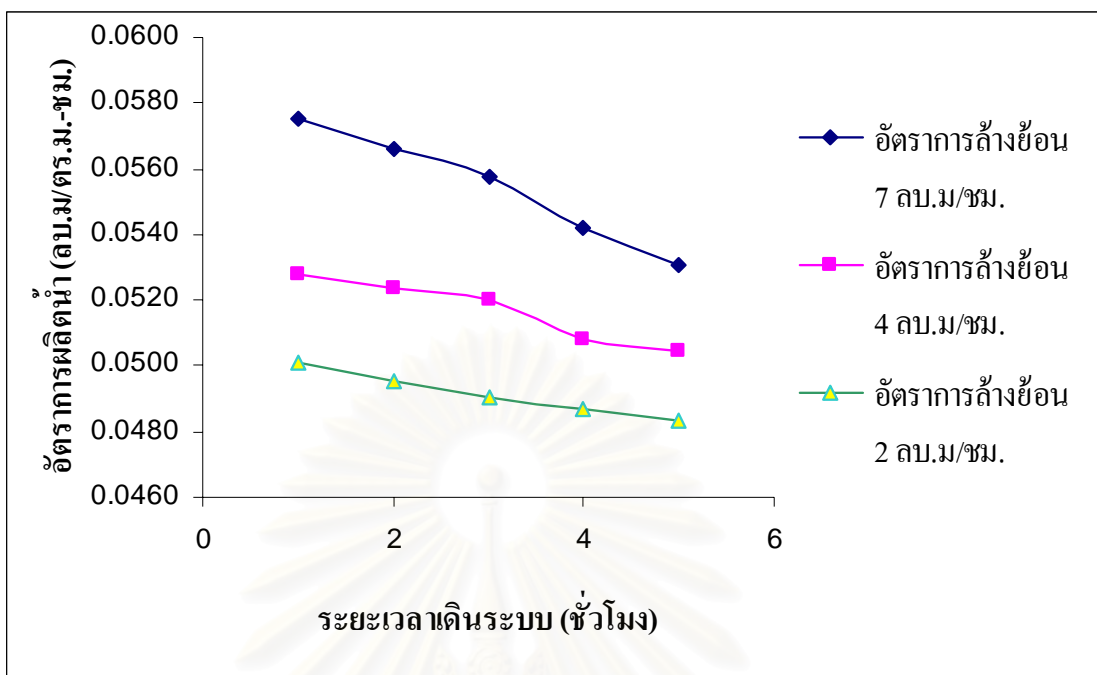
รูปที่ 4.8 อัตราการผลิตน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่อัตราการกรอง 110 กิโลปาสกาล



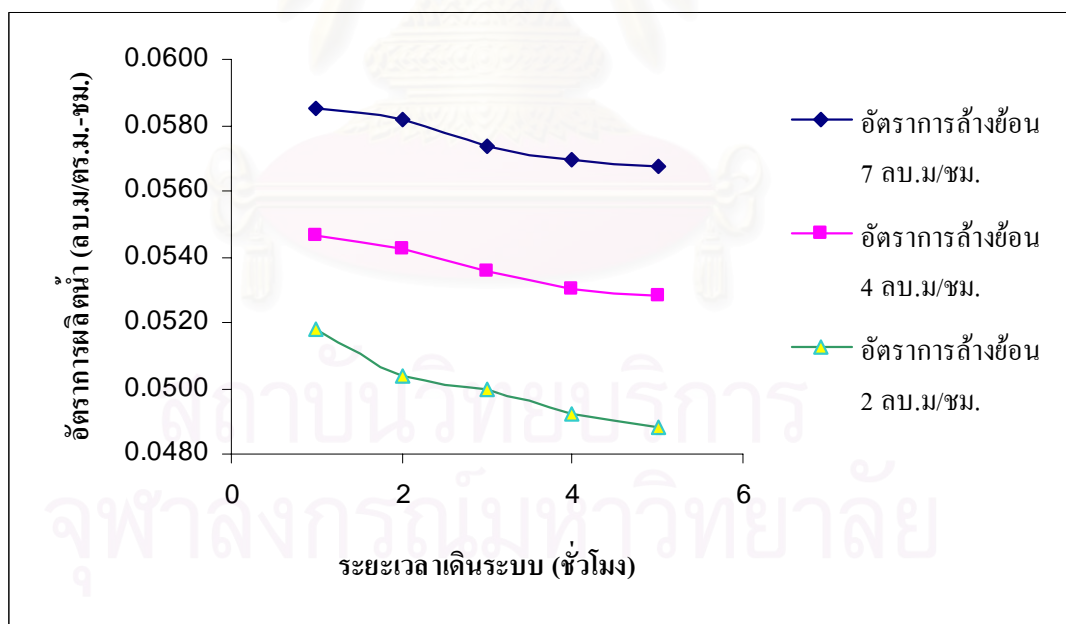
รูปที่ 4.9 อัตราการผลิตน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่อัตราการกรอง 120 กิโลปาสกาล



รูปที่ 4.10 อัตราการผลิตน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่อัตราการกรอง 130 กิโลปาสกาล



รูปที่ 4.11 อัตราการผลิตน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่อัตราการกรอง 140 กิโลปาสกาล

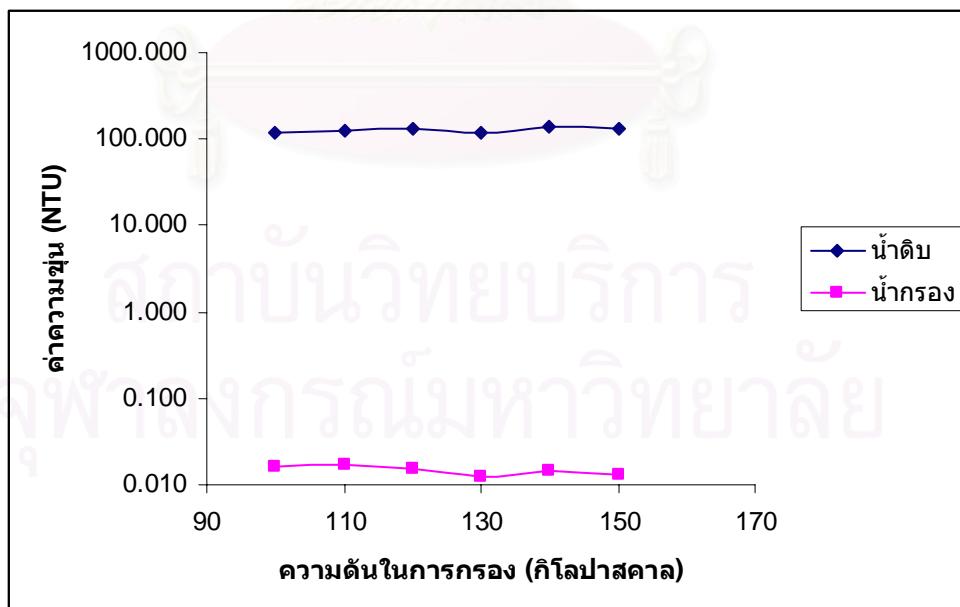


รูปที่ 4.12 อัตราการผลิตน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนที่อัตราการกรอง 150 กิโลปาสกาล

## 4.2.2 ผลของความดันที่ใช้ในกระบวนการเมมเบรนต่อคุณภาพน้ำ

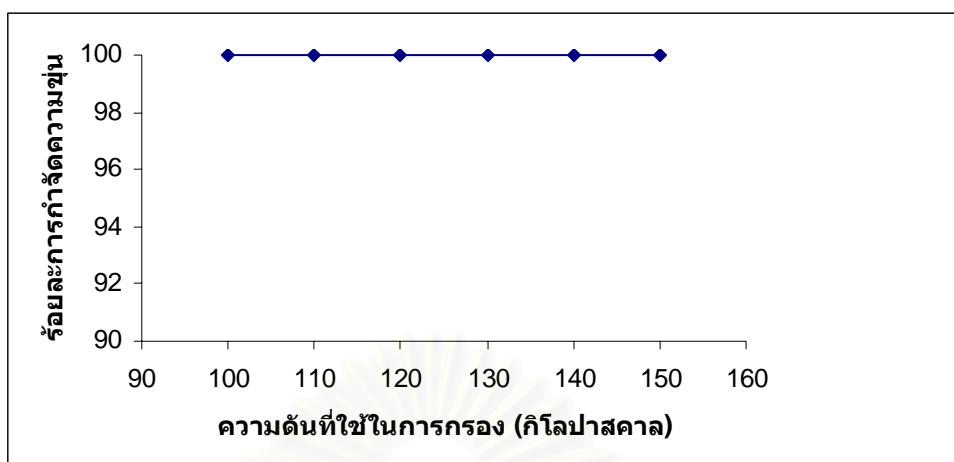
### 4.2.2.1 ผลของความดันที่ใช้ต่อความขุ่น

ผลของความดันที่ใช้ในการกรองที่มีต่อค่าความขุ่นแสดงดังรูปที่ 4.13 ค่าความขุ่นเฉลี่ยในน้ำดิบอยู่ในช่วง 90-170 NTU เมื่อทำการเดินระบบที่ความดัน 100 กิโลปาสกาล ความขุ่นของน้ำหลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.013-0.018 NTU ที่ความดัน 110 กิโลปาสกาล ความขุ่นมีค่าอยู่ในช่วง 0.015-0.018 NTU ที่ความดัน 120 กิโลปาสกาล ความขุ่นมีค่าอยู่ในช่วง 0.012-0.018 NTU ที่ความดัน 130 กิโลปาสกาล ค่าความขุ่นมีค่าอยู่ในช่วง 0.010-0.017 NTU ที่ความดัน 140 กิโลปาสกาล ค่าความขุ่นมีค่าอยู่ในช่วง 0.011-0.018 NTU และเมื่อเดินระบบที่ความดันเข้า 150 กิโลปาสกาล ค่าความขุ่นมีค่าอยู่ในช่วง 0.011-0.016 NTU ค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองแล้วนั้นจะมีค่าแปรเปลี่ยนเพียงเล็กน้อยและประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจึงไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันเข้า เหตุที่การเปลี่ยนแปลงความดันเข้าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นนั้น เนื่องจากว่ากระบวนการกำจัดความขุ่นนั้นอาศัยกลไกการติดค้างที่ผิวอนุภาคของความขุ่นซึ่งส่วนใหญ่เป็นอนุภาคของคอลลอยด์เป็นส่วนใหญ่มีขนาดที่ใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนทำให้ไม่สามารถที่จะผ่านออกมาได้ ทำให้ค่าความขุ่นที่วัดได้กับน้ำที่กรองแล้วนั้น มีค่าน้อยมาก ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 ผลของความดันที่ใช้ในการกรองต่อค่าความขุ่น

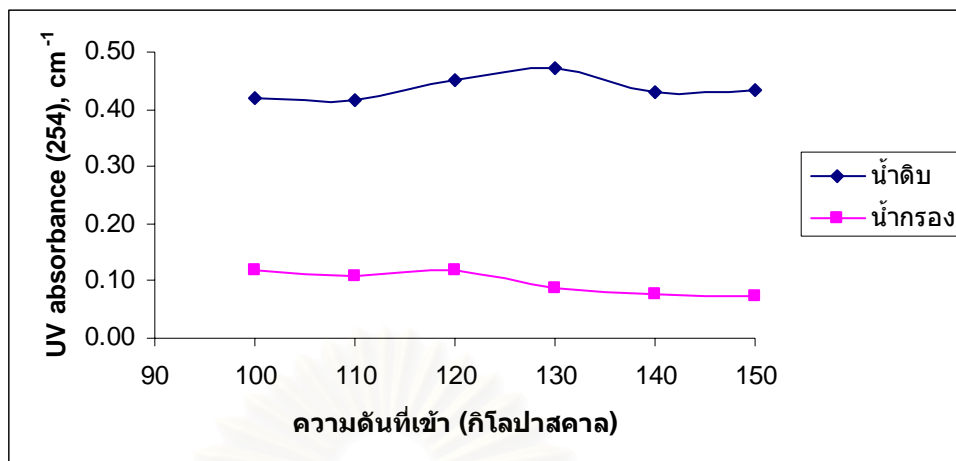




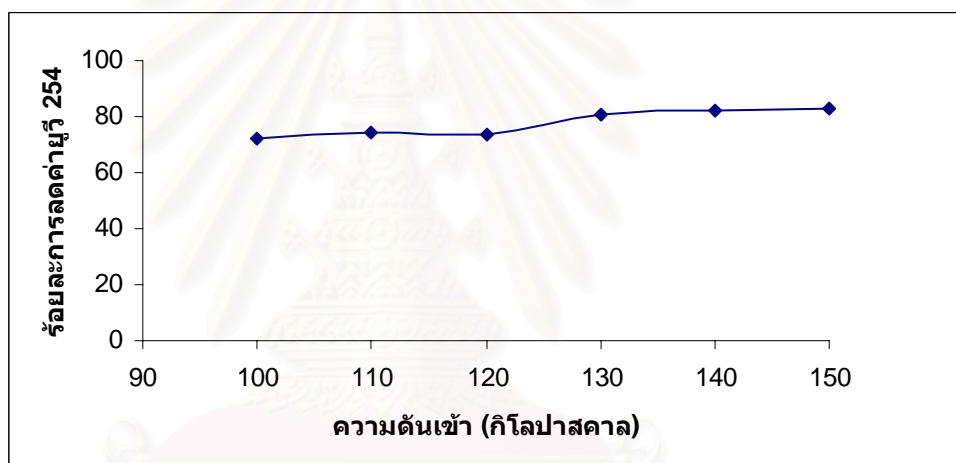
รูปที่ 4.14 ร้อยละการกำจัดความขุ่น

#### 4.2.2.2 ผลของความดันที่ใช้ต่อค่าสารอินทรีย์ในน้ำ

ผลของความดันเข้าต่อค่าสารอินทรีย์ในน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.15 ค่าสารอินทรีย์ในน้ำ ในน้ำดิบที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.3-0.6 ต่อเซนติเมตร ตลอดจนการทดลอง เมื่อทำการเดินระบบที่ความดันเข้า 100 กิโลปาสกาล ค่าสารอินทรีย์ในน้ำ ที่วัดได้หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.2 ต่อเซนติเมตรจากนั้นเดินระบบที่ความดันเข้า 110 กิโลปาสกาล ค่าสารอินทรีย์ในน้ำ ที่วัดได้หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.094-0.172 ต่อเซนติเมตร ที่ความดันเข้า 120 กิโลปาสกาล ค่าสารอินทรีย์ในน้ำ ที่วัดได้หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.14 ต่อเซนติเมตร ที่ความดัน 130 กิโลปาสกาล ค่าสารอินทรีย์ในน้ำ ที่วัดได้ในน้ำหลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.07-0.1 ต่อเซนติเมตรที่ความดัน 140 กิโลปาสกาล ค่าสารอินทรีย์ในน้ำ ที่วัดได้ในน้ำหลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.064-0.09 ต่อเซนติเมตรและเมื่อทำการเดินระบบที่ความดัน 150 กิโลปาสกาล ค่ายูวีที่วัดได้ในน้ำหลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.07-0.078 ต่อเซนติเมตร จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความดัน ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าสารอินทรีย์ในน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.16 สูงขึ้นด้วยเช่นกัน เหตุที่เมื่อเพิ่มความดันในการกรองส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าสารอินทรีย์ในน้ำ สูงขึ้นตามนั้นเนื่องจากว่า การกรองของเมมเบรนนั้นเป็นการกรองแบบเยื่อผิวหน้าเมมเบรนและตัวเมมเบรนอาศัยกลไกการดูดซับสารอินทรีย์เป็นหลัก ทั้งที่ผิวหน้าเมมเบรนและในรูพรุนของเมมเบรน ทำให้สารอินทรีย์ต่างๆ ถูกดูดซับไว้ สารอินทรีย์ที่ออกมากับน้ำที่กรองแล้วจึงน้อยตามไปด้วย เมื่อวัดค่าการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรของสารอินทรีย์จึงน้อยลงตามไปด้วย การเพิ่มความดันเป็นการเร่งให้เกิดการดูดซับที่ผิวหน้าและในรูพรุนของเมมเบรนนั้นมีมากขึ้น ดังนั้นการกำจัดสารอินทรีย์จึงมีประสิทธิภาพมากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.15 ผลของความดันเข้าต่อค่าสารอินทรีย์ในน้ำ

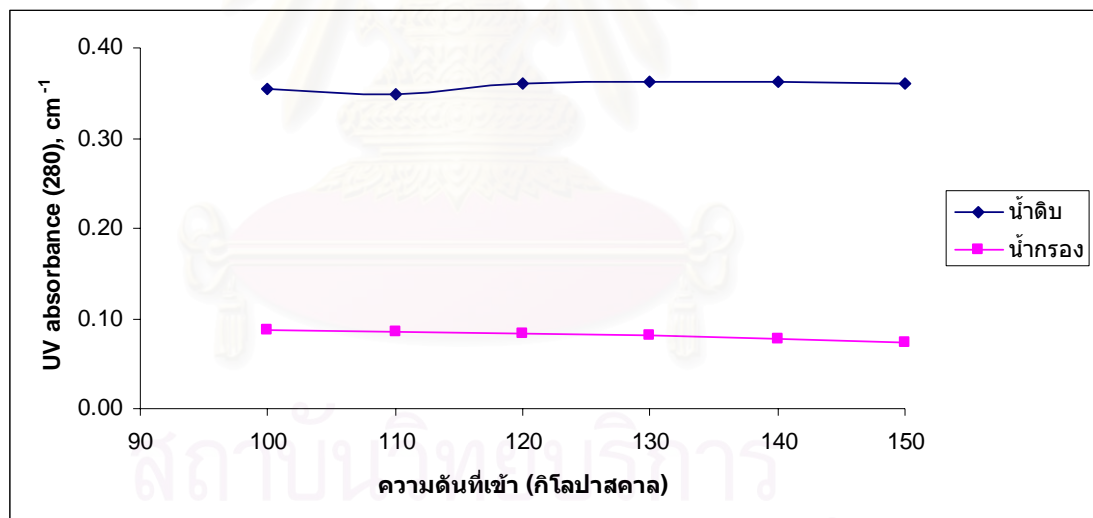


รูปที่ 4.16 ร้อยละการกำจัดค่าสารอินทรีย์ในน้ำ

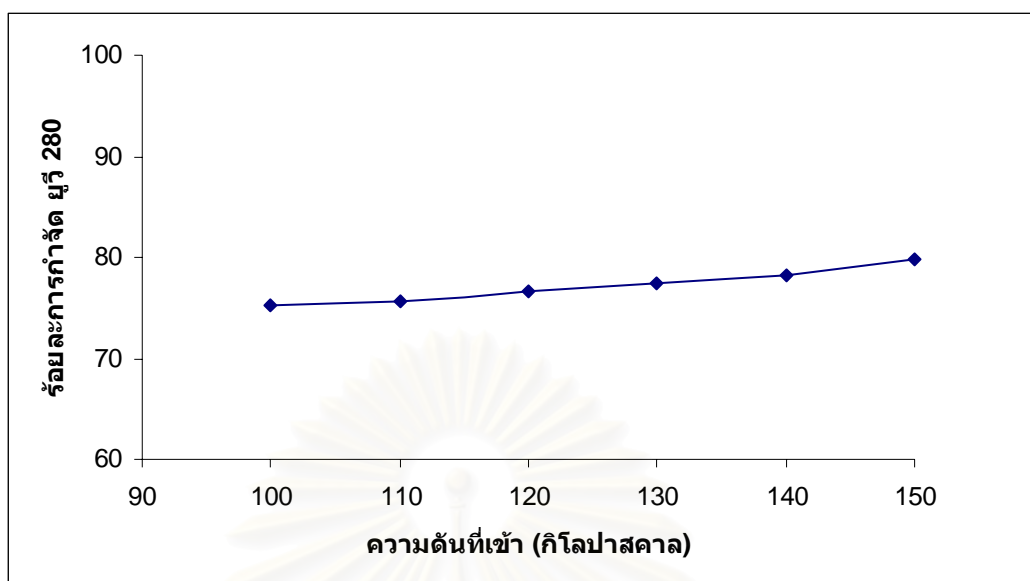
#### 4.2.2.3 ผลของความดันที่ใช้ต่อสารอินทรีย์อีวมัสและลิกนิน

ผลของความดันเข้าต่อค่าสารอินทรีย์ประเภทอีวมัสและลิกนิน ซึ่งเป็นการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารอินทรีย์จำพวกลิกนินและอีวมัส แสดงดังรูปที่ 4.17 ค่าสารอินทรีย์ประเภทอีวมัสและลิกนิน ในน้ำดิบที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.28-0.47 ต่อเซนติเมตรตลอดการทดลอง เมื่อทำการเดินระบบที่ความดันเข้า 100 กิโลปาสคาล ค่าสารอินทรีย์ประเภทอีวมัสและลิกนิน ที่วัดได้หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.07-0.1 ต่อเซนติเมตรจากนั้นเดินระบบที่ความดันเข้า 110 กิโลปาสคาล ค่าสารอินทรีย์ประเภทอีวมัสและลิกนิน ที่วัดได้หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.081-0.1 ต่อเซนติเมตร ที่ความดันเข้า 120 กิโลปาสคาล ค่าสารอินทรีย์ประเภทอีวมัสและลิกนิน ที่วัดได้หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.06-0.12 ต่อเซนติเมตร ที่ความดัน 130 กิโลปาสคาล ค่าสารอินทรีย์ประเภทอีวมัสและลิกนิน ที่วัดได้ในน้ำหลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.07-0.2 ต่อ

