


ระบบนาโนฟิลเตรชันขนาดทดสอบสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำประปา



นางสาว ปรภาภรณ์ ผาติสุนทร

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3714-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PILOT-SCALE NANOFILTRATION SYSTEM FOR NOM REMOVAL IN WATER SUPPLY



Miss Parapaporn Phatisoonton

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3714-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระบบนาโนฟิลเตรชันขนาดทดสอบสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์
ธรรมชาติในน้ำประปา

โดย

นางสาว ปรภาภรณ์ ผาติสุนทร

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้มหาวิทยาลัยฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนิก)

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปรภภาภรณั ฝาดิสนุทร : ระบบนาโนฟิลเตรชันขนาดทดสอบสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์
 ธรรมชาติในน้ำประปา. (PILOT-SCALE NANOFILTRATION SYSTEM FOR NOM
 REMOVAL IN WATER SUPPLY) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต
 รัตนธรรมสกุล, 188 หน้า, ISBN 974-17-3714-9

สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter, NOM) เป็นสารที่พบโดยทั่วไปใน
 กระบวนการผลิตน้ำประปา ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสารเคมีที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาและทำให้
 เกิดสารอันตราย เช่น ไตรฮาโลมีเทน งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงกรกำจัดสารอินทรีย์
 ธรรมชาติในน้ำประปด้วยระบบนาโนฟิลเตรชัน โดยพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความดัน
 เปอร์เซ็นต์ Recovery และการเกิดฟาวลิง โดยใช้ที่ผ่านกระบวนการกรองด้วยถังกรองทรายเป็น
 น้ำเข้าระบบ และมีระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment เมื่อใช้น้ำจากระบบการถ้
 ตกตะกอนเป็นน้ำเข้าระบบ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันของ
 น้ำที่เพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบที่ต่อเนื่องคือที่ความดัน 4 บาร์ เปอร์เซ็นต์
 Recovery 50% โดยสามารถให้ค่าฟลักซ์ที่ 0.0418 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$ สามารถเดินระบบแบบต่อเนื่องได้
 390 ชั่วโมง ค่าฟลักซ์ของน้ำที่ผลิตได้จึงลดลงเป็น 40% ของค่าฟลักซ์เริ่มต้น หลังจากที่ทำความ
 สะอาดเมมเบรนพบว่า ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีค่าลดลงเป็น 0.0342 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$ ที่ความ
 ดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ที่เท่ากัน แสดงให้เห็นถึงการเกิดการอุดตันในรูพรุนของเมมเบรน
 และเมื่อพิจารณาในด้านค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติพบว่า จากการเดินระบบ
 สามารถลดความต้องการคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคได้ประมาณร้อยละ 50 ของความต้องการ
 คลอรีนก่อนที่จะเข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการซื้อคลอรีนในกระบวน
 การฆ่าเชื้อโรค และยังสามารถลดปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนที่เกิดขึ้นสูงสุดได้ประมาณร้อยละ 90
 เพราะวาระบบนาโนฟิลเตรชันกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่เป็นสารตั้งต้นของสารไตรฮาโลมีเทน
 ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารไตรฮาโลมีเทน สารอินทรีย์ธรรมชาติ
 พบว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ สามารถใช้ปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติ ในการตรวจ
 สอบติดตามปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนได้

ภาควิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิติ.....

สาขาวิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2546.....

4470389121: MAJOR ENVIRONMENT ENGINEERING

KEYWORD: NOM / NANOFILTRATION / MEMBRANE

PARAPAPORN PHATISOONTON : PILOT-SCALE NANOFILTRATION SYSTEM
FOR NOM REMOVAL IN WATER SUPPLY. THESIS ADVISOR: ASST. PROF.
CHAVALIT RATANATAMSAKUL, Ph.D., 188 pp. ISBN 974-17-3714-9

Natural Organic Matter (NOM) is an organic substance found generally in water that used in water supply production process. It is required chemical substance for disinfection. The more natural organic matter in water, the more chemical substance is required. NOM plays important role in producing many hazardous substances such as Trihalomethane in water supply.

The purpose of this research, therefore, is to study an effective way to remove natural organic matter using Nanofiltration system. Considering the pressure, percent recovery, fouling process, the experiment was conducted using sand-filtered water as influent water. Micro-filtration system is a pre-treatment system when uses water from sedimentation tank as influent water.

From the study, pressure at 4 bar and 50 percent recovery, is the suitable condition for continuous running system, that gave flux value as $0.0418 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-hr}$ and 390 hrs for the continuous running system. Flux reduces by 40 percent of initial value. After cleaning membrane, flux reduces as 0.0342 at the same pressure and percent recovery that means there have a pore blocking in membrane. The pilot-scale plant required chlorine for disinfection approximately 50 percent less than that in conventional process of water supply treatment, thus, reducing cost of chlorine. It also reduced Trihalomethane by 90 percent. This research concludes that as the relationship between the concentration of Trihalomethane and natural organic matter is significant, we can use natural organic matter to monitor Trihalomethane.

Department Environment Engineering

Student's signature

Field of study Environment Engineering

Advisor's signature

Academic year 2003

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช กรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภา ขาวเขียวร และอาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนบุรี ที่ตรวจสอบ และให้คำแนะนำ จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ การประสานครหลวง ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยครั้งนี้ และเจ้าหน้าที่ทุก ๆ ท่าน ในส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ฝ่ายควบคุมการผลิตน้ำ และส่วนวิจัยและพัฒนาคุณภาพน้ำ ฝ่ายวางแผนการผลิตและควบคุมคุณภาพ

ขอขอบคุณ บริษัท โกลู โคชัน จำกัด ที่อนุเคราะห์ระบบไมโครฟิลเตรชัน

ขอขอบคุณ ปาล์ม พี่อ้อย พี่ต๋ม บี พี่กิม พี่เอก หน้อย ม่วย โป่ง อ้อ ย้อย เพื่อน ๆ พี่ ๆ ภาค วิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน

งานวิจัยชิ้นนี้ได้รับการสนับสนุนร่วมจากโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณพ่อและแม่ที่อบรมสั่งสอนเป็นกำลังใจในทุก ๆ ด้าน ด้วยดีตลอดมา ดังนั้นผู้เขียนจึงขอมอบคุณความดีทั้งหมดของงานวิจัยชิ้นนี้ให้กับท่านทั้งสอง

สถาบันวิจัยปฏิบัติการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 NOM (สารอินทรีย์ธรรมชาติ).....	4
2.1.1 เหตุที่ต้องกำจัด NOM ออกจากน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปา.....	5
2.1.2 ลักษณะสมบัติของสารฮิวมิก.....	9
2.1.3 พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนในการวัดปริมาณของ NOM.....	12
2.2 กระบวนการที่ใช้ในการกำจัด NOM.....	13
2.2.1 การกำจัด NOM โดยใช้การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการโคแอกกูเลชัน....	13
2.2.2 การกำจัด NOM โดยกระบวนการดูดติดผิวคาร์บอนแบบแกร็ด.....	14
2.2.3 การกำจัด NOM โดยใช้กระบวนการเติมโอโซน.....	15
2.3 กระบวนการเมมเบรน.....	17
2.3.1 กระบวนการ NF.....	20
2.3.2 ประวัติความเป็นมาของกระบวนการ NF.....	20
2.3.3 คุณสมบัติของ NF เมมเบรน.....	21
2.3.4 กลไกในการทำงานของกระบวนการ NF.....	23
2.3.5 ฟลักซ์และการต้านทานต่อการอุดตันของ NF เมมเบรน.....	26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.6	โมดูลชนิดต่าง ๆ ของ NF เมมเบรน.....	26
2.3.7	โมเดลสำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำและสารละลายผ่าน NF เมมเบรน.....	29
2.3.8	NF เมมเบรนบางชนิดที่มีขายในท้องตลาด.....	34
2.3.9	ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการ NF.....	34
2.4	งานวิจัยที่ผ่านมา.....	49
บทที่ 3	แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย	
3.1	แผนการวิจัย.....	54
3.2	การติดตั้งอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง.....	55
3.2.1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	56
3.3	ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	58
3.4	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	62
3.5	พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการวัดและวิเคราะห์.....	63
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1	ลักษณะสมบัติของน้ำที่ใช้ในการวิจัย.....	64
4.2	ผลการศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบต่อเนื่อง.....	64
4.2.1	ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ที่ใช้.....	64
4.3	ผลการทดลองเดินระบบต่อเนื่องในขนาดทดสอบในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน.....	76
4.3.1	เหตุผลของการเลือกใช้ปัจจัยต่าง ๆ ในการเดินระบบ.....	76
4.3.2	ผลของค่าฟลักซ์ต่อการเดินระบบต่อเนื่อง.....	77
4.3.3	ผลของการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ.....	77

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.4 ผลของการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อค่ายูวี254.....79

4.3.5 ผลของการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อค่าความขุ่น.....81

4.3.6 ผลของการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อค่าความนำไฟฟ้า.....82

4.3.7 ผลของการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อค่าความกระด้าง.....87

4.4 การล้างเมมเบรนและการเดินระบบนาโนฟิลเตรชันอย่างต่อเนื่อง

 ด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน.....88

 4.4.1 ผลของการล้างเมมเบรนต่อค่าฟลักซ์.....88

 4.4.2 ผลของการล้างเมมเบรนต่อค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ.....89

 4.4.3 ผลของการล้างเมมเบรนต่อค่ายูวี 254.....91

 4.4.4 ผลของการล้างเมมเบรนต่อค่าความขุ่น.....92

 4.4.5 ผลของการล้างเมมเบรนต่อค่าความนำไฟฟ้า.....94

 4.4.6 ผลของการล้างเมมเบรนต่อค่าความกระด้าง.....98

4.5 ผลการระบบต่อเนื่องของระบบนาโนฟิลเตรชันเมื่อใช้ระบบไมโครฟิลเตรชัน

 เป็นระบบ Pre-Treatment.....99

 4.5.1 ผลของการเดินระบบต่อค่าฟลักซ์.....101

 4.5.2 ผลของการเดินระบบต่อการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ.....101

 4.5.3 ผลของการเดินระบบต่อการกำจัดค่ายูวี 254.....104

 4.5.4 ผลของการเดินระบบต่อการกำจัดค่าความขุ่น.....105

 4.5.5 ผลของการเดินระบบต่อค่าความนำไฟฟ้า.....106

 4.5.6 ผลของการเดินระบบต่อค่าความกระด้าง.....108

 4.5.7 ผลของการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย.....111

4.6 ผลการเดินระบบต่อเนื่องต่อการกำจัดอิมัลชันในน้ำ.....113

 4.6.1 ผลการเดินระบบต่อเนื่องต่อการกำจัดอิมัลชันในน้ำ.....113

 4.6.2 ผลการเดินระบบต่อเนื่องต่อการกำจัดอิมัลชันในน้ำ.....115

4.7 ผลการศึกษาการลดความต้องการคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคเปรียบเทียบ

 ระหว่างน้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชันกับน้ำที่ไม่ได้ผ่านระบบ.....117

4.8 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์ละลายน้ำ

 ค่ายูวี 254 และค่าไตรฮาโลมีเทน.....120

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.8.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดกับ ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ.....	120
4.8.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำกับค่ายูวี 254....	121
4.8.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าไตรฮาโลมีเทนกับสารอินทรีย์ ละลายน้ำและค่ายูวี 254.....	122
4.9 การวิเคราะห์ข้อมูลและเกณฑ์ในการออกแบบ.....	128
4.9.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการเดินระบบ.....	128
4.9.2 เกณฑ์การออกแบบระบบนาโนฟิลเตรชัน.....	130
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	131
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไป.....	132
รายการอ้างอิง.....	134
ภาคผนวก.....	139
ภาคผนวก ก ข้อมูลของผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม.....	140
ภาคผนวก ข ข้อมูลของผลการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง.....	148
ภาคผนวก ค ข้อมูลของผลการล้างเมมเบรนและการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง.....	153
ภาคผนวก ง ข้อมูลผลการเดินระบบอย่างต่อเนื่องเมื่อใช้ระบบไมโครฟิลเตรชัน เป็นระบบ Pre-Treatment.....	158
ภาคผนวก จ ข้อมูลผลการศึกษาหาความต้องการคลอรีน.....	166
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทน.....	170
ภาคผนวก ช ข้อมูลแสดงรายการค่าใช้จ่าย.....	186
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	188

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 น้ำหนักโมเลกุลของกรดฮิวมิก.....	10
ตารางที่ 2.2 สรุปผลการกำจัดสารที่ทำให้เกิด THMs โดยใช้โอโซน.....	15
ตารางที่ 2.3 สรุปข้อดีและข้อเสียของการกำจัด NOM โดยกระบวนการต่าง ๆ.....	16
ตารางที่ 2.4 สรุปผลจากงานวิจัยโดยใช้กระบวนการ 3 ชนิดในการกำจัด NOM.....	17
ตารางที่ 2.5 ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการเมมเบรนแบบต่าง ๆ.....	19
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของกระบวนการเมมเบรนต่าง ๆ สำหรับการบำบัดน้ำเสีย.....	19
ตารางที่ 2.7 NF เมมเบรนบางชนิดที่มีขายในท้องตลาดในขณะนี้.....	38
ตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติของ NF เมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	55
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของความดันและ เปอร์เซ็นต์ Recovery ที่ใช้ในการดำเนินระบบ.....	57
ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของการดำเนินระบบแบบต่อเนื่อง และการบำบัดน้ำ Influent ที่แตกต่างกัน.....	57
ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาการเดินระบบต่อเนื่อง.....	59
ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงการเดินระบบต่อเนื่องโดยมีระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment.....	60
ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงการทดลองเพื่อศึกษาการลดความต้องการคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค เปรียบเทียบระหว่างน้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชันกับน้ำที่เข้าระบบ.....	61
ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์ละลายน้ำ ค่ายูวี 254 และค่าไตรฮาโลมีเทน โดยการทำการกราฟเปรียบเทียบ.....	61
ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการวัดและวิเคราะห์.....	63
ตารางที่ 4.1 สมการแบบจำลองการละลาย-การแพร่ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ และความดันที่ใช้ที่เปอร์เซ็นต์ Recovery ต่าง ๆ.....	67
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการเลือกใช้ในการเดินระบบต่อเนื่อง.....	76
ตารางที่ 4.3 ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมดและโคลิฟอร์มแบคทีเรียของน้ำจากกระบวนการ กรองทราย ระบบไมโครฟิลเตรชันและระบบนาโนฟิลเตรชัน.....	111
ตารางที่ 4.4 ปริมาณคลอรีนที่ใช้เพื่อทำให้น้ำมีค่าคลอรีนอิสระเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	117
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าที่ใช้ในการตรวจติดตามสารไตรฮาโลมีเทน.....	128
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินระบบ.....	129
ตารางที่ 4.7 สรุปเกณฑ์การออกแบบระบบนาโนฟิลเตรชัน.....	130

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1	กระบวนการแยกและวิเคราะห์ส่วนประกอบของ NOM..... 11
รูปที่ 2.2	รูปแสดงโครงสร้างของกรดฮิวมิค..... 12
รูปที่ 2.3	ความสามารถในการกำจัดสารขนาดต่าง ๆ ของเมมเบรนแต่ละชนิด..... 18
รูปที่ 2.4	ความสามารถในการแยกของ NF เมมเบรน..... 21
รูปที่ 2.5	รูปแสดงภาคตัดขวางของ Composite NF เมมเบรนชนิดหนึ่ง..... 22
รูปที่ 2.6	ช่วงค่าของ MWCO ของ NF ชนิดต่าง ๆ 23
รูปที่ 2.7	ออสโมซิส (ก) และ ออสโมซิสย้อนกลับ (ข)..... 25
รูปที่ 2.8	Plate and Frame Module..... 27
รูปที่ 2.9	Hollow Fiber Module.....28
รูปที่ 2.10	Spiral Wound Module29
รูปที่ 2.11	Concentration Polarization ที่เกิดขึ้นในระบบ NF..... 35
รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์ของฟลักซ์กับระยะเวลาเดินระบบ 36
รูปที่ 2.13	ฟลักซ์กับแรงดันที่ใช้สำหรับ NF เมมเบรน (NF70)..... 40
รูปที่ 2.14	ผลของแรงดันต่อค่าฟลักซ์ สำหรับเมมเบรนชนิด DS5..... 40
รูปที่ 2.15	ผลของแรงดันที่ใช้และความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบกับ เปอร์เซ็นต์การกำจัด โดย NF เมมเบรน 41
รูปที่ 2.16	ผลของอุณหภูมิต่อค่าฟลักซ์..... 42
รูปที่ 2.17	ผลของพีเอชกับ เปอร์เซ็นต์การกำจัดของกรดอะมิโน โดย NF เมมเบรน..... 43
รูปที่ 2.18	พฤติกรรมของกรดอะมิโนที่จุดได้หรือสูงกว่า Isoelectric Point..... 44
รูปที่ 2.19	ผลของพีเอชต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ สำหรับเมมเบรนชนิด NF40 ในการบำบัดส่วนผสมของสารอินทรีย์อันตราย..... 44
รูปที่ 2.20	ผลของสารอื่น ๆ ในน้ำต่อ เปอร์เซ็นต์การกำจัด โดย NF เมมเบรน..... 45
รูปที่ 2.21	ผลของสารแขวนลอยต่อค่าฟลักซ์ในการกำจัดกรดฮิวมิค แรงดันที่ใช้ 20 บาร์ MWCO 6000.....46
รูปที่ 2.22	การเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบของ NF เมมเบรน.....46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงของค่า K_w กับเวลาในการดำเนินระบบ.....	47
รูปที่ 2.24 รูปแสดงการกรองตามปกติ (ซ้าย) และ Crossflow Filtration (ขวา).....	48
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย.....	54
รูปที่ 3.2 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง.....	55
รูปที่ 3.3 Flow Diagram สำหรับการทดลองขั้นที่ 1 และขั้นที่ 2.....	58
รูปที่ 3.4 Flow Diagram สำหรับการทดลองขั้นที่ 3.....	58
รูปที่ 3.5 ระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง.....	62
รูปที่ 3.6 ระบบไมโครฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง.....	62
รูปที่ 4.1 พารามิเตอร์แสดงคุณภาพน้ำที่ผ่านขั้นตอนการกรองทรายของโรงผลิตน้ำประปา บางเขนในปี พ.ศ. 2545-2546.....	65
รูปที่ 4.2 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อค่าฟลักซ์.....	66
รูปที่ 4.3 ผลของค่าความดันและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบต่อค่าฟลักซ์ที่เปอร์เซ็นต์ Recovery ต่างๆ.....	66
รูปที่ 4.4 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่ออัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ.....	68
รูปที่ 4.5 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่ออัตราการเวียนกลับน้ำ concentrate เข้าระบบ.....	68
รูปที่ 4.6 ค่าการดูดกลืนแสง UV ในช่วงความยาวคลื่น 200-310 nm.....	70
รูปที่ 4.7 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดค่า UV254.....	70
รูปที่ 4.8 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัด ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ.....	71
รูปที่ 4.9 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัด ค่าความนำไฟฟ้า.....	72
รูปที่ 4.10 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	73
รูปที่ 4.11 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัด ค่าความกระด้างทั้งหมด.....	74
รูปที่ 4.12 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าความ กระด้างในรูปของแคลเซียม.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.13 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าความ กระด้างในรูปของแมกนีเซียม.....	75
รูปที่ 4.14 ผลของค่าฟลักซ์ต่อการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	77
รูปที่ 4.15 ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	78
รูปที่ 4.16 ร้อยละการกำจัดค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำของเมมเบรนที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	79
รูปที่ 4.17 ค่ายูวี 254 ของน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	80
รูปที่ 4.18 ร้อยละการกำจัดค่ายูวี 254 ของเมมเบรนที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	80
รูปที่ 4.19 ค่าความขุ่นของน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	81
รูปที่ 4.20 ร้อยละการกำจัดค่าความขุ่น.....	82
รูปที่ 4.21 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	83
รูปที่ 4.22 ร้อยละการกำจัดค่าความนำไฟฟ้า.....	84
รูปที่ 4.23 ค่าความกระด้างทั้งหมดของน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	84
รูปที่ 4.24 ร้อยละการกำจัดความกระด้างทั้งหมด.....	85
รูปที่ 4.25 ค่าความกระด้างในรูปของแคลเซียมของน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	85
รูปที่ 4.26 ร้อยละการกำจัดความกระด้างในรูปของแคลเซียม.....	86
รูปที่ 4.27 ค่าความกระด้างในรูปของแมกนีเซียมของน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	86
รูปที่ 4.28 ร้อยละการกำจัดความกระด้างในรูปของแมกนีเซียม.....	87
รูปที่ 4.29 ผลของค่าฟลักซ์ต่อการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	89
รูปที่ 4.30 ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	90
รูปที่ 4.31 ร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	90
รูปที่ 4.32 ค่ายูวี 254 ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	91
รูปที่ 4.33 ร้อยละการกำจัดค่ายูวี 254 ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	92
รูปที่ 4.34 ค่าความขุ่นที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	93
รูปที่ 4.35 ร้อยละการกำจัดความขุ่นที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	93
รูปที่ 4.36 ค่าความนำไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.37 ร้อยละการกำจัดความนำไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	95
รูปที่ 4.38 ค่าความกระด้างทั้งหมดที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	95
รูปที่ 4.39 ร้อยละการกำจัดความกระด้างทั้งหมดที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	96
รูปที่ 4.40 ค่าความกระด้างในรูปของแคลเซียมที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	96
รูปที่ 4.41 ร้อยละการกำจัดความกระด้างในรูปของแคลเซียมที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการ ล้าง.....	97
รูปที่ 4.42 ค่าความกระด้างในรูปของแมกนีเซียมที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง.....	97
รูปที่ 4.43 ร้อยละการกำจัดความกระด้างในรูปของแมกนีเซียมที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลัง การล้าง.....	98
รูปที่ 4.44 พารามิเตอร์แสดงคุณภาพน้ำที่ผ่านขั้นตอนการตกตะกอนของโรงผลิตน้ำประปา บางเขน ในปี พ.ศ. 2545-2546.....	100
รูปที่ 4.45 ผลต่อค่าฟลักซ์ของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	101
รูปที่ 4.46 สารอินทรีย์ละลายน้ำของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	102
รูปที่ 4.47 ร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบ ไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	103
รูปที่ 4.48 ค่ายูวี ₂₅₄ ของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	104
รูปที่ 4.49 ร้อยละการกำจัดค่ายูวี ₂₅₄ ของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชัน เป็น Pre-treatment.....	104
รูปที่ 4.50 ค่าความขุ่นของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	105
รูปที่ 4.51 ร้อยละการกำจัดค่าความขุ่นของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบ ไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	106
รูปที่ 4.52 ค่าความนำไฟฟ้าของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	107

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.53 ร้อยละการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบ ไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	107
รูปที่ 4.54 ค่าความกระด้างทั้งหมดของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโคร ฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	108
รูปที่ 4.55 ร้อยละการกำจัดความกระด้างทั้งหมดของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....]	109
รูปที่ 4.56 ค่าความกระด้างในรูปของแคลเซียมของระบบนาโนฟิลเตรชัน ที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	109
รูปที่ 4.57 ร้อยละการกำจัดค่าความกระด้างในรูปของแคลเซียมของระบบ นาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	110
รูปที่ 4.58 ค่าความกระด้างในรูปของแมกนีเซียมของระบบนาโนฟิลเตรชัน ที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	110
รูปที่ 4.59 ร้อยละการกำจัดค่าความกระด้างในรูปของแมกนีเซียมของ ระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment.....	111
รูปที่ 4.60 แสดงค่าฟลูออไรด์ในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ.....	113
รูปที่ 4.61 แสดงค่าคลอไรด์ในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ.....	113
รูปที่ 4.62 แสดงค่าไนเตรทในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ.....	113
รูปที่ 4.63 แสดงค่าซัลเฟตในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ.....	114
รูปที่ 4.64 ร้อยละการกำจัดออลอนลบในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ.....	114
รูปที่ 4.65 แสดงค่าแคลเซียมในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ.....	115
รูปที่ 4.66 แสดงค่าแมกนีเซียมในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ.....	115
รูปที่ 4.67 ร้อยละการกำจัดออลอนบวกในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ.....	116
รูปที่ 4.68 การเติมคลอรีนให้กับน้ำหลังจากการเดินระบบ 80 ชั่วโมง.....	118
รูปที่ 4.69 การเติมคลอรีนให้กับน้ำหลังการเดินระบบ 160 ชั่วโมง.....	118
รูปที่ 4.70 การเติมคลอรีนให้กับน้ำหลังการเดินระบบ 240 ชั่วโมง.....	118
รูปที่ 4.71 การเติมคลอรีนให้กับน้ำหลังการเดินระบบ 320 ชั่วโมง.....	119
รูปที่ 4.72 การเติมคลอรีนให้กับน้ำหลังการเดินระบบ 390 ชั่วโมง.....	119

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดกับค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ....	120
รูปที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายูวี 254 กับค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ.....	121
รูปที่ 4.75 ค่าไดรฮาโลมีเทนของน้ำที่เข้าระบบ.....	123
รูปที่ 4.76 ค่าไดรฮาโลมีเทนของน้ำ permeate.....	123
รูปที่ 4.77 ค่าไดรฮาโลมีเทนของน้ำ concentrate.....	123
รูปที่ 4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์ละลายน้ำกับค่าไดรฮาโลมีเทน.....	124
รูปที่ 4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดรฮาโลมีเทนกับค่ายูวี 254.....	125
รูปที่ 4.80 กราฟแสดงการทำนายค่าไดรฮาโลมีเทน.....	126
รูปที่ 4.81 แสดงค่าไดรฮาโลมีเทนตามมาตรฐานองค์การอนามัยโลก.....	127

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ปัญหาของการมี NOM อยู่ในแหล่งน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา เป็นที่ทราบมาตั้งแต่ก่อนปี ค.ศ. 1970 โดยในช่วงแรก งานวิจัยเพื่อศึกษาวิธีการในการกำจัด NOM ออกจากน้ำ เนื่องจาก NOM เป็นสารที่ก่อให้เกิดสีในแหล่งน้ำ ต่อมาจึงได้พบปัญหาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ NOM ในน้ำ ได้แก่ ปริมาณความต้องการของสารโคแอกกูแลนต์และสารฆ่าเชื้อโรคที่สูงขึ้น ความสามารถในการจับโลหะและสารอินทรีย์เกลียดน้ำ การก่อให้เกิดการกัดกร่อนและการเจริญเติบโตขึ้นใหม่ของแบคทีเรียในน้ำ

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาหรือที่เรียกว่า Conventional Process ที่ประกอบไปด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟลอคคูเลชัน การตกตะกอน และการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนนั้นไม่สามารถกำจัด NOM ออกจากน้ำได้ ในทางกลับกัน อาจยังเพิ่มปัญหาให้กับน้ำที่ผลิตได้ ยกตัวอย่างเช่น ในกระบวนการเติมคลอรีนให้กับน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด NOM ต่ำ ทำให้ปริมาณ NOM เหลืออยู่ในน้ำมาก หากเติมคลอรีนโดยคำนึงถึงแต่ปริมาณคลอรีนที่ต้องการให้ตกค้างอยู่ในน้ำ (Chlorine Residual) อาจทำให้เกิดสาร Disinfection By-products (DPBs) เช่น สารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane หรือ THMs) ในปริมาณสูง

ปัจจุบันในบางประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ได้มีการนำกระบวนการเมมเบรนมาใช้เป็นกระบวนการผลิตน้ำประปาแทน Conventional Process เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีขนาดเล็กกะทัดรัด การดำเนินระบบไม่ยุ่งยาก น้ำที่ออกจากกระบวนการมีคุณภาพสูง ทั้งยังช่วยลดต้นทุนการดำเนินระบบและการบำรุงรักษาอีกด้วย

เนื่องจากน้ำประปาที่ผ่านกระบวนการกรองทรายแล้วยังอาจมีสารอินทรีย์เหลืออยู่ ซึ่งอาจก่อให้เกิดเป็นสารที่มีพิษ เช่น สารไตรฮาโลมีเทนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง ย่อมมีผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายของผู้บริโภค ถึงแม้จะมีปริมาณหลงเหลือในน้ำไม่มากนัก ดังนั้นการเพิ่มระบบนาโนฟิลเตรชันในการกำจัด NOM ที่หลงเหลือในน้ำประปา จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการใช้กำจัด NOM ในระบบผลิตน้ำประปาในอนาคต

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถึงกลไกในการทำงาน ประสิทธิภาพ และผลของปัจจัยต่างๆ ในการดำเนินระบบต่อการกำจัด NOM ออกจากน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองทรายของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ในระดับ Pilot-scale เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการพิจารณาการใช้และออกแบบระบบในระดับ Full-scale ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงกลไกในการทำงาน และประสิทธิภาพของระบบ NF ในการกำจัด NOM ในระบบผลิตน้ำประปา
2. เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อการทำงานของระบบ NF
3. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบและแนวทางการปรับปรุงการดำเนินระบบ
4. เพื่อศึกษาการลดความต้องการคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคระหว่างน้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชันและน้ำที่เข้าระบบ
5. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ ค่ายูวี 254 และค่าไตรฮาโลมีเทนโดยการทำการกราฟเปรียบเทียบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาการทดลองขนาดทดสอบซึ่งจะติดตั้งที่การประปานครหลวง บางเขน

1. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงการกำจัด NOM ออกจากน้ำ ในระบบผลิตน้ำประปาโดยกระบวนการ NF ในงานวิจัยนี้ทำในระดับ Pilot-scale โดยใช้รูปแบบโมดูลของเมมเบรนแบบ Spiral Wound
2. งานวิจัยศึกษาถึงสภาวะที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการ NF ในการกำจัด NOM ดังนี้ คือ ปัจจัยด้านการดำเนินระบบ : ประกอบด้วย คุณสมบัติของเมมเบรน แรงดัน และเปอร์เซ็นต์ Recovery
3. งานวิจัยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบต่อเนื่อง

4. งานวิจัยศึกษาการลดความต้องการคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคระหว่างน้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชันและน้ำที่เข้าระบบ
5. งานวิจัยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ ค่ายูวี 254 และค่าไตรฮาโลมีเทนโดยการถ่ายภาพเปรียบเทียบ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 NOM (สารอินทรีย์ธรรมชาติ)

Natural Organic Matter หรือ NOM ที่ถูกพบในแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยทั่วไปจะเกิดจากการเติบโตหรือการเน่าเปื่อยของพืช และเกิดจากกระบวนการสลายตัวของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ส่วนประกอบของ NOM ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย คาร์บอน , ออกซิเจน และไฮโดรเจน บางครั้งสามารถพบไนโตรเจนและซัลเฟอร์ได้เช่นกัน โดยแหล่งที่มาของ NOM ในแหล่งน้ำมีอิทธิพลอย่างมากต่อส่วนประกอบของ NOM ที่พบ(Chris, 2002)

แหล่งที่มาที่สำคัญของ NOM ในแหล่งน้ำจืด คือ สาหร่าย และ Cyanobacterial ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูป Aliphatic และปราศจากสารลิกนิน โดยสารอินทรีย์จากแหล่งนี้จะมีส่วนประกอบที่เป็นฟีนอลิก (Phenolic) และอะโรมาติก (Aromatic) ในปริมาณที่ต่ำ ตรงข้ามกับสารอินทรีย์ที่เกิดจากดิน ซึ่งโดยมากจะมาจากซากพืชที่อยู่บนบก ทำให้มีองค์ประกอบที่เป็นสารลิกนินในปริมาณที่สูง

ลิกนินมีโครงสร้างหลักเป็นสารอะโรมาติก ทำให้ NOM ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากดินมีส่วนประกอบเป็นสารอะโรมาติกมากกว่า NOM ที่มีแหล่งกำเนิดในน้ำ นอกจากนี้สถานที่ และอายุของดินที่ทำให้เกิด NOM ก็มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของ NOM โดยองค์ประกอบที่สำคัญของ NOM ในน้ำผิวดินที่เกิดจากซากพืชที่ทับถมกัน แล้วถูกน้ำชะล้างสู่แหล่งน้ำจะมีส่วนประกอบหลักเป็นกรดฟัลวิก ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย ซึ่งละลายน้ำได้และไม่ถูกดูดติดโดยดิน ต่างจาก NOM ที่อยู่ในแหล่งน้ำบาดาลที่มีอายุมากๆ ซึ่งมักจะถูกกำจัดโดยการดูดติด เนื่องจากเวลาสัมผัสที่ยาวนานกับชั้น Aquifer ดังนั้น NOM ที่ยังละลายอยู่ในน้ำจะเป็นส่วนที่ถูกดูดติดได้น้อย (Goel และคณะ, 1995)

NOM ในน้ำอาจจะอยู่ในรูปของอนุภาค คอลลอยด์ หรือในรูปสารละลาย โดยทั่วไปอนุภาคสารอินทรีย์จะถูกกำจัดได้ง่ายโดยกระบวนการโคแอกกูชัน ฟลอคคูเลชัน และการตกตะกอน เหมือนกับอนุภาคทั่วไปที่ทำให้เกิดความขุ่นในน้ำ NOM ละลาย คือ โมเลกุลของสาร

อินทรีย์ที่สามารถผ่านเมมเบรนที่ขนาด $0.45 \mu\text{m}$ ส่วน NOM ที่เป็นคอลลอยด์จะแตกต่างจากโมเลกุลของ NOM ตรงที่สามารถกำจัดออกได้โดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันแบบทำให้ประจุเป็นกลาง (Charge Neutralization) (Crozes และคณะ, 1995)

NOM สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นสารฮิวมิก และส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิก NOM ส่วนที่เป็นสารฮิวมิกจะมีคุณสมบัติเป็นสาร Hydrophobic โดยประกอบด้วย กรดฮิวมิก กรดฟัลวิก และฮิวมิน ส่วน NOM ที่ไม่ใช่สารฮิวมิกจะมีคุณสมบัติเป็นสาร Hydrophobic น้อยกว่าสารฮิวมิก โดยประกอบไปด้วย Hydrophilic Acids โปรตีน กรดอะมิโน และคาร์โบไฮเดรต (Owen และคณะ, 1995) โดยทั่วไป NOM ส่วนที่เป็นสารฮิวมิกจะมีประมาณ 45-65% และส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิกจะมีประมาณ 35-55% (Hanra และคณะ)

2.1.1 เหตุที่ต้องกำจัด NOM ออกจากน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปา

ในช่วงก่อนปี ค.ศ. 1970 งานวิจัยในเรื่องลักษณะสมบัติของ NOM ในน้ำดื่ม และวิธีการกำจัดเกิดขึ้นเนื่องจากความต้องการในการกำจัดสีออกจากแหล่งน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา หลังจากนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงปัญหาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับ NOM ซึ่งประกอบด้วย ความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ และสารฆ่าเชื้อโรคที่มากขึ้นของน้ำที่มี NOM ความสามารถในการจับโลหะและสารอินทรีย์เกลียดน้ำ การทำให้เกิดการกัดกร่อน และการเติบโตขึ้นใหม่ของแบคทีเรียในระบบจ่ายน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้สารออกซิแดนท์ระหว่างกระบวนการบำบัด การทำให้เกิดกลิ่น และรสในน้ำ แนวโน้มในการเป็นตัวขัดขวางการกำจัดสารปนเปื้อนอื่นๆ ในน้ำ และการเป็นสารที่ก่อให้เกิดสาร Disinfection By-Products (DPBs) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญมากในปัจจุบัน

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน หรือที่เรียกว่า Conventional Process ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟลอคคูเลชัน การตกตะกอน และการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนนั้น ไม่สามารถกำจัด NOM ออกจากน้ำได้อย่างเพียงพอที่จะสามารถควบคุมไม่ให้เกิดปัญหาหลาย ๆ อย่าง ในทางกลับกัน อาจยังเพิ่มปัญหาให้กับน้ำที่ผลิตได้ ยกตัวอย่างเช่น ในกระบวนการเติมคลอรีนให้กับน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด NOM ทำให้ปริมาณ NOM เหลืออยู่ในน้ำมาก หากเติมคลอรีนโดยคำนึงถึงแต่ปริมาณคลอรีนที่ต้องการให้ตกค้างอยู่ในน้ำ (Chlorine Residual) อาจทำให้เกิดสาร DPBs เช่น สารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane หรือ THMs) ในปริมาณสูง

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติทางเคมี และกระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา NOM ส่วนที่เป็นสารฮิวมิก จะมีบทบาทสำคัญมากต่อปัญหาที่เกิดขึ้นกับน้ำประปา ในขณะที่ NOM ส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิก จะทำให้เกิดปัญหาต่อคุณภาพน้ำประปาน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม Owen และคณะ (1995) พบว่า NOM ส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิกสามารถทำให้เกิดสาร DPBs ในปริมาณที่มีนัยสำคัญ นอกจากนั้น ยังอาจเป็นส่วนสำคัญของสารอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายได้ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการเติบโตขึ้นใหม่ของแบคทีเรียในระบบจ่ายน้ำ โดยกระบวนการที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการแยกและวิเคราะห์ส่วนประกอบของ NOM ในปัจจุบัน โดยถือว่าเป็นวิธีการมาตรฐานในการตรวจสอบน้ำและน้ำเสียที่ใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา (APHA, AWWA, WPCF (1995))

ในปี พ.ศ. 2527 ได้มีการสำรวจปริมาณของสาร THMs ในน้ำประปาของกรุงเทพมหานคร โดย Onodera และคณะ (1984) พบว่ามีสาร THMs ในน้ำประปาที่ผลิตจากแหล่งน้ำผิวดินโดยมีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 16.8-100 $\mu\text{g/L}$ และมีค่าเฉลี่ย 68 $\mu\text{g/L}$

ในปัจจุบันได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของน้ำประปา หรือที่เรียกว่าค่าระดับความปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Contaminant Levels: MCLs) ของสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำประปา โดยมาตรฐานของ U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) กำหนดปริมาณเข้มข้นของ THMs ในระบบประปาไว้ไม่เกิน 80 $\mu\text{g/L}$

2.1.1.1 ไตรฮาโลมีเทน

เกิดจากการรวมตัวของ NOM ในน้ำโดยทั่วไปคือ กรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก ที่มีอยู่ปกติในน้ำธรรมชาติกับคลอรีนหรือโบรมีนที่มาจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งปัจจุบันจัดเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic Organic Substance) ในน้ำประปา

สำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปา คลอรีนที่เติมจะใช้ในปริมาณน้อย โดยทั่วไปแล้วจะไม่เกิน 2-3 mg/L (ppm) คลอรีนจะทำปฏิกิริยากับ NOM และแร่ที่มีอยู่ในน้ำ ปริมาณคลอรีนที่ใช้ไปนี้เรียกว่าความต้องการคลอรีน (Chlorine Demand) การเติมคลอรีนที่ถูกต้องใช้ปริมาณเกินความต้องการ เพื่อคลอรีนที่เหลืออยู่หรือคลอรีนอิสระ (Free Residual Chlorine) จะได้เป็นตัวฆ่าเชื้อโรคในน้ำต่อไป แต่การเติมคลอรีนในปริมาณที่น้อยนี้ทำให้เกิดไตรฮาโลมีเทน และสารประกอบอินทรีย์

คลอรีนอื่น ๆ ในปริมาณที่ไม่มาก มาตรฐานของ U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) กำหนดปริมาณเข้มข้นของ THMs ในระบบน้ำประปาไว้ไม่เกิน 80 $\mu\text{g/L}$

การเกิดของ THMs ในน้ำประปาพบว่ามาจากสารฮิวมิกในน้ำธรรมชาติ (Aquatic Humic Materials) อัตราการเกิด THMs จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการสูญเสียของสารฮิวมิก นอกจากนี้สารฮิวมิกยังเป็นตัวหลักที่ทำให้เกิดสารประกอบอื่นๆ ที่ไม่ใช่ THMs เช่น สารอินทรีย์ฮาไลด์ (Total Organic Halide-TOX) อีกด้วย

จากการศึกษาวิเคราะห์น้ำประปาพบว่าสารประกอบ TOX ที่ไม่ระเหย (Nonvolatile TOX) อันเกิดจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนมีอยู่ 2 สารหลักคือ Trichloroacetic acid (TCAA) และ Dichloroacetic acid (DCAA) ส่วนสารประกอบคลอรีนระเหยง่าย (Volatile Chlorination by Product) ได้แก่ Haloketones และ Haloacetonitriles นอกจากนี้ยังพบสารประกอบคลอรีนอื่นในปริมาณน้อย

สารประกอบฮิวมิกในน้ำจะมีสภาพ Aromatic (สารไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว มีโครงสร้างเป็นวงแหวน บางชนิดไม่รวมตัวกับ Cl_2 หรือ Br_2 ในที่มี แต่จะมีปฏิกิริยาเมื่อมีตัวเร่ง) ปานกลาง (ประมาณ 25% ของคาร์บอนทั้งหมดที่มี) ส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่ม Carboxyl กลุ่ม Phenolic กลุ่ม Alcohol OH กลุ่ม Methoxyl คีโตน (Ketones) และ Aldehydes

เป็นที่ยอมรับกันว่าอัตราการเกิด THMs ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคลอรีน ระดับ THMs จะสูงขึ้นเมื่อเพิ่ม dose ของคลอรีน เช่นเดียวกันเมื่อสารอินทรีย์ละลายน้ำ (Soluble Organic Content) เพิ่มขึ้น THMs ก็เพิ่มขึ้นด้วย

องค์ประกอบอื่นที่มีผลต่ออัตราการเกิด THMs ได้แก่ ฟิเอช อุณหภูมิ และปริมาณโบรไมด์ โดย THMs จะเพิ่มขึ้นเมื่อฟิเอช และอุณหภูมิเพิ่ม ส่วนโบรไมด์ (ในรูปโบรมีน) จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าคลอรีน เกิดเป็น Brominated THMs

2.1.1.2 ผลของ THMs ที่มีต่อสุขภาพอนามัย

รายงานความเสี่ยงต่อสุขภาพที่เกิดจากสาร Haloform ในน้ำดื่ม เกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1974 โดยมีข้อมูลว่าการดื่มน้ำที่มีสาร Haloform ในระยะยาวอาจก่อให้เกิดมะเร็งได้ เนื่องจากมี

อัตราการป่วยด้วยโรคมะเร็งลำไส้ (Gastrointestinal Tract) และระบบปัสสาวะ (Urinary Tract) เพิ่มขึ้น

อีกการศึกษาหนึ่งพบว่า การดื่มน้ำที่มี Chloroform สูง จะก่อให้เกิดมะเร็งในลำไส้ใหญ่ (Rectal-intestinal) และมะเร็งในไต (Bladder Cancer) จากการทดลองกับหนูพบว่า Chloroform ทำให้หนูเป็นเนื้องอกในตับและไตเมื่อหนูดื่มน้ำประปาที่มีคลอโรฟอร์ม ซึ่งทำให้คาดคะเนว่าคลอโรฟอร์มในน้ำดื่มมีผลต่อการเป็นมะเร็งในมนุษย์ได้

สารประกอบไตรฮาโลมีเทน (THMs) อีก 2 ชนิดคือ Chlorodibromomethane กับ Bromodichloromethane ก็มีรายงานว่า เป็นสารก่อมะเร็ง โดยสารแรกทำให้หนูทดลองป่วยด้วยอาการ Hepatic Adenofibrosis และ Neoplastic Nodules นอกจากนี้ยังทำให้เกิดเนื้องอกในอวัยวะหลายส่วน เช่น ลำไส้และไต

สารประกอบคลอรีนกลุ่ม Acetic Acid อาทิ Dichloroacetic Acid ทำให้หนูเกิดอาการขาหลังเปลี่ยนผิดปกติในสมองอันตะ สถาบันวิจัยแห่งชาติของสหรัฐอเมริกาได้ระบุความเข้มข้นของ Dichloroacetic Acid ในน้ำประปาไม่เกิน 0.12 mg/L และ Trichloroacetic Acid ไม่เกิน 0.05 mg/L นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบทั้งสองนี้ก่ออาการเนื้องอกในตับด้วย แต่ยังไม่อาจสรุปได้ว่าสารทั้งสองนี้เป็นสารก่อมะเร็ง

สารประกอบคลอรีนกลุ่มที่สามคือ Haloacetonitriles ได้แก่ Dichloroacetonitrile , Dibromoacetonitrile และ Bromochloroacetonitrile พบในปริมาณน้อย เป็น $\mu\text{g/L}$ จัดเป็นสารที่มีพิษต่อร่างกาย และมีอันตรายต่อการตั้งครวมในอัตรา (Dose) 55 มิลลิกรัมต่อวันต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัม นอกจากนี้สถาบันวิจัยแห่งชาติยังได้กำหนดความเข้มข้นของสารประกอบสองอย่างแรกในน้ำดื่มไว้ที่ 0.056 และ 0.023 mg/L ตามลำดับ เนื่องจากอาจจะก่อมะเร็งขึ้นได้

2.1.1.3 การควบคุมไตรฮาโลมีเทน

การกำจัด NOM ที่หลงเหลืออยู่ในน้ำ ที่เป็นสารตั้งต้นที่เป็นตัวการ จะช่วยทำให้ลดการเกิด THMs ได้ เนื่องจาก THMs เกิดจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน ซึ่งจัดเป็นสารอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนเพราะจัดเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง และเป็นปัญหาสำคัญของการผลิตน้ำประปา THMs เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับ NOM ในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วย

คลอริน ซึ่งเกิดจาก NOM ส่วนที่เป็นกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก ในปี ค.ศ. 1979 U.S. EPA กำหนดให้มาตรฐานการปนเปื้อนสูงสุด (Maximum Contaminant Level , MCL) ของ THMs ทั้งหมดเท่ากับ $80 \mu\text{g/L}$

2.1.2 ลักษณะสมบัติของสารฮิวมิก

2.1.2.1 โครงสร้างทางเคมีของสารฮิวมิก

สารฮิวมิกมีสูตรโมเลกุล และสูตรโครงสร้างที่ไม่แน่นอน อย่างไรก็ตาม เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่า กรดฮิวมิก เป็นสารโพลีเมอร์ ที่ประกอบด้วย อะโรมาติกโมโนเมอร์ (Aromatic Monomers) ในปริมาณที่แตกต่างกัน Chirstman และ Ghassemi (1966) ได้เสนอว่า โครงสร้างของกรดฮิวมิก ประกอบด้วยกลุ่มทำปฏิกิริยา (Functional Groups) หลายกลุ่ม เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic Acids) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และคีโตน (Ketone) โดยพบว่า กลุ่มทำปฏิกิริยาที่เป็นคาร์บอกซิลิก มีปริมาณถึง 60-90% ของกลุ่มที่ทำปฏิกิริยาทั้งหมด ดังนั้นสารฮิวมิกจึงมีประจุลบในช่วงค่าพีเอชของน้ำธรรมชาติและค่าพีเอชที่สูงกว่านั้น และเนื่องมาจากกลุ่มที่ทำปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้สารฮิวมิกสามารถละลายน้ำได้ดีที่ค่าพีเอชสูงๆ และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนและการเกิดสารประกอบกับอิออนประจุบวกที่มีสองและสามวาเลนซ์ โดยอิออนประจุบวกที่มีสองวาเลนซ์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญขององค์ประกอบของสารอนินทรีย์ในน้ำธรรมชาติสามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มคาร์บอกซิลิกในสารฮิวมิก ทำให้ประจุของสารฮิวมิกมีค่าน้อยลง (Hanra และคณะ)

Stevenson (1982) อธิบายถึงลักษณะโครงสร้างของกรดฮิวมิกว่าเป็นวงของโมเลกุลสายยาวหลายๆ โมเลกุล ซึ่งเชื่อมจากส่วนหนึ่งของวงไปยังส่วนอื่นๆ การเชื่อมของวงนี้อาจเนื่องมาจากพันธะระหว่าง ส่วนที่เป็น Hydrophobic ของโมเลกุล เช่น ไฮโดรคาร์บอน และส่วนที่เป็น Hydrophobic อื่น ๆ กับส่วนที่เป็น Hydrophilic (กลุ่มทำปฏิกิริยาที่มีขั้ว) โดยเกิดขึ้นในสารละลายในดิน หรือเกิดขึ้นโดยตรงกับผิวของแร่ธาตุในดิน ดังรูป 3.2

2.1.2.2 น้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิก

น้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิกมีค่าอยู่ในช่วงกว้างมาก Gjessing (1966) รายงานผลจากการทดลองโดยใช้ Gel Filtration ถึงน้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิกว่ามีค่าระหว่างน้อยกว่า 700 ถึง

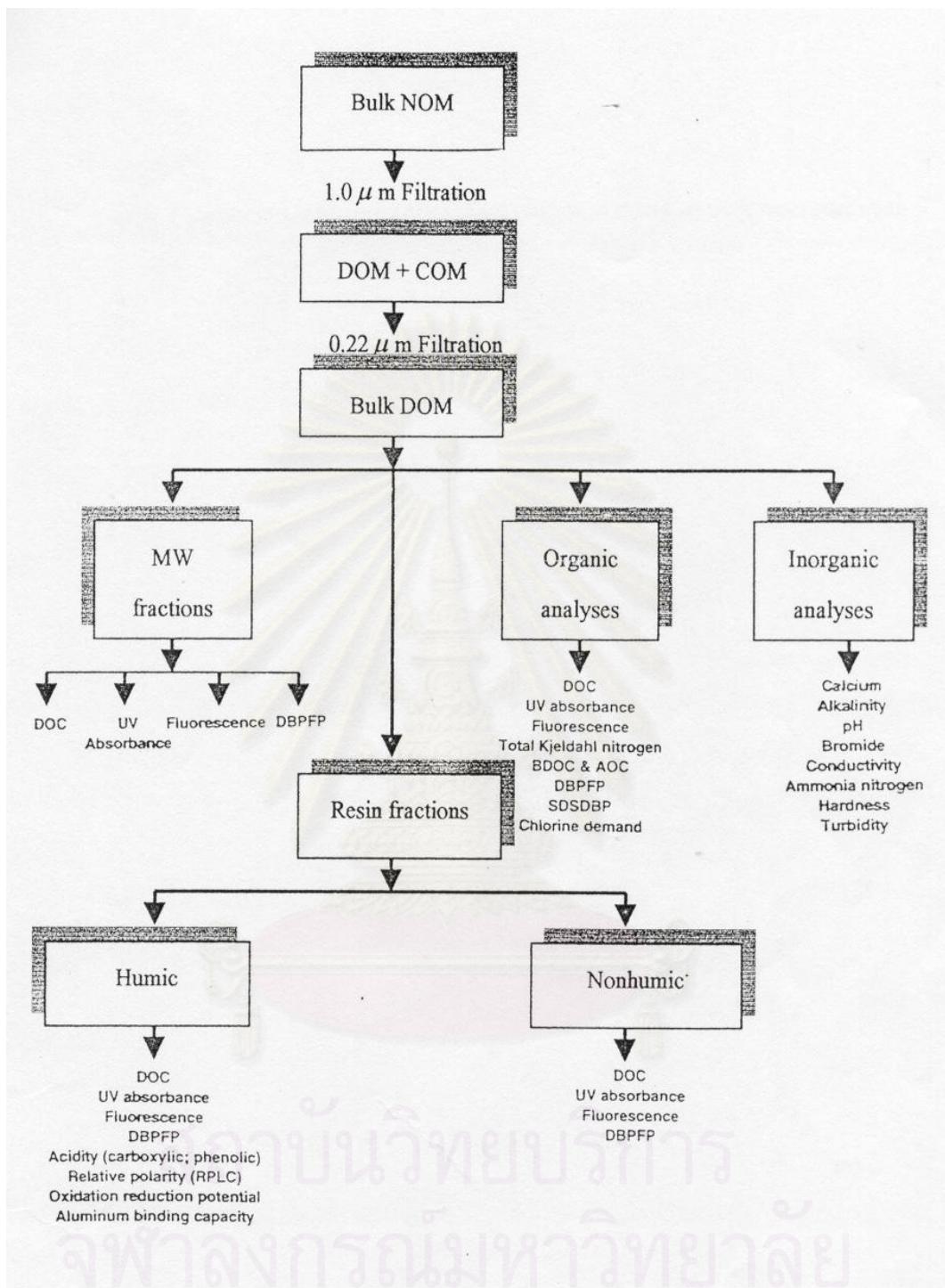
มากกว่า 20,000 ซึ่งค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ได้ยังขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย เช่น น้ำหนักโมเลกุลของกรดฮิวมิก โดยการใช้วิธีทางเคมีพบว่ามามีค่าประมาณ 1,300-13,000 โดยวิธี Osmometric Cryoscopy และวิธี Diffusion และ Viscosity มีค่า 700-26,000 และโดยวิธี Ultracentrifugation และ Light Scattering มีค่าเท่ากับ 30,000-80,000 ส่วนกรดฟัลวิก พบว่าส่วนใหญ่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 200-1,000 (Gassemi และ Cristman, 1968)

Schnitzer และ Khan (1972) ได้สรุปค่าน้ำหนักโมเลกุลของกรดฮิวมิกที่หาจากวิธีต่าง ๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

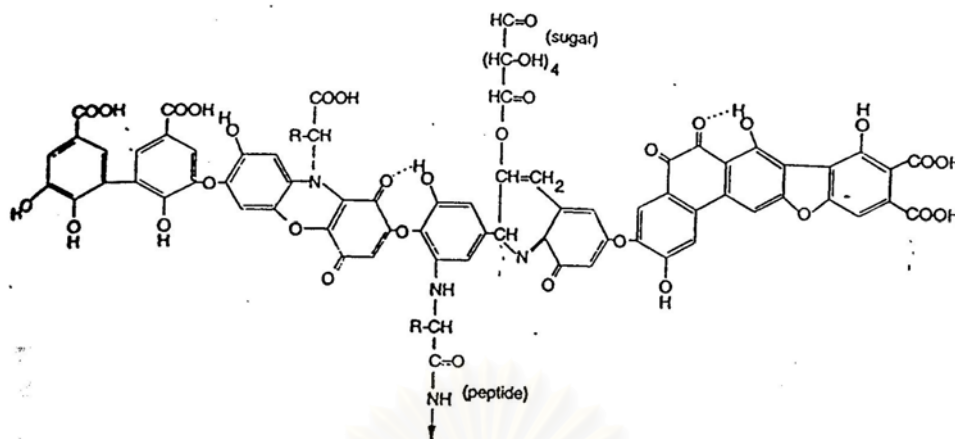
ตารางที่ 2.1 น้ำหนักโมเลกุลของกรดฮิวมิก (Schnitzer และ Khan ,1972)

Value of molecular weight	Method of estimation
5,000-7,000	Dialysis
4,500-26,000	Diffusion
14,000-20,000	Gel filtration
5,000-100,000 (Average 25,000)	Gel filtration
10,000-200,000	
~25,000	Sedimentation , Viscosity
~36,000	Viscosity
47,000-53,800	Osmometry
~53,000	Sedimentation

อย่างไรก็ตามในการศึกษาถึงลักษณะสมบัติของสารฮิวมิกในช่วงปี 1990s การหาค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิกสามารถทำได้แน่นอนขึ้น เช่น Hassett และ Banwart (1992) ได้สรุปค่าน้ำหนักโมเลกุลของกรดฮิวมิกว่ามีค่าอยู่ในช่วง 20,000 – 1,360,000 และน้ำหนักโมเลกุลของกรดฟัลวิกอยู่ในช่วง 275 – 2,110



รูปที่ 2.1 กระบวนการแยกและวิเคราะห์ส่วนประกอบของ NOM (Owen และคณะ, 1995)



รูป 2.2 รูปแสดงโครงสร้างของกรดฮิวมิก (Stevenson, 1982)

2.1.3 พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนในการวัดปริมาณของ NOM

ค่า TOC, UV254 และ UV260 เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนที่ดีในการวัดปริมาณของ NOM ในปัจจุบัน

การวัดค่า TOC เป็นการวัดปริมาณสารอินทรีย์ทุกชนิดที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุคาร์บอน ซึ่งประกอบด้วย สารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย (Dissolved Organic Carbon หรือ DOC) ซึ่งเป็น TOC ส่วนที่ผ่านสารกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง $0.45 \mu\text{m}$. อนุภาคอินทรีย์คาร์บอน (Particulate Organic Carbon หรือ POC) คือสารอินทรีย์คาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ และถูกกักโดยสารกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง $0.45 \mu\text{m}$. สารคาร์บอนอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Carbon หรือ VOC) คือ สารอินทรีย์คาร์บอนที่สลายตัวได้และถูกกำจัดออกโดย Gas stripping ภายใต้สภาวะจำเพาะ และสารคาร์บอนอินทรีย์คงตัว (Nonpurgeable Organic Carbon หรือ NPOC) คือส่วนของ TOC ที่ไม่ถูกกำจัดออกโดยวิธี Gas Stripping

Edzwald และคณะ (1985) พบว่า ค่า UV254 เป็นตัวแทนที่ดีมากในการวัดปริมาณ Nonpurgeable TOC (NPTOC) และสารที่ทำให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane Precursors หรือ THMP) โดยอัตราส่วนระหว่างค่า UV254 กับค่า TOC ยังสามารถใช้ในการบอกลักษณะสมบัติของ NOM ในน้ำได้ โดยบอกถึงระดับของความไม่อิ่มตัวของ NOM (Goel และคณะ, 1995)

การวัดค่า UV254 และ UV260 อาศัยหลักการที่ว่า สารอินทรีย์ที่เป็นสารอะโรมาติกหรือเป็นสารที่มีพันธะทางเคมีเป็นพันธะคู่ จะสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 254 และ 260 nm. จึงทำให้การวัดค่าการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นวิธีการที่ดีและเหมาะสมในการวัดปริมาณของ NOM เช่น สารฮิวมิก เพราะประกอบไปด้วยสารอะโรมาติก และมีปริมาณมากในน้ำธรรมชาติ

Eaton (1995) ได้สรุปผลจากการใช้ค่าการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารอินทรีย์ในน้ำ เพื่อใช้เป็นวิธีมาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีความสัมพันธ์อย่างมากกับปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน, ซี, Trihalomethane Precursors (THMP) และสารที่ทำให้เกิดสาร DBPs ชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ยังใช้ค่าการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต ในการตรวจสอบน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม และประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์โดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน การดูดซับโดยคาร์บอนแบบเกร็ดและกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบอื่นๆ

2.2 กระบวนการที่ใช้ในการกำจัด NOM

2.2.1 การกำจัด NOM โดยใช้การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการโคแอกกูเลชัน

นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาถึงการกำจัด NOM โดยใช้การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการโคแอกกูเลชัน การสำรวจโดยหน่วยงานของประเทศสหรัฐอเมริกา ภายใต้ชื่อ The National Organic Reconnaissance Survey (NORS) ระบุว่ากำจัดสาร Nonpurgeable TOC (NPTOC) โดยใช้กระบวนการ Conventional Treatment สามารถทำได้ 30% โดยการใช้สารส้มตามด้วยการกรองด้วยทราย สามารถกำจัดสาร Trihalomethane Precursors (THMP) ได้ประมาณ 2 ใน 3 (Symons และคณะ, 1975 ; Oliver และ Lawrence, 1979)

Kavanaugh (1978) ได้ทำการศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการโคแอกกูเลชัน ในการกำจัดสาร Trihalomethane Precursors (THMP) และสรุปว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสาร THMP มีดังนี้ คือ

- ปัจจัยทางกายภาพ : ประกอบด้วย การผสมขั้นแรกของสารโคแอกกูแลนต์ สภาวะในการกวนในถังกวนช้า และกระบวนการแยกระหว่างของแข็งกับของเหลว

- ผลของปัจจัยทางเคมี : ค่าพีเอชที่เหมาะสม อยู่ในช่วง 5-6 สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้ม ในขณะที่พีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันโดย Fe^{+3} มีค่าในช่วง 3-5 และพบว่า 15% ของกรดฮิวมิกไม่ถูกกำจัดโดยการใส่สารส้ม
- ผลของประเภทของสารฮิวมิก : กรดฟัลวิกต้องการปริมาณสารส้มสูงกว่ากรดฮิวมิก เพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์การกำจัด 80% เท่ากัน
- ความต้องการโพลีเมอร์ : การเกิดขึ้นของฟลอค ในสภาวะที่ไม่มี ความขุ่น ทำให้คุณสมบัติในการตกตะกอนไม่ดี

Crozes และคณะ (1995) สรุปผลของการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูชันในการกำจัด NOM ว่า สารโคแอกกูแลนท์ที่เป็นธาตุเหล็ก เช่น $FeCl_3$ มีประสิทธิภาพดีกว่าสารส้ม โดยค่าพีเอชในกระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นปัจจัยสำคัญในการกำจัด NOM เมื่อใช้ $FeCl_3$ เป็นสารโคแอกกูแลนท์เบื้องต้น โดยการปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.0 ± 0.2 จะสามารถกำจัด NOM ได้ถึง 65% และลดปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ลงถึง 60% แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูแลนท์ อาจจะไม่พอเพียงในการกำจัด NOM เพื่อควบคุมปริมาณสาร DBPs (Jacangelo และคณะ, 1995)

2.2.2 การกำจัด NOM โดยกระบวนการดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon)

McCreary และ Snoeyink (1979) ศึกษาผลของเกลืออนินทรีย์ และพีเอชต่อการดูดติดผิวของ NOM โดยพบว่า การเพิ่มการดูดติดผิวของกรดฟัลวิกที่พีเอชต่ำเป็นผลมาจากคุณสมบัติที่ NOM มีความเป็นกรดอ่อน ๆ โดยการลดลงของพีเอชทำให้ความสามารถในการละลายได้ลดลง และถูกดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ดได้ดีขึ้น แหล่งที่มาของ NOM เป็นปัจจัยสำคัญเช่นกัน ดังจะเห็นได้ว่ากรดฟัลวิกที่เกิดจากการสลายตัวของพืชดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ดได้ดีกว่ากรดฮิวมิกที่มีขายในท้องตลาด และกรดฮิวมิกที่มาจากดิน การใช้กระบวนการดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ดในการกำจัด NOM อย่างมีประสิทธิภาพต้องทำการศึกษาในสภาวะเฉพาะของ NOM และคาร์บอนแบบเกร็ดในแต่ละแห่ง โดยการบำบัดเบื้องต้น หรือการปรับปรุงคุณสมบัติของ NOM จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้กระบวนการดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ดในการกำจัด NOM ได้ (Jacangelo และคณะ, 1995)

2.2.3 การกำจัด NOM โดยใช้กระบวนการเติมโอโซน

มีการทดลองใช้กระบวนการเติมโอโซนเพื่อลด NOM สำหรับโรงผลิตน้ำประปาบางแห่งในระดับ Pilot-scale ตารางที่ 3.2 สรุปผลจากการทดลองดังกล่าว โดยพิจารณาถึงการลดสาร THMs ทั้งหมดเมื่อใช้เวลาสัมผัสของคลอรีนประมาณ 24 ชม.