เซนติเมตร ที่ความดัน 140 กิโลปาสกาล ค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน ที่วัดได้ในน้ำ หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.05-0.1 ต่อเซนติเมตร และเมื่อทำการเดินระบบที่ความดัน 150 กิโลปาสกาล ค่ายูวีที่วัดได้ในน้ำหลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.05-0.09 ต่อเซนติเมตรจากการ ทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความดัน ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน ที่แสดงดังรูปที่ 4.18 สูงขึ้นด้วยเช่นกัน เหตุที่เมื่อเพิ่มความดันในการกรองส่งผลให้ประสิทธิภาพใน การกำจัดค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน มีแนวโน้มสูงขึ้นตามนั้นเนื่องจากการกรอง ของเมมเบรนนั้นเป็นการกรองแบบเยื่อผิวหน้าเมมเบรนและตัวเมมเบรนอาศัยกลไกการดูดซับ สารอินทรีย์ที่ผิวหน้าเมมเบรนและในรูพรุนของเมมเบรนเป็นหลักเช่นเดียวกับการกำจัดสารอินทรีย์ ด้วยการวัดการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ทำให้สารอินทรีย์ลิกนิน และฮิวมัสถูกดูดซับไว้ สารอินทรีย์ลิกนินและฮิวมัสที่ออกมากับน้ำที่กรองแล้วจึงน้อยตามไปด้วย เมื่อวัดค่าการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตรของสารอินทรีย์ลิกนินและ ฮิวมัสจึงน้อยลงตามไปด้วย ดังนั้นการกำจัดสารอินทรีย์ลิกนินและฮิวมัสจึงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เช่นกัน ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ผลของความดันเข้าต่อค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน

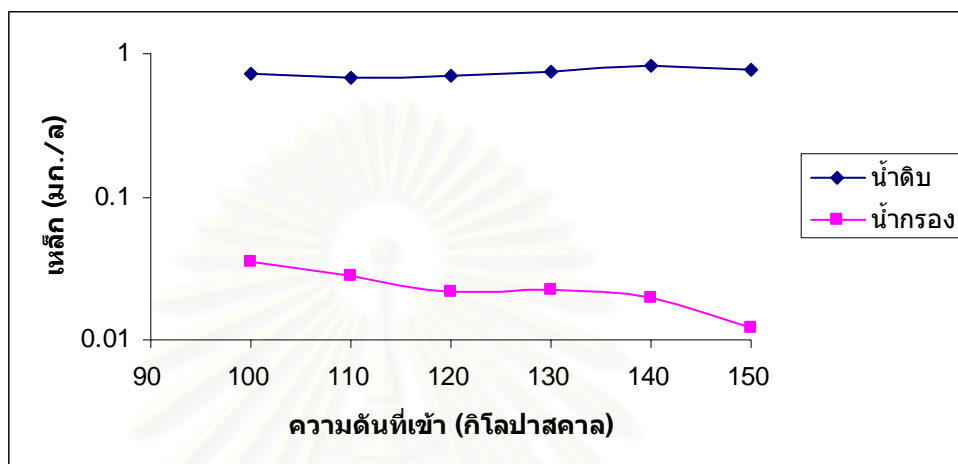


รูปที่ 4.18 ร้อยละการกำจัดค่าสารอินทรีย์ประเภทอีเอ็มเอสและลิกนิน

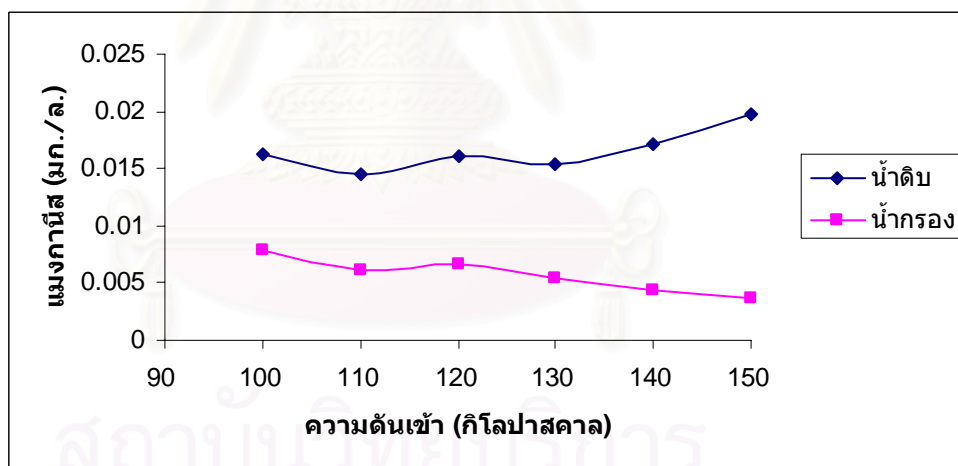
#### 4.2.2.4 ผลของความดันที่ใช้ต่อค่าเหล็กและแมงกานีส

ผลของความดันเข้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและแมงกานีส แสดงดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 เหล็กและแมงกานีส ในน้ำดิบที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.51-1.1 มิลลิกรัมต่อลิตร. และ 0.012-0.023 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับตลอดการทดลอง เมื่อทำการเดินระบบที่ความดันเข้า 100 กิโลปาสคาลเหล็กและแมงกานีส ที่วัดได้หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.027-0.046 มิลลิกรัมต่อลิตร. และ 0.005-0.012 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นเดินระบบที่ความดันเข้า 110 กิโลปาสคาลเหล็กและแมงกานีส ที่วัดได้หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.024-0.031 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.003-0.009 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ความดันเข้า 120 กิโลปาสคาลเหล็กและแมงกานีส ที่วัดได้หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.009-0.033 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.004-0.009 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ความดัน 130 กิโลปาสคาลเหล็กและแมงกานีส ที่วัดได้ในน้ำหลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.018-0.027 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.004-0.009 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ความดัน 140 กิโลปาสคาลเหล็กและแมงกานีส ที่วัดได้ในน้ำหลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.012-0.026 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.002-0.008 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับเมื่อทำการเดินระบบที่ความดัน 150 กิโลปาสคาล เหล็กและแมงกานีสที่วัดได้ในน้ำหลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.005-0.023 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.02-0.007 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความดันประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสที่แสดงดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 สูงขึ้นด้วยเช่นกัน เหตุที่เมื่อเพิ่มความดันในการกรองส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กและแมงกานีส มีแนวโน้มสูงขึ้นตามนั้นเนื่องจากว่า เหล็กและแมงกานีสถูกกำจัดออกโดยการดูดซับโดยผิวและรูพรุนของของเมมเบรนเมื่อความดันที่ใช้มากขึ้น จะยิ่งเป็นการส่งผลให้เกิดการดูดซับ

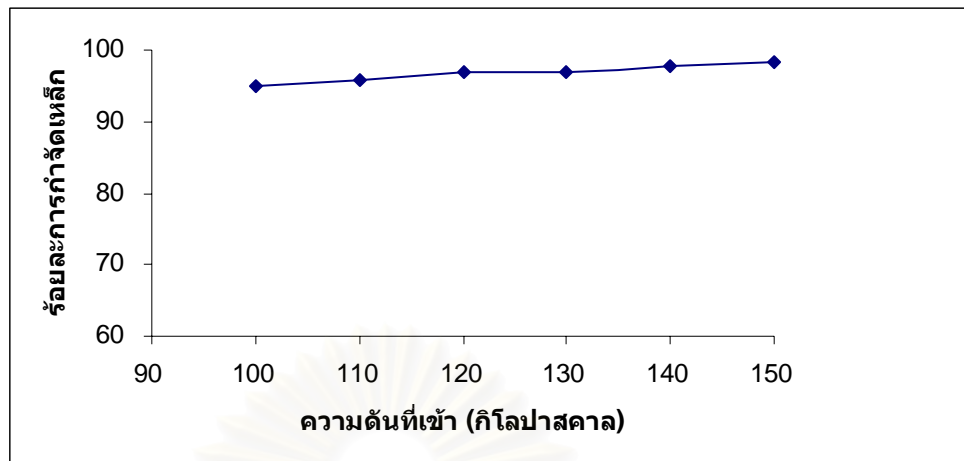
มากขึ้น เหล็กและแมงกานีสจึงถูกดูดซับที่ผิวของเมมเบรนและออกมากับน้ำกรองน้อย และการกรองของเมมเบรนนั้นเป็นการกรองแบบเหมือนผิวหนังเมมเบรน เมื่อเพิ่มความดันในการกรองมากขึ้น โอกาสที่เหล็กและแมงกานีสจะถูกกำจัดที่ผิวของเมมเบรนยังมีมากขึ้นเช่นกัน



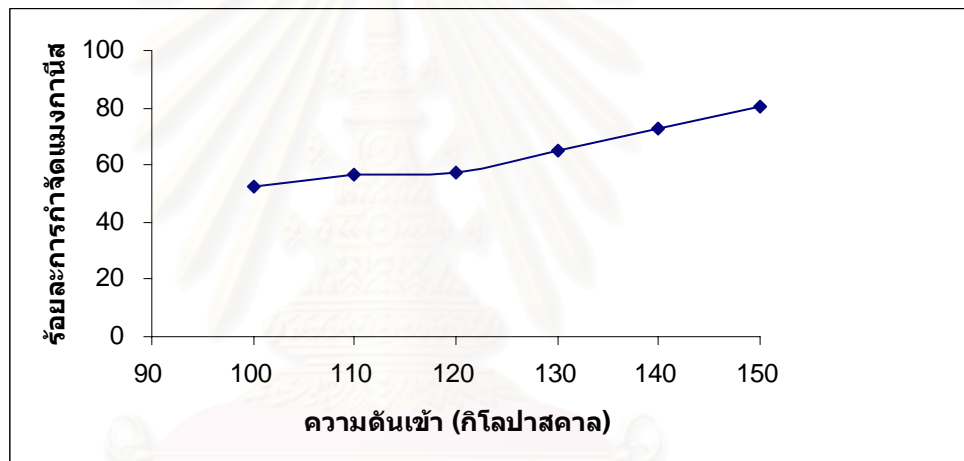
รูปที่ 4.19 ผลของความดันเข้าต่อปริมาณเหล็ก



รูปที่ 4.20 ผลของความดันเข้าต่อแมงกานีส



รูปที่ 4.21 ร้อยละการกำจัดเหล็ก

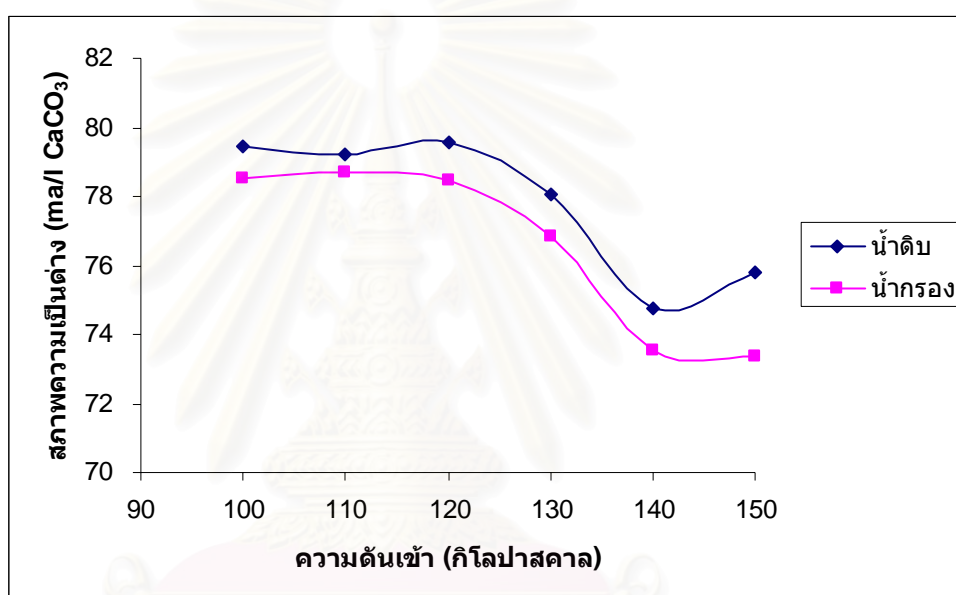


รูปที่ 4.22 ร้อยละการกำจัดแมงกานีส

#### 4.2.2.5 ผลของความดันที่ใช้ต่อสภาพความเป็นด่าง

ผลของความดันที่เข้าต่อสภาพความเป็นด่าง แสดงดังรูปที่ 4.23 สภาพความเป็นด่างในน้ำดิบที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 50- 74 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ตลอดการทดลอง เมื่อทำการเดินระบบที่ความดันเข้า 100 กิโลปาสกาล สภาพความเป็นด่างที่วัดได้ หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 76-82 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นเดินระบบที่ความดันเข้า 110 กิโลปาสกาล สภาพความเป็นด่าง ที่วัดได้หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 75-86 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ความดันเข้า 120 กิโลปาสกาล สภาพความเป็นด่าง ที่วัดได้หลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 75-86 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ความดัน 130 กิโลปาสกาล สภาพต่าง ที่วัดได้ในน้ำหลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 68-81 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ความดัน 140 กิโลปาสกาล สภาพต่าง ที่วัดได้ในน้ำหลังจากการกรองมีค่าอยู่ 63-81

มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อทำการเดินระบบที่ความดัน 150 กิโลปาสกาล สภาพต่างที่วัดได้ในน้ำหลังจากการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 74-78 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความดันประสิทธิภาพในการกำจัดไม่ได้เพิ่มขึ้นตาม เหตุที่เมื่อเพิ่มความดันในการกรองไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสภาพความเป็นต่างซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Chen และคณะ (1999) ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนในการกำจัดน้ำมันออกจากสารละลายที่มีสภาพต่างสูง เพราะเกลือ และไอออนในน้ำมีขนาดที่เล็กกว่าขนาดรูพรุนของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

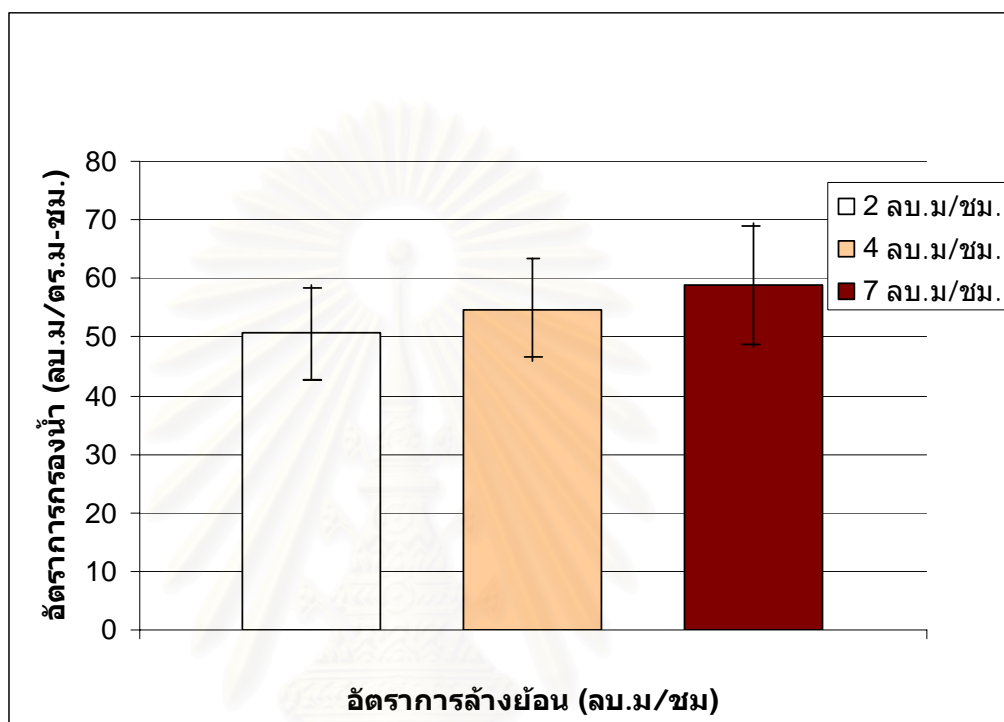


รูปที่ 4.23 ผลของความดันเข้าต่อสภาพความเป็นต่าง

#### 4.2.3 ผลของอัตราการล้างย้อนต่ออัตราการผลิตน้ำ

ผลของอัตราการล้างย้อนต่ออัตราการผลิตน้ำแสดงดังรูปที่ 4.24 จากการทดลองพบว่าอัตราการผลิตน้ำเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการล้างย้อนที่ใช้เพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าอัตราการล้างย้อนที่ใช้เป็นการผสมระหว่างอากาศที่ออกมาจากปั๊มและน้ำ อัตราการล้างย้อนที่ต่ำแรงดันที่ออกมาจากปั๊มรวมทั้งอัตราการไหลของน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการล้างย้อนที่สูงนั้น จะมีค่าอัตราการไหลต่ำกว่า ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจะต่ำกว่าด้วย ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นขณะการล้างย้อนนั้น จะส่งผลให้สารที่อุดตันนั้นหลุดออกได้คือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับอัตราการล้างย้อนที่ใช้ ถ้าอัตราการล้างย้อนที่ใช้มาก สารที่อุดตันที่อยู่บนผิวของเมมเบรนจะหลุดออกได้ดีขึ้น แต่ถ้าอัตราการล้างย้อนที่ใช้นั้นมีค่าต่ำ สารอุดตันที่เกาะที่ผิวของเมมเบรนจะยังมีบางส่วนที่หลงเหลืออยู่ บนผิวและในรูพรุนของเมมเบรน ส่วนที่หลงเหลืออยู่ถ้ายังมีการสะสมทับถมไปเรื่อยๆ จะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์คอนเซน

เตรชัน โพลาริเซชัน ความเข้มข้นที่ผิวของเมมเบรนจะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงมากๆ สารที่เกาะอยู่บนผิวเมมเบรนจะกลายเป็นเจลล์เคลือบที่ผิวทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรนต่ำลง ดังนั้นอัตราการล้างย้อนที่ใช้จึงมีความสำคัญต่อกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน



รูปที่ 4.24 ผลของอัตราการล้างย้อนต่ออัตราการผลิตน้ำ

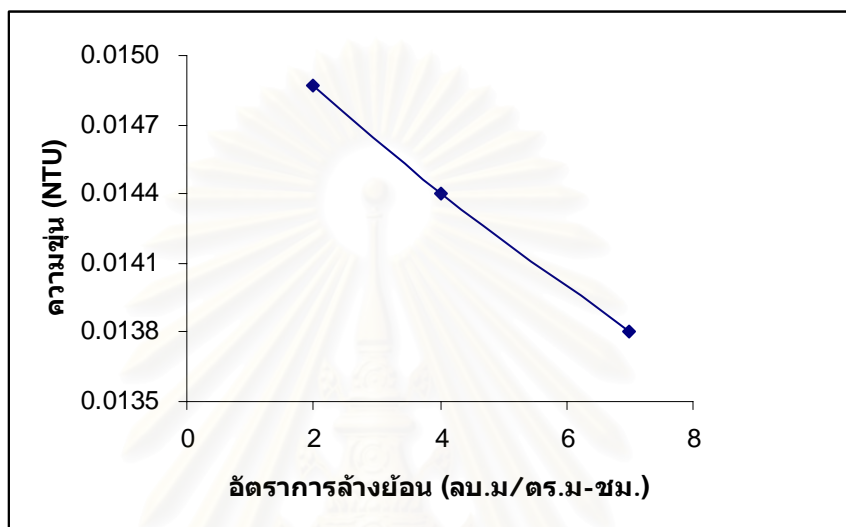
#### 4.2.4 ผลของอัตราการล้างย้อนต่อคุณภาพน้ำ

##### 4.2.4.1 ผลของอัตราการล้างย้อนต่อความขุ่น

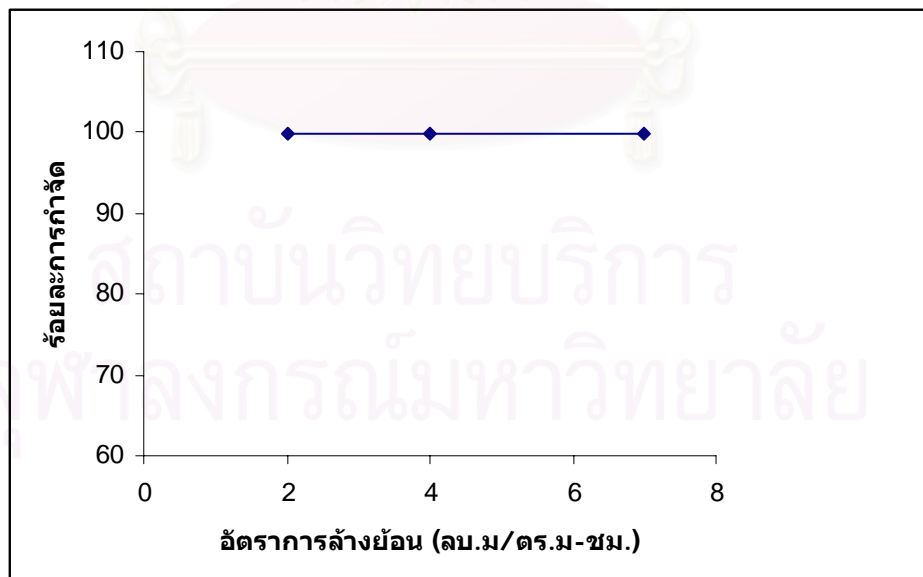
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการล้างย้อนกับความขุ่นแสดงดังรูปที่ 4.25 จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการล้างย้อนเพิ่มสูงขึ้นแล้ว จะส่งผลให้การกำจัดความขุ่นของเมมเบรนนั้นดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการล้างย้อนนั้นจะเป็นการเพิ่มแรงเฉือนขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ติดค้างที่ผิวเมมเบรนหลุดออกไปได้ดีขึ้น เมื่อทำการเดินระบบกรองน้ำอีกครั้งทำให้อัตราการผลิตน้ำนั้นสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นแสดงดังรูปที่ 4.26 หลังจากการล้างย้อนแล้วทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นนั้นสูงขึ้นเนื่องจากอนุภาคต่างๆ ได้หลุดออกไป กลไกการกำจัดความขุ่นแบบติดค้างที่ผิวของเมมเบรนจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ดังนั้นความขุ่นที่ออกมาหลังจากการกรองแล้วแทบจะไม่มีเลย ในการทดลองพบว่าทุกชุดการทดลองสามารถกำจัดความขุ่นได้ใกล้เคียงกันคือ ร้อยละ 98-100 ซึ่งความดันที่ใช้ในการเดินระบบ



นั้นจะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบมากนัก ทั้งนี้เพราะการกำจัดความขุ่น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่ จะอาศัยกระบวนการกรองติดผิวในการกำจัดเป็นหลัก ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ดังกล่าวไม่สามารถผ่านผิวเมมเบรนได้อยู่แล้ว



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการล้างย้อนกับความขุ่น

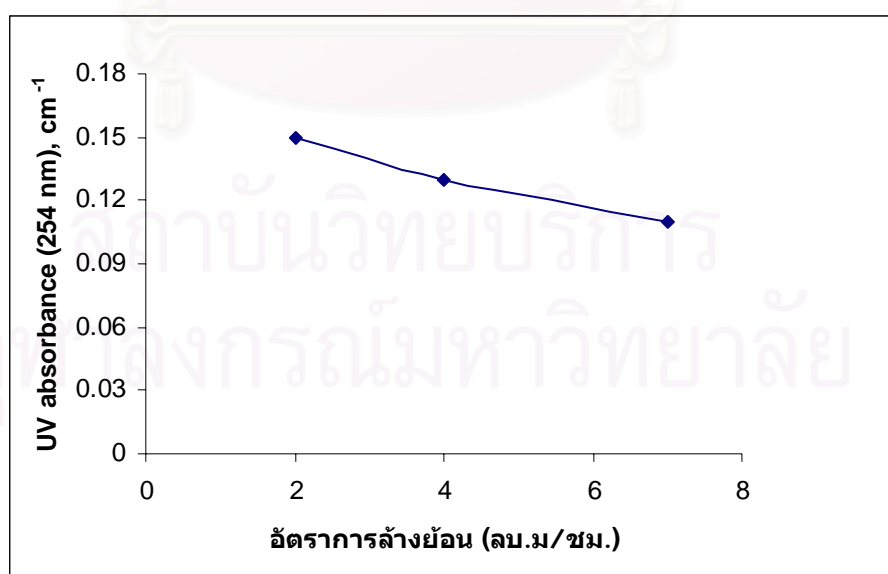


รูปที่ 4.26 ร้อยละการกำจัดความขุ่นกับอัตราการล้างย้อน

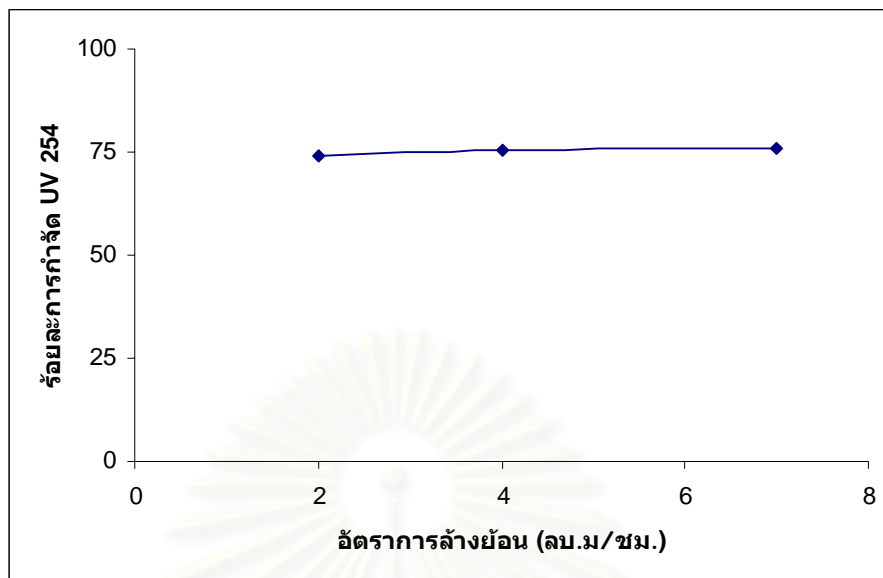
#### 4.2.4.2 ผลของอัตราการล้างย้อนต่อค่า สารอินทรีย์ในน้ำ

ผลของอัตราการล้างย้อนต่อการกำจัดค่าสารอินทรีย์ในน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.27 น้ำดิบที่ผ่านเมมเบรนแล้วค่าสารอินทรีย์ในน้ำ มีค่าลดลง สาเหตุที่ทำให้เมมเบรนสามารถลดค่าสารอินทรีย์ในน้ำ ได้นั้น เนื่องจากผิวหน้าของเมมเบรนมีความหยาบค่อนข้างสูง สารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านไปได้อาจทำให้สารอินทรีย์ออกมาน้อยลงและการดูดซับรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรน้อยลงตามไป

ประสิทธิภาพการกำจัดค่าสารอินทรีย์ในน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าสารอินทรีย์ในน้ำ จะลดลงเมื่อทำการลดอัตราการล้างย้อนลง เนื่องจากว่า เมื่อลดอัตราการล้างย้อนจะมีผลต่อแรงเฉือน โดยทำให้แรงเฉือนมีค่าน้อยลง ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ยังคงมีการติดค้างอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรนบางส่วน ซึ่งถ้าใช้อัตราการล้างย้อนที่สูงโอกาสที่โมเลกุลของสารอินทรีย์จะติดค้างที่ผิวของเมมเบรนนั้นจะน้อยกว่าการทดลองที่ใช้อัตราการล้างย้อนต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดนั้นลดลงเมื่อเทียบกับอัตราการล้างย้อนที่สูงขึ้น ในน้ำที่ทำการทดลองนั้นประกอบไปด้วยสารอินทรีย์หลายชนิด แต่ละชนิดมีโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน ซึ่งเมมเบรนแบบ อัลตราฟิลเตรชันสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้โดยใช้กลไกแบบติดค้างในการกำจัด เช่นเดียวกับการกำจัดความขุ่น ทำให้สามารถกำจัดได้เฉพาะค่า สารอินทรีย์ในน้ำ ที่เกิดจากสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูง



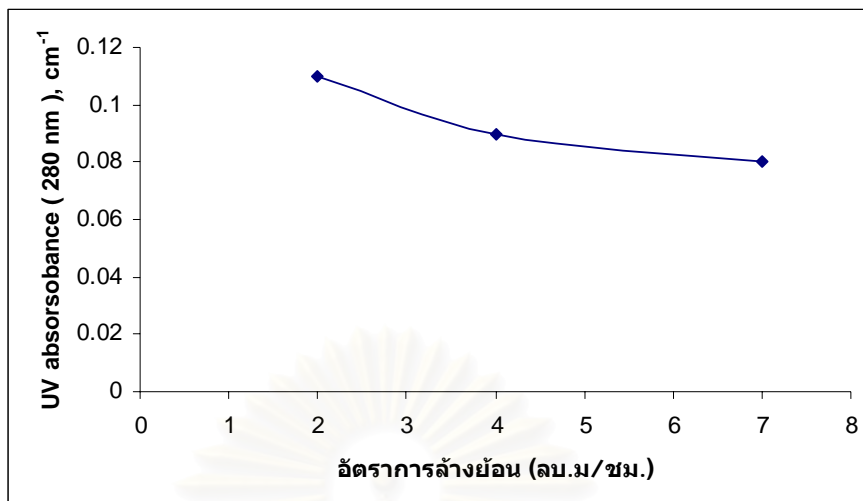
รูปที่ 4.27 ผลของอัตราล้างย้อนที่มีต่อการกำจัดค่าสารอินทรีย์ในน้ำ



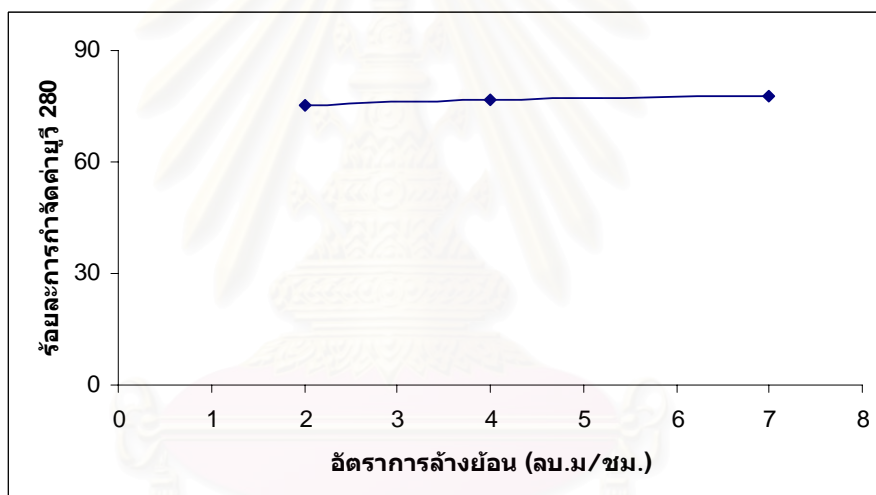
รูปที่ 4.28 ร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ ของระบบ

#### 4.2.4.3 ผลของอัตราการล้างย้อนต่อค่า สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน

ผลของอัตราการล้างย้อนที่มีต่อการกำจัดสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน แสดงดังรูปที่ 4.29 จากการทดลองพบว่า ค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน ในน้ำกรองมีค่าลดลง เนื่องจากว่าสารอินทรีย์จำพวกลิกนินและฮิวมัสได้ถูกกำจัดออกไปโดยกระบวนการติดค้างที่ผิวของเมมเบรน ซึ่งคล้ายกับการกำจัดสารอินทรีย์ที่ค่าสารอินทรีย์ในน้ำ และ โมเลกุลบางส่วนที่มีขนาดใหญ่กว่ารูของเมมเบรนนั้นไม่สามารถผ่านออกมาได้ จึงทำให้ปริมาณของลิกนินและฮิวมัสที่ออกมาน้อยลงและการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร นั้นน้อยตามลงไปด้วย และรูปที่ 4.30 เป็นการแสดงค่าร้อยละการกำจัดค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการล้างย้อนสูงขึ้น สารอินทรีย์ที่ติดอยู่ที่ผิวของเมมเบรนขณะการกรองนั้นมีโอกาสหลุดออกได้มากกว่าอัตราการล้างย้อนต่ำ ทำให้ค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน ที่วัดได้ในน้ำกรองนั้นมีค่าน้อยกว่าในน้ำดิบ โดยประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์จำพวกลิกนินและฮิวมัสโดยการวัดการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 280 นั้นประมาณร้อยละ 75- 78



รูปที่ 4.29 ผลของอัตราการล้างยอนต่อการกำจัดค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน

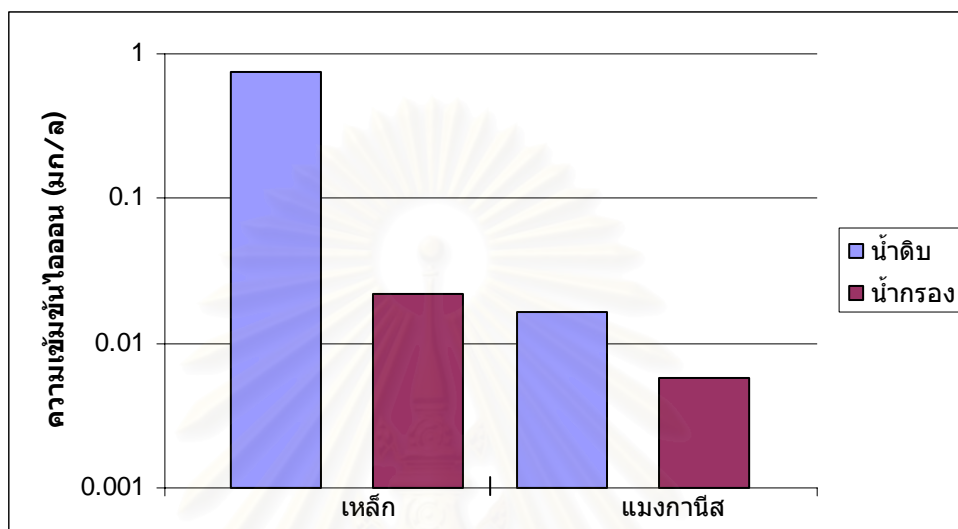


รูปที่ 4.30 ร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนินที่อัตราการล้างยอนต่างๆ

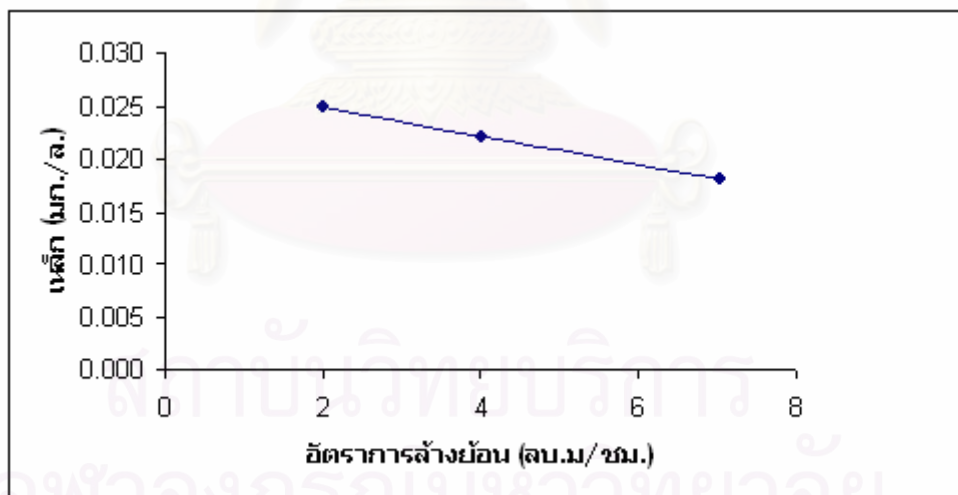
#### 4.2.4.4 ผลของอัตราการล้างยอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและแมงกานีส

รูปที่ 4.31 แสดงปริมาณของเหล็กและแมงกานีส รูปที่ 4.32 แสดงผลของอัตราการล้างยอนที่มีต่อปริมาณเหล็กและแมงกานีส ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสของอัลตราฟิลเตรชัน เมมเบรนนั้น อาศัยกลไกการดูดซับโดยการดูดติดผิวและในรูพรุนของเมมเบรน เช่นเดียวกับการกำจัดสารอินทรีย์ เมื่อทำการล้างยอนเมมเบรน อัตราการล้างยอนที่มาก จะมีความปั่นป่วนที่รุนแรง ส่งผลให้เหล็กและแมงกานีสที่เกาะติดที่ผิวเมมเบรนและในรูพรุนหลุดออกมา แต่บางครั้งก็ยังมีปริมาณของเหล็กและแมงกานีสหลุดออกมาและยังมีบางส่วนที่ติดค้างที่ผิวของเมมเบรนนั้น ดังนั้น เมื่อใช้อัตราการล้างยอนที่สูง โอกาสที่จะกำจัดเหล็กและแมงกานีสออกจากผิวเมมเบรนก็สูงตามไปด้วย การเกาะตัวที่ผิวของเหล็กและแมงกานีสยังก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันขึ้นอีกด้วยถ้าไม่มีการ

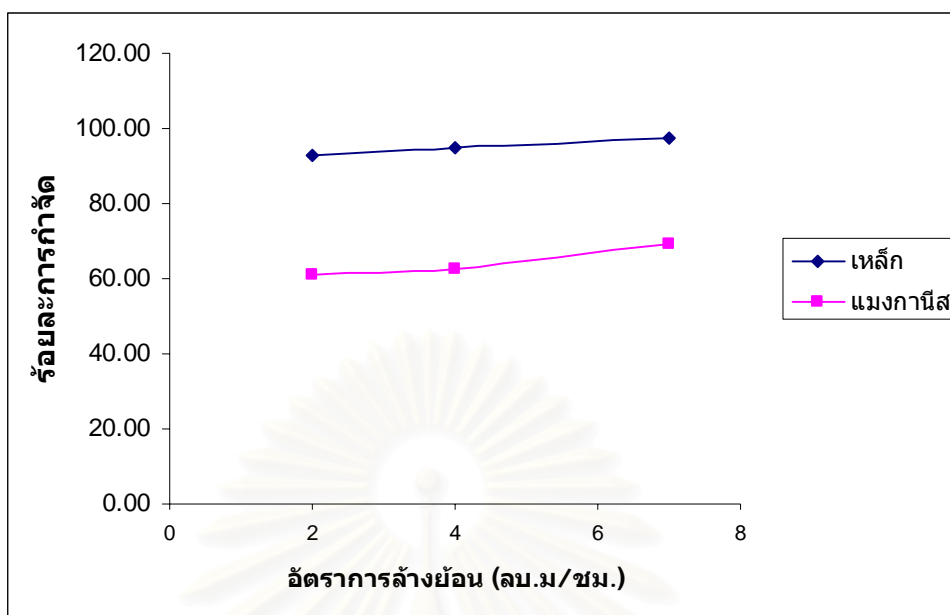
ล้างขี้นเมมเบรนเมื่อทำการกรองไปได้ระยะหนึ่ง รูปที่ 4.33 แสดงร้อยละการกำจัดเหล็กและแมงกานีสซึ่งประสิทธิภาพ ในการกำจัดแตกต่างกันไปตามแต่คุณสมบัติของธาตุต่างๆ ที่มีต่อเมมเบรน และความเข้มข้นของธาตุที่อยู่ในน้ำดิบอีกด้วย



รูปที่ 4.31 ปริมาณความเข้มข้นเหล็กและแมงกานีสในน้ำดิบและน้ำกรอง



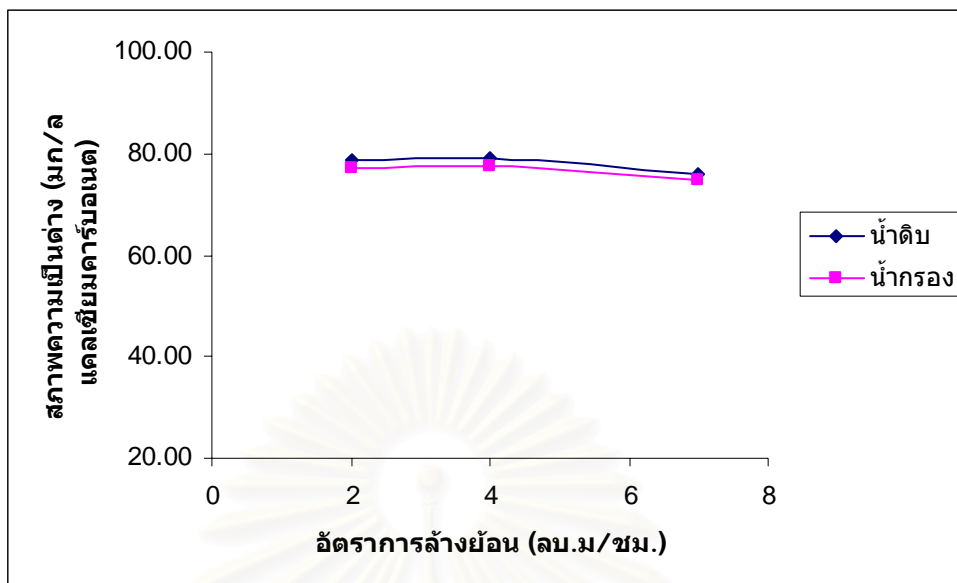
รูปที่ 4.32 ผลของอัตราล้างขี้นที่มีต่อการกำจัดเหล็ก



รูปที่ 4.33 ร้อยละการกำจัดเหล็กและแมงกานีส

#### 4.2.4.5 ผลของอัตราการล้างย้อนต่อสภาพความเป็นต่าง

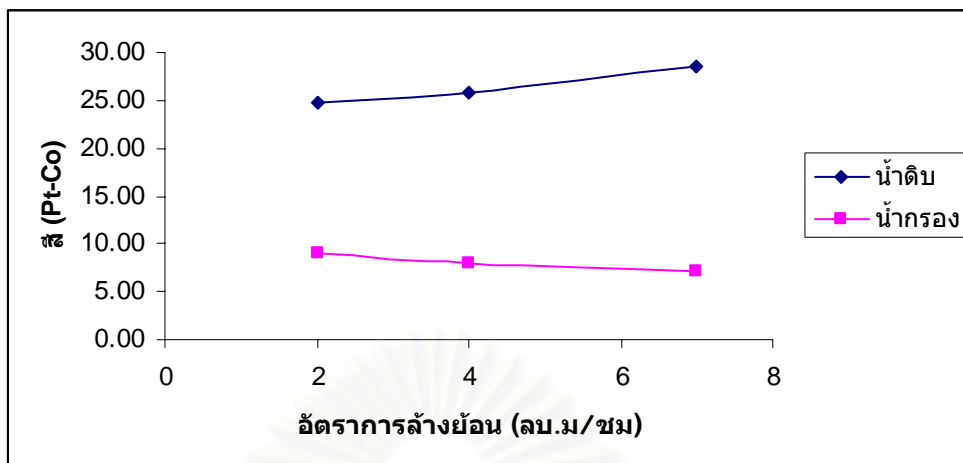
จากรูปที่ 4.34 แสดงความเป็นต่างในน้ำดิบและน้ำที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรนจากการทดลองพบว่า เมื่อเริ่มล้างย้อนเมมเบรนที่อัตราการล้างย้อน 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แล้วเดินระบบอีกครั้งน้ำดิบก่อนเข้าระบบมีค่าประมาณ 78 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต หลังจากผ่านการกรองแล้วมีค่าประมาณ 75 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต และเมื่อเปลี่ยนอัตราการล้างย้อนเป็น 4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แล้วเดินระบบอีกครั้ง น้ำดิบก่อนเข้าระบบมีค่าประมาณ 79 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต หลังจากผ่านการกรองแล้วสภาพความเป็นต่างมีค่าประมาณ 74 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นทำการเปลี่ยนอัตราการล้างย้อนเป็น 7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แล้วทำการเดินระบบใหม่ สภาพความเป็นต่างของน้ำดิบมีค่าประมาณ 75.83 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต หลังจากผ่านการกรองแล้ว สภาพความเป็นต่างมีค่าประมาณ 73 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต การเปลี่ยนแปลงอัตราการล้างย้อนนั้น ไม่ได้ส่งผลต่อการกำจัดสภาพความเป็นต่างออกไปได้ เนื่องจากไอออนของสภาพความเป็นต่าง ส่วนใหญ่เป็นไบคาร์บอเนต มีขนาดที่ใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนดังนั้นเมมเบรนจึงไม่สามารถที่จะกำจัดออกไปได้ เมื่อไม่สามารถกำจัดได้จึงไม่มีไอออนติดอยู่ที่ผิวการล้างย้อนที่ใช้จึงไม่ส่งผลต่อสภาพความเป็นต่าง