มีปัจจัย 5 ปัจจัยที่อาจมีผลต่อความไม่แน่นอนในการกำจัดสารที่ทำให้เกิด THMs สำหรับการทดลองที่แตกต่างกันคือ

- (1) ความเข้มข้นและคุณสมบัติจำเพาะของสารอินทรีย์
- (2) คุณสมบัติทางเคมีของสารอินทรีย์ในน้ำ
- (3) ประสิทธิภาพในการถ่ายเทโอโซน
- (4) ความแตกต่างของเวลาสัมผัสหลังจากการเติมคลอรีน ปกติจะใช้เวลาสัมผัส 24 ชม. หากมีความแตกต่างมากหรือน้อยกว่านี้อาจส่งผลต่อการกำจัดสาร THMs ได้
- (5) ความล่าช้าระหว่างเวลาในการเติมโอโซนกับเวลาในการเติมคลอรีน เนื่องจากโอโซนจะแตกตัวกลายเป็นออกซิเจนหลังจากช่วงเวลา 30 นาที ถ้าหากมีการเติมคลอรีนโดยที่มีช่วงเวลาห่างจากการเติมโอโซนมากอาจทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการกำจัด THMs ได้

ตารางที่ 2.2 สรุปผลการกำจัดสารที่ทำให้เกิด THMs โดยใช้โอโซน (Trussell และ Umphres, 1978)

สถานที่	ปริมาณโอโซนที่ใช้, มก./ล.	คุณภาพน้ำ		% การลดปริมาณ THMs ทั้งหมด
		TOC, มก./ล.	พีเอช	
Owens River	1.0	1.3	8.3	78
Lake Casitas	2.0	3.5	8.1	6
Columbia River	0.5-4.0	2.4	8.0	16
Ohio River	1.0-8.0	3.0	7.1	46
Bay Bull's Big Pond	1.0-3.0	-	5.7	27
Mokelumne	2.0-6.0	2.4	9.2	62
Middle River	2.6-11.0	3.5	7.3	32

อย่างไรก็ตามการเติมโอโซนสามารถเกิด DPBs ได้เช่นกัน โดย Najm และ Krasne (1995) ทำการศึกษาผลของ Br⁻ และ NOM ต่อการเกิดของ Ozonation By-products พบว่าใน

แหล่งน้ำที่มี Br^- ในปริมาณสูงจะทำให้เกิดโบรมเมท (Bromate) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในปริมาณสูง ด้วยภายหลังการเติมโอโซน และถ้ามีค่า TOC สูงก็จะเพิ่มปริมาณความต้องการโอโซน ซึ่งจะทำให้เพิ่มปริมาณการผลิตโบรมเมทด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อดีและข้อเสียของการกำจัด NOM โดยกระบวนการต่าง ๆ (Marsono, 1996)

กระบวนการที่ใช้	ข้อดี	ข้อเสีย
โคแอกกูเลชัน	<ul style="list-style-type: none"> -เป็นทางเลือกที่ประหยัดที่สุด -สามารถทำได้โดยปรับปรุงกระบวนการโคแอกกูเลชันที่มีอยู่แล้ว -มีข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการนี้มาก -หลังจากกระบวนการโคแอกกูเลชันอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งเป็นผลดีต่อการใช้ GAC ในขั้นตอนต่อมา 	<ul style="list-style-type: none"> -ใช้สารส้มในปริมาณสูง ถ้ามีค่าความขุ่นต่ำและมีค่าของสีสูง -ประสิทธิภาพในการกำจัดพอใช้-ดี โดยกำจัด THMP ได้ < 60% และ DOC < 50%
การดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon)	<ul style="list-style-type: none"> -สามารถกำจัดสี, กลิ่น และรสออกจากน้ำ -ต้องการเวลาสัมผัสสั้น(10-15 นาที) -สามารถกำจัดสารปนเปื้อนอื่นด้วย (เช่น ยาฆ่าแมลง) 	<ul style="list-style-type: none"> -ประสิทธิภาพในการกำจัด DOC < 50% , THMP 29-56 % -ข้อมูลในการใช้ต้องศึกษาเฉพาะแต่ละแห่ง -กำจัด Br^- ได้น้อย
โอโซน	<ul style="list-style-type: none"> -สามารถกำจัดสี, กลิ่น และรสออกจากน้ำ -สามารถใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคได้ -สามารถทำลายสารประกอบอินทรีย์ (เช่น ฟีนอล) -ไม่ทำให้เกิดของแข็งละลายและพีเอชของน้ำไม่มีผลต่อระบบ 	<ul style="list-style-type: none"> -สามารถทำปฏิกิริยากับ NOM เกิดเป็นสาร Ozonation By-products -ทำปฏิกิริยากับ NOM และ Br^- เกิดเป็นสาร Brominated By-products

Jacangelo (1995) ได้ทำการสรุปผลจากการทดลองโดยใช้กระบวนการในการกำจัด NOM ออกจากน้ำ 3 กระบวนการ คือ กระบวนการโคแอกกูเลชัน , การดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ด

และกระบวนการ NF ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่าของกระบวนการ NF

ตารางที่ 2.4 สรุปผลจากงานวิจัยโดยใช้กระบวนการ 3 ชนิดในการกำจัด NOM (Jacangelo, 1995)

กระบวนการที่ใช้	ประสิทธิภาพในการกำจัด NOM	ความซับซ้อนของกระบวนการ	ค่าใช้จ่ายของกระบวนการ
โคแอกกูเลชัน	พอใช้-ดี	ต่ำ-ปานกลาง	ต่ำ-ปานกลาง
การดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ด (มีการ Regeneration)	ดีมาก	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง
NF	ยอดเยี่ยม	ปานกลาง	ปานกลาง-สูง

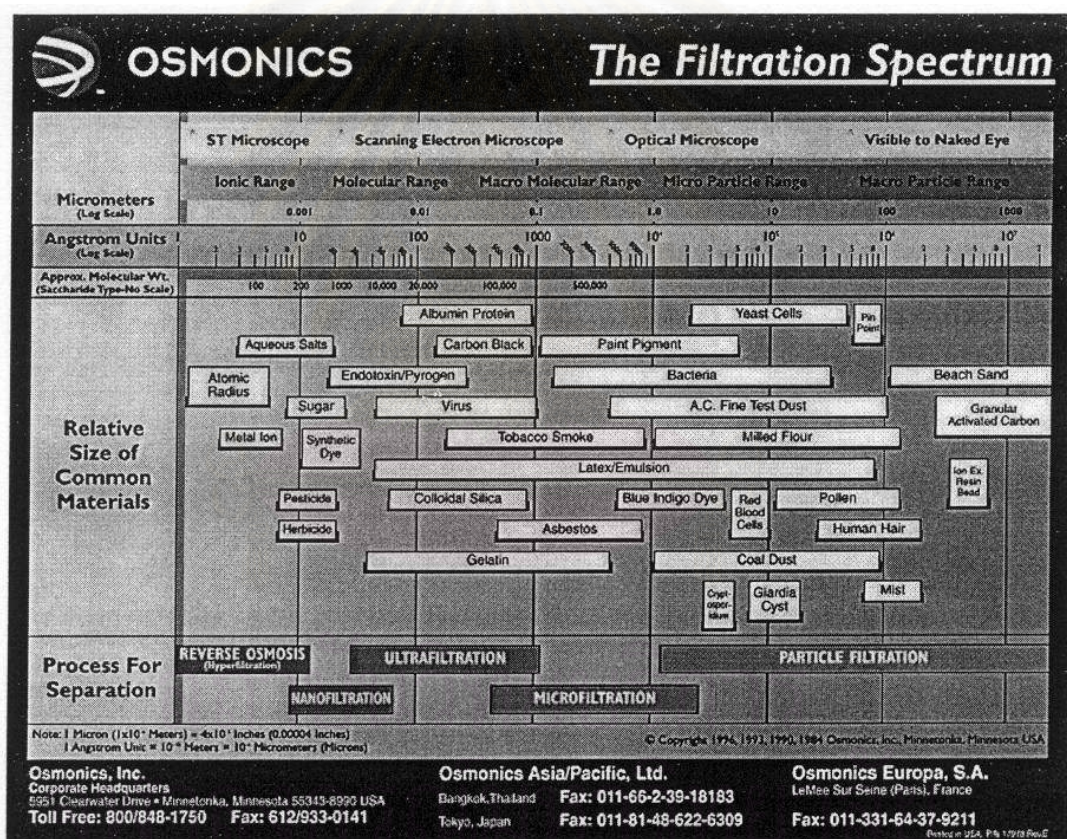
2.3 กระบวนการเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรน หมายถึงกระบวนการต่างๆ ที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (Semi-permeable Membrane) ในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลว (มันลิน ตันกุลเวศม์, 2539) และสืบเนื่องมาจากระดับความเข้มงวดที่มากขึ้นของกฎหมายซึ่งเปลี่ยนแปลงจากการบำบัดที่ปลายท่อ (End-of-pipe Treatment) ซึ่งเป็นวิธีบำบัดของเสียที่มีค่าใช้จ่ายสูง มาเป็นการไม่ปล่อยของเสียออกสู่ธรรมชาติ (Zero Discharge) ซึ่งเป็นวิธีที่นอกจากจะเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมแล้วยังเป็นวิธีที่สามารถนำสารมีค่าที่อยู่ในน้ำเสีย และน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นวิธีบำบัดโดยไม่ปล่อยของเสียออกสู่ธรรมชาติจึงเป็นวิถีทางใหม่สำหรับกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมทุกชนิด รวมถึงในกระบวนการผลิตน้ำประปา เพื่อประโยชน์ในทางเศรษฐศาสตร์ และทางสิ่งแวดล้อม

การเกิดขึ้นของกระบวนการเมมเบรน สร้างมิติใหม่ในการแยกและทำให้บริสุทธิ์ (Purification) สำหรับทั้งระบบ ของแข็ง-ของเหลว และ ก๊าซ-ก๊าซ โดยกระบวนการเมมเบรนมีบทบาทที่สำคัญทั้งในการบำบัดน้ำและน้ำเสีย ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างกระบวนการ Conventional Process ซึ่งก็คือ การตกตะกอนด้วยสารเคมี และวิธีย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological Oxidation) กับกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน คือกระบวนการเมมเบรนจะแยกสิ่งเจือปนออกจากน้ำ โดยไม่มีการทำลายโครงสร้างของเจือปนเหล่านั้น นอกจากนี้กระบวนการเมมเบรน

ยังมีข้อได้เปรียบที่สำคัญอื่น ๆ อีกคือ ใช้พลังงานต่ำ ต้องการพื้นที่น้อย สามารถใช้ได้ง่ายในการปรับปรุงให้ระบบที่มีอยู่แล้วมีประสิทธิภาพมากขึ้น การแยกเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ให้คุณภาพของน้ำที่ออกจากระบบที่ดีกว่า และหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีต่าง ๆ จึงไม่มีปัญหาเรื่องตะกอนเคมีที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการเมมเบรนเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ

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



ที่มา : <http://www.osmonics.com>

รูปที่ 2.3 ความสามารถในการกำจัดสารขนาดต่าง ๆ ของเมมเบรนแต่ละชนิด

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการเมมเบรนแบบต่างๆ (Rautenbach และ Albrecht, 1989)

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

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของกระบวนการเมมเบรนต่างๆ สำหรับการบำบัดน้ำเสีย (Cartwright,1994)

Feature	MF	UF	NF	RO	Electrodialysis	Pervaporation	Membrane*Con- tactor Technology
Suspended solids removal	Excellent	Impractical	Impractical	Impractical	N/A	N/A	N/A
Dissolved organic removal	N/A	Excellent ¹	Excellent ¹	Excellent ¹	N/A	Good ³	Good ⁴
VOC removal	N/A	Poor	Fair ¹	Fair-Good ¹	N/A	Excellent	Good
Dissolved inorganic removal	N/A	N/A	Good (function of salt species)	Very good (90 -99%removal)		N/A	Good(liquid-liquid) extraction
Osmotic pressure effects	None	Minor	Significant	High	None	None	None
Concentration capabilities	Up to 5% total solids	Up to 50% organics	Up to 15% ²	Up to 15% ²	Up to 20% (ionic concentration)	N/A	Up to 80% (organics)
Permeate quality	Excellent	Excellent	Good	Excellent	Good	Excellent	Excellent
Energy requirements	20-40 psi	50-100 psi	70-150 psi	225-1000 psi	Function of ionic concentration	<25% of distillation	<60 psi
Capital costs(\$/GPD)	0.5-5	0.5-7	0.5-5	0.5-5	0.5-4	7-15	0.5-4
Operating cost (\$/1000 gal feed rate)	0.5-4	0.5-3	0.75-3	1-3	0.5-1	3-5	0.4-4
1.Function of molecular weight 2.Function of osmotic pressure 3.Function of vapor pressure 4.Function of vapor pressure and concentration							
N/A-not applicable		GPD-gallons per day					

2.3.1 กระบวนการ NF

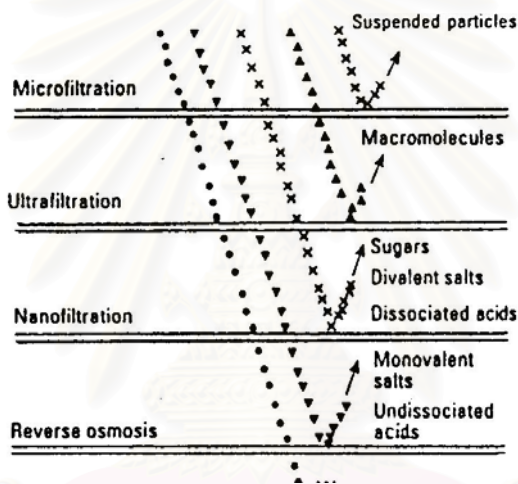
กระบวนการ NF เป็นกระบวนการเมมเบรนแบบใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้นโดยใช้แรงขับ คือ แรงดันที่มีค่าอยู่ระหว่างช่วงค่าที่ใช้ในกระบวนการ Reverse Osmosis (RO) และ Ultrafiltration (UF) (Eriksson, 1998) โดยกระบวนการ RO จะให้ค่าพลังค์ที่ต่ำกว่า ในขณะที่ใช้แรงดัน (Operating Pressure) สูงกว่า และจะใช้ในกระบวนการทำให้ปราศจากแร่ธาตุ (Demineralization) หรือการกำจัดของแข็งละลายทั้งหมดออกจากน้ำ ในขณะที่กระบวนการ UF จะให้ค่าพลังค์ที่สูงกว่า โดยใช้แรงดันที่ต่ำกว่า และสามารถกำจัดสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ๆ เช่น กรดฮิวมิก กรดฟัลวิก เป็นต้น อย่างไรก็ตามกระบวนการ UF ไม่สามารถกำจัดเกลือ กรด น้ำตาล ฯลฯ ในขณะที่กระบวนการ NF รวมความสามารถ ของกระบวนการ RO และ UF โดยสามารถกำจัดสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ และไอออนที่มีหลายวาเลนซ์ (Multivalent Ions) ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่แรงดันขนาดปานกลาง (138-827 kPa) (Amy และคณะ, 1990) และสามารถกำจัดเกลือ Trihalomethane Formation Potential (THMFP) โลหะหนัก สี ไวรัสทุกชนิด แบคทีเรีย และพาราสิต จากน้ำและน้ำเสียได้ (Cluff, 1992) ดังนั้นกระบวนการ NF จึงสามารถใช้อย่างได้ผลกับระบบบำบัดน้ำและน้ำเสีย

2.3.2 ประวัติความเป็นมาของกระบวนการ NF

ในปี ค.ศ. 1970 บริษัท Israel Desalination Engineering ได้ใช้คำว่า “Hybrid Filtration” สำหรับกระบวนการซึ่งดำเนินระบบอยู่ระหว่างช่วงความดันที่ใช้กับกระบวนการ RO และ UF กระบวนการนี้สามารถกำจัดโซเดียมคลอไรด์ได้ในช่วง 50-70% และกำจัดสารอินทรีย์ได้ประมาณ 90% ข้อเสียที่สำคัญของชื่อ HYbrid Filtration คือ ไม่สามารถอธิบายได้อย่างกระจ่างชัดถึงประเภทของการกรองที่ใช้ ซึ่งอาจจะเป็นอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่าง Media Filtration และ Cartridge Filtration

ในช่วงต้นปี ค.ศ. 1980 บริษัท Film Tech ได้ทำการพัฒนาเมมเบรนประเภทใหม่ขึ้น ซึ่งให้ค่าอัตราการผลิตน้ำสะอาด ประมาณ $34 L/m^2-hr$ โดยเมมเบรนนี้กำจัดสารละลายเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ได้น้อยประมาณ 10% และกำจัดสารละลายซูโครสได้ประมาณ 90% ด้วยเหตุที่เมมเบรนนี้กำจัดโซเดียมคลอไรด์ได้น้อยจึงเป็นการไม่ถูกต้องที่จะเรียกว่าเป็น RO เมมเบรน และไม่สามารถเรียกได้ว่าเป็น UF เมมเบรน เนื่องจากกำจัดซูโครสได้เกือบหมด

เป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายว่าตัวทำละลาย และตัวถูกละลาย เคลื่อนที่ผ่าน RO เมมเบรนโดยการแพร่ (Diffusion) และเคลื่อนที่ผ่าน UF เมมเบรนโดยการไหลผ่านรูของเมมเบรน ดังนั้นเมมเบรนชนิดใหม่นี้จะเป็น RO เมมเบรน แต่เพื่อสามารถแยกแยะมันออกจาก RO เมมเบรน ซึ่งสามารถกำจัดโซเดียมคลอไรด์ได้ในปริมาณที่สูง บริษัท Film Tech จึงได้กำหนดชื่อ NF เมมเบรนขึ้น ชื่อ NF กำหนดขึ้นในทำนองเดียวกับ Microfiltration (MF) คือเมื่อสารละลายมากกว่า 95% ที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ $1 \mu m$. สามารถถูกกำจัดโดยเมมเบรนจะเรียกเมมเบรนนั้นว่า MF เมมเบรน ในทำนองเดียวกัน เมื่อสารละลายที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ $1 nm$. สามารถถูกกำจัดโดยเมมเบรน จะเรียกเมมเบรนนั้นว่า NF เมมเบรน (Eriksson, 1988) NF เมมเบรนถูกผลิตเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำดื่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1986 เป็นต้นมา (Cluff, 1992)



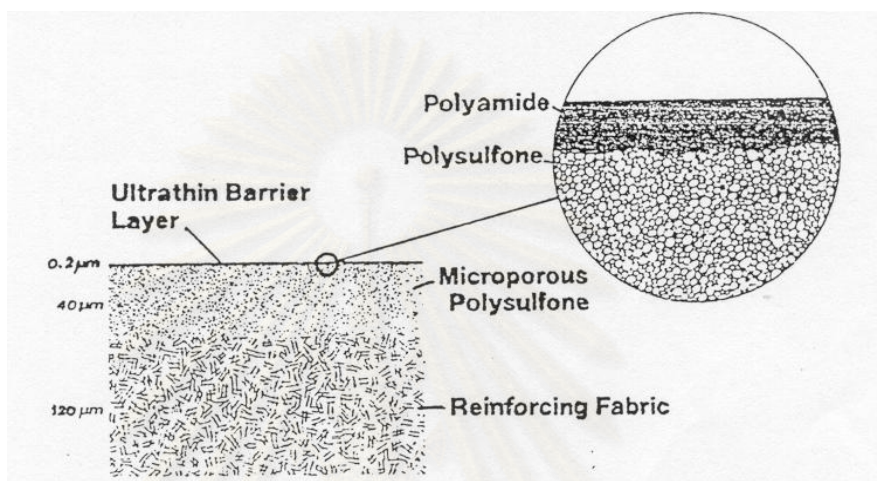
รูปที่ 2.4 ความสามารถในการแยกของ NF เมมเบรน (Raman และคณะ, 1994)

ช่วงความดันที่ใช้สำหรับ NF เมมเบรนคือ 198-827 kPa (Tan และ Amy, 1991) อย่างไรก็ตาม NF เมมเบรนบางชนิดสามารถใช้ความดันได้สูงถึง 4000 kPa และบางชนิดอาจใช้ความดันได้ต่ำประมาณ 30 kPa (Ratanatamskul, 1996) ซึ่งขึ้นอยู่กับสารละลายที่เข้าสู่ระบบ และระดับความต้องการในการกำจัดสารละลาย

2.3.3 คุณสมบัติของ NF เมมเบรน

วัสดุที่ใช้ในการทำ NF เมมเบรนจะเป็นสารโพลีเมอร์อินทรีย์ ในอดีต NF เมมเบรนมักทำจากเซลลูโลส และโพลีเอไมด์ โดยจะมีรูปแบบเป็น Multiple Layer Thin Film Composite สามารถให้ค่าฟลักซ์ เปอร์เซ็นต์การกำจัด ตลอดจนความทนทานต่อแรงอัด และสารเคมีต่างๆ ได้ดี

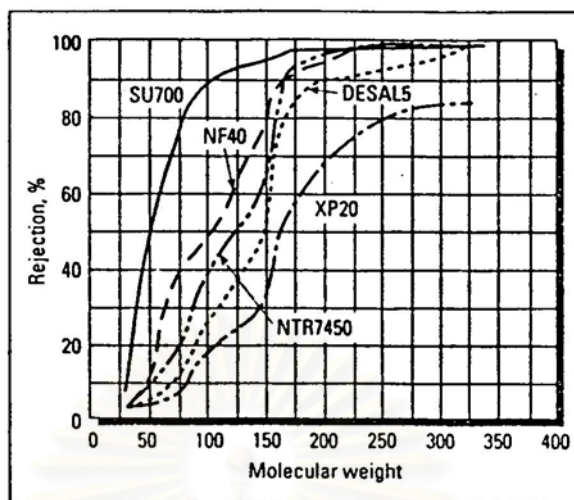
กว่า (Petersen และ Cadotte, 1990) โดยลักษณะของเมมเบรนจะประกอบด้วยชั้นบางๆ ของเมมเบรน ซึ่งเรียกว่า Active Membrane Layer วางตัวอยู่บนชั้นรองรับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก โดยทั่วไป Active Membrane Layer จะประกอบด้วยหมู่สารเคมีที่เป็นประจุลบ และเชื่อว่าเมมเบรนมีรูพรุนซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2 nm . (Raman และคณะ, 1994)



รูปที่ 2.5 รูปแสดงภาคตัดขวางของ Composite NF เมมเบรนชนิดหนึ่ง (Petersen และ Cadotte, 1990)

เนื่องจากขนาดรูพรุนของ NF เมมเบรนมีขนาดเล็กมาก ในลักษณะเดียวกับ RO เมมเบรน ในบางครั้งจึงกำหนดคุณสมบัติของเมมเบรนโดยใช้ค่า Molecular Weight cut-off (MWCO) ซึ่งก็คือขนาดของโมเลกุลที่เล็กที่สุดที่จะถูกกำจัดโดยเมมเบรน ค่า MWCO สำหรับ NF อยู่ในช่วง 100-200 ดังแสดงในรูปที่ 2.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 ช่วงค่าของ MWCO ของ NF ชนิดต่างๆ (Raman และคณะ, 1994)

ส่วนค่า Molecular Weight Cut Off (MWCO) สำหรับ UF มีค่ามากกว่า 1000 และสำหรับ RO มีค่าน้อยกว่า 500 (Eriksson, 1988) แต่ในความเป็นจริงแล้วเมมเบรนไม่มีช่วงค่า MWCO ที่สามารถกำหนดได้แน่นอน ทำให้มีช่วงค่า MWCO ที่คาบเกี่ยวกันระหว่าง RO NF และ UF ช่วงค่า MWCO สำหรับ NF อาจจะไม่ใกล้เคียงกับ RO หรือ UF หรืออยู่ระหว่างกระบวนการเมมเบรนทั้งสอง ขึ้นอยู่กับระดับความต้องการในการกำจัดสิ่งเจือปนออกจากน้ำ

2.3.4 กลไกในการทำงานของกระบวนการ NF

กลไกในการทำงานของกระบวนการ NF เหมือนกันกับการทำงานของ RO ต่างกันที่แรงขับที่ใช้ คือ NF จะใช้แรงดันที่ต่ำกว่ากระบวนการ RO ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายแตกต่างกัน ซึ่งการทำงานของเมมเบรนทั้งสองชนิดนี้เกี่ยวข้องกันโดยตรงกับกระบวนการออสโมซิส (Osmosis)

ออสโมซิส (Osmosis) หมายถึง การเคลื่อนที่ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติของน้ำผ่านเยื่อเมมเบรนบางๆ (Semi Permeable Membrane) จากสารละลายเจือจาง ไปยังสารละลายเข้มข้น (รูปที่ 2.6) เยื่อเมมเบรนในอุดมคติยอมให้น้ำไหลผ่านได้เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติ โมเลกุลหรืออิออนบางชนิดอาจไหลผ่านได้เช่นกัน ถ้าจัดระบบออสโมซิสให้มีการไหลเป็นแบบที่แสดงในรูปที่ 2.6ก. เมื่อปล่อยให้มีการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนจนกระทั่งถึงจุดสมดุล (ไม่มีการไหลอีก) ระดับ

น้ำในด้านซ้ายซึ่งเป็นสารละลายเข้มข้นจะสูงกว่าระดับน้ำในด้านขวาซึ่งเป็นน้ำจืด ผลต่างของระดับน้ำนี้เรียกว่า แรงดันออสโมซิส (Osmotic Pressure) นักวิทยาศาสตร์ได้อธิบายถึงปรากฏการณ์ออสโมซิสว่า อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสารละลายเข้มข้นมี Vapor Pressure ต่ำกว่าสารละลายเจือจาง ระดับน้ำในทั้งสองด้านของเมมเบรนจึงมีการปรับตัว จนกระทั่งแรงดันบนผิวน้ำทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน ถ้ามีแรงดันที่มีค่าสูงกว่าแรงดันออสโมซิสมากจะทำต่อด้านที่มีสารละลายเข้มข้น น้ำจะไหลย้อนกลับ (รูปที่ 2.6ข.) ซึ่งเป็นการดำเนินการไหลธรรมชาติ วิธีดังกล่าวนี้วิศวกรได้นำมาใช้เพื่อแยกน้ำออกจากสารละลายเข้มข้นต่างๆ และเรียกว่า Reverse Osmosis (RO) หรือออสโมซิสย้อนกลับ ดังนั้นกระบวนการ RO และ NF จึงอาศัยปัจจัยสำคัญ 2 อย่าง คือ แรงดันและเมมเบรน

แรงดันออสโมซิส (π) เป็นคุณสมบัติของสารละลายที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ดังอาจแสดงได้ด้วยสมการ ดังนี้

$$\pi = nCRT \quad (2.1)$$

โดยที่ π = แรงดันออสโมซิส (atm.)

n = จำนวนไอออนในสารประกอบ เช่น NaCl มี $n = 2$, Na_2SO_4 มี $n = 3$ เป็นต้น

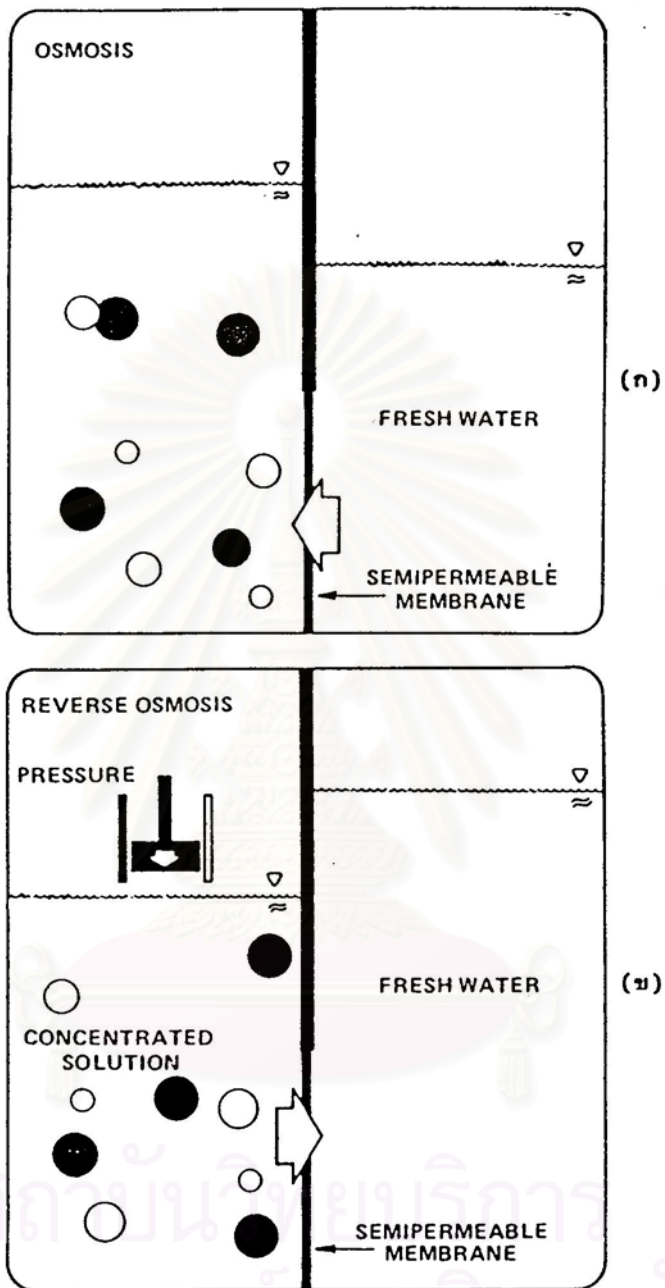
C = ความเข้มข้นของสารละลาย (mole/L)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ = 0.082 atm.-L/mole-°K

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (°K) = 273 + °C

NF เมมเบรนกำจัดเกลือและสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ด้วยกลไกที่แตกต่างจากกลไกของการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) หรือการดูดติดผิว (Adsorption) นักวิจัยเชื่อว่ากระบวนการ NF มีกลไก 2 กลไกในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำคือ

1. กลไกทางกายภาพ เนื่องจาก NF เมมเบรนมีขนาดรูพรุนที่เล็กมาก (ประมาณ 2 nm.) สารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 จะถูกกำจัดโดยวิธีการกรองติดค้าง (Sieve)
2. กลไกเนื่องจากแรงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Interaction) : เนื่องจากโดยทั่วไป NF เมมเบรนจะมีประจุลบ กลไกการกำจัดเกลือจึงเกิดขึ้นโดยแรงผลักทางไฟฟ้าของประจุลบ ไอออนลบยังมีประจุไฟฟ้ามาก ก็จะถูกกำจัดได้มาก



รูปที่ 2.7 ออสโมซิส (ก) และ ออสโมซิสย้อนกลับ (ข) (มันสัน ตันทูลเวศม์, 2539)

2.3.5 ฟลักซ์และการต้านทานต่อการอุดตันของ NF เมมเบรน

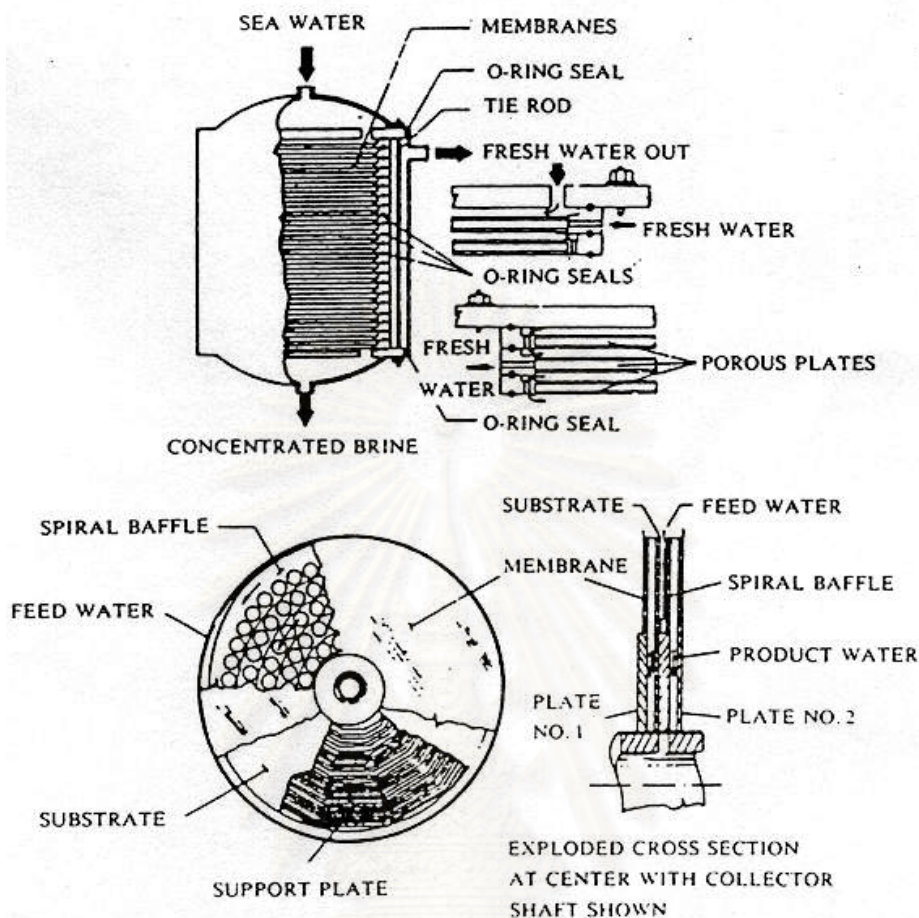
เนื่องจาก NF เมมเบรนส่วนใหญ่จะมี Active Layer เป็น Hydrophilic และมีประจุลบอยู่บนตัวรองรับที่เป็น Hydrophobic UF เมมเบรน ซึ่งทำให้ NF เมมเบรนให้ค่าฟลักซ์ที่สูง ทั้งนี้เนื่องจากความเหมาะสมในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำของเมมเบรน (Rudie, <http://osmonics.com/products/Page772.htm>) และเนื่องจาก Active Layer ของเมมเบรน จึงทำให้มีความต้านทานต่อการอุดตันมากขึ้นต่อ Hydrophobic Colloid น้ำมัน โปรตีน และสารอินทรีย์อื่นๆ (Raman และคณะ, 1994)

2.3.6 โมดูลชนิดต่างๆ ของระบบ NF

โมดูลที่ใช้สำหรับ NF เมมเบรนคือ Flat Sheets (Plate and Frame Type) , Hollow Fiber และ Spiral Wound โดยโมดูลแบบ Hollow Fiber และ Spiral Wound เหมาะสำหรับการทดลองในระดับ Pilot Scale และ Industrial Scale ในขณะที่โมดูลแบบ Flat Sheet ใช้สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ ค่าฟลักซ์ที่ได้สำหรับโมดูลแบบ Spiral Wound มีค่ามากกว่าที่ได้จาก Hollow Fiber แต่ข้อได้เปรียบของโมดูลแบบ Hollow Fiber คือประสิทธิภาพในการกำจัดที่สูง ในขณะที่ความต้องการการบำบัดขั้นต้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบมีไม่มากนัก (Laine และคณะ, 1987)

2.3.6.1 Plate and Frame Module

เทคนิคนี้เป็นการจัดแผ่นเมมเบรนที่ง่ายที่สุด โมดูลที่ใช้เทคนิคนี้มีลักษณะการทำงานคล้าย Filter Press แผ่นเมมเบรนวางอยู่บนแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน (Porous Plate) หรือแผ่นรองรับที่มีรูช่องให้น้ำไหลออกได้ เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางซ้อนและสลับกัน น้ำถูกบังคับให้ซึมผ่านเมมเบรนและแผ่นรองรับและไหลออกจากโมดูล โมดูลแบบนี้ต้องเสียเงินค่าติดตั้ง และดูแลรักษาแพงมาก

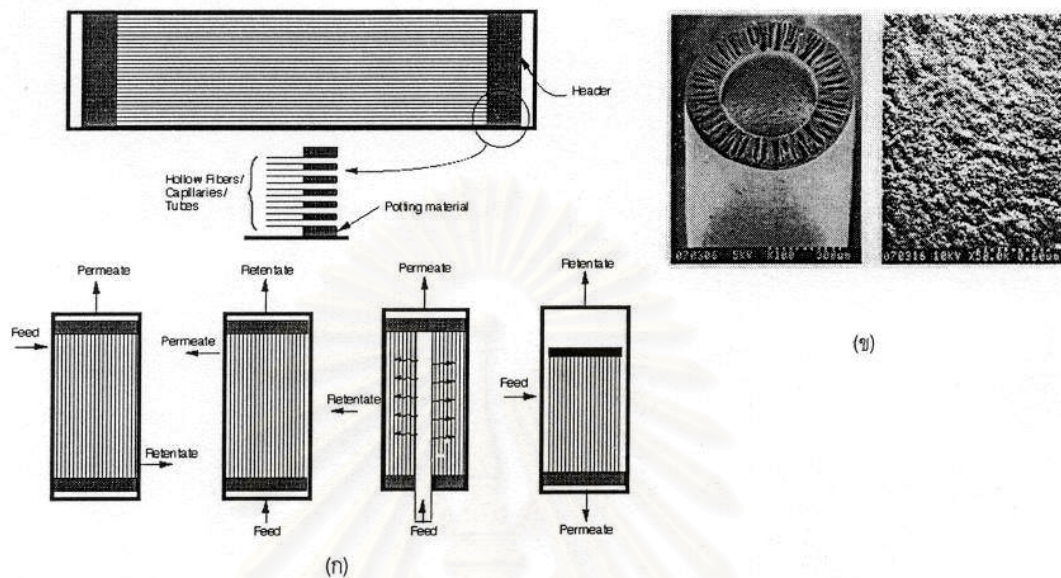


รูปที่ 2.8 Plate and Frame Module (มันลีน ตันซูลเวคม์, 2539)

2.3.6.2 Hollow Fiber Module

โมดูลแบบเส้นใยกลวงหรือ Hollow Fiber Module ทำมาจากวัสดุไนลอนจำพวกโพลีเอไมด์ (Polyamide) ซึ่งสร้างโดย บริษัทดูปองต์ (Du Pont Co.) ต่อมาภายหลัง บริษัทดาวเคมี (Dow Chemical Co.) ได้พัฒนาเมมเบรนที่ทำด้วยเซลลูโลสไตรอะเซเตด (Cellulose Triacetate) และสร้างเป็นเส้นใยกลวงได้ เส้นใยกลวงที่ทำจากโพลีเอไมด์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 50-80 μm . และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณครึ่งหนึ่งของภายนอก ส่วนเส้นใยกลวงที่ทำมาจากเซลลูโลสไตรอะเซเตด มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 200-300 μm . วิธีนำเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมาใช้ประโยชน์กระทำโดยนำมารวมกันเป็นมัดๆ และงอพับให้เป็นรูปเกือกม้าหรือตัว U ปลายทั้งสองข้างของเส้นใยทั้งหมดมัด ถูกตรึงติดอยู่กับทางน้ำออก เส้นใยเมมเบรนทั้งหมดวางอยู่ในถังรูปทรงกระบอก น้ำดิบเข้ามาทางท่อเจาะรู ซึ่งวางอยู่ตรงกลางของถังทรง

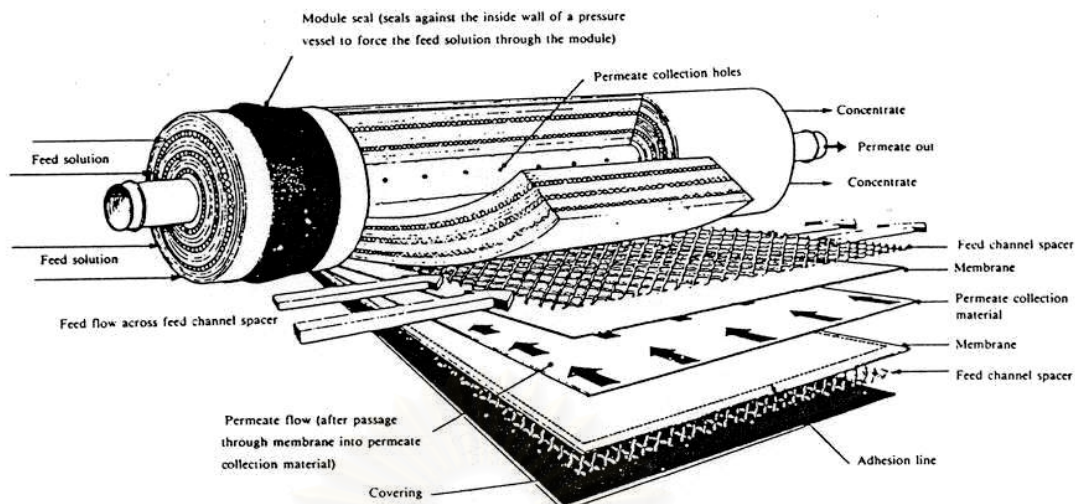
กระบอก และกระจายน้ำไปยังส่วนต่างๆ แรงดันทำให้น้ำซึมเข้าเส้นใยเมมเบรนและทะลุถึงภายใน น้ำบริสุทธิ์จะซึมไปตามรูกลวงของเส้นใยและไปรวมกันที่ทางออก



รูปที่ 2.9 Hollow Fiber Module

2.3.6.3 Spiral Wound Module

โมดูลแบบนี้ประกอบด้วยเมมเบรน 2 แผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่กลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นแบนทั้งสามรอบท่อเจาะรู โดยมีแผ่นตะแกรงทำด้วย Polypropylene คลุมปิดอยู่ด้านนอก ขอบของแผ่นเมมเบรนทั้งสามด้านถูกยึดไว้ด้วยกาวพิเศษ ขอบที่เหลือปล่อยให้เปิดตามปกติและยึดติดกับท่อเจาะรู ลักษณะเช่นนี้ทำให้น้ำถูกบังคับให้ไหลไปยังท่อเจาะรูเสมอ การม้วนเมมเบรน แผ่นรองรับ และตะแกรงพลาสติก ทำให้ได้โมดูลรูปทรงกระบอกที่สามารถบรรจุไว้ในท่อโลหะธรรมดาได้ โมดูลแบบนี้อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 10 20 หรือ 30 cm. และมีความยาวต่างๆ กัน แต่มักไม่เกิน 1 m. น้ำดิบถูกบังคับให้ไหล (ในแนวแกนของโมดูล) เข้าไปตามแผ่นตะแกรง จากนั้นแรงอัดทำให้น้ำซึมผ่านทะลุเมมเบรน (ตามแนวรัศมีของโมดูล) ลงไปถึงแผ่นรองรับซึ่งทำหน้าที่ส่งน้ำบริสุทธิ์ไปยังท่อเจาะรู เพื่อรับน้ำออกจากโมดูล



รูปที่ 2.10 Spiral Wound Module (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2539)

2.3.7 โมเดลสำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำและสารละลายผ่าน NF เมมเบรน

2.3.7.1 Pore Model

โมเดลนี้ใช้ได้ทั้งกับ UF และ NF ซึ่งเป็นเมมเบรนที่มีรูพรุนมากกว่าที่จะใช้กับ RO เนื่องจากผลของความสามารถในการซึมผ่านได้สูงของเมมเบรน สมมติฐานของการไม่มีการไหลแบบ Coupling จึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ การไหลแบบ Coupling เป็นลักษณะการไหลแบบหนืด (Viscous Flow) สมมติให้รูของเมมเบรนเป็นรูปทรงกระบอกกลมที่มีรัศมีคงที่ตลอดเมมเบรน และโมเลกุลของตัวถูกละลายถูกแยกออกจากน้ำ เนื่องจากมีขนาดใหญ่กว่ารูของเมมเบรน หรือ เนื่องจากแรงเสียดทานภายในรูของเมมเบรน (Kootatep, 1979)

ค่าฟลักซ์ (Volumetric Water Flux) ของ Pore Model สามารถอธิบายได้โดย Poiseuille's Law โดยสมมติให้อยู่ในรูปของวัฏจักรของพาราโบลาโดยรอบเส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าความเร็วเฉลี่ยสามารถแสดงได้โดย

$$u = \frac{r^2}{8\nu} \frac{dP}{dx} \quad (2.2)$$

โดยที่ u = ความเร็วเฉลี่ยของของเหลวในรูเมมเบรน
 r = ค่ารัศมีเทียบเท่าของรูของเมมเบรน (Equivalent Cylindrical Pore Radius)
 ν = ค่า Kinetic Viscosity ของของเหลว
 $\frac{dP}{dx}$ = ค่า Gradient ของความดัน

ดังนั้น ค่าฟลักซ์ (Volumetric Water Flux) สามารถแสดงได้ดังนี้

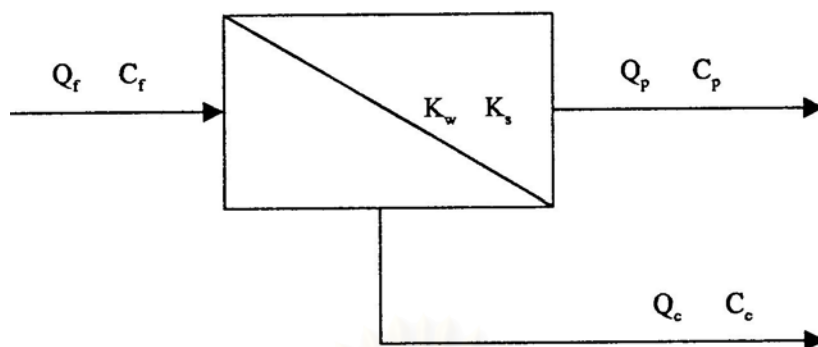
$$F_w = \frac{er^2}{8\nu} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (2.3)$$

โดยที่ F_w = ค่า Volumetric Water Flux
 e = สัดส่วนของพื้นที่เปิดของเมมเบรน (ความพรุน)

2.3.7.2 Solution-Diffusion Model

สมการที่ 2.4-2.9 อธิบายเมมเบรนที่มีการแพร่ (Diffusion) เกิดขึ้นเป็นตัวควบคุมการทำงานของเมมเบรน และแสดงการทำสมดุลมวลของน้ำ สารละลายต่างๆ Recovery ฟลักซ์ของน้ำ และฟลักซ์ของสารละลายต่างๆ ตามลำดับ สมการที่ 2.10-2.12 แสดงวิธีการคำนวณหาค่า Mass Transfer Coefficient (MTCs) และ Concentration Gradients ซึ่งสามารถนำมาใช้หาค่า C_p ตามสมการที่ 2.13 โมเดลนี้ไม่พิจารณาถึงผลของ Concentration Polarization และการไหลแบบ Coupling ผ่านเมมเบรน ถึงแม้ว่าปรากฏการณ์นี้เป็นที่รู้กันว่าจะเกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของมวลในกระบวนการเมมเบรน โมเดลที่พิจารณาทั้ง Concentration Polarization หรือ Ion Coupling และ System Recovery ยังไม่มีการทำวิจัยในขณะนี้

อย่างไรก็ตาม โมเดลนี้จะพิจารณาผลของความดัน เปอร์เซ็นต์ Recovery ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ และค่า MTCs ของทั้งตัวทำละลาย และตัวถูกละลาย เพื่อทำนายความเข้มข้นของน้ำ Permeate วิธีนี้มีข้อดีมากกว่าการใช้ เปอร์เซ็นต์การกำจัดในการทำนายความเข้มข้นของน้ำ Permeate และใช้กันอย่างแพร่หลายในการบวนการผลิตน้ำที่ใช้เมมเบรน (Blau และคณะ, 1992)



$$Q_f = Q_p + Q_c \quad (2.4)$$

โดยที่ Q_f = อัตราการไหลของน้ำ Influent
 Q_p = อัตราการไหลของน้ำ Permeate
 Q_c = อัตราการไหลของ Concentrate

$$Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c \quad (2.5)$$

โดยที่ C_f = ความเข้มข้นของน้ำ Influent
 C_p = ความเข้มข้นของน้ำ Permeate
 C_c = ความเข้มข้นของ Concentrate

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (2.6)$$

โดยที่ R = Recovery

$$F_w = K_w [\Delta P - \Delta \pi] = \frac{Q}{A} \quad (2.7)$$

โดยที่ F_w = ค่าฟลักซ์ของน้ำ Permeate
 K_w = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ
 ΔP = ความแตกต่างระหว่างแรงดันของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน

$\Delta\pi$ = ความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมซิสของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน

$$F_s = K_s [C_m - C_p] \quad (2.8)$$

$$F_s = K_s \left[\left(\frac{C_f + C_c}{2} \right) \right] - C_p = \frac{Q_p \cdot C_p}{A} \quad (2.9)$$

โดยที่ F_s = Solute Flux

K_s = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวถูกละลาย

C_m = ความเข้มข้นของสารละลายที่ผิวของเมมเบรน

A = พื้นที่ผิวของเมมเบรน

$$K_w = \frac{Q_p}{A \cdot \Delta P} \quad (2.10)$$

$$K_s = \frac{Q_p \cdot C_p}{A \cdot \Delta P} \quad (2.11)$$

$$\Delta C = [C_m - C_p] \quad (2.12)$$

$$= \left[\left(\frac{C_f + C_c}{2} \right) - C_p \right]$$

$$C_p = \frac{K_s \cdot C_f}{K_w (\Delta P - \Delta \pi) \left[\frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + K_s} \quad (2.13)$$

2.3.7.3 Donnan Exclusion Model

NF เมมเบรนส่วนใหญ่มีประจุลบ เมื่อใช้เมมเบรนที่มีประจุ (Charged Membrane) กับสารละลายเกลือจะเกิดสภาวะ Dynamic Equilibrium ขึ้น ไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของเมมเบรน (Counter Ion) จะมีความเข้มข้นสูงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ในขณะที่ไอออนที่มีประจุเดียวกับประจุของเมมเบรน (Co-ion) จะมีความเข้มข้นต่ำ เมื่อเทียบกับสารละลายบริเวณนอก

Membrane Phase (Bulk Solution) ทำให้เกิด “Donnan Potential” ปฏิกิริยาการนี้จะทำให้ไม่มีการแพร่ (Diffusion) ของ Counter Ion จาก Membrane Phase ไปยัง Bulk Solution และเช่นเดียวกัน คือ ทำให้ไม่มีการแพร่ของ Co-ion จาก Bulk Solution ไปยัง Membrane Phase ซึ่ง Donnan Potential จะยังเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้แรงดันในการขับเคลื่อนน้ำผ่านเมมเบรน ผลของ Donnan Potential จะทำให้เกิดการผลักออกของ Co-ion จากเมมเบรน และเนื่องจากความต้องการความเป็นกลางทางไฟฟ้า (Electroneutrality) จึงทำให้ Counter Ion ถูกกำจัดออกไปด้วย

สำหรับเกลือ $M_{z_y}Y_{z_m}$ ซึ่งแตกตัวเป็นไอออน M^{Zm^+} และ Y^{Zy^-} ที่สภาวะสมดุลค่า Salt Distribution Coefficient (K^*) แสดงได้ดังนี้

$$K = \left[\frac{C_{y(m)}}{C_y} \right] = \left[Z_y^{z_y} \left(\frac{C_{y(m)}}{C_m^*} \right)^{z_y} \left(\frac{\gamma}{\gamma_m} \right)^{z_y + z_m} \right]^{\frac{1}{z_m}}$$

โดยที่ Z_i แสดงประจุลบของไอออน C_y และ $C_{y(m)}$ คือ ความเข้มข้นของ Co-ion y ใน Bulk Solution และ Membrane Phase ตามลำดับ γ และ γ_m คือ Activity Coefficient และ C_m^* คือ Charge Capacity ของเมมเบรน

$$\text{Rejection สามารถประมาณได้เป็น } R = 1 - K^*$$

โมเดลนี้สามารถทำนาย Rejection ในรูปฟังก์ชันของ Membrane Charge Capacity , ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบและประจุของไอออน ซึ่งอธิบายถึงการกำจัดสารละลาย แต่ไม่พิจารณาถึงผลของ Diffusive และ Convective Flux ซึ่งมีความสำคัญเช่นเดียวกันสำหรับเมมเบรนที่มีประจุอย่าง NF เมมเบรน (Bhattacharyya และ Williams, 1992)

2.3.7.4 Extended Nernst-Planck Model

โมเดลนี้ให้ค่าฟลักซ์ของไอออนผ่านเมมเบรนที่มีประจุโดยสมการ

$$J_j = J_{wc_{j(m)}} + Z_j C_{j(m)} \frac{FE}{R_g T} - D_{j(m)} \frac{dC_{j(m)}}{dx} - C_{j(m)} D_{j(m)} d \left(\frac{\ln \gamma_{j(m)}}{dx} \right) \quad (2.14)$$

โดยที่ J_j , $C_{j(m)}$, $D_{j(m)}$, Z_j , $\gamma_{j(m)}$ คือฟลักซ์ , ความเข้มข้น , Diffusivity , ประจุ และ Activity Coefficient ของไอออน j ตามลำดับ m แสดงถึง Membrane Phase , E คือ Donnan

Potential และ F คือ Faraday's Constant จากสมการเทอมแรกแสดงถึง Solute Flux เนื่องจาก Convection เทอมที่สองแสดงถึงค่าฟลักซ์เนื่องจาก Donnan Potential และสองเทอมสุดท้ายอธิบายถึง Salt Flux เนื่องจาก Diffusion โมเดลนี้ใช้ทำนายการกำจัดตัวถูกละลาย ในรูปฟังก์ชันของความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ และประจุของไอออน เหมือนกับ Donnan Equilibrium Model แต่สมการของ Nernst-Planck รวมผลของ Convective และ Diffusion Fluxes ซึ่งมีความสำคัญสำหรับ NF เมมเบรนด้วย (Bhattacharyya และ Williams, 1996)

2.3.8 NF เมมเบรนบางชนิดที่มีขายในท้องตลาด

เนื่องจากข้อได้เปรียบหลาย ๆ อย่างของ NF เมมเบรน เช่น ค่าฟลักซ์ที่มากกว่า และการเลือกที่จะกำจัดเฉพาะสารที่ต้องการกำจัด เมื่อเปรียบเทียบกับ RO เมมเบรน ทำให้การวิจัยเกี่ยวกับ NF ขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว บริษัทผู้ผลิตได้ทำการผลิต NF เมมเบรน ชนิดต่าง ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้น ในปัจจุบันมี NF เมมเบรนหลายชนิดที่มีการผลิตออกมาใช้แล้ว

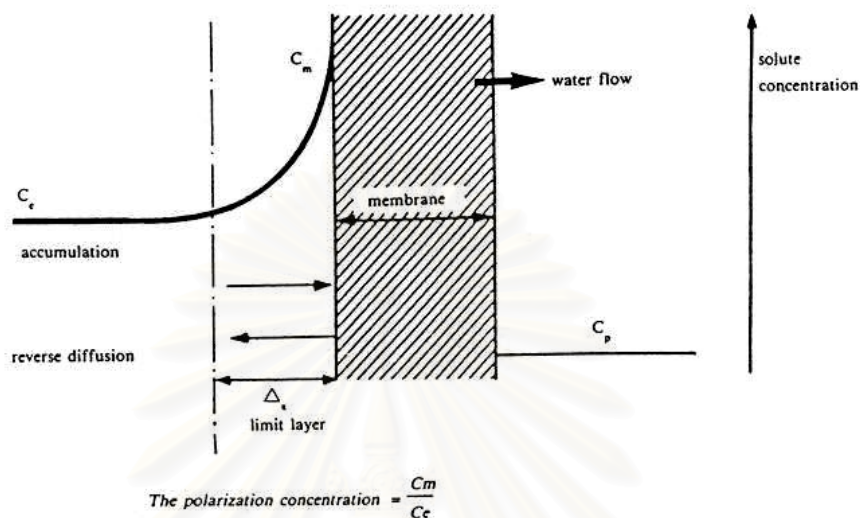
2.3.9 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการ NF

ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อประสิทธิภาพและฟลักซ์ของกระบวนการ NF ขึ้นอยู่กับสารละลายที่จะใช้กับกระบวนการ NF โดยปัจจัยที่อาจจะมีผลกับประสิทธิภาพในการกำจัดและค่าฟลักซ์ ระหว่างการกำจัด NOM ออกจากน้ำมีดังนี้ คือ Concentration Polarization การเกิด Fouling ลักษณะสมบัติของเมมเบรน ความดันที่ใช้ ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ อุณหภูมิของน้ำ พีเอช สารอื่นๆ ในน้ำ สารแขวนลอย ระยะเวลาในการดำเนินระบบ Crossflow Velocity และ เปอร์เซ็นต์ Recovery

2.3.9.1 Concentration Polarization

ในระบบไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic) ใด รวมทั้งระบบ NF จะมีชั้นน้ำที่เรียกว่า Boundary Layer อยู่ติดกับผิวหน้าของเมมเบรน ชั้นน้ำดังกล่าวนี้จะอยู่เป็นอิสระโดยไม่ผสมกับน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ภายนอก ความหนาของ Boundary Layer แปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำและความปั่นป่วน น้ำสะอาดถูกบังคับให้ออกจากชั้นนี้และกระจายข้ามเมมเบรนออกไปภายนอก ทำให้มีการสะสมตัวของสารละลายต่าง ๆ เกิดขึ้นภายใน Boundary Layer (ดูรูปที่ 2.11) จนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำดิบหลายเท่า ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิด

Concentration Polarization ระดับของการเกิด Concentration Polarization อาจแสดงได้ด้วย อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นสูงสุด (ที่ผิวของเมมเบรน) ของสารละลายใน Boundary Layer และความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำดิบ หรือ $\frac{C_m}{C_e}$ ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 Concentration Polarization ที่เกิดขึ้นในระบบ NF

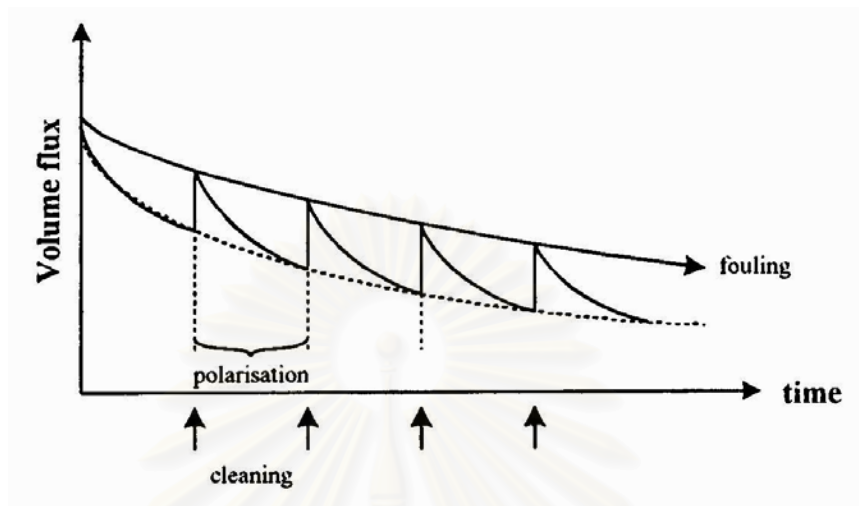
สมรรถนะในการกำจัดสารละลายของเมมเบรนขึ้นอยู่กับ Concentration Polarization เป็นอย่างมาก เนื่องจากการสะสมตัวของเกลือแร่ใน Boundary Layer ทำให้เกิดผลเสียต่าง ๆ ต่อระบบ NF ที่กำลังทำงานอยู่ดังต่อไปนี้

1. ทำให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้น เป็นผลให้อัตราการผลิตน้ำสะอาด (Water Flux) ลดลง
2. ทำให้มีการรั่วไหลของสารละลายผ่านเมมเบรน (Salt Flux) เพิ่มขึ้น เป็นผลให้น้ำที่ผลิตได้มีมลทินมากขึ้น
3. เร่งเมมเบรนให้เสื่อมสภาพเร็วขึ้น
4. ทำให้มีการตกผลึกของ CaCO_3 และ/หรือ CaSO_4 หรือสารประกอบอื่น ๆ

2.3.9.2 การเกิด Fouling

Membrane Fouling จะใช้สำหรับอธิบายการสูญเสียสภาพการกรองแบบ Irreversible ซึ่งไม่สามารถแก้ไขสภาพให้เหมือนเดิมได้โดยใช้แรงดันของน้ำหรือสารเคมี ซึ่งจะแตกต่างจากการเกิด Concentration Polarization ที่สามารถแก้ไขได้ด้วยการล้างย้อนหรือการทำความสะอาด ดังรูปที่ 2.12 ฟลักซ์ที่ลดลงเนื่องจาก เกิด Concentration Polarization จะเกิดขึ้นค่อนข้างเร็วและ

เมื่อทำการล้างย้อนหรือทำความสะอาดเมมเบรนแล้วฟลักซ์ก็จะเพิ่มกลับมาได้อีก แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นฟลักซ์ที่กลับคืนมาได้จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จึงทำให้ค่าฟลักซ์โดยรวมมีค่าลดลง



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของฟลักซ์กับระยะเวลาเดินระบบ

Fouling ที่เกิดบนเมมเบรนส่วนใหญ่ เป็นผลมาจากการอุดตันของสารอินทรีย์ในรูพรุนของเมมเบรน ทำให้ลดอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน และไม่สามารถทำให้กลับมาใช้งานได้เหมือนเดิม ซึ่งอาจจะเกิดได้จากการอุดตันของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ (Maynarovich และ Knyazkova, 1990)

1. การอุดตันบนด้านนอก (External Surface Fouling) ซึ่งจะเกิดจากการก่อตัวของชั้น cake หรือ gel บนผิวหน้าของเมมเบรนด้านน้ำดิบ ซึ่งการอุดตันในลักษณะนี้คืออาการเกิด 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 แต่น้ำยังสามารถผ่านไปได้พอสมควร
 - การอุดตันแบบธรรมดา (Standard Pore Blocking) เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กกว่ารูพรุนเข้าไปติดค้างอัดตัวอยู่ในรูพรุนของเมมเบรน

การอุดตันในแบบ Pore Blocking แต่ละชนิดนั้นจะไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลของของเหลวเช่น การล้างย้อน หรือการทำความสะอาด และการอุดตันลักษณะนี้ จะทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลงตั้งแต่ 5-20% จนกระทั่ง 80-95% หรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของ เมมเบรนและชนิดของสารละลาย โมเดลของการเกิด Fouling นั้นไม่สามารถหาได้ง่ายนัก ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยแบบ Empirical โมเดลหนึ่ง (Maynarovich และ Knyazkova, 1999) ที่ใช้แสดงการเกิด Fouling ได้แก่

$$J_v(t) = J_{ss} + a.e^{-b.t} \quad (2.15)$$

สมการที่ 2.15 เป็นสมการของฟลักซ์ที่ Steady State ได้จากค่าของ Concentration Polarization รวมกับการลดลงในแบบ Exponential ซึ่งค่าคงที่ a และ b สามารถหาได้จากการทดลองแยกสารละลายของเมมเบรนที่สภาวะต่าง ๆ กัน สมการทำนายการเกิด Fouling ถือว่ามีความสำคัญมากในการออกแบบระบบเมมเบรนอย่างมากเพื่อที่จะให้เกิด Fouling กับระบบน้อยที่สุดและยืดอายุการใช้งานของระบบเมมเบรนอีกด้วย

ตารางที่ 2.7 NF เมมเบรนบางชนิดที่มีขายในท้องตลาดในขณะนี้ (Raman และคณะ, 1994)

Manufacturer	Membrane	Active membrane layer	Charge	Operating conditions			Test conditions		Performance	
				P max(kPa)	pH	Temp. (°C)	Pressure (kPa)	FeedConc.(mg/L)NaCl	Flux (L/m ² -h)	%Rejection
Celfa	DRC-1000	**	**	4000	3-8	40	1000	3500	50	10
DDS	HC50	**	**	6000	2-10	60	4000	2500	80	50
Desalination	Desal-5	**	**	4200	2-11	50	1000	1000	46	47
Film Tech	NF40	PA	Negative	4100	2-11	45	2000	2000	43	45
	NF50	**	**	**	**	**	400	2000	**	50
	NF70	**	Negative	1700	3-9	45	600	2000	43	80
	XP20	**	**	**	**	**	1000	2000	36	20
	XP45	**	**	**	**	**	700	2000	36	50
	NF 40HF	**	**	**	**	**	900	2000	43	40
	NF40-8040	**	**	**	**	**	1600	2000(M)	36	95
Kalle	NF-PES10/PP60	**	**	6000	1-14	90	4000	5000	400	15
	NF-CA50/PET100	**	**	4000	2-8	40	4000	5000	120	55
Membrane Products Kiryat Weizmann	MPT-10	**	**	**	**	**	**	2000	**	63
	MPT-20	**	**	**	**	**	2500	50000	**	0
	MPT-30	**	**	**	**	**	2500	50000	**	10
Nitto	NTR-7250	PVA	Negative	**	**	**	2000	2000	127	50
	NTR-7410	SPS	Negative	**	**	**	999	5000	496	15
	NTR-7450	SPES	Negative	**	**	**	999	5000	93	51
Osmonics	B-Type TLC	**	Negative	**	**	**	**	2000	**	50
PCI	AFC-30	PA	Negative	**	**	**	**	2000	**	35
Toray	SC-L100	CA	Neutral	**	**	**	**	2000	**	75
	SU200HF	**	**	1500	3-10	40	1500	1500	150	50
	SU600	**	**	1000	3-8	35	350	500	28	55
	SU700	**	**	**	**	**	1000	glucose	**	99
	UTC-20HF	PA	Negative	**	**	**	1500	1500	146	50
	UTC-20HR	**	**	**	**	**	1500	1500	101	70
	UTC-60	PA	Amphoteric	**	**	**	**	1000	**	85
UOP	ROGA-4231	**	**	**	**	**	**	500	**	85
	TFCS-4921	**	**	**	**	**	**	2000	**	75

CA=cellulose acetate,PA=polyamide,PVA=polyvinyl alcohol,SPS=sulfonated polysulfone,SPES=sulfonated

Polyethersulfone **=data not available,M=magnesium sulphate

2.3.9.2 ลักษณะสมบัติของเมมเบรน

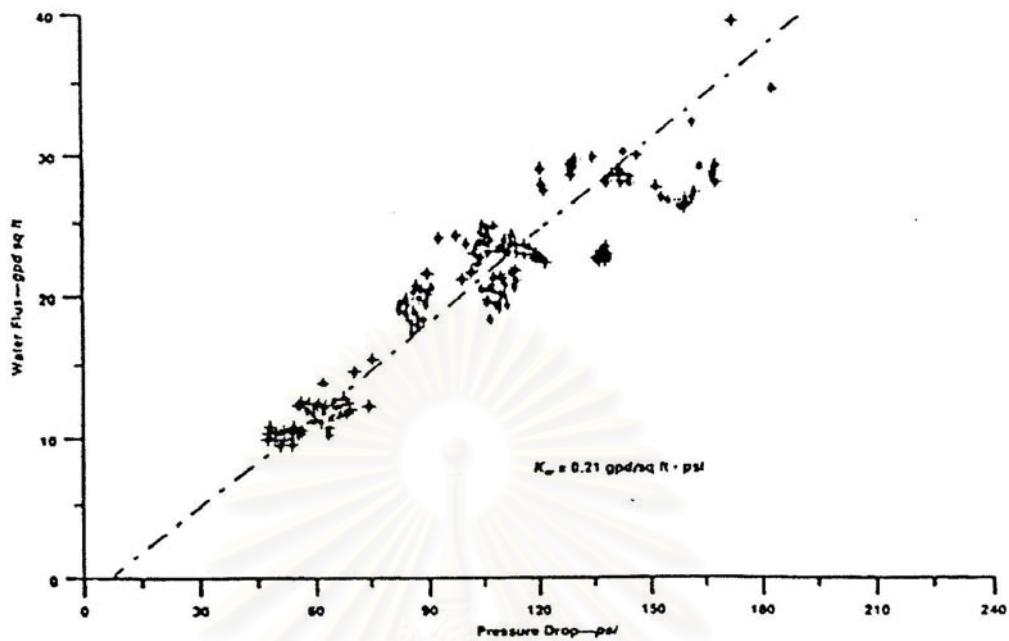
ลักษณะสมบัติของเมมเบรนมีบทบาทสำคัญต่อค่า เปรอร์เซ็นต์การกำจัด และฟลักซ์ โดยลักษณะสมบัติของเมมเบรนประกอบไปด้วย วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน ขนาดรูของเมมเบรนซึ่งวัดโดย MWCO สภาวะในการดำเนินระบบ (ความดันสูงสุดที่ใช้ ช่วงของพีเอช และอุณหภูมิ) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะแตกต่างกันสำหรับแต่ละบริษัทผู้ผลิตเมมเบรน (ดังแสดงในตารางที่ 2.7)

NF เมมเบรนจะยอมให้น้ำและไอออนของสารอนินทรีย์ที่มีวาเลนซ์เดียว (Monovalent Inorganic Ions) ไหลผ่านได้ แต่ไม่ยอมให้สารอนินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่และไอออนของสารอนินทรีย์ที่มีหลายวาเลนซ์ (Multivalent Inorganic Ions) ไหลผ่าน เปรอร์เซ็นต์การกำจัดโซเดียมคลอไรด์โดยทั่วไปประมาณ 0-20% สามารถกำจัดกรดอินทรีย์ได้ 80-100% ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุล ไอออนของสารอนินทรีย์ที่มีสองวาเลนซ์จะถูกกำจัดในช่วง 30-90% (Dyke และ Bartels, 1990)

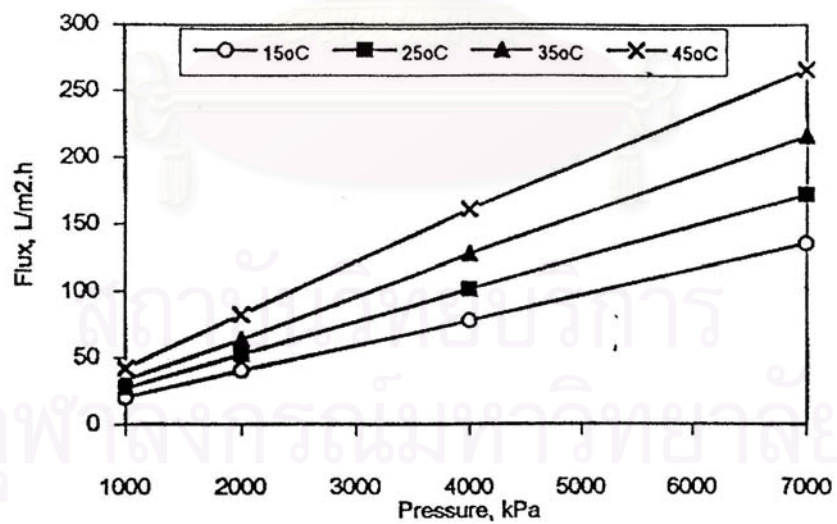
สำหรับเมมเบรนที่มีความสามารถในการซึมผ่านได้ที่สูงและมีประจุ เช่น เมมเบรนสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ การกำจัดสารอินทรีย์จะมีค่าสูงหรือไม่ขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ที่มีประจุจะถูกกำจัดมากกว่าสารอินทรีย์ที่ไม่มีประจุ ดังนั้นค่า MWCO จึงไม่ใช่ค่าที่ดีในการบอกว่าสารอินทรีย์ขนาดเท่าใดที่จะถูกกำจัดโดยเมมเบรน เพราะเหตุนี้บริษัทผู้ผลิต จึงไม่ให้ค่า MWCO สำหรับเมมเบรนที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ (Fu และคณะ, 1994)

2.3.9.3 ความดันที่ใช้

ความดันที่ใช้มีผลกระทบที่สำคัญต่อค่าฟลักซ์ และ เปรอร์เซ็นต์การกำจัด สำหรับ NF เมมเบรน จากสมการของ Solution-Diffusion Model และ Pore Model Duranceau และคณะ (1992) ได้รายงานผลการทดลองโดยใช้ NF เมมเบรนชนิด NF70 ในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์สังเคราะห์ (Synthetic Organic Compound, SOC) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความดันที่ใช้ (รูปที่ 2.13) สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (K_w) คือ ความชันของกราฟระหว่างค่าฟลักซ์กับความดันลด ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และพบว่ามีความดันประมาณ 0.21 gpd/sq.ft-psi Schirgh และ Widmer (1992) ได้รายงานผลการทดลองในทำนองเดียวกัน ซึ่งทำการทดลองโดยใช้เมมเบรนชนิด DS5 และได้แสดงให้เห็นว่าที่ความดันสูงการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์จะมีค่ามากกว่าที่ความดันต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.14

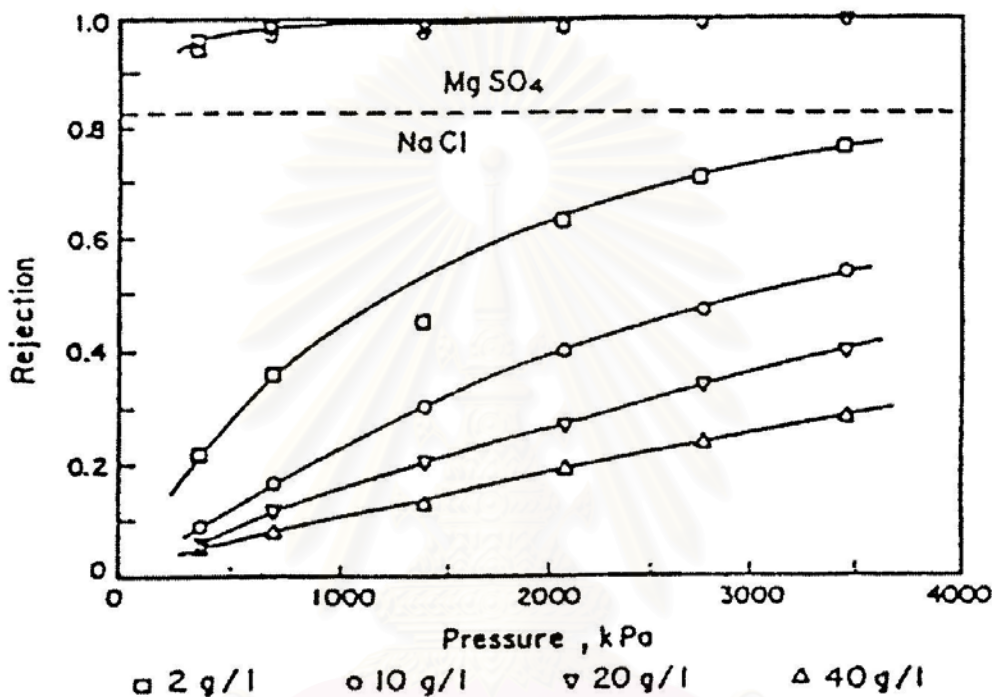


รูปที่ 2.13 ฟลักซ์กับแรงดันที่ใช้สำหรับ NF เมมเบรน (NF70) (Duranceau และคณะ, 1992)



รูปที่ 2.14 ผลของแรงดันต่อค่าฟลักซ์ สำหรับเมมเบรนชนิด DS5 (Schirg และ Widmer, 1992)

เปอร์เซ็นต์การกำจัด โดย NF เมมเบรน มีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันที่ใช้ (รูปที่ 2.15) ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.13 ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความดันสูงก็จะสามารถผลิตน้ำ Permeate ที่มีความเข้มข้นต่ำหรือมีค่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดสูง หรือสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อใช้ความดันสูงก็จะทำให้ได้อัตราการไหลของน้ำ Permeate สูง ในขณะที่สารละลายไม่สามารถไหลผ่านเมมเบรนด้วยอัตราที่สูงเท่าความเข้มข้นของน้ำ Permeate จึงมีค่าต่ำลง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Dilution Effect (Waypa และคณะ, 1997)



รูปที่ 2.15 ผลของแรงดันที่ใช้และความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบกับ เปอร์เซ็นต์การกำจัด โดย NF เมมเบรน (Eriksson, 1988)

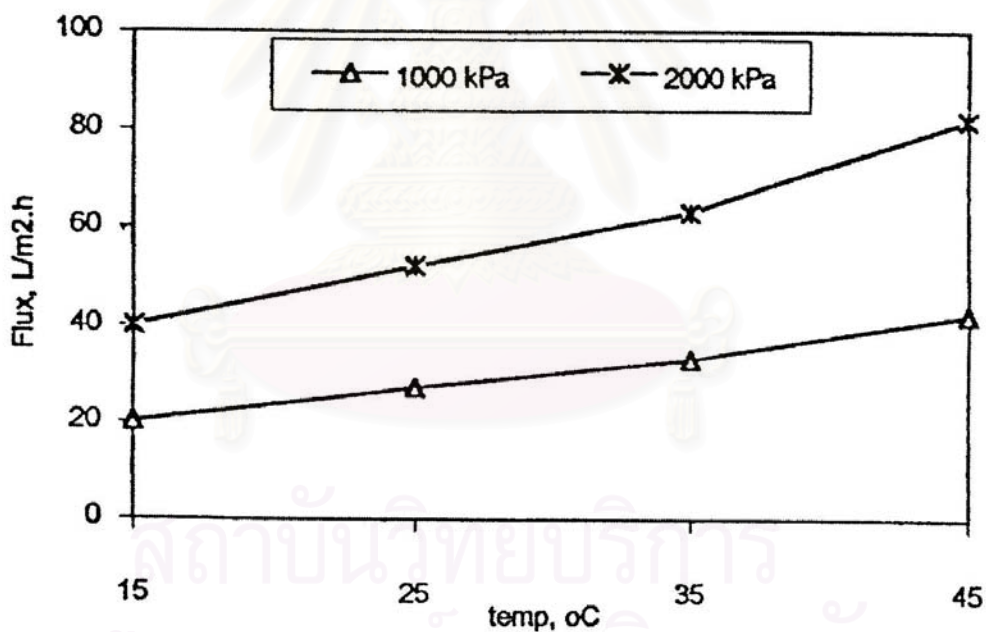
2.3.9.4 ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ

ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบมีผลกับ ฟลักซ์ของสารละลาย และเปอร์เซ็นต์การกำจัด Duranceau และคณะ (1992) ได้รายงานผลการทดลองโดยใช้เมมเบรนแบบ NF70 ในการกำจัด Dibromochloropropane (DBCP) และได้ผลว่าค่าฟลักซ์ของสารละลายเพิ่มขึ้นตาม Concentration Gradient เช่นเดียวกับ Eriksson (1988) ที่ได้รายงานผลการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำจัดโซเดียมคลอไรด์มีค่าลดลงตามการเพิ่มของความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ (รูปที่ 2.13) จะเห็นได้ว่าที่แรงดัน 2000 kPa เปอร์เซ็นต์การกำจัดโซเดียมคลอไรด์ลดลงจาก 60% เป็น 20% เมื่อมีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 2 g/L เป็น 4 g/L ปัจจัยที่มีผล

เล็กน้อยกับการลดลงของเปอร์เซ็นต์การกำจัด คือการลดลงของค่าฟลักซ์แต่ปัจจัยที่มีผลมากเกิดขึ้นเนื่องจากความสามารถในการซึมผ่านเมมเบรนที่มากขึ้นของสารละลาย

2.3.9.5 อุณหภูมิ

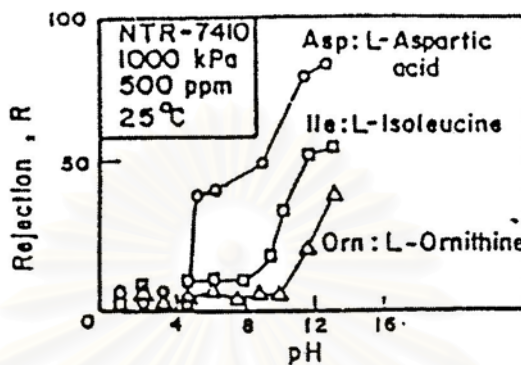
การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารละลายที่เข้าสู่ระบบจะเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำมาก ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การกำจัดมีค่าคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (Laconit และคณะ, 1972) Schirg และ Widmer (1992) ทำการทดลองกับเมมเบรนแบบ DDS และได้ผลว่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเหตุผลที่เป็นไปได้สำหรับกรณีนี้ก็คือ ที่อุณหภูมิสูงความหนืดของน้ำจะมีค่าลดลง ทำให้มันสามารถซึมผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้น รูปที่ 2.16 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าฟลักซ์



รูปที่ 2.16 ผลของอุณหภูมิต่อค่าฟลักซ์ (Schirg และ Widmer, 1992)

2.3.9.6 พีเอช

พีเอชของสารละลายมีอิทธิพลอย่างมากในการทำงานของ NF เมมเบรน (รูปที่ 2.17)

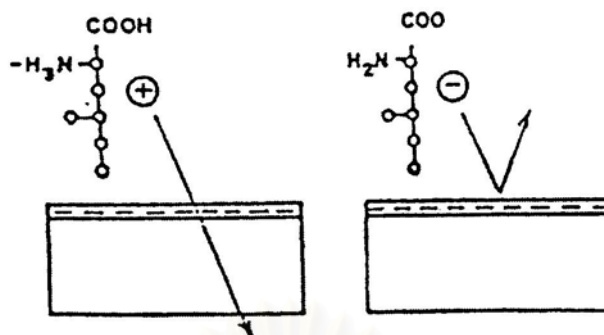


รูปที่ 2.17 ผลของพีเอชกับ เปอร์เซ็นต์การกำจัดของกรดอะมิโน โดย NF เมมเบรน

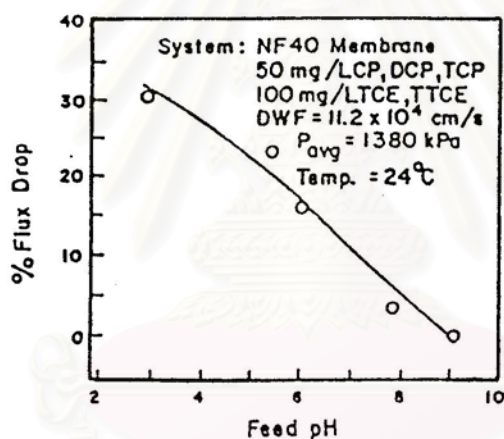
(Rautenbach และ Groschl, 1990)

ที่ค่าพีเอชต่ำๆ เปอร์เซ็นต์การกำจัดจะมีค่าต่ำ และที่ค่าพีเอชสูงๆ เปอร์เซ็นต์การกำจัดจะมีค่าสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือที่พีเอชที่มีค่าต่ำกว่า Isoelectric Point (คือ ค่าพีเอชที่ประจุทั้งหมดเปลี่ยนจากบวกเป็นลบ หรือจากลบเป็นบวก) กรดอะมิโนจะเปลี่ยนเป็นประจุบวกและสามารถผ่านเมมเบรนได้ง่าย ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัด มีค่าต่ำ ในขณะที่ เมื่อค่าพีเอชสูงกว่า Isoelectric Point ซึ่งก็คือที่ค่าพีเอชสูงๆ กรดอะมิโนจะมีประจุลบ และจะถูกขับออกโดยประจุลบของผิวเมมเบรน (รูปที่ 2.18)

และจากการทดลองบำบัดสารละลายที่เป็นส่วนผสมของสารอินทรีย์โดยใช้กระบวนการ NF ได้ผลว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของค่าฟลักซ์ (Flux Drop) มีค่าลดลงเมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.19) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่ค่าพีเอชสูงๆ สารประกอบอินทรีย์จะอยู่ในรูปอิออนและมีประจุลบ ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยากับเมมเบรนมากนัก ทำให้ค่าการลดลงของค่าฟลักซ์มีค่าน้อยลง



รูปที่ 2.18 พฤติกรรมของกรดอะมิโนที่จุดได้หรือสูงกว่า Isoelectric Point
(Rautenbach และ Groschl, 1990)

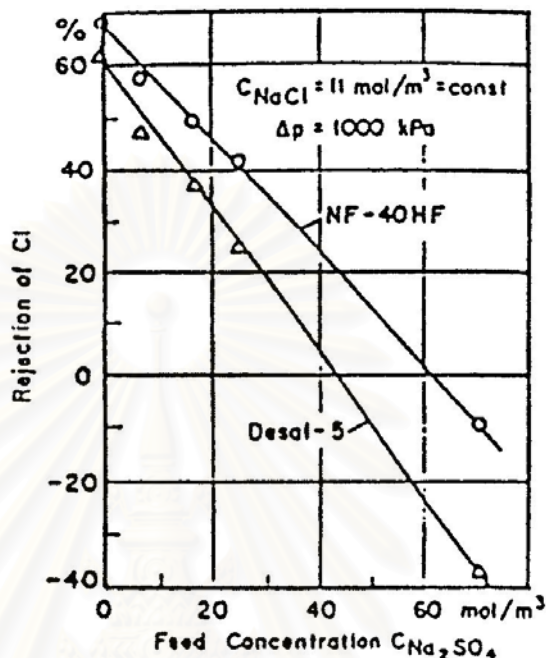


รูปที่ 2.19 ผลของพีเอชต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ สำหรับเมมเบรนชนิด NF40 ในการบำบัดส่วนผสมของสารอินทรีย์อันตราย (Bhattacharyya และ Williams, 1992)

2.3.9.7 สารอื่น ๆ ในน้ำ

เปอร์เซ็นต์การกำจัดโดย NF เมมเบรน จะมีค่าลดลง ถ้ามีสารอื่น ๆ อยู่ในน้ำ (รูปที่ 2.20) จากรูปจะเห็นได้ว่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดของอีออนคลอไรด์มีค่าลดลงตามการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตในการละลาย เนื่องจากซัลเฟตมีประจุมากกว่าคลอไรด์ เมมเบรนจึง

สามารถกำจัดซัลเฟตได้ดีกว่าคลอไรด์ ส่วนโซเดียมมีประจุบวก ทำให้สามารถผ่านเมมเบรนได้ง่าย ดังนั้นจึงเกิดความไม่สมดุลทางไฟฟ้าขึ้นทั้งสองด้านของเมมเบรน

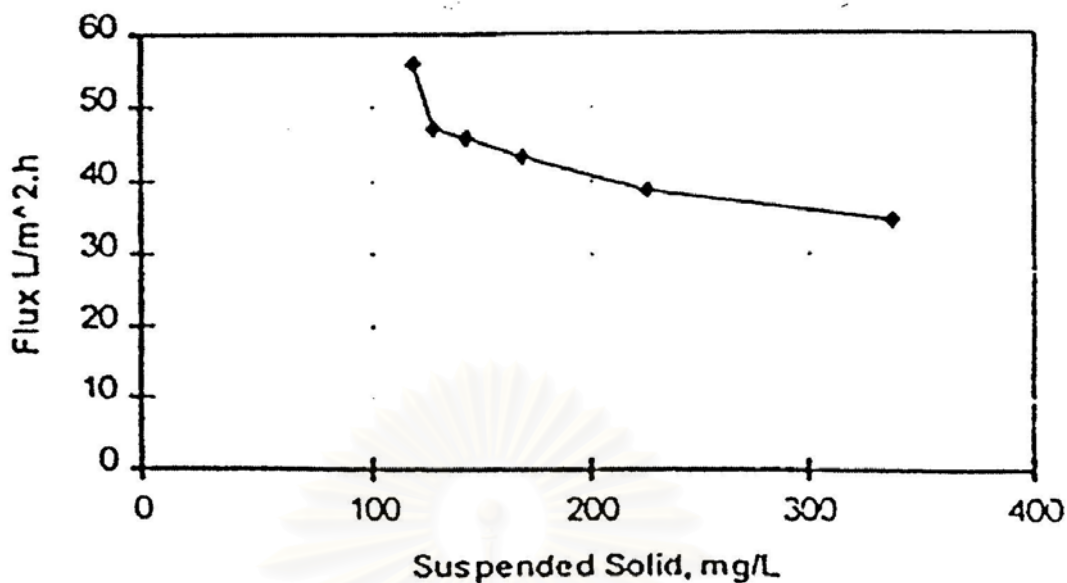


รูปที่ 2.20 ผลของสารอื่นๆ ในน้ำต่อ เปอร์เซ็นต์การกำจัด โดย NF เมมเบรน (Rautenbach และ Groschl, 1990)

2.3.9.8 สารแขวนลอย

ขนาดของอนุภาคของสารแขวนลอยมีบทบาทต่อการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน เนื่องจากขนาดของอนุภาคจะเป็นตัวตัดสินว่าสารแขวนลอยนั้นจะผ่านเข้าสู่รูของเมมเบรน หรือติดขวางอยู่ที่ทางเข้ารูของเมมเบรน ซึ่งในกรณีหลังจะมีผลกระทบต่ออัตราการอุดตันของเมมเบรน เช่นเดียวกับกรณีของคอลลอยด์ ขนาดและรูปร่างของโมเลกุลสารอินทรีย์ก็มีบทบาทสำคัญต่อการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนเช่นเดียวกัน

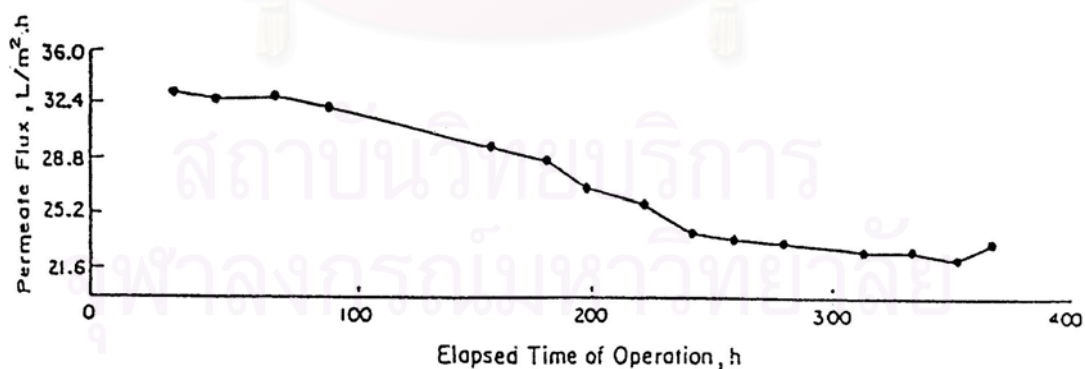
Koottatep (1979) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารแขวนลอยกับอัตราการไหลของน้ำ Permeate ผ่านเมมเบรนแบบ T2A ผลในรูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นว่าฟลักซ์มีค่าลดลง กับการเพิ่มความเข้มข้นของสารแขวนลอย การลดลงของฟลักซ์เนื่องมาจากการอุดตันของเมมเบรน



รูปที่ 2.21 ผลของสารแขวนลอยต่อค่าฟลักซ์ในการกำจัดกรดฮิวมิก แรงดันที่ใช้ 20 บาร์
MWCO 6000 (Kooattatep, 1979)

2.3.9.9 ระยะเวลาในการดำเนินระบบ

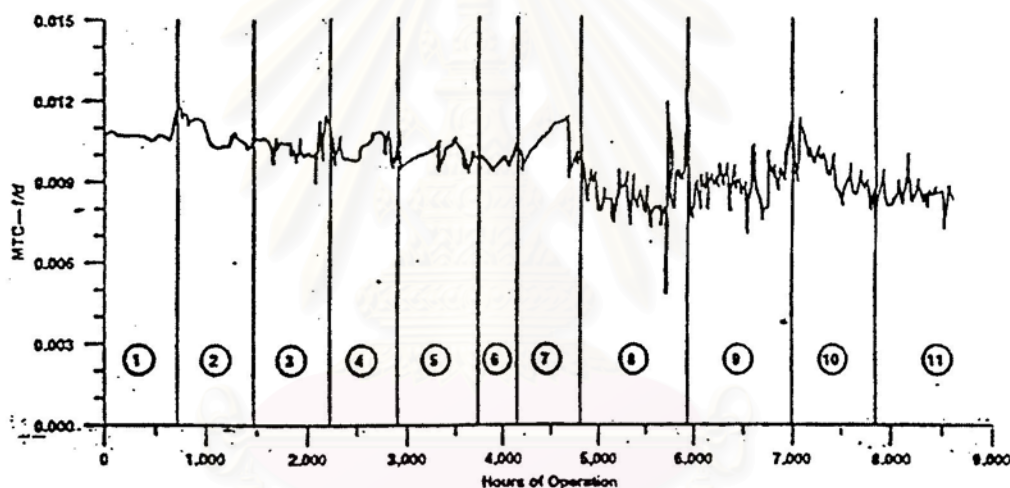
การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ กับเวลาในการดำเนินระบบสำหรับ NF เมมเบรน ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำหรือน้ำเสียที่ใช้ Taylor และคณะ (1987) ได้รายงานผลที่ได้โดยการใช้น้ำเมมเบรนแบบ NF40 ในการบำบัดน้ำผิวดิน (รูปที่ 2.22)



รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบของ NF เมมเบรน
(Taylor และคณะ, 1987)

การลดลงของค่าฟลักซ์เกิดขึ้นเนื่องจากการอุดตันของสารอินทรีย์หรือการเติบโตของจุลชีพภายในเมมเบรน เพราะในน้ำผิวดินประกอบไปด้วยสารอินทรีย์และการเติบโตของจุลชีพถูกเร่งให้เกิดขึ้นในช่วงที่ไม่มีการทำงานของเมมเบรนเป็นเวลา 18 ชม. ระหว่างการทำงานในแต่ละวัน

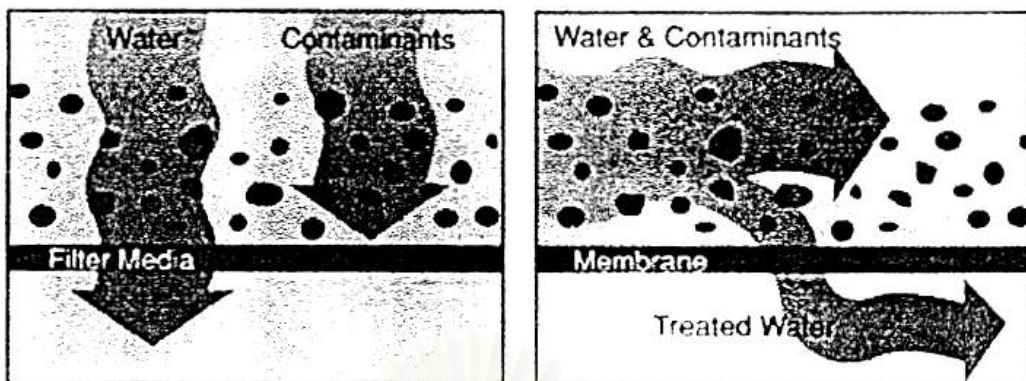
สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (K_w) ที่ลดลงตามเวลาเป็นผลมาจากการอุดตันและการเสื่อมสภาพของเมมเบรน (รูป 2.23) จากรูปจะเห็นได้ว่าการลดลงของค่า K_w จะมีค่าคงที่ในช่วงเวลา 0-4750 ชม. จากชั่วโมงที่ 4750-5750 ค่า K_w จะลดลงอย่างมากและรวดเร็ว แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มการอุดตันของเมมเบรน หลังจากนั้น ค่า K_w จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการทำความสะอาดเมมเบรน



รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงของค่า K_w กับเวลาในการดำเนินระบบ (Blau และคณะ, 1992)

2.3.9.10 Crossflow Velocity

กระบวนการกรองที่ใช้กับกระบวนการ NF เป็นกระบวนการที่เรียกว่า Crossflow Filtration ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการกรองตามปกติที่ใช้ เช่น การกรองผ่านชั้นทราย ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 รูปแสดงการกรองตามปกติ (ซ้าย) และ Crossflow Filtration (ขวา)

โดยใช้ Crossflow Filtration สารที่ถูกกำจัดออกโดยเมมเบรนจะไหลออกจากผิวหน้าของเมมเบรนอย่างต่อเนื่อง ทำให้ไม่เกิดการสะสมตัวของสารเหล่านั้น ลดปัญหาของ Concentration Polarization และทำให้ผิวหน้าของเมมเบรนพร้อมที่จะกำจัดสารต่างๆ ที่ไหลเข้ามาอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่ายังมีความต้องการ การทำความสะอาดเมมเบรนอีกเป็นระยะๆ แต่การทำความสะอาดด้วยตัวเอง Crossflow Filtration ก็ทำให้อายุการใช้งานของเมมเบรนนานขึ้น ซึ่งเป็นผลดีทางด้านเศรษฐกิจ (Williamson, 1993)

ตัวแปรสำคัญที่จะทำให้ Crossflow Filtration ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ คือ Crossflow Velocity โดยจะต้องมีค่ามากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมของสารต่างๆ ที่ถูกกำจัดโดยเมมเบรน นอกจากนี้ ค่า Crossflow Velocity ที่เหมาะสมยังจำเป็นเพื่อให้เมมเบรนมีประสิทธิภาพในการแยกสารที่ไม่ต้องการออกอย่างเต็มที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารละลาย โดยค่า Crossflow Velocity ที่เหมาะสมนี้จะทำให้เกิดการผสมของสารละลายที่ Boundary Layer อย่างเพียงพอ และป้องกันการเกิดขึ้นของ Concentration Polarization (William และ Paulson, 1990)

Ratanatamskul และคณะ, 1996 ได้ทำการศึกษาถึงผลของ Crossflow Velocity ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอิออนประจุลบหลายชนิดในสารละลายเจือจาง และพบว่า Crossflow Velocity ในช่วง 0.05-0.7 m/s ไม่มีผลต่อการกำจัด SO_4^{2-} และ PO_4^{3-} ของเมมเบรนชนิด NTR-729HF เนื่องจาก NF เมมเบรนสามารถกำจัดอิออนที่มี 2 วาเลนซ์ได้ดี แต่ในการกำจัดอิออนที่มี 1 วาเลนซ์ เช่น Cl^- และ NO_2^- มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อค่า Crossflow Velocity ลดลง เนื่องจากอาจเกิด Concentration Polarization ของอิออนประจุลบที่มี 1 วาเลนซ์ เมื่อค่า Crossflow Velocity มีค่าไม่เพียงพอ แต่สำหรับเมมเบรนชนิด NTR-759HR ผลของ Crossflow Velocity จะมี

น้อยมากสำหรับทุกชนิดของอิออน เนื่องจากเมมเบรนชนิดนี้มีความหนาแน่นของประจุที่ผิวเมมเบรนสูงมาก

2.3.9.11 เปอร์เซนต์ Recovery

เป้าหมายที่สำคัญของกระบวนการเมมเบรนทุกชนิดคือ ประสิทธิภาพที่สูงในการกำจัดสารที่ไม่ต้องการออก โดยมีปริมาณการผลิตน้ำ Permeate ที่มากที่สุด ซึ่งวิธีหนึ่งที่สามารถทำให้ผลิตน้ำ Permeate ได้มากคือ การใช้ค่า เปอร์เซนต์ Recovery ในการดำเนินระบบที่สูง

Hanra และคณะ ได้ทำการทดลองโดยใช้ Rapid Bench-scale Membrane Test (RBSMT) เพื่อประเมินความสามารถในการใช้กระบวนการ NF ในการกำจัด NOM และโบรมاید (Br^-) จากแหล่งน้ำผิวดิน 2 แหล่งในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้เมมเบรนที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน 6 ชนิด ที่ค่า เปอร์เซนต์ Recovery ต่าง ๆ กัน และพบว่าสำหรับเมมเบรนชนิด NF70 และ NTR7450 ค่า Bulk Rejections, R_b ซึ่งคำนวณจาก $R_b = ((C_f - C_p)/C_f)$ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ Feed Rejections, R_f ซึ่งคำนวณจาก $R_f = ((C_f - C_p)/C_f)$ มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่า เปอร์เซนต์ Recovery โดยที่ C_i , C_f และ C_p คือ ความเข้มข้นของ Influent, Feed และ Permeate ตามลำดับ และยังพบว่า R_b มีค่าสูงกว่า R_f นอกจากนี้ยังพบว่า เปอร์เซนต์ Recovery มีผลต่อ R_b น้อยกว่า R_f โดย เปอร์เซนต์ Recovery มีผลกระทบต่อเมมเบรนที่มีค่า MWCO สูงมากกว่าเมมเบรนที่มีค่า MWCO ต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบมีผลอย่างมากต่อการกำจัด NOM โดยเฉพาะเมมเบรนที่มีค่า MWCO สูง

2.4 การศึกษาที่ผ่านมา

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ใช้กระบวนการเมมเบรนในการกำจัด NOM ออกจากแหล่งน้ำ โดยเกือบทั้งหมดทำในต่างประเทศ และจะเห็นได้ว่ายังไม่มีการทำงานวิจัยกับแหล่งน้ำจริงที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาในประเทศไทย

Taylor และคณะ (1987) ใช้กระบวนการเมมเบรน 3 ชนิด คือ RO NF และ UF ในการกำจัดสาร Trihalomethane Precursors (THMP) ออกจากน้ำบาดาล และน้ำผิวดิน พบว่าต้องการเมมเบรนที่มีค่า Molecular Weight Cut Off (MWCO) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 400 ในสภาวะปกติในการดำเนินระบบเพื่อควบคุม THMP และสรุปผลการวิจัยว่ากระบวนการเมมเบรนให้ผลทั้งด้าน

ประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ในการควบคุม THMs ในแหล่งน้ำที่มีสารอินทรีย์ในปริมาณสูง และควรใช้เป็นระบบบำบัดเบื้องต้นสำหรับควบคุมปริมาณ THMs

Tan และ Amy (1991) ทำการเปรียบเทียบ ระหว่างกระบวนการเติมโอโซนกับ NF เมมเบรนในการกำจัดและควบคุมปริมาณ Disinfection By-Products (DBPs) พบว่ากระบวนการทั้งสองมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในการกำจัดออกจากน้ำบาดาล โดยกระบวนการเมมเบรนกำจัดออกโดยกระบวนการทางกายภาพ โดยสามารถกำจัด Total Organic Halide (TOX) ได้ 72% กระบวนการเติมโอโซนที่ทำการเติมโอโซน 5 mg/L กำจัด TOX 25% และกระบวนการเมมเบรนกำจัด Trihalomethane (THMs) ได้ 84% กระบวนการโอโซนกำจัด THMs ได้ 1.6% ในขณะที่กระบวนการเติมโอโซนเปลี่ยนรูปสีในน้ำได้สารที่ยังคงก่อให้เกิด DBPs กระบวนการเมมเบรนสามารถควบคุมการเกิด DBPs ได้ดีกว่า เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดสารที่ก่อให้เกิด DBPs ที่ดีกว่า นอกจากนั้นกระบวนการเติมโอโซนยังทำให้เกิด Ozonation By-products ด้วย

Blau และคณะ (1992) ทำการวิจัยโดยใช้กระบวนการ NF ในการควบคุม Disinfection By-Products (DBPs) โดยพบว่า สามารถกำจัด Nonpermeable Dissolved Organic Carbon (NPDOC) ได้มากกว่า 97% และกำจัด Disinfection By-Products Formation Potential (DBPFP) มากกว่า 96% เช่นเดียวกับ Total Organic Carbon Formation Potential (TOXFP) โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดไม่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสถานะในการดำเนินระบบ ซึ่งคือ ค่าความดันที่ใช้ และ เปอร์เซนต์ Recovery และสรุปว่า กลไกเบื้องต้นของการกำจัดสารที่ก่อให้เกิด DBPs คือการกรอง และส่วนน้อยควบคุมโดยการแพร่ผ่านเมมเบรน

Laine และคณะ (1993) ทำการวิจัยเพื่อศึกษาถึงผลของ Br⁻ ในกระบวนการ UF และ NF ในการควบคุม Disinfection By-Products (DBPs) ในน้ำผิวดิน เมมเบรนที่ใช้ในกระบวนการ UF มีค่า Molecular Weight Cut Off (MWCO) 100,00 Dalton ส่วนเมมเบรนของกระบวนการ NF มีค่า MWCO ในช่วง 200-800 Dalton ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า UF ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัด THMs และควบคุมการเกิด DBPs ได้ ในการกรณีที่มีน้ำมี Br⁻ มากจะพบว่าเกิด Bromoform ในปริมาณความเข้มข้นที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำดิบหลังจากการเติมคลอรีนให้ให้กับน้ำ Permeate ส่วน NF แบบ Spiral Wound ที่มี MWCO 200-300 Dalton สามารถควบคุมการเกิดของ Brominated THMs ได้ 86% โดยไม่ต้องมีการบำบัดเบื้องต้นก่อน

Allgeier และ Summers (1995) ได้ศึกษาถึงการทำให้วิจัยโดยใช้ NF ในระดับ Bench-scale เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในระดับ Pilot-scale และ Full-scale โดยใช้โมดูลแบบ Flat-sheet และมีการนำน้ำ Concentrate กลับสู่ระบบใหม่ เพื่อจำลองลักษณะการทำงาน ของ NF แบบ Spiral Wound โดยใช้ค่า Crossflow Velocity 0.1 m/s, เปอร์เซ็นต์ Recovery 70%, Pressure 85 psi และพบว่า กระบวนการ NF สามารถควบคุมการเกิด THMs ได้ 60-90% กำจัด TOC ได้ 67-94% โดยผลที่ได้จากการทดลองโดยเฉพาะค่าฟลักซ์ในช่วง 20-30 gfd, พื้นที่ผิวของเมมเบรน 24 ตารางนิ้วและเปอร์เซ็นต์การกำจัด สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับพิจารณากระบวนการในระดับ Pilot-scale และ Full-scale

Nilson และ Di Giano (1996) ศึกษาถึงผลของส่วนประกอบของ NOM ต่อการทำงานของกระบวนการ NF โดยการทำการแยกส่วนประกอบของ NOM ออกเป็น ส่วนที่ชอบน้ำ และส่วนที่เกลียดน้ำ โดยส่วนที่ชอบน้ำ ถูกกำจัดออกได้ 39-65% และส่วนที่เกลียดน้ำถูกกำจัดออกได้ 90-95% การทดลองทำโดยใช้ NF แบบ Hollow Fiber และพบว่า NOM ส่วนที่เกลียดน้ำทำให้เกิดการลดลงของค่าฟลักซ์อย่างรวดเร็วในช่วงก่อนชั่วโมงที่ 23 โดยค่า Normalize Permeate Flux ลดลงจาก 1.1 เป็น 0.4 หลังจากชั่วโมงที่ 23 ถึง ชั่วโมงที่ 100 จะลดลงอย่างช้า ๆ คือจาก 0.44 เป็น 0.38 ส่วน NOM ส่วนที่ชอบน้ำค่า Normalize Permeate Flux จะลดลงอย่างช้า ๆ จาก 1 เป็น 0.7 ในช่วงชั่วโมงที่ 1 ถึงชั่วโมงที่ 100 และเมื่อใช้การดูดติดผิวคาร์บอนแบบผงเป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น พบว่า NOM จากน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยผงคาร์บอนแบบผง ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงมากกว่า โดยที่ Normalize Permeate Flux ลดลงจาก 1.05 เป็น 0.73 ใน 100 ชั่วโมง และน้ำที่ไม่ได้ผ่านคาร์บอนแบบผง Normalize Permeate Flux จะลดลงจาก 1.05 เป็น 0.87 ใน 100 ชั่วโมง และกำจัดออกได้ยากกว่า NOM จากน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น โดยพบว่าน้ำที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดด้วยคาร์บอนแบบผงจะมีเปอร์เซ็นต์การกำจัด TOC 72-82% และน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยคาร์บอนแบบผงมีเปอร์เซ็นต์การกำจัด TOC 42-62%

Chellam และคณะ (1997) ศึกษาถึงผลของการบำบัดขั้นต้นต่อการทำงานของกระบวนการ NF กับน้ำผิวดิน โดยการเปรียบเทียบกระบวนการบำบัดขั้นต้น 3 ประเภท คือ MF, UF และกระบวนการ Conventional Process ต่อการทำงานของ NF แบบ Spiral Wound โดยพบว่า การบำบัดขั้นต้นโดยใช้ Conventional Process, MF และ UF ทำให้อัตราการอุดตันของ NF มีค่า $24.6-29.6 \times 10^6$, $12.8-14.8 \times 10^6$ และ $9.9-16.9 \times 10^6$ $L/m^2/h^2/kPa$ ตามลำดับและช่วงเวลาในการดำเนินระบบก่อนการล้างเมมเบรนในแต่ละครั้งคือ 26, 56 และ 56 วัน ตามลำดับ และยังพบว่าการอุดตันของเมมเบรนหลังจากการบำบัดขั้นต้นโดยใช้กระบวนการ Conventional Process มีผล

มาจากค่าฟลักซ์ที่ใช้ มากกว่า เปอร์เซนต์ Recovery เพราะเวลาที่ค่าฟลักซ์ 10-20 gfd เกิดอัตราการดูดซับ $29-250 \times 10^6 \text{ L/m}^2/\text{h}^2/\text{kPa}$ แต่ที่เปอร์เซนต์ Recovery 30-75% เกิดอัตราการดูดซับ $35-115 \times 10^6 \text{ L/m}^2/\text{h}^2/\text{kPa}$

Visvanathan และคณะ (1998) ทำการวิจัยโดยใช้กระบวนการ NF ในการบำบัด Trihalomethane Precursors (THMP) ในสถานะน้ำของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย โดยศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ คือ ความดันในช่วง 6-10 bar, ค่า TOC ในช่วง 0-20 mg/L, พีเอชในช่วง 4-11, ความเข้มข้น Ca^+ ในช่วง 8-32 mg/L, ความเข้มข้น Mg^{+2} ในช่วง 2-14 mg/L, ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย 2-10 mg/L และเวลาในการดำเนินระบบ 0-60 ชั่วโมง กับ NF เมมเบรนชนิด DK และ NF45 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ความดัน, ความเข้มข้นของ THMP และของแข็งแขวนลอยที่มากกว่า จะเพิ่ม เปอร์เซนต์การกำจัด ในขณะที่การมีไอออนที่มีสองวาเลนซ์ ในน้ำจะลดความสามารถในการกำจัดลง โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัด THMP อยู่ในช่วง 7-9 และเปอร์เซนต์การกำจัด THMP ที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่า 90%

Mulford และคณะ (1999) ทำการวิจัยเพื่อศึกษาว่าผลของการดำเนินระบบ NF ในระดับ Pilot-scale จะสามารถแสดงถึงผลของการดำเนินระบบ NF ในระดับ Full-scale ได้อย่างถูกต้องหรือไม่ โดยผลการทดลองพบว่าอัตราการผลิต และคุณภาพของน้ำที่ผลิตได้จากโรงผลิตน้ำจริงถูกจำลองโดยการดำเนินระบบ Pilot-plant ในช่วงเวลา 4 เดือนของการทดลองได้อย่างถูกต้อง โดยน้ำที่ผลิตได้จากทุก plant มีค่า TOC 0.4 mg/L, THMFP 35 $\mu\text{g/L}$ และ Haloacetic Acids Formation Potential (HAAFP) 28 $\mu\text{g/L}$ และยังพบว่าอัตราการผลิตน้ำของ Full-scale Plant มีค่าลดลง 50% ในช่วงระยะเวลาในการดำเนินระบบ 5ปี โดยพบว่าแบบจำลองการต้านทานแบบ Second-order สามารถทำนายอัตราการผลิตน้ำได้อย่างถูกต้องกว่าแบบ Zero-order

Digiano และคณะ (2000) ทำการวิจัยประมาณการเกิดฟาวลิงของระบบนาโนฟิลเตรชันในระดับ Bench-scale พบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำลดลงจากฟลักซ์เริ่มต้นประมาณ 30% ที่ชั่วโมงที่ 90 ของการเดินระบบและทำการล้างเมมเบรนหลังจากค่าฟลักซ์ลดลง และที่เปอร์เซนต์ Recovery 80% ต้องทำการล้างเมมเบรนบ่อยกว่าการเดินระบบที่เปอร์เซนต์ Recovery 30% และสามารถกำจัดค่า TOC ได้มากกว่าคือเปอร์เซนต์ Recovery 30% สามารถกำจัด TOC จาก 2.1 mg/L เหลือ 0.6 mg/L ส่วนที่เปอร์เซนต์ Recovery 80%สามารถกำจัด TOC จาก 2.1 mg/L ให้เหลือ 1.7 mg/L ได้

Seidel และ Elimelech (2002) ได้ทำการศึกษาถึงผลของฟลักซ์เริ่มต้น และ การเกิด fouling ของสารอินทรีย์ธรรมชาติในส่วนที่เป็นแคลเซียมในระบบนาโนฟิลเตรชัน ในระดับ bench-scale โดยใช้ค่าฟลักซ์เริ่มต้นที่ 16.9, 11.3 และ 5.6 $\mu\text{m/s}$ ส่วนค่า Ca^{2+} ที่ใช้คือ 0.1, 0.3 และ 1 mM พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลคือที่ 16.9 $\mu\text{m/s}$ จะช่วยลดการเกิดผลกระทบบ(fouling) ที่อาจเกิดมากขึ้น โดยจะทำให้การรวมตัวกันของ NOM บนผิวเมมเบรนลดลง และช่วยหยุดยั้งการเพิ่มของชั้น fouling (fouling layer) Ca^{2+} ที่รวมตัวกันอยู่ใกล้ผิวเมมเบรน ที่ฟลักซ์เริ่มต้นสูงขึ้นและอัตราการไหลที่ต่ำ ความเข้มข้นของ rejected Ca^{2+} ที่ผิวเมมเบรนจะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก concentration polarization



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

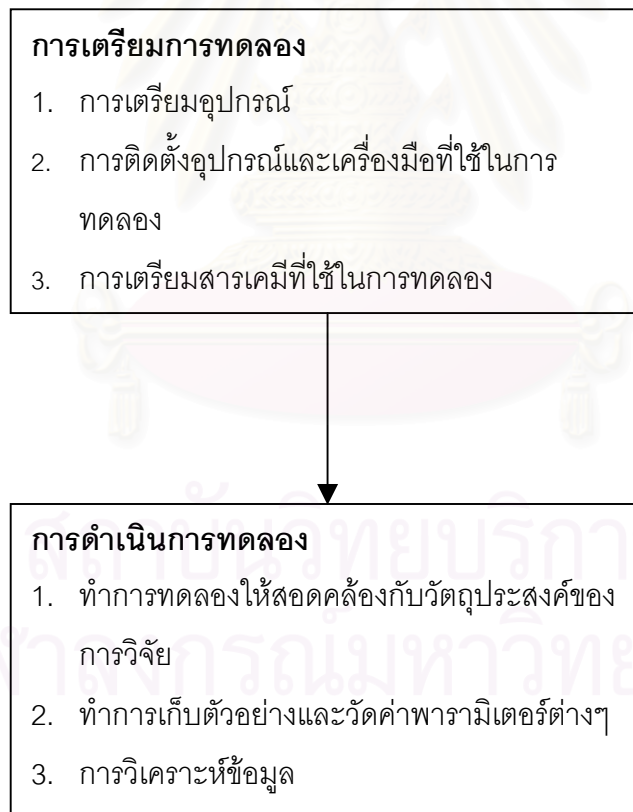
บทที่ 3

แผนการทดลอง และการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติออกจากน้ำประปาด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (NF) และปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการทำงานของเมมเบรนรวมทั้งปัจจัยด้านราคา โดยทำการติดตั้งชุดการทดลองในขนาดทดสอบที่การประปานครหลวง ซึ่งรับน้ำที่ผ่านการกรองด้วยถังกรองทราย สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ กระทำที่ห้องปฏิบัติการของภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

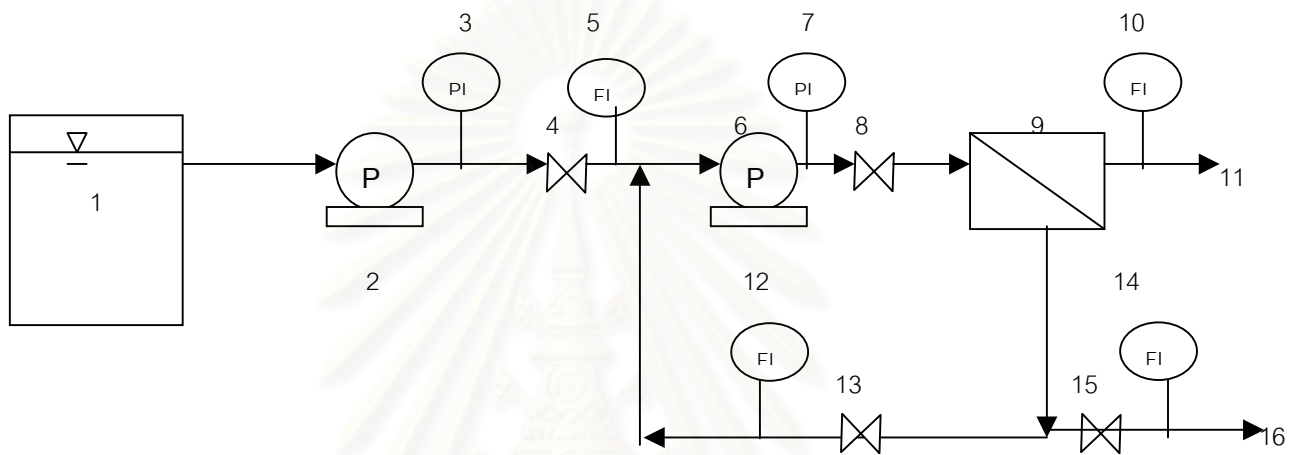
แผนการการดำเนินการวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

3.2 การติดตั้งอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

แผนผังการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดในการวิจัยนี้ แสดงในรูปที่ 3.2 การดำเนินการทดลองนี้ จะใช้น้ำที่ผ่านถังกรองทรายเป็นน้ำ Influent ของการทดลอง การติดตั้งชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบไปด้วยถังเก็บน้ำ, ปั๊ม, ระบบท่อและวาล์ว, Cartridge Filter และโมดูลของเมมเบรน



รูปที่ 3.2 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในงานวิจัย

1 = ถังน้ำ Influent, 2,6 = Pump, 3,7 = มาตรวัดความดัน, 4, 8,13, 15 = บอลล์วาล์ว, 9 = โมดูลเมมเบรน, 5, 10,12 = Flow meter, 11 = น้ำ Permeate, 16 = น้ำ Concentrate

ตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติของ NF เมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ชนิดของเมมเบรน	วัสดุ	เปอร์เซ็นต์กำจัด NaCl*
ESNA1-4040	Composite Polyamide	85%

ข้อมูลที่แสดงเป็นข้อมูลที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต, ที่ 5 bar, 0.05%NaCl

3.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 : ประกอบด้วยชุดการทดลองที่ 1-24 เป็นการทดลอง Pre-test ระบบ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการเดินระบบ โดยทำการทดลองจนกระทั่งค่าอัตราการกรองน้ำและคุณภาพน้ำเข้าสู่สภาวะคงตัว เป็นการศึกษาค่าผลของความดันและ เปอร์เซ็นต์ Recovery ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบโดยทำการทดลองที่ความดัน 2, 3 และ 4 bar ตามลำดับและที่ เปอร์เซ็นต์ Recovery 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 % ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ขั้นตอนที่ 2 : เมื่อสิ้นสุดการทดลองในขั้นที่ 1 แล้วจะใช้ค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ที่เหมาะสมมาทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้น้ำที่ผ่านถังกรองทรายของการประปานครหลวงเป็นระบบ Pre-treatment เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบ และโอกาสเกิดปัญหา fouling ของเมมเบรน

ขั้นตอนที่ 3 : การศึกษาเปรียบเทียบระบบ Pre-treatment ระหว่างกระบวนการกรองทรายกับระบบไมโครฟิลเตรชัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองในขั้นที่ 1 และ 2 แล้วจะใช้ค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ที่เหมาะสมมาทำการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยใช้ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนขนาด $0.1 \mu\text{m}$. (MF) ซึ่งรับน้ำจากระบบ Solids Contact Clarifier เป็นระบบ Pre-treatment เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบและโอกาสเกิดปัญหา fouling ของเมมเบรน

ขั้นตอนที่ 4 : การศึกษาการลดความต้องการคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคเปรียบเทียบระหว่างน้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชันกับน้ำที่เข้าระบบดังแสดงในตารางที่ 3.6

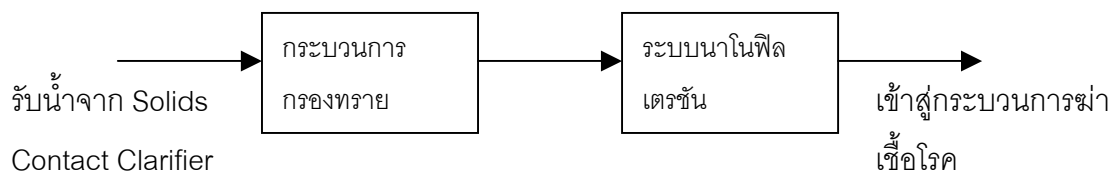
ขั้นตอนที่ 5 : การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ ค่ายูวี 254 และค่าไทรฮาโลมีเทน โดยการทำการกราฟเปรียบเทียบ (Calibration curve) ดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของความดันและ เปอร์เซ็นต์Recovery ที่ใช้ในการดำเนินระบบ

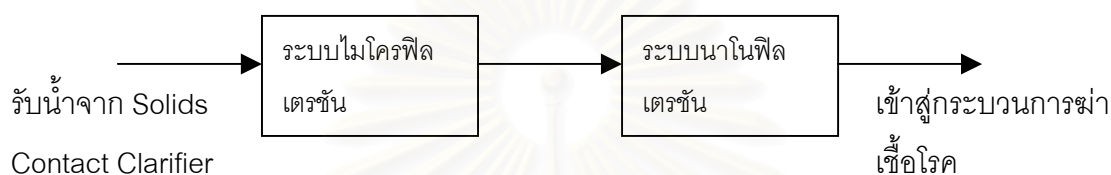
การทดลองที่	ความดัน (bar)	เปอร์เซ็นต์Recovery
1	2	10%
2	3	10%
3	4	10%
4	2	15%
5	3	15%
6	4	15%
7	2	20%
8	3	20%
9	4	20%
10	2	30%
11	3	30%
12	4	30%
13	2	40%
14	3	40%
15	4	40%
16	2	50%
17	3	50%
18	4	50%
19	2	60%
20	3	60%
21	4	60%
22	2	70%
23	3	70%
24	4	70%

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของการดำเนินต่อเนื่อง และการบำบัดน้ำ Influent ที่แตกต่างกัน

วิธีการบำบัดขั้นต้น	ความดัน (bar)	เปอร์เซ็นต์Recovery
MF 0.1 μm	ค่าที่เหมาะสม	ค่าที่เหมาะสม
ถังกรองทราย	ค่าที่เหมาะสม	ค่าที่เหมาะสม



รูปที่ 3.3 Flow Diagram สำหรับการทดลองชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2



รูปที่ 3.4 Flow Diagram สำหรับการทดลองชั้นที่ 3

3.3 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรที่พิจารณาในการทดลอง ประกอบด้วย ตัวแปรคงที่ (Fixed Variables) ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) และตัวแปรตาม (Dependent Variables) ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบต่อเนื่อง

ตัวแปรคงที่คือตัวแปรที่กำหนดให้มีค่าคงที่ในตลอดการทดลอง ประกอบด้วย

- ชนิดของเมมเบรนที่ใช้คือ เมมเบรนของบริษัท Nitto Denko ชนิด

ESNA1-4040

- พื้นที่ผิวประสิทธิภาพผลของเมมเบรน 7.9 m^2 .
- สารที่ใช้ล้างเมมเบรน คือ สารอีดีทีเอ และสารซिटริก

ตัวแปรอิสระคือ ปัจจัยในการดำเนินระบบต่างๆ ที่ทำการแปรค่าในการทดลอง ประกอบด้วย

- ความดันที่ใช้ : ใช้ค่าความดัน 3 ค่า คือ 2, 3 และ 4 bar
- เปอร์เซ็นต์ Recovery : ใช้เปอร์เซ็นต์ Recovery 8 ค่า คือ 10, 15, 20, 30, 40,

50, 60 และ 70%

ตัวแปรตาม คือตัวแปรที่จะเปลี่ยนแปลงเมื่อตัวแปรอิสระเปลี่ยนแปลง ประกอบด้วย

● ค่าฟลักซ์ : คือค่าปริมาณน้ำที่ผลิตได้ ต่อพื้นที่ผิวประสิทธิภาพของเมมเบรน ต่อเวลา ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$)

- ประสิทธิภาพการกำจัด DOC และ UV254
- ประสิทธิภาพการกำจัด Hardness
- pH
- อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

ขั้นตอนที่ 2 : ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยมีระบบ Pre-treatment คือกระบวนการกรองทราย

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตัวแปรคงที่	ค่าที่กำหนด
1. ชนิดและพื้นที่ผิวของเมมเบรน	ESNA1-4040
2. สารที่ใช้ล้างเมมเบรน	EDTA, กรดซิตริก
3. ลักษณะน้ำที่ใช้ในระบบจากกระบวนการกรองทราย - ความเข้มข้นสารอินทรีย์ละลายน้ำ, มิลลิกรัมต่อลิตร	2-6
ตัวแปรอิสระ	
1. เปอร์เซ็นต์ Recovery, %	ค่าจากการทดลองขั้นที่ 1
2. แรงดัน, บาร์	ค่าจากการทดลองขั้นที่ 1
ตัวแปรตาม	
1. ค่าฟลักซ์	ค่าจากการทดลองขั้นที่ 1
2. ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ	ค่าจากการทดลองขั้นที่ 1
3. ระยะเวลาที่ทำการทดลองจนกระทั่งถึงเวลาล้างเมมเบรน	-

ขั้นตอนที่ 3 : การศึกษาการเดินระบบต่อเนื่องโดยมีระบบ Pre-treatment คือระบบไมโครฟิลเตรชัน

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยมีระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment

ตัวแปรคงที่	ค่าที่กำหนด
1. ชนิดและพื้นที่ผิวของเมมเบรน	ESNA1-4040
2. สารที่ใช้ล้างเมมเบรน	EDTA, กรดซิตริก
3. ลักษณะน้ำที่ใช้ในระบบจากระบบไมโครฟิลเตรชัน - ความเข้มข้นสารอินทรีย์ละลายน้ำ, มลลิกกรัมต่อลิตร	2-4
ตัวแปรอิสระ	
1. เปอร์เซ็นต์ Recovery, %	ค่าจากการทดลองขั้นที่ 1
2. แรงดัน, บาร์	ค่าจากการทดลองขั้นที่ 1
ตัวแปรตาม	
1. ค่าฟลักซ์	ค่าจากการทดลองขั้นที่ 1
2. ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ	ค่าจากการทดลองขั้นที่ 1
3. ระยะเวลาที่ทำการทดลองจนกระทั่งถึงเวลาด้างเมมเบรน	-

ขั้นตอนที่ 4 : การศึกษาการลดความต้องการคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคเปรียบเทียบระหว่างน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองทรายกับน้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงการทดลองเพื่อศึกษาการลดความต้องการคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค เปรียบเทียบระหว่างน้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชันกับน้ำที่เข้าระบบ

ตัวแปรคงที่	ค่าที่กำหนด
1.ปริมาณน้ำที่นำมาทำการทดลอง, มิลลิลิตร	100
2.ชนิดของสารฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน	NaOCl
ตัวแปรอิสระ	
1.ลักษณะน้ำที่นำมาทดลอง	
-ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ	
2.ที่มาของน้ำที่นำมาทดลอง	2
	1.น้ำที่ผ่านกระบวนการกรองทราย
	2.น้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชัน
ตัวแปรตาม	
1.ปริมาณสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้	-
2.ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ	-

ขั้นตอนที่ 5 : การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์ละลายน้ำ ค่ายูวี 254 และสารไตรฮาโลมีเทนโดยการทำการกราฟเปรียบเทียบ (Calibration Curve) ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์ละลายน้ำ ค่ายูวี 254 และสารไตรฮาโลมีเทนโดยการทำการกราฟเปรียบเทียบ (Calibration Curve)

ตัวแปรคงที่	ค่าที่กำหนด
1.ปริมาณน้ำที่นำมาทดลอง, มิลลิลิตร	100
2.ที่มาของน้ำที่นำมาทดลอง	2
3.ชนิดของสารฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน, ชนิด	3
ตัวแปรอิสระ	
1.ลักษณะของน้ำที่นำมาทดลอง	
-ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ	-
2.เวลาสัมผัส, วัน	2
3.ปริมาณคลอรีนอิสระ, มก./ล.	1
ตัวแปรตาม	
-ปริมาณไตรฮาโลมีเทนในน้ำหลังทำการทดลอง	-



รูปที่ 3.3 ระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.4 ระบบไมโครฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลอง

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. ถังพักน้ำขนาด 500 ลิตร จำนวน 2 ถัง
2. เครื่องสูบน้ำ 2 เครื่อง
3. ท่อน้ำ , ข้อต่อ และวาล์วต่างๆ

4. เครื่องวัดความดัน (Pressure Gauge) 2 ตัว
5. มาตรฐานวัดอัตราการไหล (Flow Meter) 2 ตัว
6. พีเอชมิเตอร์
7. เครื่องวิเคราะห์ DOC
8. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
9. เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า
10. เทอร์โมมิเตอร์
11. เครื่อง Ion Chromatograph
12. ชุดเครื่องแก้ว
13. ชุดเครื่องมือในการไตเตรท

3.5 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการวัดและวิเคราะห์

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการวัดและวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่	อ้างอิงจาก
ความดัน	มาตรฐานวัดความดัน	ทุกวัน	*Standard Method
อัตราการไหลของน้ำ Influentผ่านเมมเบรน	Flow meter	ทุกวัน	*Standard Method
ฟลักซ์	วัดปริมาตร Permeate ต่อ เวลา	ทุกวัน	*Standard Method
พีเอชและอุณหภูมิ	พีเอชมิเตอร์	ทุกวัน	*Standard Method
ความขุ่น	Nephelometric Method	ทุกวัน	*Standard Method
UV254	เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	ทุกวัน	*Standard Method
DOC	เครื่องวิเคราะห์ค่า TOC	ทุกวัน	*Standard Method
ค่าความนำไฟฟ้า	เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า	ทุกวัน	*Standard Method
Hardness	ไตเตรทด้วยวิธี EDTA	ทุกวัน	*Standard Method
อิออนลบ	เครื่อง Ion Chromatograph	ทุกวัน	*Standard Method
คลอรีนอิสระ	DPD Ferrous Titrametric Method	ขั้นตอนที่ 4	*Standard Method
THMFP	GC-MS	ขั้นตอนที่ 5	ค่าแนะนำจากการประปานครหลวง

*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater¹⁹ Edition 1995

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์การทดลอง

4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำที่ใช้ในการวิจัย

การทดลองนี้ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน โดยนำน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองทรายในกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน มาใช้ในการทดลอง โรงงานผลิตน้ำบางเขนสามารถผลิตน้ำประปาได้วันละ 3,200,000 ม³ หรือ ประมาณร้อยละ 75 ของการผลิตน้ำประปาทั้งหมดของการประปานครหลวง

จากผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองทรายในกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขนโดย ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ระบบผลิตฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขนตามรายงานประจำปี 2545-2546 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นน้ำเข้าระบบทดลองตลอดการทดลองนี้ พบว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ อยู่ในเกณฑ์ควบคุมคุณภาพน้ำของการประปานครหลวง จากรูปที่ 4.1ก แสดงค่า pH ของน้ำเข้าระบบในปี 2545-2546 โดยปี 2545 มีค่าอยู่ในช่วง 7.03-7.33 และในปี 2546(ม.ค.-ก.ค.) มีค่าอยู่ในช่วง 7.03-7.26 จากรูปที่ 4.1ข แสดงค่าความขุ่นของน้ำเข้าระบบโดยที่ค่าความขุ่นมีค่าค่อนข้างต่ำตลอดทั้งปี เมื่อพิจารณาค่าความขุ่นสูงสุดของน้ำเข้าระบบในเดือนตุลาคม ปี 2545 เท่ากับ 1.34 ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำและสามารถเข้ากับระบบการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันได้

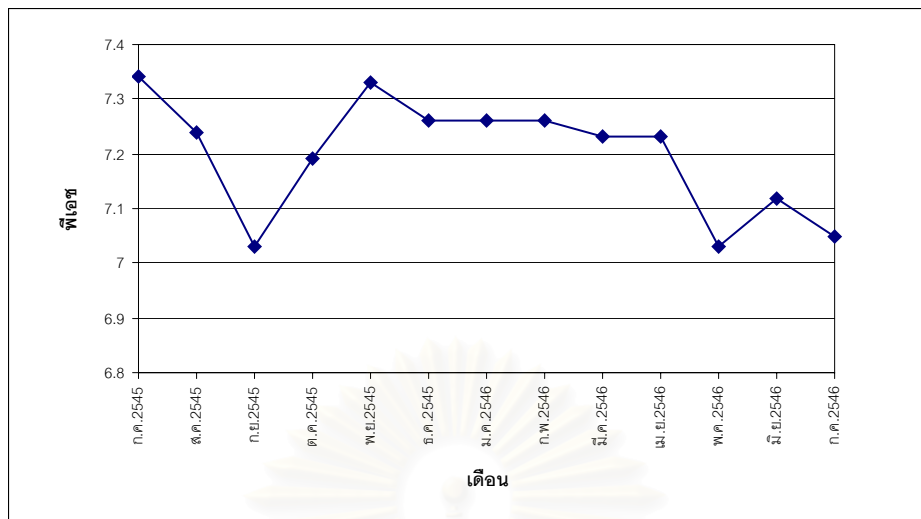
4.2 ผลการศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบต่อเนื่อง

4.2.1 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์Recovery ที่ใช้

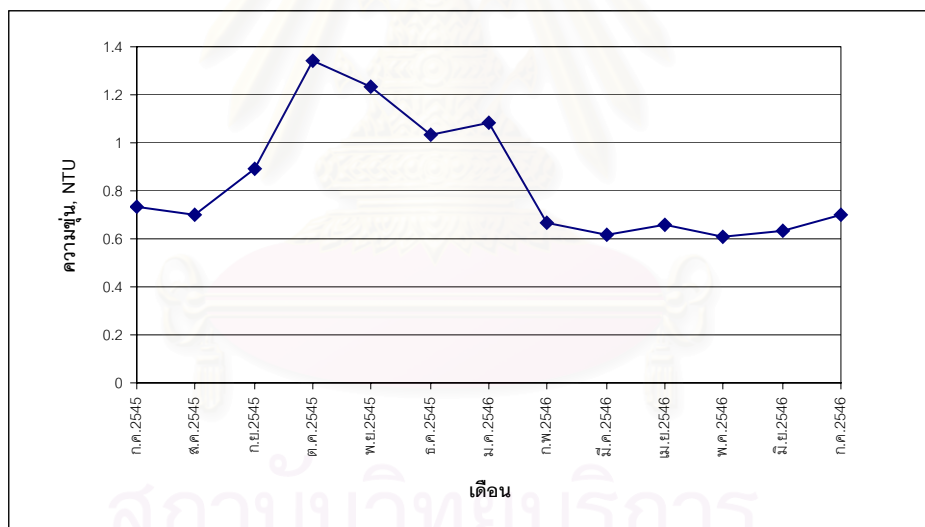
4.2.1.1 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์Recovery ต่อค่าฟลักซ์

ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์Recovery ที่ใช้ต่อค่าฟลักซ์ Permeate ฟลักซ์ สำหรับการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2 โดยในช่วงของค่าความดันที่ใช้คือ 2-4 bar จากการทดลองจะเห็นว่า ค่าฟลักซ์ของเมมเบรนที่เปอร์เซ็นต์Recovery ต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยการใช้สมการของแบบจำลองการละลายการแพร่ ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับความดันที่ใช้ ดังที่แสดงในสมการที่ 4.1 คือ

$$F_w = K_w(\Delta P - \Delta \pi) \quad (4.1)$$



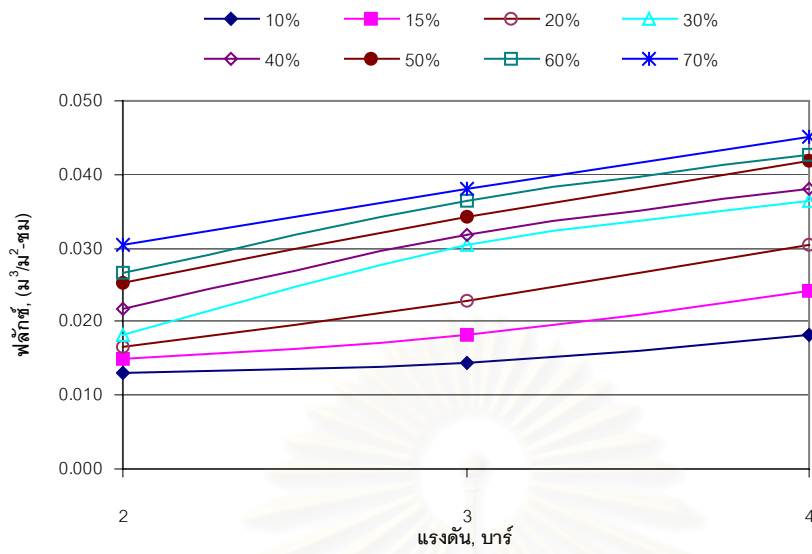
รูปที่ 4.1ก แสดงค่า pH ของน้ำที่ผ่านการกรองด้วยถังกรองทรายในช่วงเดือน ก.ค.2545-ก.ค.2546



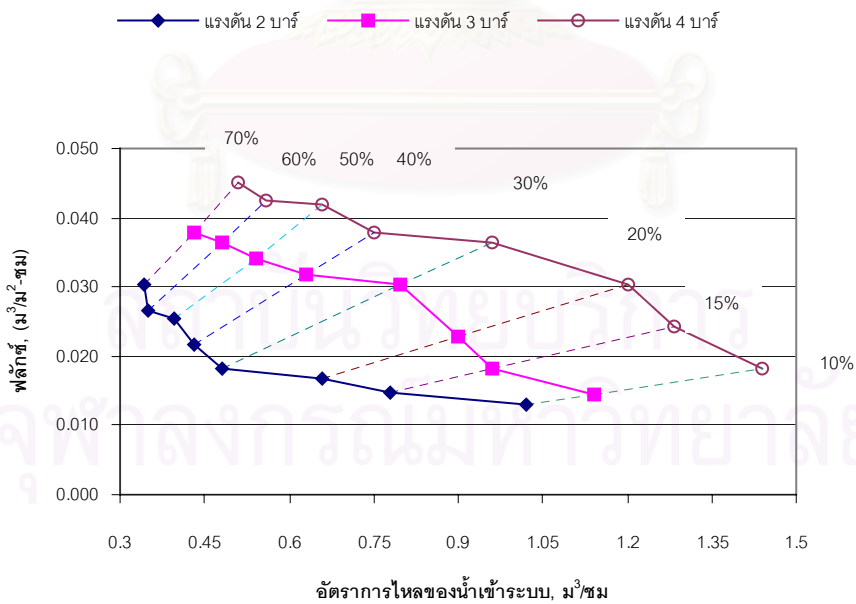
รูปที่ 4.1ข แสดงค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองด้วยถังกรองทรายในช่วงเดือน ก.ค.2545-ก.ค.2546

รูปที่ 4.1 พารามิเตอร์แสดงคุณภาพน้ำที่ผ่านขั้นตอนการกรองทรายของโรงผลิตน้ำประปาบางเขน ในปี พ.ศ. 2545-2546

แหล่งข้อมูล : รายงานผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต ฝ่ายควบคุมการผลิตน้ำ สำนักการผลิตน้ำบางเขน



รูปที่ 4.2 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์Recovery ต่อค่าฟลักซ์



รูปที่ 4.3 ผลของค่าความดันและอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบต่อค่าฟลักซ์ที่เปอร์เซ็นต์ Recovery ต่าง ๆ

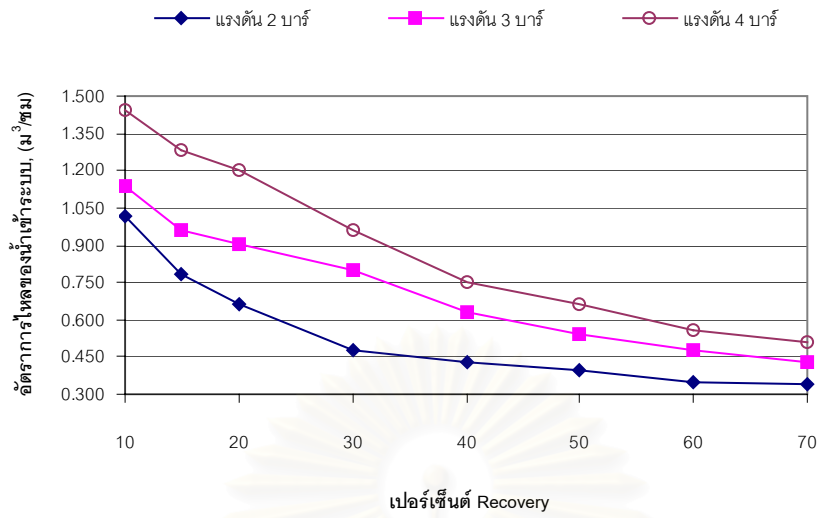
จากสมการจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่าความดัน (ΔP) จะทำให้ค่า Permeate ฟลักซ์ (F_w) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความดันที่เพิ่มขึ้น ค่า Permeate ฟลักซ์ (F_w) ที่เปอร์เซ็นต์ Recovery ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมการแบบจำลองการละลาย-การแพร่ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และความดันที่ใช้ที่เปอร์เซ็นต์ Recovery ต่าง ๆ

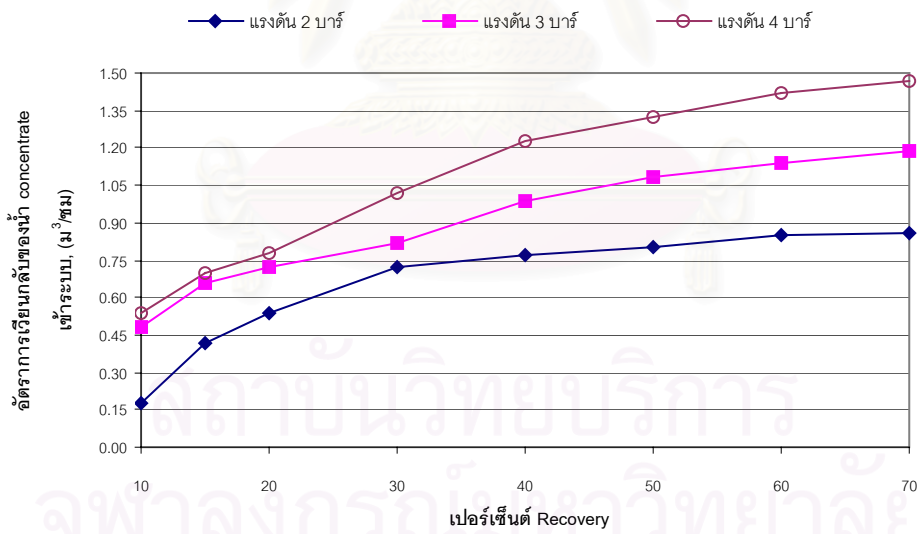
เปอร์เซ็นต์ Recovery	สมการ	R^2
10	$F_w = 0.0027[\Delta P - \Delta \pi]$	0.9423
15	$F_w = 0.0047[\Delta P - \Delta \pi]$	0.9745
20	$F_w = 0.0068[\Delta P - \Delta \pi]$	0.9959
30	$F_w = 0.0091[\Delta P - \Delta \pi]$	0.9643
40	$F_w = 0.0081[\Delta P - \Delta \pi]$	0.9798
50	$F_w = 0.0082[\Delta P - \Delta \pi]$	0.998
60	$F_w = 0.0080[\Delta P - \Delta \pi]$	0.9815
70	$F_w = 0.0074[\Delta P - \Delta \pi]$	0.9998

ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ค่าความดัน 4 bar และเปอร์เซ็นต์ Recovery 70% มีค่าฟลักซ์สูงที่สุดคือ 0.0452 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงผลของความดันและอัตราการไหลของน้ำที่เข้าระบบต่อค่าฟลักซ์ที่เปอร์เซ็นต์ Recovery ต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าค่าฟลักซ์ของน้ำ permeate ที่ผลิตได้จะมีค่าลดลงตามค่าอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากการที่มีเปอร์เซ็นต์ Recovery ที่สูงขึ้นจะมีการเวียนน้ำ concentrate กลับมายังระบบมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 ทำให้อัตราการไหลของน้ำที่เข้าระบบ(ยังไม่รวมกับน้ำ concentrate) มีค่าลดลง และที่เปอร์เซ็นต์ Recovery สูงขึ้น อัตราการไหลของน้ำที่เข้าระบบ(ยังไม่รวมกับน้ำ concentrate) มีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ผลของความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่ออัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ



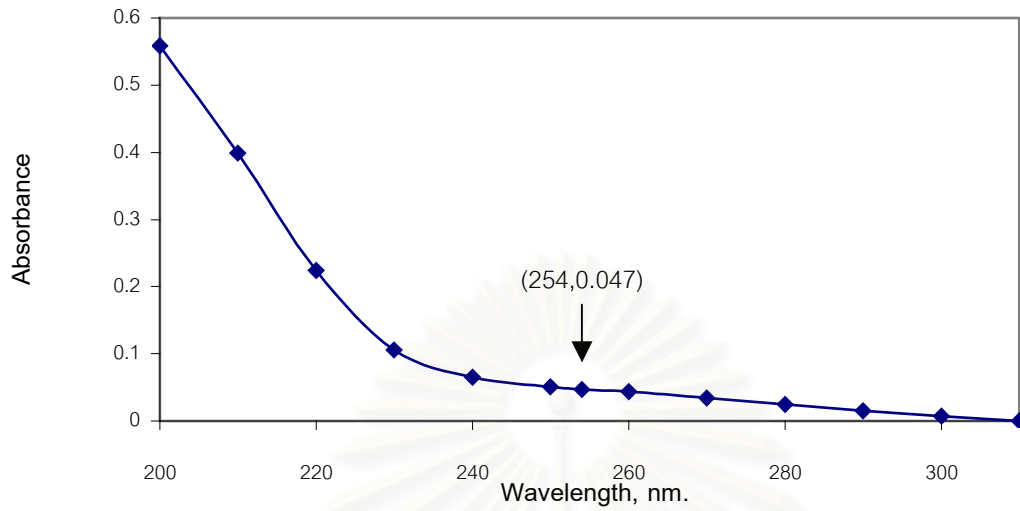
รูปที่ 4.5 ผลของความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่ออัตราการเวียนกลับน้ำ concentrate เข้าระบบ

4.2.1.2 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัด NOM ในรูปยูวี254

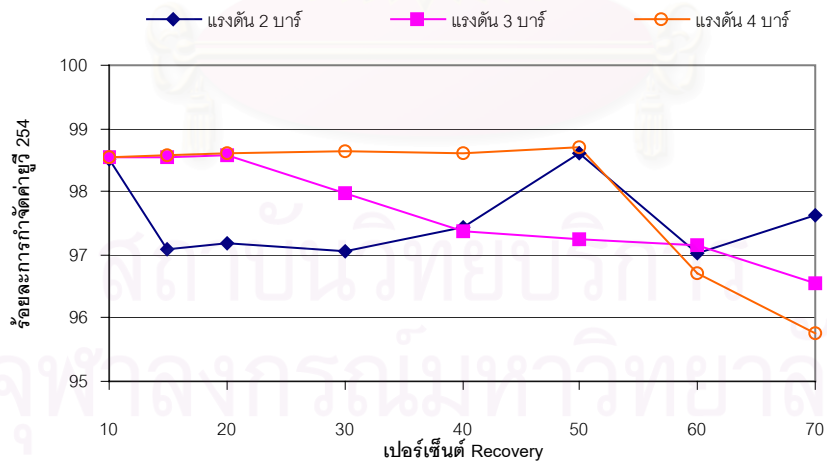
จากผลการตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสง UV ในช่วงความยาวคลื่น 200-310 nm. ของน้ำจากถังกรองทราย ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้ตรวจสอบหาสารบวทอน (APHA, AWWA, WPCF (1995)) แสดงในรูปที่ 4.6 จากรูปจะเห็นได้ว่า ค่าการดูดกลืนแสงยูวีของน้ำตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นมีค่าลดลง โดยไม่มีค่าความยาวคลื่นใดที่ค่าการดูดกลืนแสงยูวี มีแนวโน้มผิดปกติไปจากนี้ แสดงให้เห็นว่าในน้ำที่ใช้ในการทดลองไม่มีสารที่เป็นตัวบวทอนการดูดกลืนแสงยูวี254 ของ NOM ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่ายูวี 254 เป็นตัวแทนปริมาณของ NOM ในแหล่งน้ำได้อย่างเหมาะสม

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดNOM ในรูปของยูวี 254 ในรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าค่าร้อยละการกำจัดNOM ในรูปของยูวี 254 มีค่าสูงขึ้นตามความดันที่ใช้แต่เพิ่มในช่วงค่าที่ไม่มากนัก คือจากช่วง ร้อยละ 98 เหลือร้อยละ 95 ที่เปอร์เซ็นต์Recovery 70% เนื่องจากช่วงความดันที่ใช้มีค่าต่ำมาก คือ 2-4 bar และเนื่องจากลักษณะสมบัติของเมมเบรนมีขนาดรูพรุนเล็กมาก ดังนั้นเมมเบรนจึงสามารถกำจัด NOM ในรูปNOM ในรูปของยูวี 254 ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนได้มาก จนค่าความดันที่เพิ่มขึ้นมีผลไม่มากนัก ต่อประสิทธิภาพการกำจัดNOM ในรูปของยูวี 254 ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้ค่าความดันเกิน 2 bar กลับทำให้ค่าร้อยละการกำจัดมีค่าลดลงที่เปอร์เซ็นต์ Recovery 60% ขึ้นไป ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้ปรากฏการณ์การเกิด Concentration Polarization คือ เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้ความเข้มข้นของ NOM ที่ผิวของเมมเบรนมีค่ามากขึ้น เนื่องจากฟลักซ์มีค่ามากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ NOM ที่ผิวของเมมเบรนมีค่ามากขึ้น จึงทำให้ปริมาณ NOM มีโอกาสที่จะหลุดผ่านเมมเบรนไปพร้อมกับน้ำ Permeate มีค่ามากขึ้นด้วย

และที่เปอร์เซ็นต์Recovery สูง ๆ ร้อยละการกำจัดก็ลดลงด้วยจากร้อยละ 98 เหลือร้อยละ 95 เนื่องจากมีการหมุนเวียนน้ำ Concentrate กลับเข้ามากรองอีกครั้ง ทำให้น้ำ Permeate ที่ออกจากเมมเบรนมีค่าความเข้มข้นสูงขึ้น



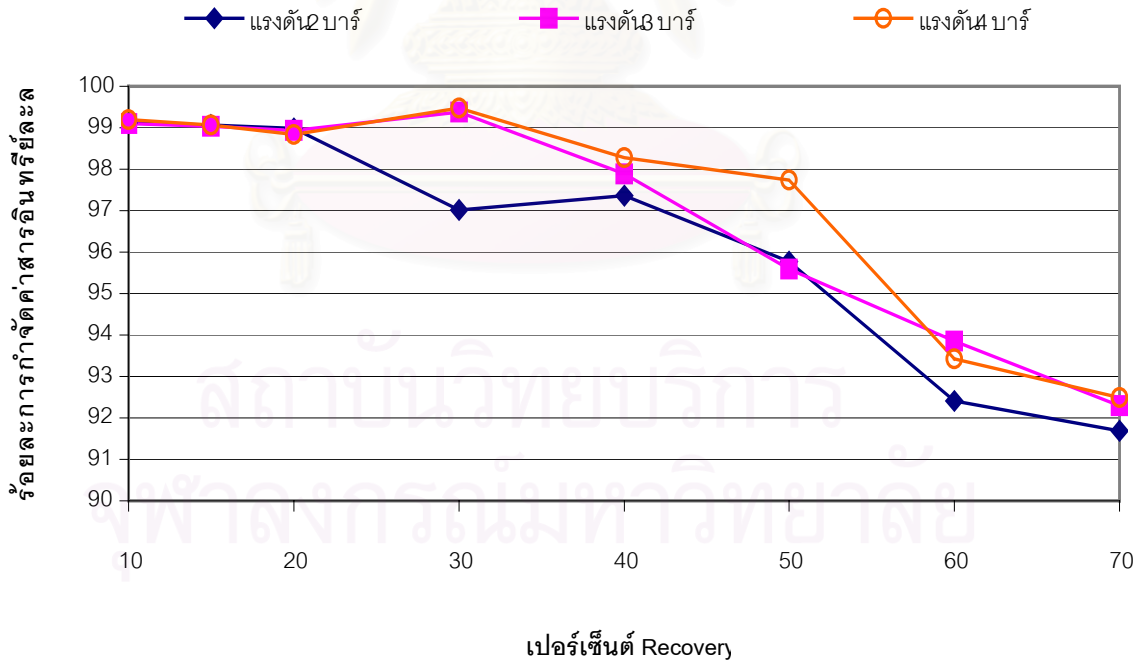
รูปที่ 4.6 ค่าการดูดกลืนแสง ยูวี ในช่วงความยาวคลื่น 200-310 nm.



รูปที่ 4.7 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อร้อยละการกำจัด NOM ในรูปของยูวี 254

4.2.1.3 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ

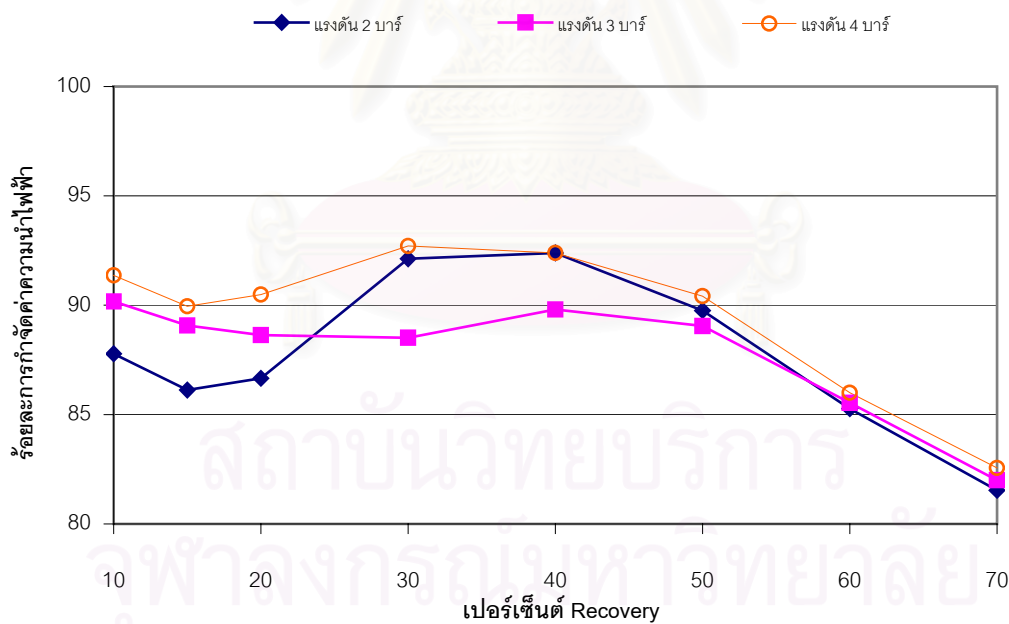
ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ แสดงในรูปที่ 4.8 จากผลการทดลองจะเห็นว่าร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ Recovery เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 99 เหลือร้อยละ 91 และเมื่อเปรียบเทียบร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ และร้อยละการกำจัดยูวี 254 จะเห็นได้ว่าร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำมีค่าน้อยกว่า เนื่องจาก NOM ที่สามารถดูดกลืนแสงยูวี ได้นั้นเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ มีโครงสร้างเป็นอะโรมาติก หรือพันธะคู่ จึงถูกกำจัดได้ง่าย โดยกระบวนการกรองติดผิวเมมเบรน ในขณะที่ค่า สารอินทรีย์ละลายน้ำ บ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งรวมโมเลกุลที่อาจมีขนาดเล็กมากจนสามารถไหลผ่านเมมเบรนได้ จึงทำให้ร้อยละการกำจัด สารอินทรีย์ละลายน้ำ มีค่าน้อยกว่าร้อยละการกำจัดNOM ในรูปของยูวี 254



รูปที่ 4.8 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ

4.2.1.4 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความนำไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าร้อยละการกำจัดค่าความนำไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ Recovery เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 90- 92 เหลือร้อยละ 82 ที่เปอร์เซ็นต์ Recovery 70% เนื่องจากมีการเวียนน้ำ concentrate เข้าระบบ และผลต่อเนื่องจากการกำจัดยูวี 254 ที่พบว่าเปอร์เซ็นต์ Recovery 60%ขึ้นไป ร้อยละการกำจัดยูวี 254 จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความดัน แต่สำหรับความนำไฟฟ้ากลับมีค่าการกำจัดมากขึ้นตามความดัน สามารถอธิบายได้โดยใช้ปรากฏการณ์ Concentration Polarization คือ เมื่อเพิ่มความดันที่ใช้จะทำให้ความเข้มข้นของ NOM ที่ผิวของเมมเบรนมีมากขึ้น เนื่องจากค่าฟลักซ์มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ตามการเพิ่มความดันมีค่ามากกว่า ทำให้ความเข้มข้นของ NOM ที่ผิวเมมเบรนมีค่ามากกว่า เมื่อมีความเข้มข้นของ NOM ที่ผิวของเมมเบรนมีค่ามากขึ้น จึงทำให้ปริมาณ NOM ที่หลุดผ่านเมมเบรนไปพร้อมกับน้ำ permeate มีค่ามากขึ้นด้วย

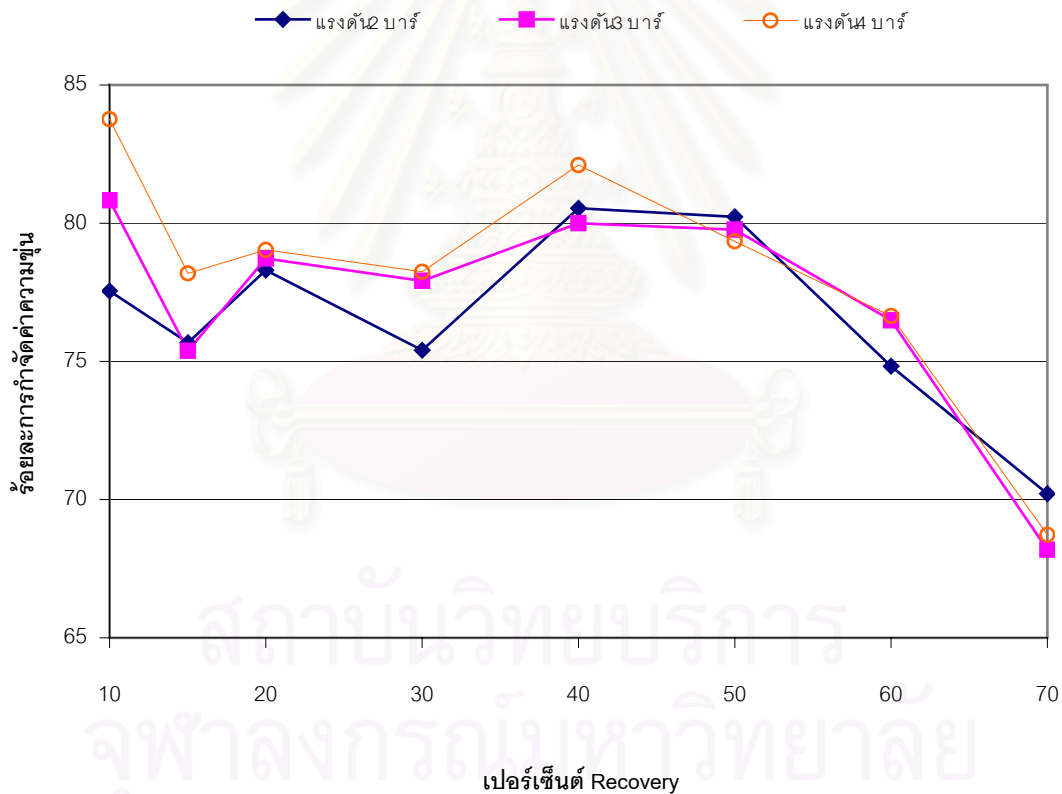


รูปที่ 4.9 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อร้อยละการกำจัดค่าความนำไฟฟ้า

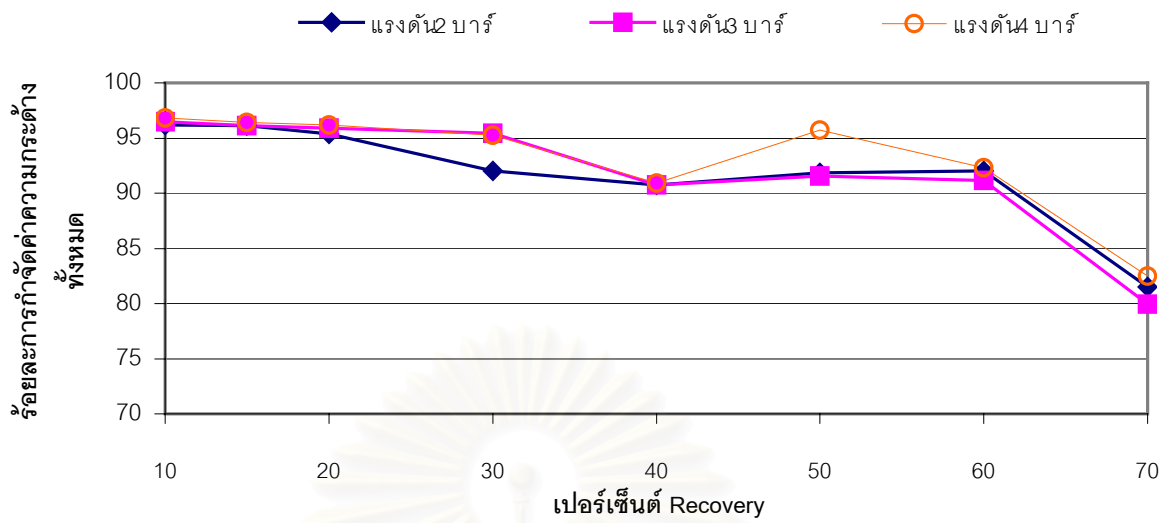
4.2.1.5 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าร้อยละการกำจัดความขุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันที่ใช้ และมีค่าลดลงเนื่องจากการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ Recovery และหลังจากเปอร์เซ็นต์ Recovery ที่มากกว่า 50% พบว่าร้อยละการกำจัดลดลงจากร้อยละ 80 เหลือเพียงร้อยละ 65 เนื่องจากเกิดการสะสมตัวของสารต่าง ๆ ที่ผิวของเมมเบรนที่มากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ Recovery

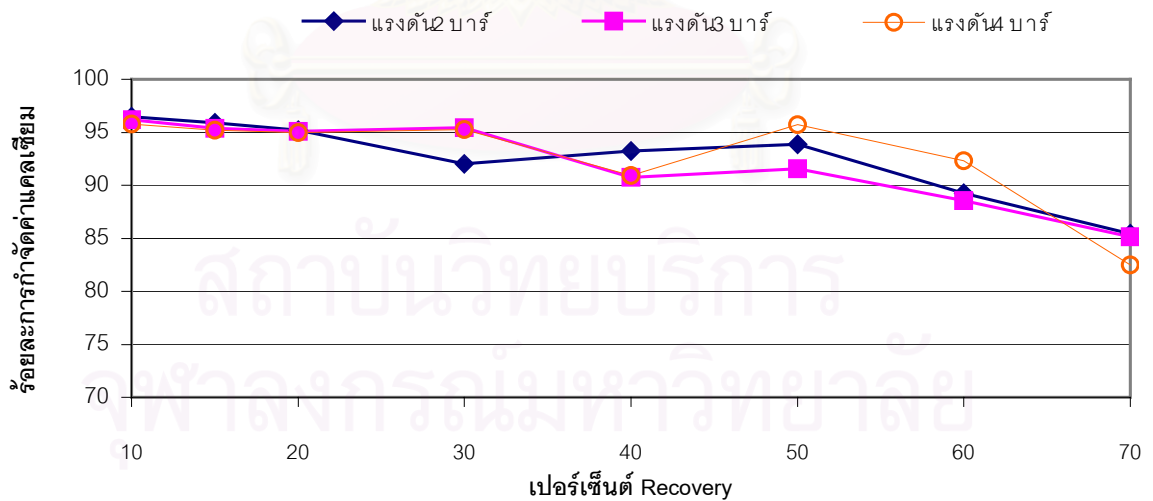
ที่เปอร์เซ็นต์ Recovery 10% พบว่ามีการกำจัดความขุ่นได้ดีที่สุด แต่จะไม่มีการนำไปใช้งานจริงเนื่องจากให้ค่าฟลักซ์ที่น้อยและสูญเสียน้ำ concentrate ที่ระบายออกจากระบบมากเกินไป



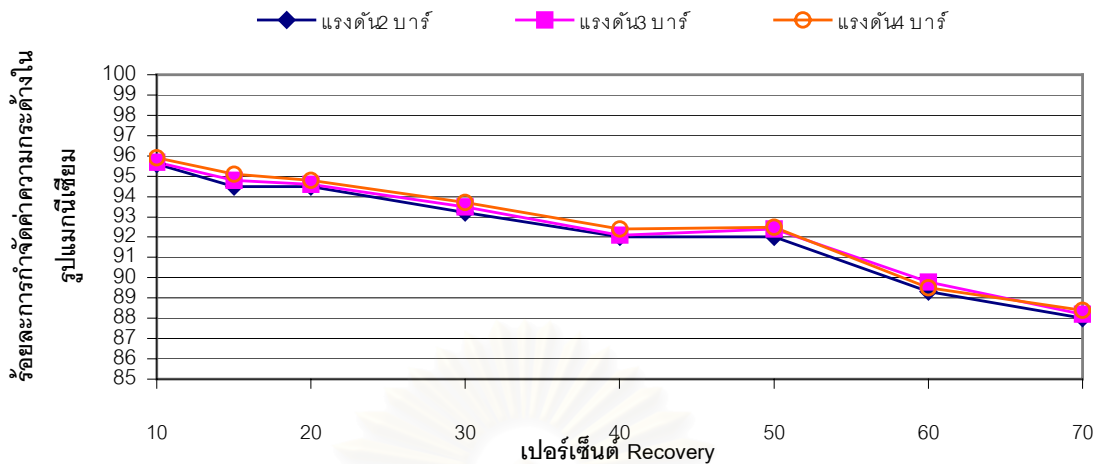
รูปที่ 4.10 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น



รูปที่ 4.11 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัด ค่าความกระด้างทั้งหมด



รูปที่ 4.12 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าความกระด้างในรูปของแคลเซียม



รูปที่ 4.13 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าความกระด้างในรูปของแมกนีเซียม

4.2.1.6 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง

จากรูปที่ 4.11-4.13 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างเพิ่มตามค่าความดันส่วนบางค่าที่มีค่าลดลงเนื่องจากความแปรปรวนของคุณภาพน้ำที่เข้าสู่ระบบและที่เปอร์เซ็นต์ Recovery 30-60% มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างที่ใกล้เคียงกันคือร้อยละ 91.81-96.06 ซึ่งถือว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการกำจัดความนำไฟฟ้าพบว่ามีการกำจัดใกล้เคียงกัน แต่ร้อยละการกำจัดความนำไฟฟ้าน้อยกว่า

ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่ออกจากเมมเบรนมีค่าไม่เกิน 10 มก./ล. ซึ่งถือว่ามีค่าน้อย เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก คือแคลเซียมไม่เกิน 75 มก./ล. และแมกนีเซียมไม่เกิน 50 มก./ล. แม้แคลเซียมจะเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับคนและสัตว์ แต่โดยทั่วไปแล้วร่างกายคนเราต้องการแคลเซียมประมาณ 0.7-1.0 กรัมต่อวัน ดังนั้นน้ำดื่มจึงไม่ใช่แหล่งแคลเซียมที่สำคัญของมนุษย์

แมกนีเซียมเป็นธาตุคู่กับแคลเซียม ในฐานะเป็นต้นเหตุของความกระด้างและตะกอน แมกนีเซียมเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นเช่นเดียวกับแคลเซียม แต่แมกนีเซียมทำให้น้ำมีรสไม่ชวนดื่ม ดังนั้นน้ำดื่มจึงไม่ใช่แหล่งแมกนีเซียมที่สำคัญของมนุษย์

4.3 ผลการทดลองเดินระบบต่อเนื่องในขนาดทดสอบในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

การทดลองในขั้นตอนนี้ใช้ระบบนาโนฟิลเตรชันขนาดทดสอบ การทดลองในขั้นนี้ใช้น้ำที่ผ่านกระบวนการกรองทายเป็นน้ำเข้าระบบ โดยทำการเดินระบบต่อเนื่องจนกระทั่งค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 40 ของค่าฟลักซ์เริ่มต้น ซึ่งเป็นตัวแทนของการเกิดปัญหา fouling (ฟาวลิง) ของระบบ

4.3.1 เหตุผลของการเลือกใช้ปัจจัยต่าง ๆ ในการเดินระบบ

ในการทดลองที่ผ่านมาจะทำการเลือกปัจจัยที่ใช้ในการเดินระบบต่อเนื่องเพื่อศึกษาการเกิดปัญหา fouling โดยค่าที่เลือกใช้ได้คือ

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการเลือกใช้ในการเดินระบบต่อเนื่อง

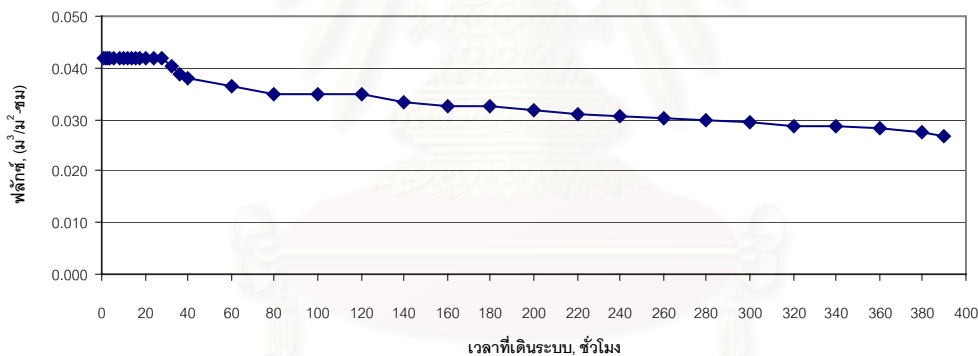
พารามิเตอร์	ค่าที่เลือกใช้	ร้อยละการกำจัด	ค่ามาตรฐาน	หมายเหตุ
ฟลักซ์, $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$	0.0418	-	N/A	
แรงดัน, บาร์	4	-	N/A	
สารอินทรีย์ละลายน้ำ, มก./ล.	0.2-0.4	95-97	N/A	
ยูวี 254, cm^{-1}	0.002-0.003	97-98	N/A	
ความขุ่น, NTU	0.06-0.07	80	5	มาตรฐานน้ำดื่ม WHO
ความนำไฟฟ้า, $\mu\text{s}/\text{cm}$	20-30	90	N/A	
แคลเซียม, มก./ล. หินปูน	5-10	95	75	มาตรฐานน้ำดื่ม WHO
แมกนีเซียม, มก./ล. หินปูน	5-10	93	50	มาตรฐานน้ำดื่ม WHO

4.3.2 ผลของค่าฟลักซ์ต่อการเดินระบบต่อเนื่อง

จากการทดลองเดินระบบต่อเนื่องโดยใช้ค่าความดันเริ่มต้นที่ 4 bar และเปอร์เซ็นต์ Recovery ที่ 50% พบว่าค่าฟลักซ์ของเมมเบรนมีค่าคงที่จนกระทั่งถึงชั่วโมงที่ 28 จึงเริ่มลดลงแต่ยังลดลงไม่มากนัก โดยค่าฟลักซ์ลดลงจาก 0.0418 ม./ชม. เป็น 0.0266 ม./ชม. ในชั่วโมงที่ 390 ดังแสดงผลในรูปที่ 4.13 จึงทำการปิดระบบเพื่อทำการล้างระบบเมมเบรน

เหตุผลที่ค่าฟลักซ์มีค่าลดลงเรื่อย ๆ เนื่องมาจากเกิดการสะสมตัวของสารต่าง ๆ ในน้ำที่หน้าพื้นที่ผิวของเมมเบรน เมื่อเกิดการสะสมน้ำจึงไหลผ่านได้น้อยลงเป็นผลให้ค่าฟลักซ์ที่ได้ลดลงด้วย เหตุการณ์เช่นนี้เรียกว่าการเกิด Concentration Polarization (CP) คือเมื่อตัวถูกละลายไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้จะสะสมอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้ค่าความเข้มข้นบริเวณนั้นสูงกว่าน้ำที่เข้าระบบ ดังนั้นการเกิด CP ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง

อย่างไรก็ตาม ค่าฟลักซ์ที่ลดลงเนื่องจากการเกิด CP สามารถแก้ไขให้มีสภาพดังเดิมได้ โดยการล้างทำความสะอาดด้วยสารเคมี



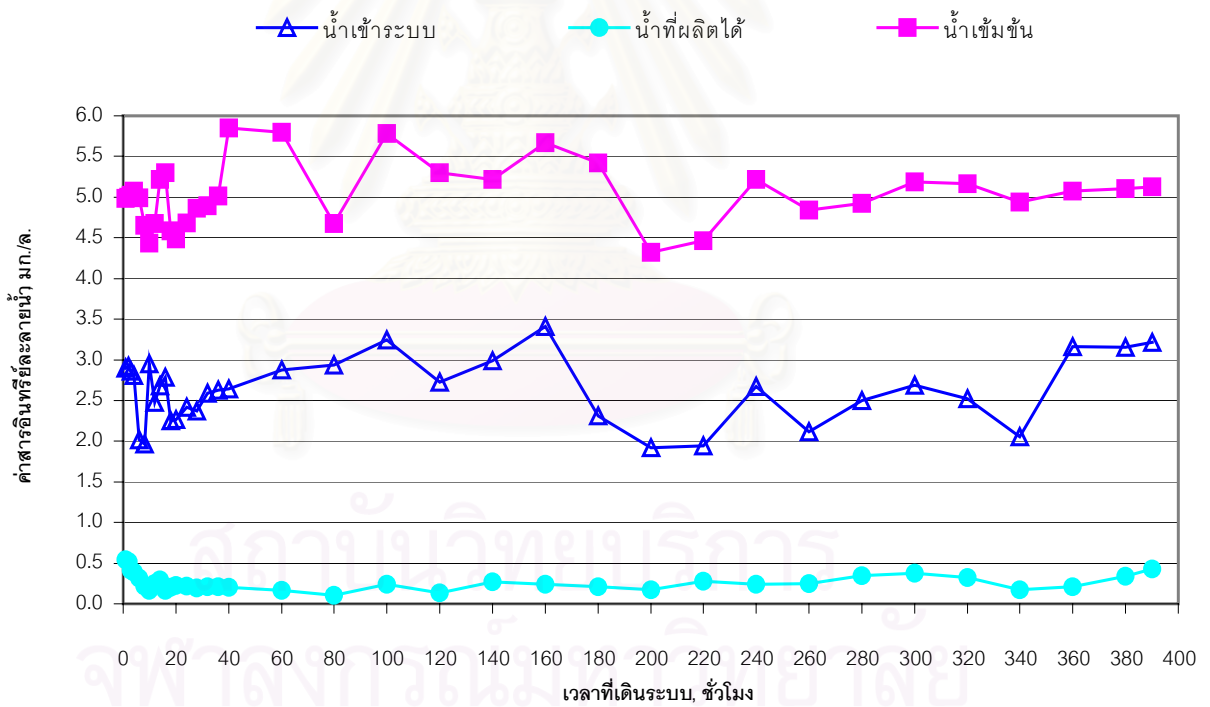
รูปที่ 4.14 ผลของค่าฟลักซ์ต่อการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ

4.3.3 ผลของการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ

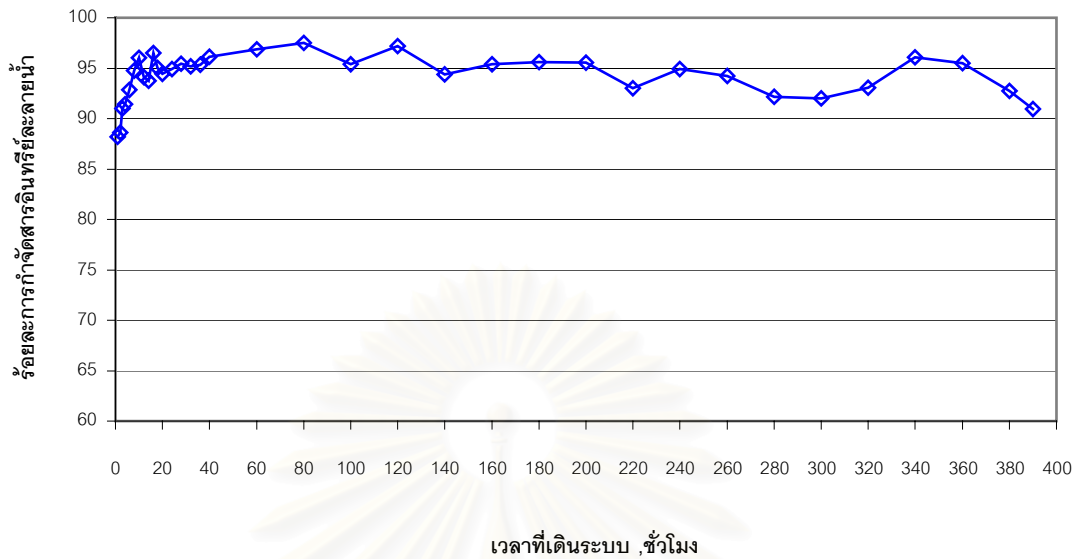
จากรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 พบว่า ร้อยละการกำจัดค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำอยู่ในช่วง 88-97 เหตุที่ช่วง 10 ชั่วโมงแรกร้อยละการกำจัดค่า สารอินทรีย์ละลายน้ำ ไม่สูงนักเนื่องมาจากค่าความแปรปรวนของค่า สารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำที่เข้าระบบ แต่เมื่อผ่านช่วง 10 ชั่วโมงแรกไป พบว่าการกำจัดค่า สารอินทรีย์ละลายน้ำค่อนข้างคงที่คืออยู่ในช่วงร้อยละ 91-96 โดยค่า สารอินทรีย์ละลายของน้ำ Concentrate ที่มีการนำกลับมาอีกแปรตามค่าน้ำที่เข้าระบบ

การทดลองในครั้งนี้ได้ทำการนำน้ำ Concentrate มาเข้าระบบใหม่โดยคิดเป็นอัตราส่วน 4:1 คือน้ำ Concentrate 4 ส่วน และน้ำที่เข้าระบบปกติ 1 ส่วน โดยที่น้ำ Concentrate ที่ออกจากเมมเบรนมีทั้งหมด 5 ส่วน ได้ทำการทิ้งไปเพื่อไม่ให้ระบบมีการสะสมตัวของสารต่าง ๆ ในน้ำมากไป 1 ส่วน โดยน้ำสะอาดที่ผลิตได้คิดเป็น 1 ส่วน

ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.5 mg/L แม้กระทั่งในช่วงที่ค่า พัลกซ์ลดลงอย่างมากจนกระทั่งต้องทำความสะอาดเมมเบรน ค่า สารอินทรีย์ละลายน้ำ ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้ยังมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปมาก เพราะเมมเบรนยังไม่ได้มีการถูกทำลาย เนื่องจากเมมเบรนชนิดนี้ทำมาจาก Polyamide ซึ่งทนทานต่อการทำลายของแบคทีเรีย ฟิเคสและอุณหภูมิจึงการทำความสะอาดเมมเบรนเมื่อถึงเวลาที่เหมาะสมจึงเป็นการยืดอายุการใช้งานของเมมเบรนได้มากขึ้น



รูปที่ 4.15 ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ