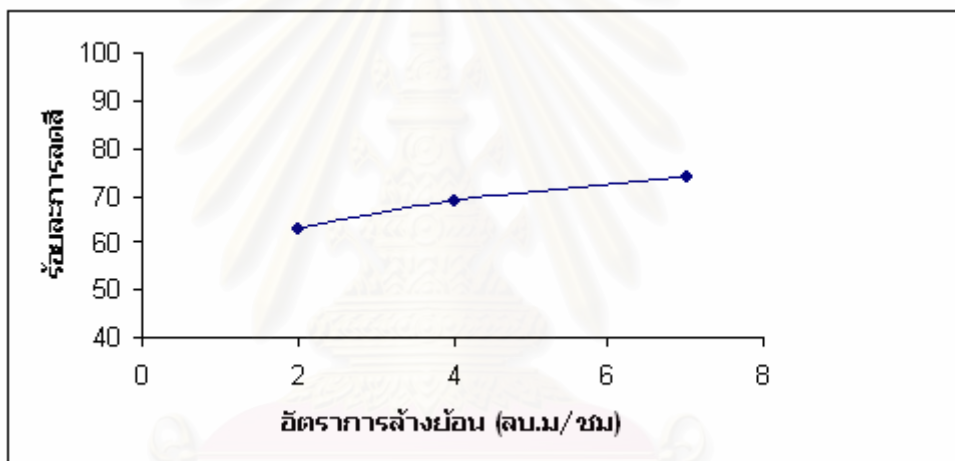
รูปที่ 4.34 สภาพความเป็นต่างในน้ำดิบและน้ำกรองที่อัตราการล้างย่อนต่างๆ

#### 4.2.4.6 ผลของอัตราการล้างย่อนต่อค่าสี

จากรูปที่ 4.35 แสดงผลของอัตราการล้างย่อนที่ส่งผลต่อการลดสีของเมมเบรน น้ำดิบที่เข้าระบบ ค่าสีที่วัดได้ได้อยู่ในช่วง 20-44 แพลทินัม-โคบอลต์ ตลอดการทดลอง ส่วนน้ำกรองค่าสีที่วัดได้นั้นอยู่ในช่วง 1-12 แพลทินัม-โคบอลต์ ตลอดการทดลอง เมื่อทำการล้างย่อนเมมเบรนด้วยอัตราการล้างย่อน 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ค่าสีที่วัดได้หลังจากการกรองน้ำมีค่าเฉลี่ยประมาณ 9.07 แพลทินัม-โคบอลต์ ที่อัตราการล้างย่อน 4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ค่าสีที่วัดได้หลังจากการกรองน้ำมีค่าเฉลี่ยประมาณ 8.07 แพลทินัม-โคบอลต์ และที่อัตราการล้างย่อน 7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ค่าสีที่วัดได้หลังจากการกรองน้ำมีค่าเฉลี่ยประมาณ 7.17 แพลทินัม-โคบอลต์ ประสิทธิภาพในการลดสีของเมมเบรนแสดงดังรูปที่ 4.36 ที่อัตราการล้างย่อน 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการลดสีประมาณร้อยละ 63 ที่อัตราการล้างย่อน 4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพในการลดสีประมาณร้อยละ 68 และที่อัตราการล้างย่อน 7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพในการลดสีมากที่สุดคือประมาณร้อยละ 74 เหตุที่การใช้อัตราการล้างย่อน 7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการลดสีสูงสุดเนื่องจากว่า การใช้อัตราการไหลของน้ำสูง ทำให้เกิดแรงเฉือนที่มาก การกำจัดอนุภาคต่างๆที่เป็นสาเหตุการเกิดสีในน้ำดิบที่ติดที่ผิวเมมเบรนสามารถหลุดออกได้ดีกว่าการใช้อัตราการล้างย่อนต่ำๆ นอกจากนั้นยังสามารถป้องกันการสะสมตัวที่ผิวของเมมเบรนได้ดีอีกด้วย



รูปที่ 4.35 ผลของอัตราการใช้งานต่อการลดสี



รูปที่ 4.36 ร้อยละการกำจัดสี

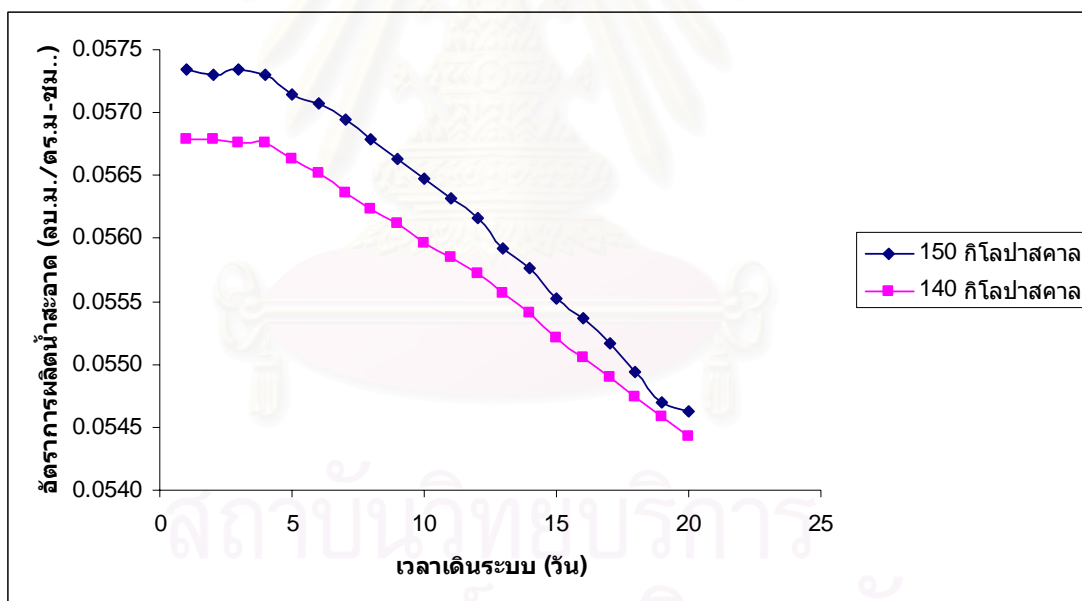
#### 4.3 การเดินระบบระยะเวลาที่มีต่อสมรรถภาพของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

การทดลองในขั้นตอนนี้เป็นการเลือกความดันที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 4.2 นั่นคือที่ความดัน 140 กิโลปาสกาล และ 150 กิโลปาสกาล เดินระบบโดยใช้อัตราการใช้งาน 7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ในการเลือกความดัน 140 กิโลปาสกาล และ 150 กิโลปาสกาล เนื่องจากว่าประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์ต่างๆ นั้นมีค่าที่สูงกว่า และที่ความดันที่สูงนั้น สามารถป้องกันการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization) ได้ และอัตราการใช้งาน 7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง มีค่าแรงเฉือนมากที่สุด



#### 4.3.1 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด

จากการเดินระบบระยะยาวโดยใช้ความดันเริ่มต้นที่ 140 กิโลปาสคาล และใช้อัตราการล้างย้อน 7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พบว่า ในระยะแรกอัตราการผลิตน้ำสะอาดมีค่าคงที่ประมาณ 0.0573 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จนถึงวันที่ 3 อัตราการผลิตน้ำสะอาดจึงเริ่มลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากการสะสมตัวของสารต่างๆ ในน้ำที่ผิวหน้าของเมมเบรน เมื่อเกิดการสะสมตัวขึ้น น้ำจึงไหลผ่านได้น้อยลง เป็นผลให้ค่าอัตราการผลิตน้ำสะอาดที่ได้ลดลงด้วย เหตุการณ์เช่นนี้เรียกว่าการเกิด คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Concentration Polarization, CP) คือ เมื่อตัวถูกละลายไม่สามารถผ่านแผ่นเมมเบรนได้ จะสะสมตัวอยู่ที่ผิวของเมมเบรน ทำให้ค่าความเข้มข้นบริเวณนั้นสูงกว่าน้ำที่เข้าระบบ ดังนั้นการเกิด คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Concentration Polarization) ทำให้ค่าอัตราการผลิตน้ำสะอาดลดลง อย่างไรก็ตามอัตราการผลิตน้ำสะอาดที่ลดลงเนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Concentration Polarization) สามารถแก้ไขให้มีสภาพดั้งเดิมได้โดยการล้างทำความสะอาดด้วยสารเคมี ผลของการเดินระบบระยะยาวต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาดแสดงดังรูปที่ 4.37

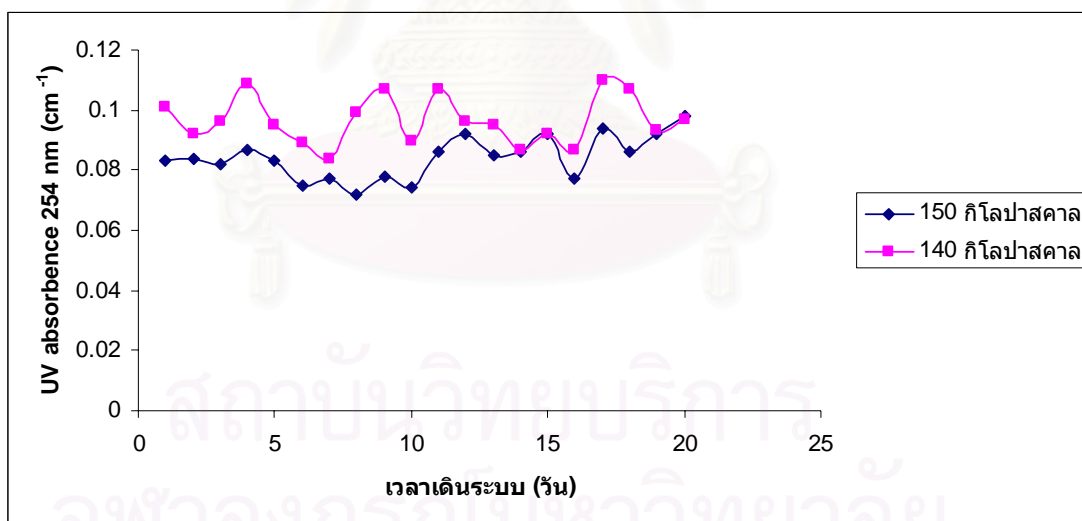


รูปที่ 4.37 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด

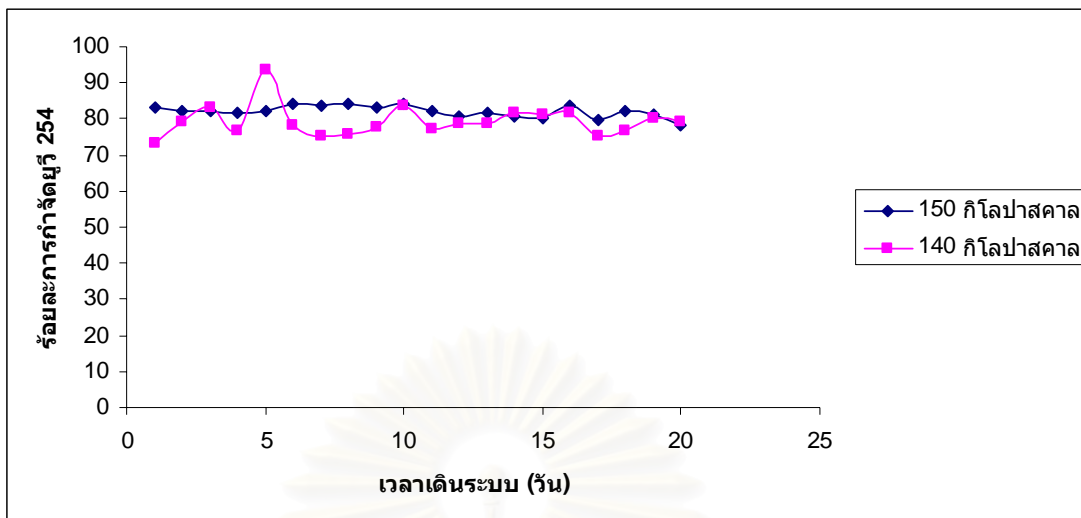
### 4.3.2 ผลของการเดินระบบระยะยาวที่มีต่อคุณภาพน้ำ

#### 4.3.2.1 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่าสารอินทรีย์ในน้ำ

จากการทดลองเดินระบบที่ความดัน 150 กิโลปาสคาล พบว่าค่าสารอินทรีย์ในน้ำของน้ำที่ผ่านการกรองอยู่ในช่วง 0.07-0.1 ต่อเซนติเมตร และที่ความดัน 140 กิโลปาสคาล ค่าสารอินทรีย์ในน้ำของน้ำที่ผ่านการกรองอยู่ในช่วง 0.08-0.1 ต่อเซนติเมตร จากรูปที่ 4.38 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มความดันในการกรองแล้วจะส่งผลให้การกำจัดสารอินทรีย์ดีขึ้นเนื่องจากการไหลของน้ำเป็นแบบเฉือนผิวหน้าเมมเบรน (Cross-flow) ความเร็วของน้ำที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความดัน จะเป็นการเฉือนผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้เป็นการลดการสะสมตัวของสารอินทรีย์ไปในตัว ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์จึงสูงเพิ่มตามไปด้วย จากกราฟที่ 4.38 ตั้งแต่วันที่ 10 เป็นต้นไปพบว่า แนวโน้มของสารอินทรีย์ในน้ำที่ผ่านกรองแล้ว มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากว่า เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นการสะสมตัวของสารอินทรีย์ที่ผิวหน้าของเมมเบรนนั้นมีค่าสูงขึ้นมากกว่าน้ำดิบที่เข้ามาจนเกิดเป็นชั้นเจลล์ขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ โดยใช้การดูดซับยูวีที่ค่าความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรแสดงดังรูปที่ 4.39



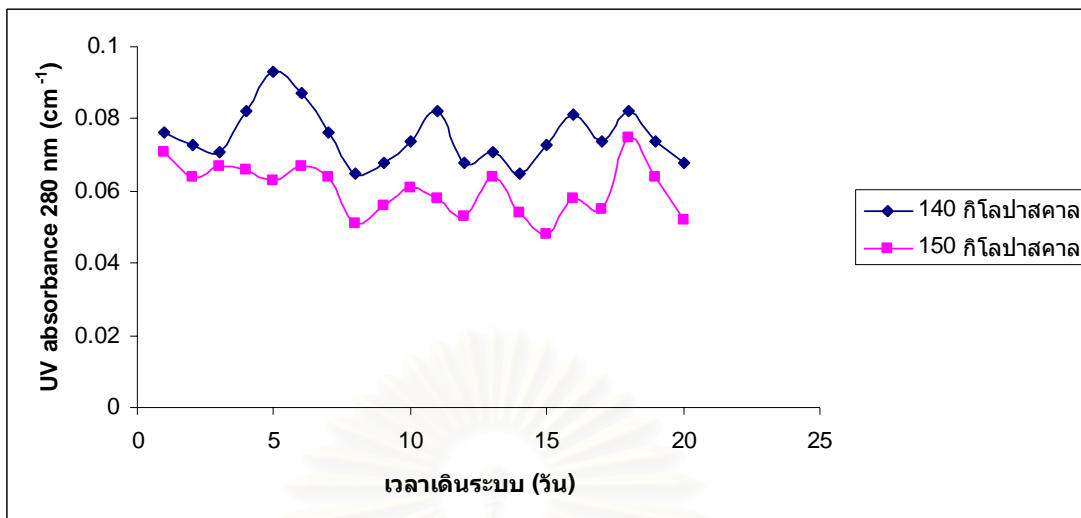
รูปที่ 4.38 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่าสารอินทรีย์ในน้ำ



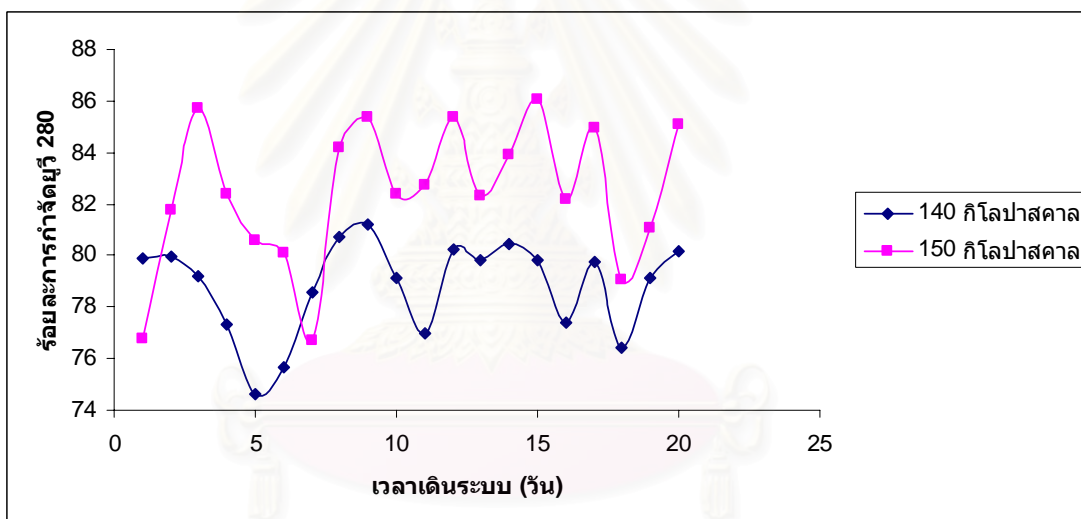
รูปที่ 4.39 ร้อยละการกำจัดค่าสารอินทรีย์ในน้ำ

#### 4.3.3 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน

จากการทดลองเดินระบบที่ความดัน 150 กิโลปาสคาล พบว่าค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน ของน้ำที่ผ่านการกรองอยู่ในช่วง 0.048-0.075 ต่อเซนติเมตร และที่ความดัน 140 กิโลปาสคาล ค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน ของน้ำที่ผ่านการกรองอยู่ในช่วง 0.065-0.093 ต่อเซนติเมตร จากรูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มความดันในการกรองแล้วจะส่งผลให้การกำจัดสารอินทรีย์จำพวกลิกนินและฮิวมัสดีขึ้น โดยใช้หลักการเช่นเดียวกันกับการกำจัดสารอินทรีย์ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร นั่นคือการไหลของน้ำเป็นแบบเจือปนผิวหน้าเมมเบรน (Cross-flow) ความเร็วของน้ำที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความดัน จะเป็นการเลื่อนผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้เป็นการลดการสะสมตัวของสารอินทรีย์จำพวกฮิวมัสและลิกนินไปในตัว ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์จำพวกฮิวมัสและลิกนินจึงสูงเพิ่มตามไปด้วย จากกราฟที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่าความดันที่ 150 กิโลปาสคาล สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดีกว่าความดัน 140 กิโลปาสคาล กราฟที่ 4.41 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์จำพวกลิกนินและฮิวมัส ตลอดช่วงของกราฟนั้นจะมีค่าของสารอินทรีย์จำพวกลิกนินและฮิวมัสที่เข้ามาไม่คงที่ มีช่วงการเปลี่ยนแปลงมากทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จำพวกลิกนินและฮิวมัสไม่ค่อยคงที่



รูปที่ 4.40 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน

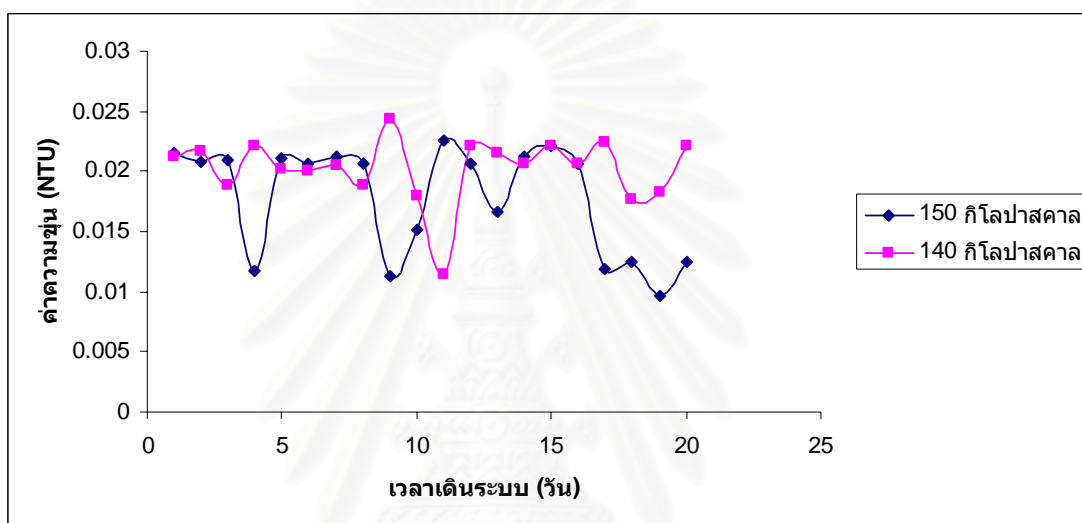


รูปที่ 4.41 ร้อยละการกำจัดค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน

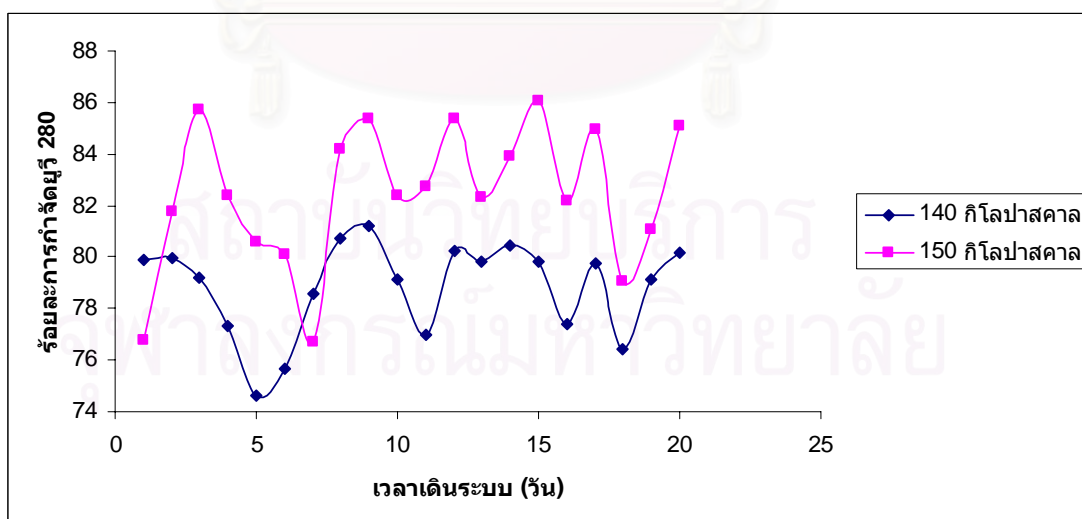
#### 4.3.4 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่าความขุ่น

จากรูปที่ 4.42 แสดงค่าความขุ่นเมื่อเดินระบบที่ความดัน 140 กิโลปาสคาล และ 150 กิโลปาสคาล ความขุ่นในน้ำที่กรองแล้วที่ความดัน 150 กิโลปาสคาล มีค่าอยู่ในช่วง 0.01-0.025 NTU ความขุ่นในน้ำที่ผ่านการกรองแล้วที่ความดัน 0.14 เมกกะปาสคาล มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 0.001-0.026 NTU ค่าความขุ่นจะมีการเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความขุ่นในน้ำดิบ จากการทดลองพบว่าความดันที่ใช้ในการกำจัดความขุ่นนั้นไม่ได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการกำจัดความขุ่นของเมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับที่ผิวหน้าของเมม

เบรน ความขุ่นส่วนใหญ่เกิดจากอนุภาคสารคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำแต่เมื่อนำมาผ่านเมมเบรนแล้วอนุภาคส่วนใหญ่ไม่สามารถที่จะผ่านเมมเบรนไปได้เนื่องจากขนาดรูพรุนของเมมเบรนนั้นมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคคอลลอยด์เหล่านั้น ดังนั้นค่าความขุ่นที่วัดได้จึงมีค่าน้อยมาก ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นแสดงดังรูปที่ 4.43 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเมื่อเดินระบบทั้งที่ความดัน 140 กิโลปาสกาล และ 150 กิโลปาสกาล ไม่ได้มีความแตกต่างกัน คือมีค่าอยู่ในช่วง ร้อยละ 99.8-99.9 เนื่องจากการกำจัดความขุ่นของเมมเบรนไม่ได้ขึ้นกับความดันที่เพิ่มขึ้น



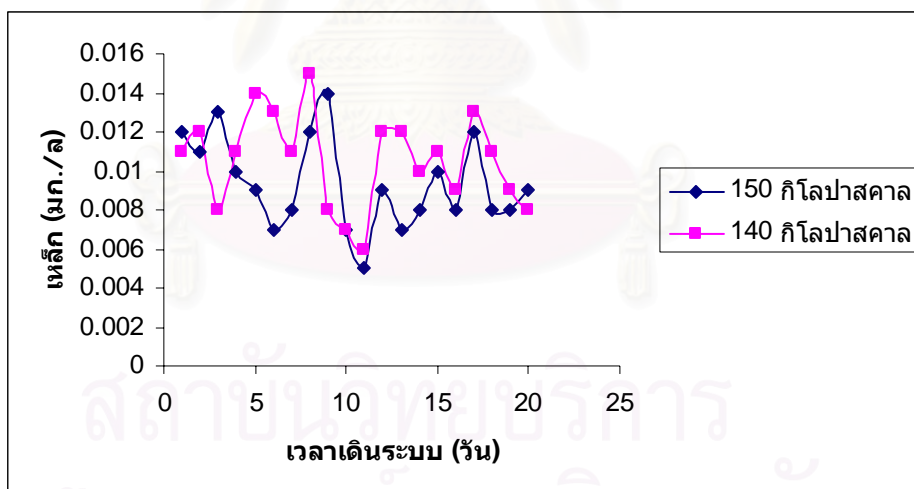
รูปที่ 4.42 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่าความขุ่น



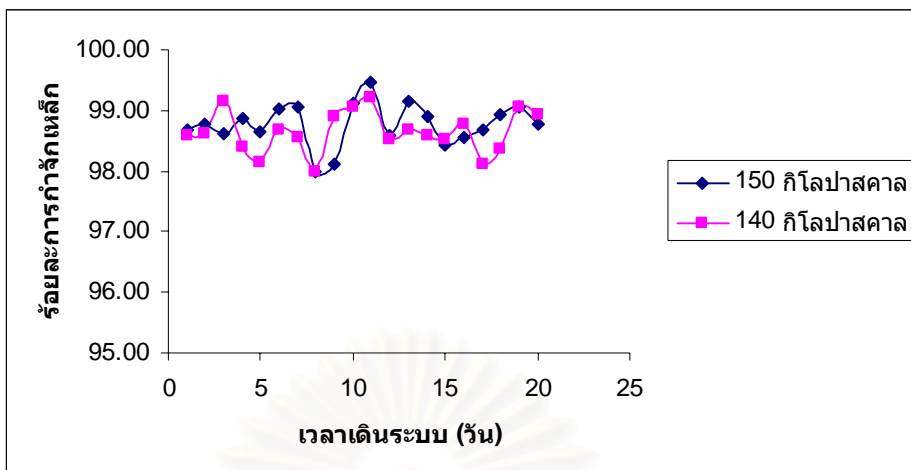
รูปที่ 4.43 ร้อยละการกำจัดความขุ่น

#### 4.3.5 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่าเหล็กและแมงกานีส

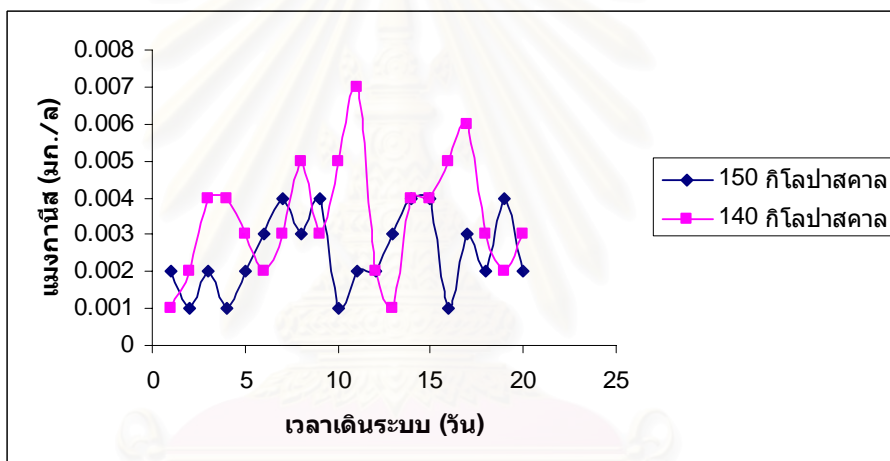
จากรูปที่ 4.44 แสดงการเดินระบบระยะยาวต่อการกำจัดปริมาณเหล็ก รูปที่ 4.45 เป็นการแสดงถึงร้อยละการกำจัดเหล็กของเมมเบรน รูปที่ 4.46 จะเป็นการกำจัดแมงกานีสเมื่อเดินระบบระยะยาว และรูปที่ 4.47 เป็นการแสดงถึงร้อยละการกำจัดแมงกานีสของเมมเบรน ค่าที่แสดงนั้นเป็นค่าปริมาณเหล็กและแมงกานีสที่ออกมาหลังจากการกรองแล้ว จากการทดลองพบว่า การเดินระบบระยะยาวในการทดลองนี้ ตั้งแต่เริ่มเดินระบบจนถึงสิ้นสุด ปริมาณเหล็กและแมงกานีสโดยรวมที่ถูกกำจัดได้ จะมีค่าขึ้นลง ซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของเหล็กและแมงกานีสในน้ำดิบด้วย การเดินระบบที่ความดัน 140 กิโลปาสคาล สังเกตได้ว่าเหล็กและแมงกานีสถูกกำจัดได้น้อยกว่าเปรียบเทียบกับที่ความดัน 150 กิโลปาสคาล เนื่องจากการเพิ่มความดันเป็นการเร่งการดูดซับเหล็กและแมงกานีส เมื่อเดินระบบไปเรื่อยๆ เป็นระยะเวลา 20 วันในการทดลองนี้ สังเกตพบว่าเหล็กและแมงกานีสไม่มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ทั้งที่เมื่อเวลาที่ใช้ในการเดินระบบนานขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสควรจะลดลง เนื่องจากว่าได้มีการล้างย้อนเมมเบรนทุกๆ 15 นาที นั้น แสดงว่าอัตราล้างย้อนที่ใช้มีค่าที่เหมาะสมในการป้องกันการสะสมตัวของเหล็กและแมงกานีส ซึ่งเป็นการลดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันได้อีกด้วย



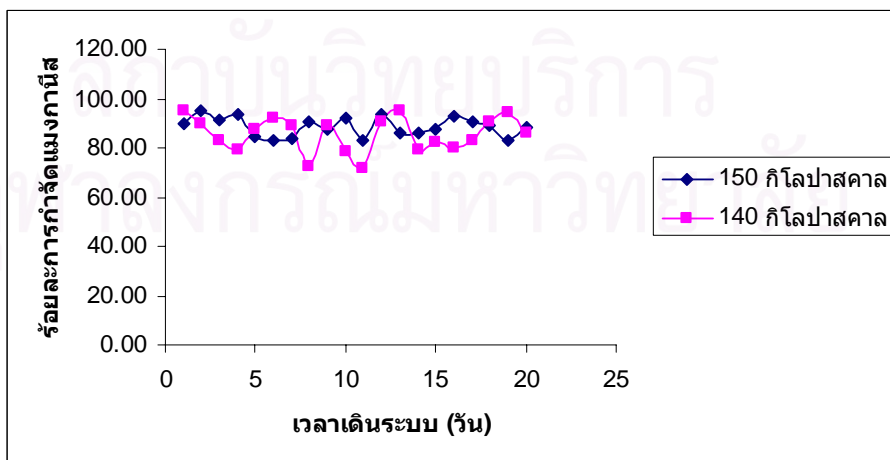
รูปที่ 4.44 การเดินระบบระยะยาวต่อปริมาณเหล็ก



รูปที่ 4.45 ร้อยละการกำจัดแห้ง



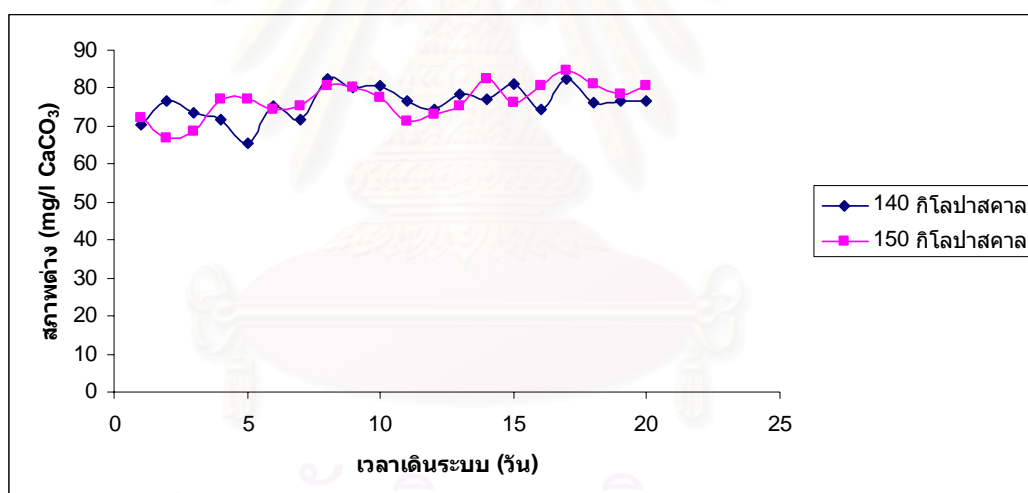
รูปที่ 4.46 การเดินระบบระยะยาวต่อปริมาณแอมโมเนียส



รูปที่ 4.47 ร้อยละการกำจัดแอมโมเนียส

#### 4.3.6 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อสภาพความเป็นด่าง

ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อสภาพต่างแสดงดังรูปที่ 4.48 ในการเดินระบบในช่วงแรกใช้ความดันในการกรอง 140 กิโลปาสคาล ค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำที่ผ่านการกรองอยู่ในช่วง 65-83 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต จากการทดลองสภาพต่างมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากน้ำดิบที่เข้ามานั้น มีค่าไม่คงที่ในแต่ละวัน สภาพต่างในน้ำที่กรองแล้วจึงมีค่าไม่คงที่ตามไปด้วย จากนั้นเริ่มเดินระบบที่ความดัน 150 กิโลปาสคาล ค่าสภาพต่างในน้ำที่กรองมีค่าอยู่ในช่วง 66-85 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต จากรูปที่ 4.48 พบว่าสภาพความเป็นด่างทั้ง 2 ค่า มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แนวโน้มของสภาพความเป็นด่างสูงขึ้นเมื่อเวลานานขึ้น ซึ่งมีปัจจัยหลัก 2 อย่างที่ทำให้ค่าสูงขึ้น 1. สภาพความเป็นด่างในน้ำสูงขึ้นเนื่องจากได้มีการเติมปูนขาวลงในถังเก็บน้ำดิบของโรงกรองน้ำ 2. เกิดการเกาะผิวหน้าเมมเบรนของแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้นจึงทำให้สภาพความเป็นด่างที่ออกมาเริ่มสูงขึ้นแต่ที่ไม่สูงมากนัก เนื่องจากมีบางส่วนที่ถูกกำจัดออกจากผิวหน้าเมมเบรนด้วยวิธีการล้างย้อน



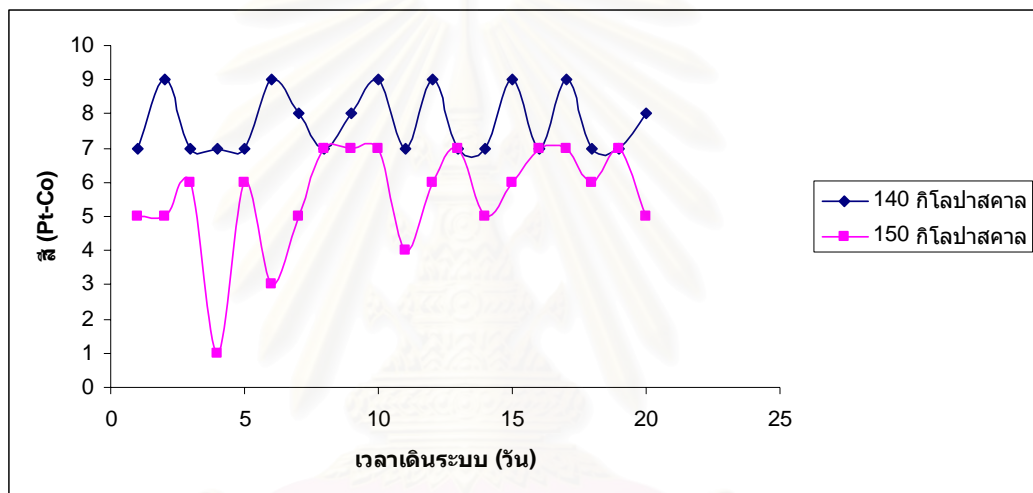
รูปที่ 4.48 ผลของการเดินระบบต่อสภาพต่าง

#### 4.3.7 ผลของการเดินระบบระยะยาวต่อค่าสี

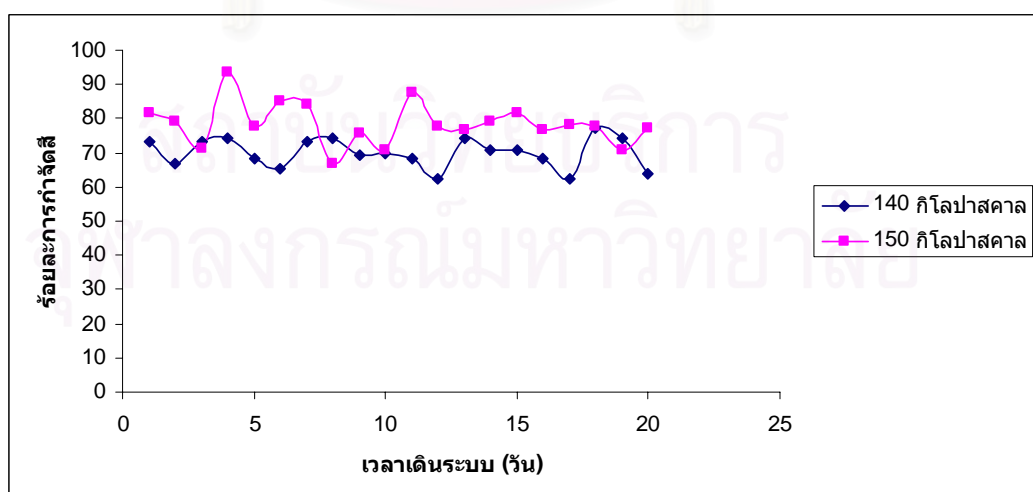
รูปที่ 4.49 แสดงการเดินระบบระยะยาวที่มีต่อค่าสี ในการทดลองช่วงแรกเป็นการเดินระบบ ใช้ความดันในการกรอง 140 กิโลปาสคาล ค่าสีที่วัดได้ในน้ำกรองมีค่าอยู่ในช่วง 7-9 แพลทินัม-โคบอลต์ หลังจากนั้นได้ทำการเดินระบบที่ความดันเข้า 150 กิโลปาสคาล ค่าสีที่วัดได้ในน้ำกรองอยู่ในช่วง 1-7 แพลทินัม-โคบอลต์ค่าสีที่วัดออกมานั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับระบบเมมเบรนแล้ว ยังขึ้นอยู่กับค่าสีที่อยู่ในน้ำดิบที่วัดได้ด้วยค่าสีที่วัดได้ในน้ำดิบมีช่วงที่กว้างก็จะส่งผลให้ค่าสีในน้ำที่กรองได้อยู่ในช่วงที่กว้างด้วยเช่นกัน จากการทดลองเดินระบบระยะยาวพบว่า แนวโน้มของ



ประสิทธิภาพการกำจัดสีของเมมเบรนลดลง เนื่องจากว่าสีที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของเมมเบรนอาศัยกลไกการดูดซับที่ผิวหน้าและในรูพรุนของเมมเบรน และการกำจัดบางส่วนยังเกิดจากกลไกการติดค้างที่รูพรุนของเมมเบรน เมื่อเดินระบบไปเรื่อยๆ โดยไม่ใช้สารเคมีในการล้างเมมเบรน ใช้แต่การล้างย้อนด้วยน้ำธรรมดา ไม่สามารถทำให้การสิ่งอุดตันต่างๆ ที่เกิดขึ้นในลักษณะเจลล์ออกได้หมด ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีนั้นเริ่มลดลง แต่ด้วยแรงเฉือนที่เกิดจากการล้างย้อนนั้น ช่วยให้สิ่งอุดตันต่างๆ หลุด ออก ช่วยชะลอการเกิดการเกาะตัวในลักษณะเจลล์ ทำให้ประสิทธิภาพที่ได้จากกราฟที่ 4.50 นั้นมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลง อย่างช้าๆ



รูปที่ 4.49 การเดินระบบระยะยาวต่อการกำจัดสี



รูปที่ 4.50 ร้อยละการกำจัดสี

#### 4.4 การวิเคราะห์หาอัตราการกรองน้ำของอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

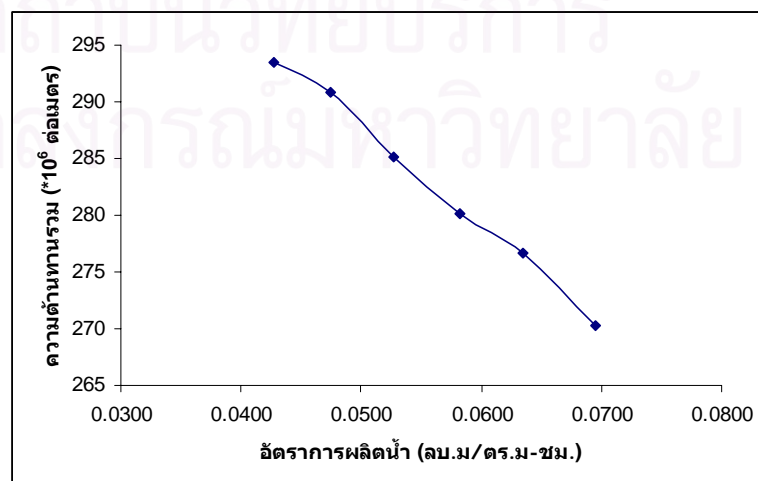
##### 4.4.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์อนุกรมความต้านทาน (Resistance-in-series model)

แบบจำลองอนุกรมความต้านทานอธิบายการลดลงของฟลักซ์ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานในการไหลเพิ่มขึ้น รูปแบบของแบบจำลองอนุกรมความต้านทานแสดงดังสมการที่ 4.1

$$J_w = \frac{\Delta P}{\mu R_t} \quad (4.1)$$

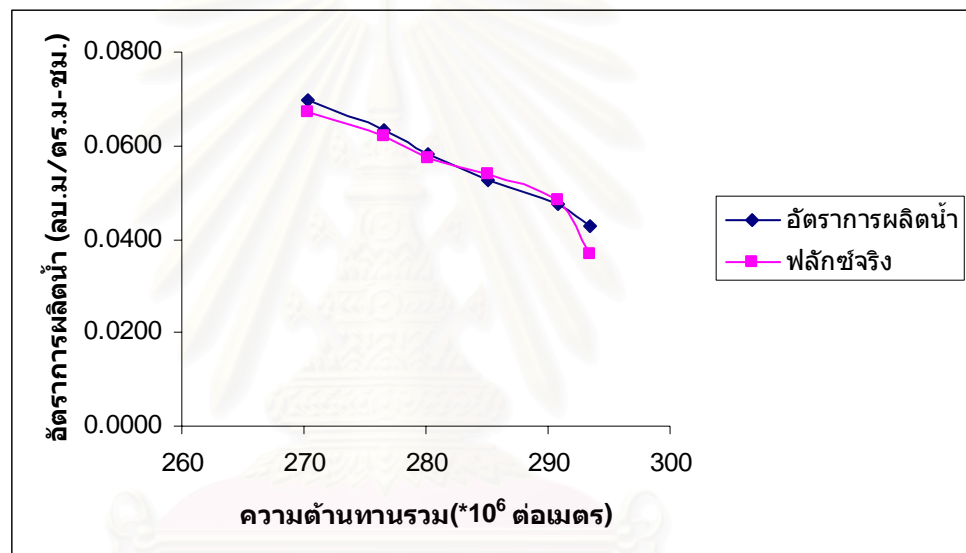
โดยที่  $J_w$  คือ อัตราการกรองน้ำสะอาด (ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร·วินาที)  
 $\Delta P$  คือ ความดันที่ให้กับระบบ (ปาสคาล)  
 $\mu$  คือ ค่าความหนืดของน้ำ (ปาสคาล·วินาที)  
 $R_t$  คือ ความต้านทานรวมที่เกิดขึ้น (ต่อเมตร)

จากรูปที่ 4.51 พบว่าเมื่อความต้านทานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการผลิตน้ำของเมมเบรนลดลงด้วย เนื่องจากเมื่อทำการกรองไปได้ระยะหนึ่ง การสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ที่ผิวของเมมเบรนจะเริ่มสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการกรองน้ำจึงลดลงตามไปด้วย รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบอัตราการกรองน้ำที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ จากการทดลองพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์นั้นมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการผลิตน้ำจริงจากการทดลอง



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานรวมกับอัตราการผลิตน้ำ

ในการเปรียบเทียบอัตราการผลิตน้ำที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 4.51 โดยการทดลองนี้เริ่มต้นด้วยการหาความต้านทานทั้งหมด ซึ่งความต้านทานจากเมมเบรนเป็นความต้านทานที่คงที่ จากนั้นทำการวัดอัตราการผลิตน้ำที่ได้ในแต่ละชั่วโมง นำไปแทนค่าในสมการที่ 4.5 เติมนระบบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วบันทึกค่าความต้านทานทั้งหมดที่เกิดขึ้น นำเมมเบรนมาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียมไว้ แล้วล้างซ้ำด้วยน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว จากนั้นเริ่มเดินระบบวัดค่าอัตราการผลิตน้ำ โดยนำค่าความต้านทานทั้งหมดที่คำนวณจากขั้นแรกในแต่ละชั่วโมงมาคำนวณหาอัตราการผลิตน้ำในแต่ละชั่วโมง เติมนระบบวัดอัตราการผลิตน้ำจริงจากระบบ แล้วนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าจากการทดลอง



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำสะอาดที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณ

#### 4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือนกับอัตราการผลิตน้ำ

ขณะมีการล้างย้อนจะเกิดแรงเฉือนขึ้นที่ผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะทำให้คอลลอยด์ที่ติดอยู่ที่ผิวของเมมเบรนในรูปของก้อนนั้นหลุดออก โดยแรงเฉือนหาได้จากความดันที่ลดลงในท่อเมมเบรนแบบรูปทรงกระบอก ซึ่งสมการที่ใช้หาค่าแรงเฉือนเป็นดังนี้

$$\tau_w = \frac{\Delta P d}{4L} \quad (4.2)$$

เมื่อ

$\tau_w$  = แรงเฉือน (ปาสคาล)

$\Delta P$  = ความดันที่เข้า (ปาสคาล)

$L$  = ความยาวของเมมเบรน (เมตร)

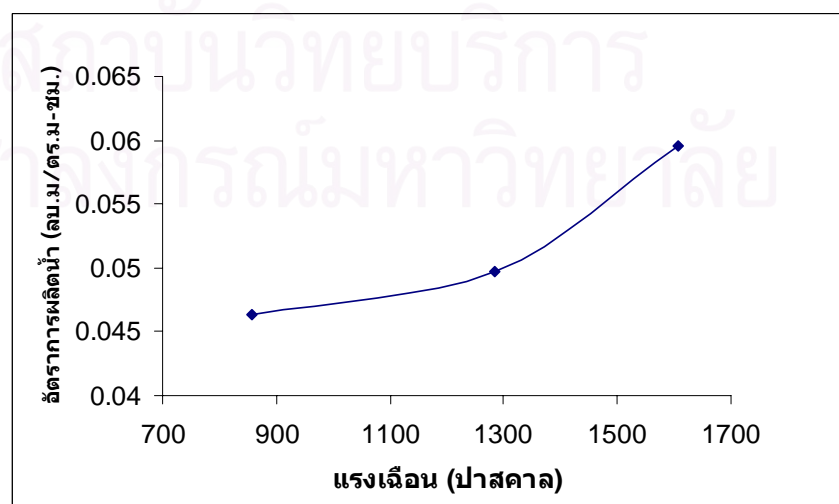
$d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของเมมเบรน (เมตร)

จากสมการที่ 4.1 เมื่อเราทราบค่าความดันที่เข้า ความดันที่ออก และความยาวของเมมเบรน เราก็สามารถที่จะหาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของเมมเบรนได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการล้างย้อน

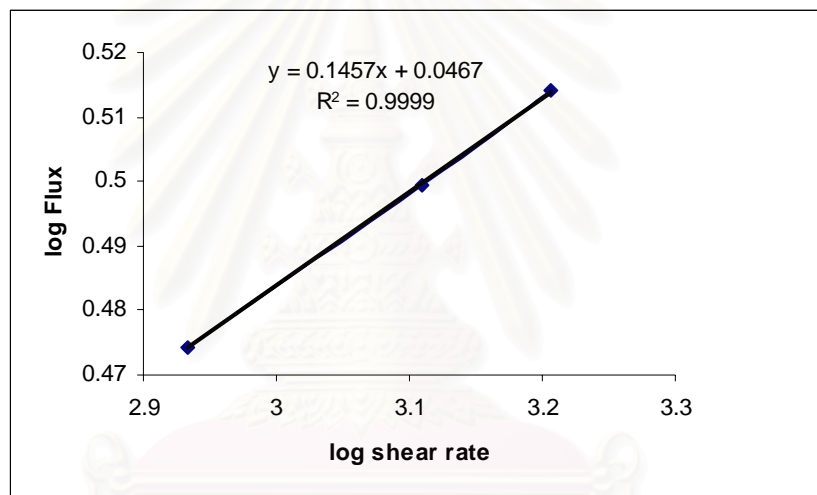
อัตราการล้างย้อน (ลบ.ม/ชม.)	แรงเฉือน (ปาสคาล)
7	$\tau_w = \frac{(170000 - 155000) \times 0.6}{4 \times 1.4} = 1607$ ปาสคาล
4	$\tau_w = \frac{(130000 - 118000) \times 0.6}{4 \times 1.4} = 1285.7$ ปาสคาล
2	$\tau_w = \frac{(70000 - 50000) \times 0.6}{4 \times 1.4} = 857$ ปาสคาล

จากตารางที่ 4.1 จะพบว่าเมื่อทราบค่าความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของเมมเบรน และความยาวของเมมเบรนแล้ว สามารถหาค่าแรงเฉือนในส่วนของการล้างย้อนได้ รูปที่ 4.52 แสดงค่าแรงเฉือนที่ได้จากการทดลองโดยทำการเปรียบเทียบแรงเฉือนที่เปลี่ยนไปกับอัตราการกรองน้ำที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำกับแรงเฉือน

จากการทดลองพบว่าเมื่อแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราการกรองน้ำที่ได้จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากว่าแรงเฉือนที่มากขึ้น ส่งผลให้สิ่งอุดตันต่างๆ ที่สะสมที่ผิวหน้าของเมมเบรนและที่อุดตันในรูพรุนของเมมเบรนหลุดออก ทำให้อัตราการกรองน้ำเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้นสมการที่ (4.2) ยังสามารถหาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีการล้างย้อนแบบจากข้างในออกข้างนอกได้อีกด้วย เมื่อนำสมการที่ (4.2) มาคำนวณหาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนอัตราการล้างย้อนตามการทดลองที่ออกแบบไว้แล้วนั้น ค่าอัตราการล้างย้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นมากขึ้นตามไปด้วย และจากผลการทดลองพบว่า เมื่อทราบค่าความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของเมมเบรน และความยาวของเมมเบรนแล้ว จะสามารถหาค่าแรงเฉือนในส่วนของการล้างย้อนได้ รูปที่ 4.53 แสดงค่าแรงเฉือนที่ได้จากสมการและอัตราการผลิตน้ำที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับอัตราการผลิตน้ำ

เมื่อแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราการผลิตน้ำที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากแรงเฉือนที่มากขึ้นจะทำให้สิ่งอุดตันต่างๆ ที่สะสมอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรนและที่อุดตันในรูพรุนของเมมเบรนนั้นออก ทำให้อัตราการผลิตน้ำเพิ่มสูงขึ้นเราสามารถประยุกต์สมการ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการล้างย้อนกับความต้านทานรวมที่เกิดขึ้นได้ จากรูปที่ 4.53 เราจะได้สมการเส้นตรงดังสมการที่ 4.3 ดังนี้

$$y = 0.1457 x + 0.0467 \quad (4.3)$$

โดยที่  $y = \log J_w$ ,  $x = \log \tau$  เมื่อแทนค่าสมการที่ (4.1) ลงไปในสมการที่ (4.3) จะได้สมการที่ (4.4) ดังนี้

$$R_t = \frac{\Delta P}{1.157 \mu \tau^{0.1457}} \quad (4.4)$$

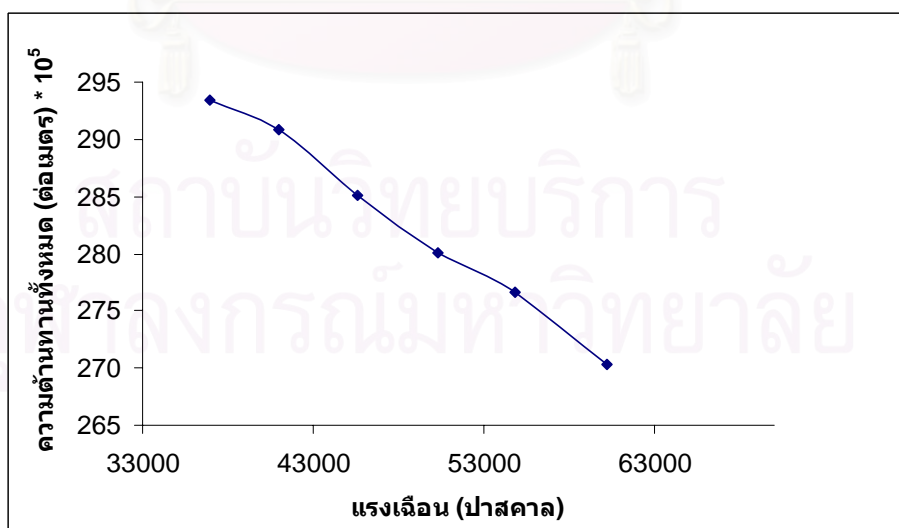
โดย  $R_t$  คือ ความต้านทานรวมที่เกิดขึ้น (ต่อเมตร)

$\Delta P$  คือ ความดันที่ให้กับระบบ (ปาสคาล)

$\mu$  คือ ค่าความหนืดของน้ำ (ปาสคาล·วินาที)

$\tau_w$  คือ แรงเฉือนที่ผิวเมมเบรน (ปาสคาล)

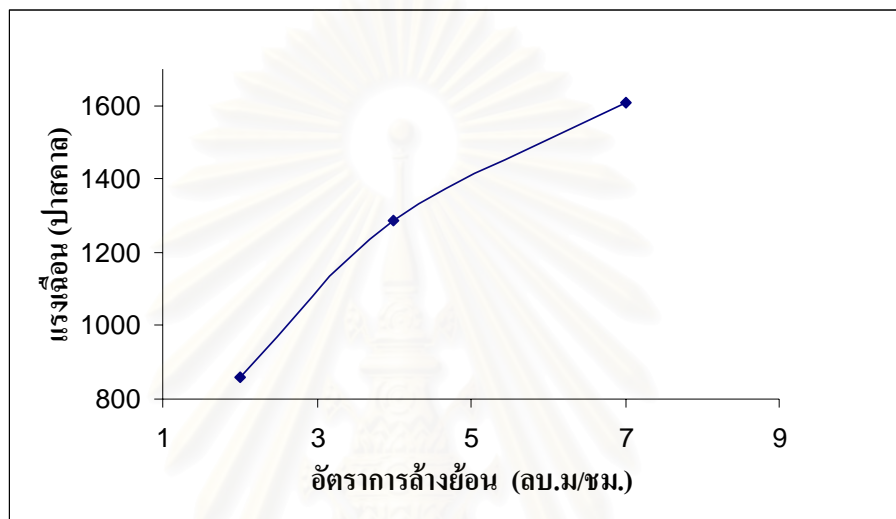
จากสมการที่ (4.4) สามารถหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ระหว่างความต้านทานรวมที่เกิดขึ้นกับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 4.54 โดยจากสมการที่ (4.4) สามารถทราบได้ว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นนั้น แปรผกผันกับความต้านทานที่ลดลง เนื่องจากว่าเมื่อแรงเฉือนที่สูงขึ้นจะเป็นการลดความต้านทานที่เกิดขึ้น โดยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การอุดตันของเมมเบรนลดลง สิ่งอุดตันต่างๆ ที่ติดที่รูพรุนและผิวหน้าของเมมเบรนจะหลุดออกและเป็นการลดการเกิดการสะสมตัวของตัวถูกละลายในน้ำดิบที่เกาะที่ผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดการอุดตัน (fouling) มีผลทำให้อัตราการผลิตน้ำนั้นลดลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อแรงเฉือนลดลงจะส่งผลให้โอกาสการสะสมตัวของตัวถูกละลายที่มากับน้ำดิบ เช่น สารแขวนลอย นั้นเกิดการสะสมตัวและหลุดออกไปได้น้อยกว่าแรงเฉือนที่มาก ทำให้ความต้านทานสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังย้อนที่มีแรงเฉือนสูงๆ และอัตราการผลิตน้ำจะลดลงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทั้งหมดกับแรงเฉือน

#### 4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการล้างย้อนกับค่าแรงเฉือน

ผลของอัตราการล้างย้อนที่มีต่อแรงเฉือนนั้นแสดงดังรูปที่ 4.55 จากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราการล้างย้อน จะทำให้ค่าแรงเฉือนที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.1 แล้ว จะพบว่าค่าของแรงเฉือนนั้นแปรผันตรงตามค่าความดันที่ใช้ในการล้างย้อน ส่วนค่าของความยาวเมมเบรนและค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของเมมเบรนนั้นมีค่าคงที่



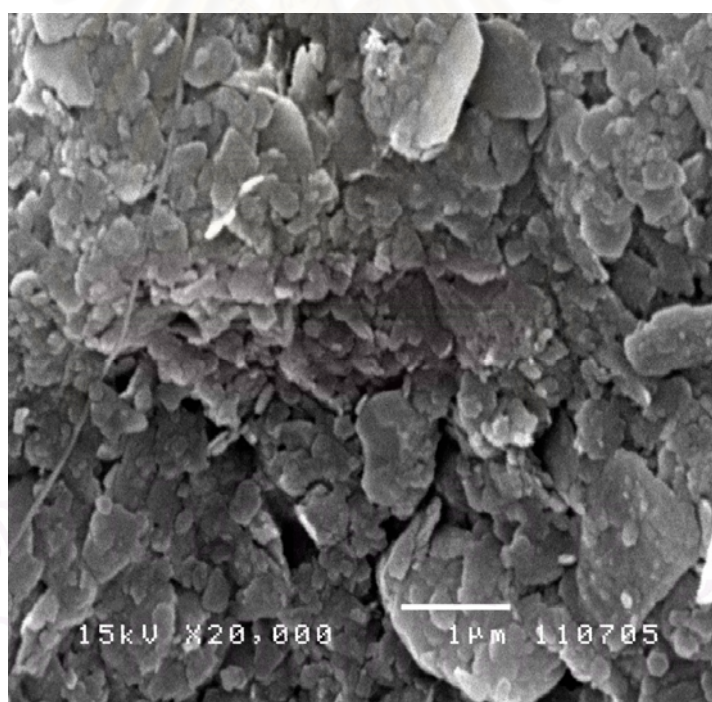
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการล้างย้อนกับแรงเฉือน

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการล้างย้อนกับค่าแรงเฉือนนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการล้างย้อนที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ค่าแรงเฉือนที่ผิวหน้าของเมมเบรนนั้นมีมากขึ้นเช่นกัน เพราะฉะนั้นจึงทำให้สารคอลลอยด์ที่เกาะติดอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรนหลุดออกได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการล้างย้อนแต่ไม่สามารถที่จะเพิ่มขึ้นสูงมากๆ ได้เนื่องจากอาจจะทำให้เมมเบรนเกิดการฉีกขาดได้เนื่องจากแรงดันที่มากเกินไป และการล้างย้อนด้วยวิธีธรรมดาโดยใช้น้ำสะอาดในการล้างย้อนนั้นไม่สามารถล้างเอาสารที่เกาะตัวในรูปของเจลล์ออกได้เนื่องจากว่าเมื่อมีการเดินระบบไปเรื่อยๆ สารคอลลอยด์ที่ไม่สามารถกำจัดออกได้นั้นจะเกิดการสะสมตัวเข้มข้นมากที่สุดที่ผิวของเมมเบรนแรงดันน้ำธรรมดาไม่สามารถที่จะกำจัดออกได้ดังนั้นเมื่อเริ่มเดินระบบไปได้ระยะหนึ่ง ควรมีการล้างเมมเบรนด้วยสารเคมีเช่น กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น

#### 4.4.4 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Pore model

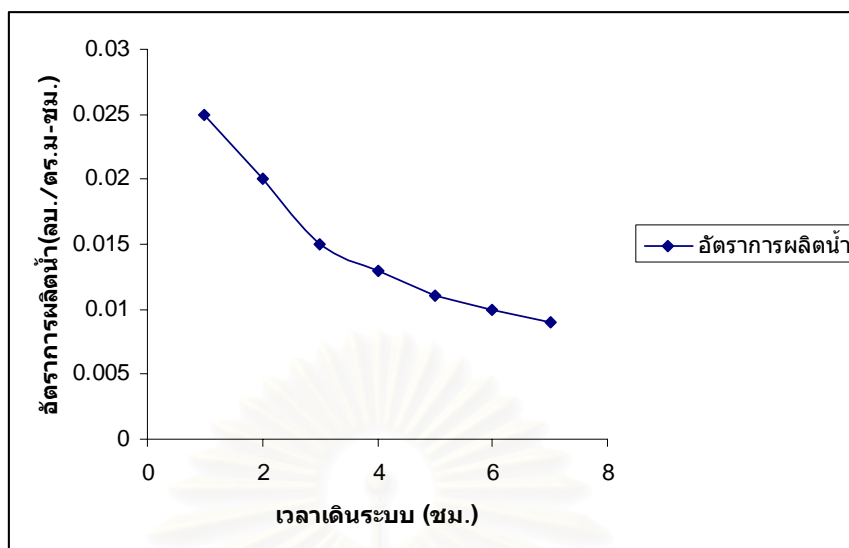
แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบรูพรุน เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายถึงอนุภาคต่างๆ ที่เกาะตัวอยู่บนผิวเมมเบรนในลักษณะของเค้ก ซึ่งเป็นรูปแบบของการอุดตันอีกแบบหนึ่ง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Kozeny-Carman จากการทดลองหาค่ารูพรุนของเค้กด้วยเครื่องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกลาด จะได้ค่าออกมาตามรูปที่ 4.56 ค่าความพรุนเฉลี่ยของเค้ก ( $\epsilon$ ) บนพื้นผิวเมมเบรนประมาณ 0.57 ค่าความหนาแน่นของอนุภาคโดยดูจากการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำ ( $d_p$ ) ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์อนุภาค (Particle Analyzer) โดยค่าเฉลี่ยของอนุภาคในน้ำมีค่าอยู่ที่ 11.94 ไมโครเมตรและความหนาแน่นของอนุภาค ( $\rho_p$ ) หากจากนำกระดาษกรองหลังอบลบกับน้ำหนักกรองก่อนอบหารด้วยปริมาตรน้ำที่ใช้ในการกรอง เมื่อนำไปแทนค่าตามสมการของ Kozeney-Carman จะได้ความต้านทานที่เกิดจากอนุภาคต่างๆ บนผิวเมมเบรนในลักษณะของเค้ก ( $\alpha_{\text{cake}}$ ) จากนั้น นำมาศึกษาต่อโดยใช้สมการ Cake filtration ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสมการ Pore model โดยนำมาสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการผลิตน้ำ ( $J_v$ ) กับเวลาในการเดินระบบ (ชั่วโมง) จะได้ดังรูปที่ 4.57 แสดงอัตราการผลิตน้ำที่เวลาเดินระบบต่างๆ จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเดินระบบนานขึ้นเรื่อยๆ อัตราการผลิตน้ำจะมีค่าลดลงเนื่องจากการสะสมตัวของมลสารต่างๆ ในน้ำดิบเกาะตัวที่ผิวของเมมเบรน ยิ่งเวลานานขึ้นการสะสมตัวจะมากขึ้นจนเป็นลักษณะการเกาะตัวแบบเค้ก



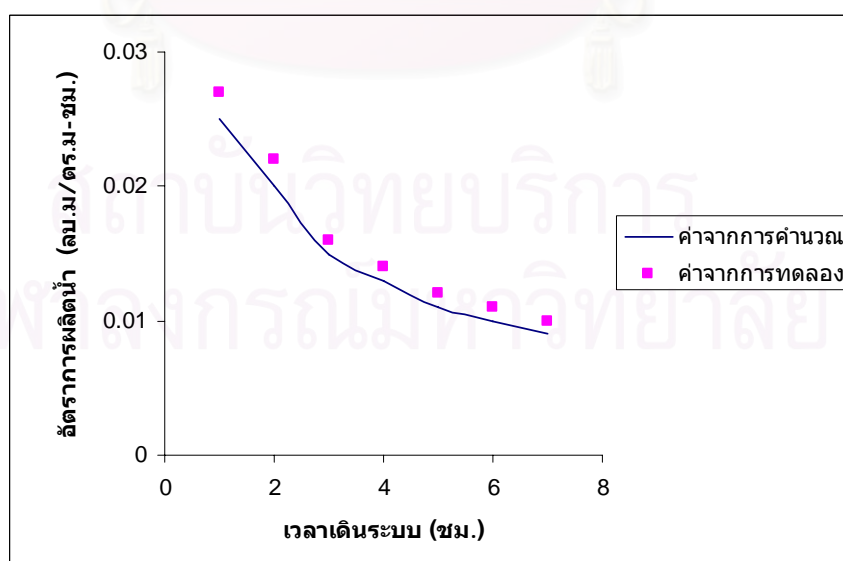
รูปที่ 4.56 ภาพถ่ายชั้นเค้กที่ผิวเมมเบรนด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกลาดที่ กำลังขยาย 20000 เท่า





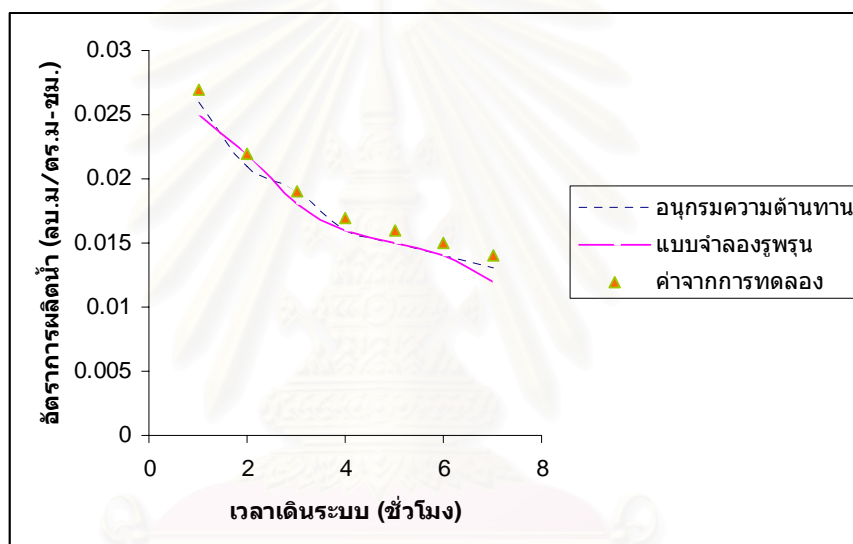
รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำกับเวลาเดินระบบ

การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบอัตราการผลิตน้ำที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ ลักษณะการทดลองจะทดลองคล้ายๆ กับแบบจำลองอนุกรมความต้านทาน คือ นำเวลาที่ต้องการทดลองหน่วยเป็นชั่วโมงมาแทนค่าในสมการ Cake filtration ของแบบจำลอง Pore model จะได้อัตราการผลิตน้ำที่ได้จากการคำนวณ จากนั้นนำเมมเบรนมาล้างด้วยกรด แล้วตามด้วยน้ำสะอาดเดินระบบบันทึกอัตราการผลิตน้ำที่ได้ในแต่ละชั่วโมงนำไปสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราการผลิตน้ำที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลองได้ดังรูปที่ 4.58



รูปที่ 4.58 การเปรียบเทียบอัตราการผลิตน้ำที่ได้จากการคำนวณกับค่าจากการทดลอง

จากการเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.59 การทดลองนี้ ได้ทำการทดลองคล้ายคลึงกับการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้ง 2 แบบกับอัตราการผลิตน้ำที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดลอง แต่ต่างกันที่การทดลองเปรียบเทียบอัตราการผลิตน้ำโดยใช้แบบจำลองอนุกรมความต้านทานที่ผ่านมาได้ทำการทดลองที่ความดันที่ สูงคือ 150 กิโลปาสกาล ดังนั้นในการทดลองนี้ ได้ทำการลดความดันลงมาเป็น 110 กิโลปาสกาล เนื่องจากว่าการทดลองใช้สมการ Pore model นั้น อัตราการผลิตน้ำเริ่มแรกก่อนการทดลอง มีความเกี่ยวข้องกัน ซึ่งก่อนการทดลอง ได้ทำการหาอัตราการกรองน้ำเริ่มต้น โดยการใช้ความดันที่ 110 กิโลปาสกาล ดังนั้นการทดลองนี้จึงลดความดันเข้าเป็น 100 กิโลปาสกาล



รูปที่ 4.59 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบ

จากการทดลองพบว่าเมื่อนำอัตราการผลิตน้ำที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับอัตราการผลิตน้ำที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าทั้ง 2 แบบจำลองนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการทดลองนี้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งในบางครั้งในการทดลองนำไปใช้กับสภาวะอื่นๆ ข้อสำคัญที่สุดคือเมื่อจะทำการทดลองที่ต้องเปลี่ยนสภาวะนั้น จำเป็นต้องล้างเมมเบรนด้วยกรดหรือด่างตามการออกแบบ ซึ่งเมมเบรนแต่ละชนิดนั้น จะใช้สารเคมีที่เหมือนหรือแตกต่างกันตามแต่วัสดุที่ใช้ในการผลิตและจุดประสงค์ในการใช้งาน หลังจากล้างด้วยกรดหรือด่างแล้ว ต้องล้างเมมเบรนซ้ำด้วยน้ำที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อนำเอากรดหรือด่างที่ใช้ล้างเมมเบรนออกเพื่อคุณภาพน้ำที่วัดได้จะมีความถูกต้องมากขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยปัจจัยของอัตราการล้างข้อนความดันและประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำสำหรับการผลิตน้ำประปา สามารถสรุปผลการวิจัยและมีข้อเสนอแนะในการศึกษาและวิจัยต่อไปดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงความดันเข้าพบว่า ความดันเข้า 150 กิโลปาสกาลส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเมมเบรนสูงขึ้น โดยอัตราการผลิตน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 0.05-0.07 ลบ.ม/ตร.ม-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จำพวกฮิวมัสและลิกนินโดยวัดค่าสารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและลิกนิน ประมาณร้อยละ 75 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำ โดยวัดค่าสารอินทรีย์ในน้ำ ประมาณร้อยละ 74 ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสประมาณร้อยละ 98 และ 88 ตามลำดับ สภาพความเป็นด่างและค่าการนำไฟฟ้า อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนไม่สามารถที่จะลดได้เนื่องจากไอออนมนน้ำมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน ความดันที่เปลี่ยนแปลงไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลไกการทำงานของเมมเบรนอาศัยหลักการติดค้าง ซึ่งอนุภาคของความขุ่นใหญ่กว่ารูของเมมเบรน ทำให้ติดค้างที่ผิวของเมมเบรน

2. การเปลี่ยนแปลงอัตราการล้างข้อนส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นกัน ที่อัตราการล้างข้อน 7 ลบ.ม/ชม. ให้ค่าแรงเฉือนมากที่สุด คือ 1607 ปาสกาล ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด ความขุ่น สารอินทรีย์ต่างๆ เหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงเฉือนที่มากขึ้นทำให้อนุภาคต่างๆ ที่ ติดค้างหลุดออกมากขึ้นประสิทธิภาพจึงเพิ่มขึ้น ส่วนค่าสภาพความเป็นด่างและค่าการนำไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อนุกรมความต้านทานได้อธิบายถึงการลดลงของอัตราการผลิตน้ำในขณะเดินระบบ พบว่าอัตราการผลิตน้ำลดลงเมื่อความต้านทานรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเดินระบบนานขึ้น ส่งผลให้เกิดการสะสมตัวที่ผิวของเมมเบรนมากขึ้น อัตราการผลิตน้ำจึงลดลง เมื่อทำการประยุกต์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานรวมที่เกิดขึ้นและแรงเฉือนที่ได้ จะสามารถนำไปใช้เพื่อคาดการณ์ ณ สภาวะต่างๆ ได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูพรุน ใช้ศึกษาการสะสมตัว

ในลักษณะของเค้กบนผิวของเมมเบรน พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับแบบจำลองอนุกรมความต้านทาน นั่นคือเมื่อระยะเวลาการเดินระบบมากขึ้น อัตราการผลิตน้ำจะลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอัตราการล้างย้อนที่ได้จากทดลองพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไป

จากงานวิจัยนี้ยังได้พบข้อที่น่าสนใจอีกหลายประการในการใช้ระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนสำหรับการผลิตน้ำประปา และทำการศึกษาวิจัยต่อไป

1. การศึกษาการนำระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนไปใช้ในพื้นที่ที่น้ำดิบเพื่อการบริโภคที่มีความขุ่นสูง เพื่อให้ทราบถึงขีดความสามารถ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
2. การศึกษาการนำระบบบำบัดขั้นต้นเช่น การติดตั้งตัวกรองขนาด 10 ไมโครเมตร ติดตั้งก่อนเข้าระบบซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรนสูงขึ้น
3. การศึกษาการนำอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนไปศึกษาร่วมกับระบบอื่นๆ เช่น ออสโมซิสผันกลับ เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์. 2536 วิศวกรรมประปา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์.

โกมล สีวบรร, เขาวุฑฒ พรพมมลเทพ และสุวททย ชุมนุฒศรรวฒน. 2523. การประปาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่4. ฐนฐการพมม.

มนนสน ตันฐลเวสม. 2538. คุมววิเคราะห์คุณภาพน้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพมม จุพาลงกรณัฒมหาวิทยาลัย.

มนนสน ตันฐลเวสม. 2539. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพมม จุพาลงกรณัฒมหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

Ahere, K.; Buchacher, A.; and Jungbauer, A. Effects of ultra-/diafiltration conditions on present aggregates in human immunoglobulin G preparations. Journal of Membrane Science. 274 (2005): 108-115.

Amirtharajah, R. The Interface between Filtration and Backwashing. Water Research. 19 (1985): 581-588.

APHA, AWWA and WPCF. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 19<sup>th</sup> edition Washington : American Public Health Association, (1995)

Bellar, T.A.; Lichtenberg, J.J.; and Kroner, R.C. The occurrence of organohalides in chlorinated drinking water. Journal American Water Works Association. 66 (1974) : 703.

Bowen, R.W.; Sabuni, M.; and Hoze, A. Electroosmotic Membrane Backwashing. Journal of Membrane Science. 33 (1994): 1245-1249.

Carrère, H. Study of hydrodynamic parameters in the cross-flow filtration of guar gum pseudoplastic solutions. Journal of Membrane Science. 174 (2000) : 135-145

Chen, S.C.; Stencel, N.; and Ferguson, D. Using ceramic membranes to recycle two nonionic alkaline metal-cleaning solutions. Journal of membrane Science. 162(1999): 219-234.

- Chmiel, H.; Schlichter, B.; and Mavrov, V. Study of a hybrid process combining ozonation and microfiltration/ultrafiltration for drinking water production from surface water. Desalination. 168(2003): 307-317.
- Fair, G.M.; Morris, J.C.; Chang, S.L.; Weil, I.; and Burden, R.P. Water and wastewater Engineering. Vol.2 Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal. New York: John Wiley and Sons.
- Jacangelo, J.G.; Demarco, J.; Owen, D.M.; and Randtke, S.J. Selected processes for removing NOM: an overview Journal American Water Works Association. 87 (1995) : 64-77.
- Kerry, J.; and Markm, C. Effect of membrane configuration on bench-scale MF and UF fouling experiments. Water research. 41 (2007): 3842-3849.
- Knocke, W.R.; Conley, L.; and Benschoten, J.E.V. Impact of dissolved organic carbon on the removal of iron during water treatment by using Ultrafiltration Process. Water research. 26 (1994): 1515-1522.
- Lanie, J.M.; Jacangelo, J.G.; Cummings, E.W.; Carms, K.E.; and Mallevalle, J. Influence of bromide on low-pressure membrane filtration for controlling DPBs in surface waters Journal American Water Works Association. 85 (1989) : 87-99.
- Lee, S.A.; Brugger, A.; panglich, S.; and Learch, A. Studies on the minimization of NOM fouling of MF/UF membranes with the help of a submerged “single” capillary membrane apparatus. Desalination, 179 (2001): 255-367.
- Lindua, L. Modeling water Treatment Chemical Disinfection Kinetics. Journal of Environmental Engineering. 124 (1994) :783-793.
- Lozier, C.J. ; Jones, G.; and Bellamy, W. Integated membrane treatment in Alaska. Journal American Water Works Association. 10 (1997): 50-64.
- Mayarovich, A.A.; and Knyazkova, T.V. Reconition of membrane fouling: test of theritical approaches with data of salt solutions containing a low molecular weight surfactant as fouling. Desalination. 126 (1999) : 163-169
- Onodera, S.; Tabucanon, M.; Uvanichkul, S.; and Siriwong, C. Seminar on Trihalomethane in Drinking Water in Bangkok Metropolitan Area. Laboratory and Research Section Environmental Quality Standard Division Office of the National Environment Board, Bangkok: Thailand, (1984).
- Samornkraisorakit, P. Membrane Technology. [Online]. Available from:

<http://www.mwa.co.th>[2007, September 26]

- Reutenbach, R.; and Albrecht, R. Recovery of vanillin from lignin/vanillin mixture by using tubular ceramic ultrafiltration membranes. Membrane Processes. 30 (1989): 221–237.
- Shen, L.Q.; Xu, Z.K.; and Liu, Z.M. Ultrafiltration hollow fiber membranes with ozone of sulfonated polyetherimide/polyetherimide blends: preparation, morphologies and antifouling properties. Journal of Membrane Science. 218 (2003): 279-293.
- Smith, P.J.; Shon, H.; Saravanamuth, V.; Huu Hao, N.; and Hung, N. Productivity enhancement in a cross-flow ultrafiltration membrane system through automated de-clogging operation. Journal of membrane science. 280 (2005): 82-88.
- US.EPA. 1979. National interim primary drinking water regulations: control of trihalomethanes in drinking water. Federal Register. 44 (1979), 68624.
- US.EPA. 1989. Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems Using Surface Water Supplies. U.S Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Williamson, J. Understanding Crossflow Filtration. [Online]. Available from: <http://osmonics.com/products/page712.htm>[2007, June 21]
- Xu, J.; Guoling, R.; Xizhang, C.; Ye Yao.; Baowei, S.; and Congjie, G. A pilot study of UF pretreatment without any chemicals for SWRO desalination in China. Desalination. 207 (2007): 216-226.
- Xu, Y.; Dodds, J.; and Leclerc, D. Optimization of a discontinuous Ultrafiltration backwash process. The Chemical Engineering Journal. 57 (1995): 247-251.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ก

ข้อมูลตีพิมพ์ผลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนความดัน

ตารางที่ ก1.1 ความดันเข้า 100 กิโลปาสกาล

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.72	0.026
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.016	0.0078
ความขุ่น (NTU)	118.7	0.016
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	79.45	78.5
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	259.2	251
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.43	0.12
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.35	0.09
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	26.4	8.07

ตารางที่ ก1.2 ความดันเข้า 110 กิโลปาสกาล

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.68	0.03
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.014	0.006
ความขุ่น (NTU)	122.4	0.017
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	79.22	78.67
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	256.8	253.13
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.42	0.11
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.35	0.09
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	25.6	8.33

**ตารางที่ ก1.3 ความดันเข้า 120 กิโลปาสกาล**

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.71	0.022
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.016	0.006
ความขุ่น (NTU)	133	0.615
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	79.56	78.46
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	253.2	255.5
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.45	0.12
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.36	0.08
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	27.2	8.9

**ตารางที่ ก1.4 ความดันเข้า 130 กิโลปาสกาล**

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.74	0.022
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.015	0.005
ความขุ่น (NTU)	115.7	0.013
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	78.04	76.88
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	259.53	259.13
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.47	0.09
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.36	0.08
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	27.2	7.3

**ตารางที่ ก1.5 ความดันเข้า 140 กิโลปาสกาล**

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.82	0.019
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.017	0.004
ความขุ่น (NTU)	138.3	0.014
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	74.77	73.54
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	261.67	257.6
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.43	0.08
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.36	0.08
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	26.87	8.13

**ตารางที่ ก1.6 ความดันเข้า 150 กิโลปาสกาล**

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.76	0.01
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.019	0.003
ความขุ่น (NTU)	135.2	0.013
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	75.86	73.39
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	260	252.13
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.43	0.07
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.36	0.07
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	25.13	8.8

ตารางที่ ก2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนอัตราการล้างย้อน

ตารางที่ ก2 .1 ความดันเข้า 100 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 7 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.67	0.02
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.015	0.006
ความขุ่น (NTU)	143.8	0.016
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	79.73	79.47
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	248.2	245.6
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.47	0.14
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.37	0.08
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	27.2	7.8

ตารางที่ ก2 .2 ความดันเข้า 100 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 4 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.74	0.03
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.016	0.007
ความขุ่น (NTU)	106	0.016
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	79.06	78.66
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	262.6	251.8
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.43	0.13
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.37	0.09
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	25.6	8.6

ตารางที่ ก2 .3 ความดันเข้า 100 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 2 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.76	0.029
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.015	0.009
ความขุ่น (NTU)	106.2	0.015
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	79.56	77.36
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	266.8	255.6
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.39	0.1
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.32	0.008
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	26.4	7.8

ตารางที่ ก2 .4 ความดันเข้า 120 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 7 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.72	0.016
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.015	0.006
ความขุ่น (NTU)	148.2	0.017
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	80.76	79.63
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	251	254
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.47	0.12
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.37	0.08
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	28.2	7

ตารางที่ ก2.5 ความดันเข้า 120 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 4 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.78	0.02
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.017	0.007
ความขุ่น (NTU)	125.2	0.015
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	78.96	77.96
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	257.4	256.2
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.45	0.12
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.37	0.08
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	27.4	7.2

ตารางที่ ก2.6 ความดันเข้า 120 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 2 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.62	0.028
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.015	0.005
ความขุ่น (NTU)	126	0.014
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	78.95	77.88
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	251.2	256.2
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.44	0.11
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.34	0.08
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	26	9.6

ตารางที่ ก2.7 ความดันเข้า 130 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 7ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.66	0.019
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.015	0.006
ความขุ่น (NTU)	148.4	0.013
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	73.08	73.46
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	272.6	253.4
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.47	0.09
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.37	0.07
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	30.2	6.8

ตารางที่ ก2.8 ความดันเข้า 130 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 4ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.8	0.022
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.014	0.005
ความขุ่น (NTU)	116	0.012
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	79.18	78.08
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	250	260.8
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.46	0.009
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.4	0.009
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	23.6	6.6



ตารางที่ ก2.9 ความดันเข้า 130 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 2 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.76	0.024
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.017	0.005
ความขุ่น (NTU)	108	0.013
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	79.8	79.2
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	266	263.2
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.43	0.009
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.34	0.007
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	25.2	8.6

ตารางที่ ก2.10 ความดันเข้า 140 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 7 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.79	0.014
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.02	0.003
ความขุ่น (NTU)	148.4	0.016
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	73.08	71.48
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	272.6	266.2
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.47	0.08
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.37	0.06
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	30.2	7.6

ตารางที่ ก2 .11 ความดันเข้า 140 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 4 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.85	0.02
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.015	0.004
ความขุ่น (NTU)	140.2	0.013
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	78.7	77.62
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	252.2	247.8
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.46	0.08
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.37	0.08
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	26.4	8.6

ตารางที่ ก2 .12 ความดันเข้า 140 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 2 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.83	0.024
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.016	0.005
ความขุ่น (NTU)	126.4	0.015
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	72.54	71.52
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	260.2	258.8
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.36	0.07
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.33	0.08
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	2325	8.25

ตารางที่ ก2 .13 ความดันเข้า 150 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 7 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.08	0.007
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.021	0.002
ความขุ่น (NTU)	145.4	0.012
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	68.1	67.76
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	247.4	245.2
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.46	0.07
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.37	0.07
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	26	7.2

ตารางที่ ก2 .14 ความดันเข้า 150 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 4 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.74	0.011
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.02	0.0038
ความขุ่น (NTU)	130.2	0.013
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	79.62	75.3
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	256.4	253.8
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.45	0.07
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.34	0.06
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	25.2	8.8

ตารางที่ ก2 .15 ความดันเข้า 150 กิโลปาสกาล อัตราการล้างย้อน 2 ลบ.ม/ชม.

พารามิเตอร์	น้ำดิบ	น้ำกรอง
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.740	0.018
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.018	0.004
ความขุ่น (NTU)	130	0.015
สภาพต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต)	79.68	77.10
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต่อ เซนติเมตร)	276.2	257.0
สารอินทรีย์ในน้ำ (ต่อเซนติเมตร)	0.39	0.07
สารอินทรีย์ประเภทฮิวมัสและ ลิกนิน (ต่อเซนติเมตร)	0.362	0.080
สี (แพลทินัม-โคบอลต์)	24.2	10.4

ตารางที่ ก3 ผลการทดลองระยะยาวต่ออัตราการผลิตน้ำ

ตารางที่ ก3.1 ความดัน 150 กิโลปาสกาล

วันที่	7 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง	อัตราการผลิตน้ำ (ลบ.ม/ตร.ม-ชม.)
1	14.520	2.420	0.0573
2	14.510	2.418	0.0573
3	14.520	2.420	0.0573
4	14.510	2.418	0.0573
5	14.470	2.412	0.0571
6	14.450	2.408	0.0571
7	14.420	2.403	0.0570
8	14.380	2.397	0.0568
9	14.340	2.390	0.0566
10	14.300	2.383	0.0565
11	14.260	2.377	0.0563
12	14.220	2.370	0.0562
13	14.160	2.360	0.0559
14	14.120	2.353	0.0558
15	14.060	2.343	0.0555
16	14.020	2.337	0.0554
17	13.970	2.328	0.0552
18	13.910	2.318	0.0549
19	13.850	2.308	0.0547
20	13.830	2.305	0.0546

ตารางที่ ก3.2 ความดัน 140 กิโลปาสกาล

วันที่	7 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง	อัตราการผลิตน้ำ (ลบ.ม/ตร.ม-ชม.)
1	14.520	2.420	0.0573
2	14.510	2.418	0.0573
3	14.520	2.420	0.0573
4	14.510	2.418	0.0573
5	14.470	2.412	0.0571
6	14.450	2.408	0.0571
7	14.420	2.403	0.0570
8	14.380	2.397	0.0568
9	14.340	2.390	0.0566
10	14.300	2.383	0.0565
11	14.260	2.377	0.0563
12	14.220	2.370	0.0562
13	14.160	2.360	0.0559
14	14.120	2.353	0.0558
15	14.060	2.343	0.0555
16	14.020	2.337	0.0554
17	13.970	2.328	0.0552
18	13.910	2.318	0.0549
19	13.850	2.308	0.0547
20	13.830	2.305	0.0546

ตารางที่ ก4 ผลการทดลองระยะยาวต่อปริมาณหลัก

ตารางที่ ก4.1 ความดัน 150 กิโลปาสกาล

วันที่	น้ำดิบ (มก./ล.)	น้ำกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
1	0.905	0.012	98
2	0.890	0.011	98
3	0.940	0.013	98
4	0.876	0.010	98
5	0.671	0.009	98.
6	0.726	0.007	99
7	0.853	0.008	99
8	0.595	0.012	97
9	0.746	0.014	98
10	0.806	0.007	99
11	0.934	0.005	99
12	0.642	0.009	98
13	0.812	0.007	99
14	0.723	0.008	98
15	0.642	0.010	98
16	0.554	0.008	98
17	0.907	0.012	98
18	0.744	0.008	98
19	0.862	0.008	99
20	0.726	0.009	98

ตารางที่ ก4.1 ความดัน 140 กิโลปาสกาล

วันที่	น้ำดิบ (มก./ล.)	น้ำกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
1	0.776	0.011	98
2	0.876	0.012	98
3	0.927	0.008	99
4	0.681	0.011	98
5	0.752	0.014	98
6	0.988	0.013	98
7	0.765	0.011	98
8	0.744	0.015	97
9	0.732	0.008	98
10	0.751	0.007	99
11	0.766	0.006	99
12	0.805	0.012	98
13	0.907	0.012	98
14	0.709	0.010	98
15	0.744	0.011	98
16	0.732	0.009	98
17	0.687	0.013	98
18	0.672	0.011	98
19	0.944	0.009	99
20	0.748	0.008	98



ตารางที่ ก5 ผลการทดลองระยะยาวต่อปริมาณแมงกานีส

ตารางที่ ก5.1 ความดัน 150 กิโลปาสกาล

วันที่	น้ำดิบ (มก./ล.)	น้ำกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
1	0.020	0.002	90
2	0.022	0.001	95
3	0.023	0.002	91
4	0.016	0.001	93
5	0.013	0.002	84
6	0.018	0.003	83
7	0.025	0.004	84
8	0.031	0.003	90
9	0.033	0.004	87
10	0.013	0.001	92
11	0.012	0.002	83
12	0.032	0.002	93
13	0.021	0.003	85
14	0.028	0.004	85
15	0.033	0.004	87
16	0.014	0.001	92
17	0.032	0.003	90
18	0.018	0.002	88
19	0.024	0.004	83
20	0.017	0.002	88

ตารางที่ ก5.2 ความดัน 140 กิโลปาสกาล

วันที่	น้ำดิบ (มก./ล.)	น้ำกรอง (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
1	0.021	0.001	95
2	0.020	0.002	90
3	0.024	0.004	83
4	0.019	0.004	79
5	0.024	0.003	88
6	0.025	0.002	92
7	0.027	0.003	89
8	0.018	0.005	72
9	0.027	0.003	89
10	0.023	0.005	78
11	0.025	0.007	72
12	0.021	0.002	90
13	0.022	0.001	95
14	0.019	0.004	79
15	0.023	0.004	82
16	0.025	0.005	80
17	0.036	0.006	83
18	0.031	0.003	90
19	0.034	0.002	94
20	0.022	0.003	86

ตารางที่ ก6 ผลการทดลองระยะยาวต่อค่าความขุ่น

ตารางที่ ก6.1 ความดัน 150 กิโลปาสกาล

วันที่	น้ำดิบ (NTU)	น้ำกรอง (NTU)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
1	144	0.022	99
2	147	0.021	99
3	136	0.021	99
4	141	0.012	99
5	142	0.021	99
6	139	0.021	99
7	136	0.021	99
8	126	0.021	99
9	132	0.011	99
10	142	0.015	99
11	147	0.023	99
12	138	0.021	99
13	147	0.017	99
14	135	0.021	99
15	137	0.022	99
16	143	0.021	99
17	153	0.012	99
18	148	0.013	99
19	120	0.010	99
20	136	0.013	99

ตารางที่ ก6.2 ความดัน 140 กิโลปาสกาล

วันที่	น้ำดิบ (NTU)	น้ำกรอง (NTU)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
1	135	0.0213	99
2	127	0.0217	99
3	134	0.0189	99
4	127	0.0221	99
5	184	0.0202	99
6	122	0.0201	99
7	96.7	0.0205	99
8	134	0.0189	99
9	124	0.0244	99
10	137	0.0179	99
11	142	0.0115	99
12	152	0.0221	99
13	145	0.0216	99
14	144	0.0207	99
15	152	0.0221	99
16	141	0.0207	99
17	146	0.0224	99
18	136	0.0177	99
19	145	0.0183	99
20	137	0.0221	99

ตารางที่ ก7 ผลการทดลองระยะยาวต่อค่าสารอินทรีย์ในน้ำ

ตารางที่ ก7.1 ความดัน 150 กิโลปาสกาล

วันที่	น้ำดิบ (ต่อเมตร)	น้ำกรอง (ต่อเมตร)	ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
1	0.486	0.083	83
2	0.475	0.084	82
3	0.465	0.082	82
4	0.471	0.087	82
5	0.463	0.083	82
6	0.477	0.075	84
7	0.468	0.077	84
8	0.453	0.072	84
9	0.464	0.078	83
10	0.466	0.074	84
11	0.483	0.086	82
12	0.477	0.092	81
13	0.463	0.085	82
14	0.446	0.086	81
15	0.464	0.092	80
16	0.477	0.077	84
17	0.468	0.094	80
18	0.477	0.086	82
19	0.488	0.092	81
20	0.451	0.098	78

ตารางที่ ก7.2 ความดัน 140 กิโลปาสกาล

วันที่	น้ำดิบ (ต่อเมตร)	น้ำกรอง (ต่อเมตร)	ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
1	0.380	0.101	73
2	0.447	0.092	79
3	0.570	0.096	83
4	0.468	0.109	77
5	1.529	0.095	94
6	0.404	0.089	78
7	0.340	0.084	75
8	0.408	0.099	76
9	0.485	0.107	78
10	0.550	0.090	84
11	0.472	0.107	77
12	0.455	0.096	79
13	0.448	0.095	79
14	0.472	0.087	82
15	0.483	0.092	81
16	0.477	0.087	82
17	0.443	0.110	75
18	0.462	0.107	77
19	0.472	0.093	80
20	0.471	0.097	79

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองระยะยาวต่อค่าสารอินทรีย์ประเภทอีวมัสและลิกนิน

ตารางที่ ก.8.1 ความดัน 150 กิโลปาสกาล

วันที่	น้ำดิบ (ต่อเมตร)	น้ำกรอง (ต่อเมตร)	ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
1	0.378	0.076	80
2	0.364	0.073	80
3	0.341	0.071	79
4	0.362	0.082	77
5	0.366	0.093	75
6	0.357	0.087	76
7	0.355	0.076	79
8	0.337	0.065	81
9	0.362	0.068	81
10	0.355	0.074	79
11	0.356	0.082	77
12	0.344	0.068	80
13	0.352	0.071	80
14	0.332	0.065	80
15	0.362	0.073	80
16	0.358	0.081	77
17	0.366	0.074	80
18	0.348	0.082	76
19	0.355	0.074	79
20	0.343	0.068	80

ตารางที่ ก8.2 ความดัน 140 กิโลปาสกาล

วันที่	น้ำดิบ (ต่อเมตร)	น้ำกรอง (ต่อเมตร)	ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
1	0.306	0.071	77
2	0.351	0.064	82
3	0.468	0.067	86
4	0.374	0.066	82
5	0.325	0.063	81
6	0.337	0.067	80
7	0.275	0.064	77
8	0.323	0.051	84
9	0.383	0.056	85
10	0.346	0.061	82
11	0.336	0.058	83
12	0.362	0.053	85
13	0.362	0.064	82
14	0.336	0.054	84
15	0.344	0.048	86
16	0.325	0.058	82
17	0.366	0.055	85
18	0.358	0.075	79
19	0.338	0.064	81
20	0.348	0.052	85



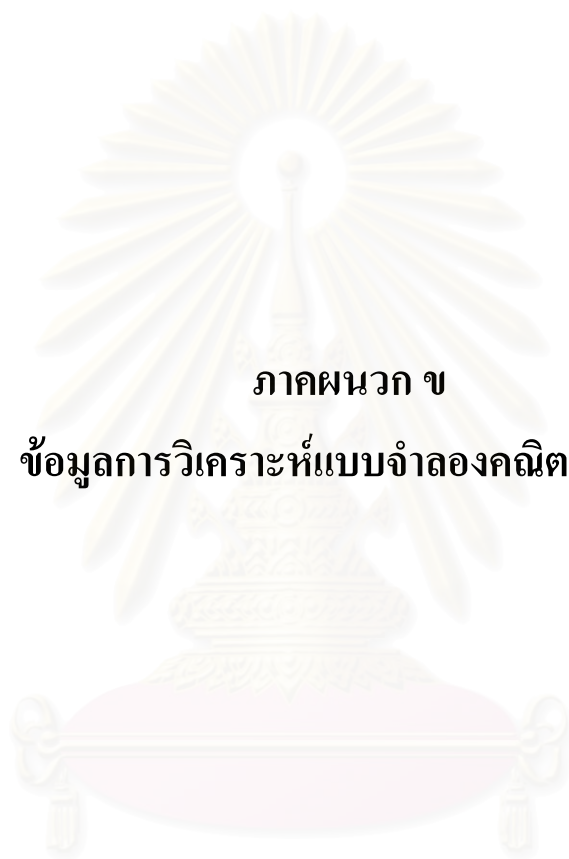
ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองระยะยาวต่อสี

ตารางที่ ก9.1 ความดัน 150 กิโลปาสกาล

วันที่	น้ำดิบ (แพลตินัม-โคบอลต์)	น้ำกรอง (แพลตินัม-โคบอลต์)	ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
1	27	5	81
2	24	5	79
3	21	6	71
4	15	1	93
5	27	6	78
6	20	3	85
7	32	5	84
8	21	7	67
9	29	7	76
10	24	7	71
11	32	4	88
12	27	6	78
13	30	7	77
14	24	5	79
15	33	6	82
16	30	7	77
17	32	7	78
18	27	6	78
19	24	7	71
20	22	5	77

ตารางที่ ก9.2 ความดัน 140 กิโลปาสกาล

วันที่	น้ำดิบ (แพลตินัม-โคบอลต์)	น้ำกรอง (แพลตินัม-โคบอลต์)	ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
1	26	7	73
2	27	9	67
3	26	7	73
4	27	7	74
5	22	7	68
6	26	9	65
7	30	8	73
8	27	7	74
9	26	8	69
10	30	9	70
11	22	7	68
12	24	9	63
13	27	7	74
14	24	7	71
15	31	9	71
16	22	7	68
17	24	9	63
18	31	7	77
19	27	7	74
20	22	8	64



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการวิเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ข1 แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน

$$J_w = \frac{\Delta P}{\mu R_t}$$

## ตารางที่ ข1.1 หาคความต้านทานรวม

ความดัน (ปาสคาล)	แอลฟา	ความหนืดน้ำ (ปาสคาล·วินาที)	แรงเฉือน (ปาสคาล)
100000	0.00798	0.0427	293.47373
110000	0.00798	0.0474	290.82982
120000	0.00798	0.0527	285.12152
130000	0.00798	0.0582	280.12117
140000	0.00798	0.0634	276.63413
150000	0.00798	0.0695	270.32030

## ข2 แรงเฉือนขณะการล้าที่ย้อน

$$\tau_w = \frac{\Delta P d}{4L}$$

## ตารางที่ ข2.2 หาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นขณะล้าที่ย้อน

อัตราการล้าที่ย้อน (ลบ.ม/ชม.)	แรงเฉือน (ปาสคาล)
7	$\tau_w = \frac{(170000 - 155000) \times 0.6}{4 \times 1.4} = 1607$ ปาสคาล
4	$\tau_w = \frac{(130000 - 118000) \times 0.6}{4 \times 1.4} = 1285.7$ ปาสคาล
2	$\tau_w = \frac{(70000 - 50000) \times 0.6}{4 \times 1.4} = 857$ ปาสคาล

### ข3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการล้างย้อนกับความต้านทาน

$$R_t = \frac{\Delta P}{1.157 \mu \tau^{0.1457}}$$

#### ตารางที่ ข3.1 หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความต้านทานรวม

ความดัน (ปาสคาล)	แอลฟา	ความหนืดน้ำ (ปาสคาล·วินาที)	แรงเฉือน (ปาสคาล)	ความ ต้านทาน ทั้งหมด (ต่อเมตร)
100000	0.1457	0.00798	36937.7163	293.47373
110000	0.1457	0.00798	41000.8651	290.82982
120000	0.1457	0.00798	45623.7024	285.12152
130000	0.1457	0.00798	50307.9585	280.12117
140000	0.1457	0.00798	54860.7266	276.63413
150000	0.1457	0.00798	60152.2491	270.32020

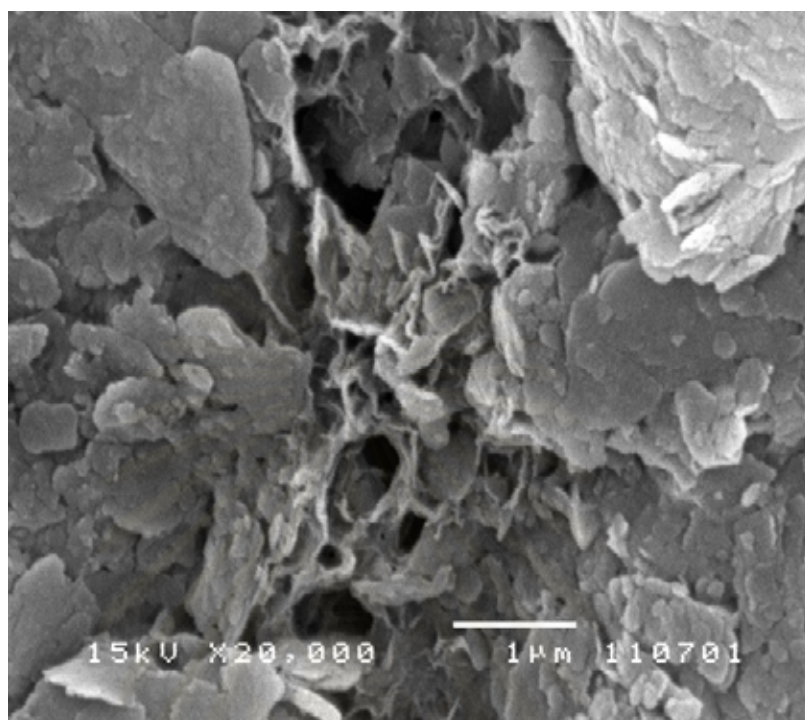
### ข4 แบบจำลองรูปพูน

$$\frac{J_v}{J_o} = \left( 1 + \frac{2\alpha_{cake} J_o C_b}{R_m} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

โดยที่

$$\alpha_{cake} = \frac{180(1 - \varepsilon_\alpha)}{\rho_p d_p^2 \varepsilon_\alpha^2}$$

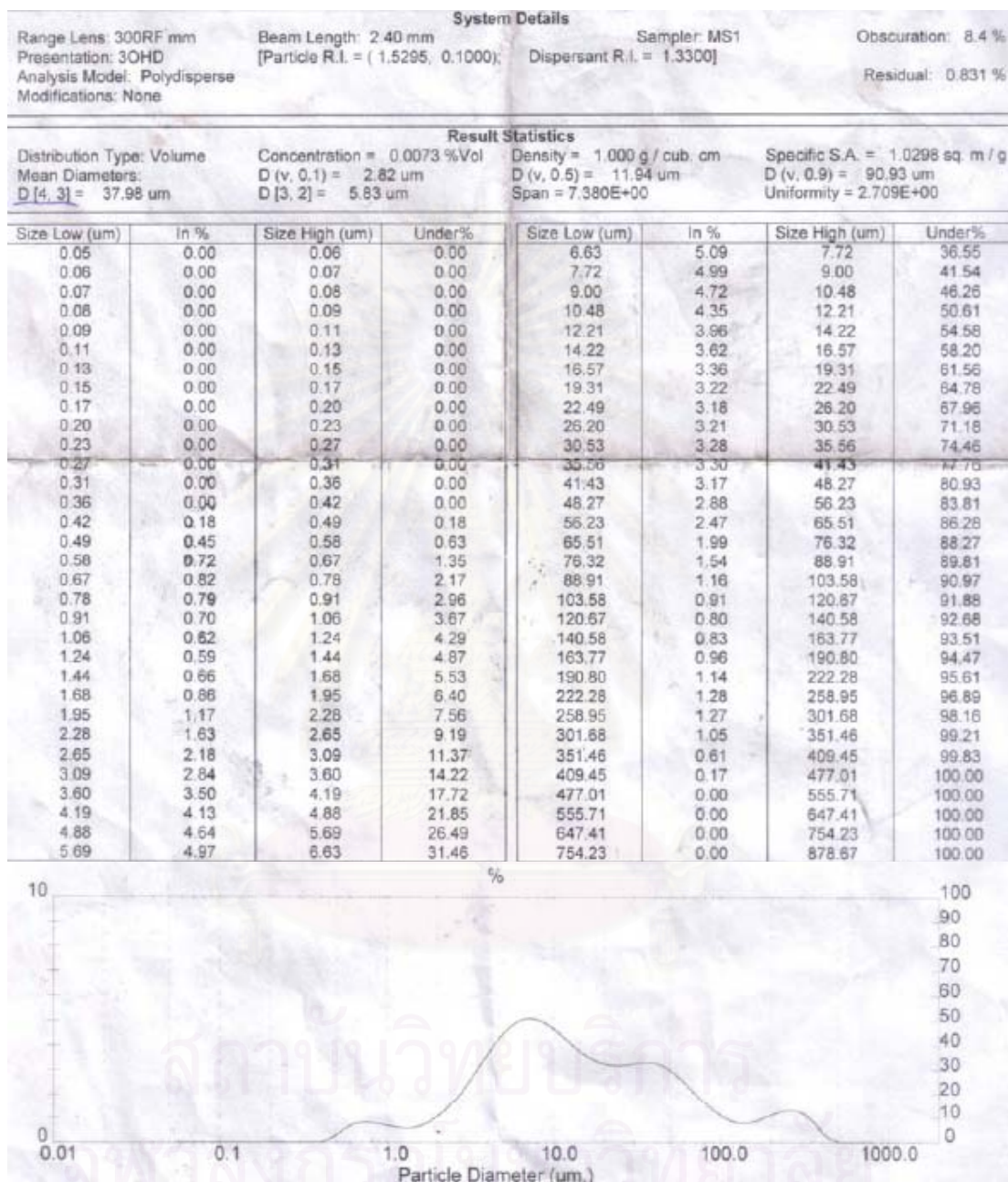
ข5 ภาพถ่ายของเค็กบนแผ่นเมมเบรนด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกลาด



รูปที่ ข5.1 ภาพถ่ายจากการเกาะตัวของอนุภาคต่างๆ ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกลาด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข6 ผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคในน้ำ



รูปที่ ข6.1 ข้อมูลการวิเคราะห์หอนุภาคในน้ำ

ข7 ผลการวิเคราะห์หาความพรุนของอนุภาคบนผิวเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชั่น

ASAP 2000 V3.03		Micromeritics Instrument Corporation		PAGE 15
SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: BET /35		START 13:15:52 03/15/08		
SAMPLE ID: gfc		COMPL 15:41:13 03/01/08		
SUBMITTER:		REPR 16:12:32 03/01/08		
OPERATOR: saksit		SAMPLE WT: 0.3943 g		
UNIT NUMBER: 1		FREE SPACE: 42.9676 cc		
ANALYSIS GAS: Nitrogen		EQUIL INTRVL: 10 sec		
SUMMARY REPORT				
AREA				
BET SURFACE AREA:		5.8813	sq. m/g	
LANGMUIR SURFACE AREA:		8.3926	sq. m/g	
SINGLE POINT SURFACE AREA AT P/P <sub>0</sub> 0.2001:		5.4120	sq. m/g	
BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:		7.0095	sq. m/g	
BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:		7.8567	sq. m/g	
MICROPORE AREA:		-1.2281	sq. m/g	
VOLUME				
SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORES LESS THAN 1274.6752 A DIAMETER AT P/P <sub>0</sub> 0.9846:		0.017831	cc/g	
BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:		0.019249	cc/g	
BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:		0.019212	cc/g	
MICROPORE VOLUME:		-0.000697	cc/g	
PORE SIZE				
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A BY BET):		121.2750	A	
BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A):		109.8477	A	
BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A):		97.8138	A	

รูปที่ ข7.1 ผลความพรุนของอนุภาคบนผิวเมมเบรนโดยแทนที่ด้วยก๊าซไนโตรเจน



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน เกิดวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อพ.ศ. 2549



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย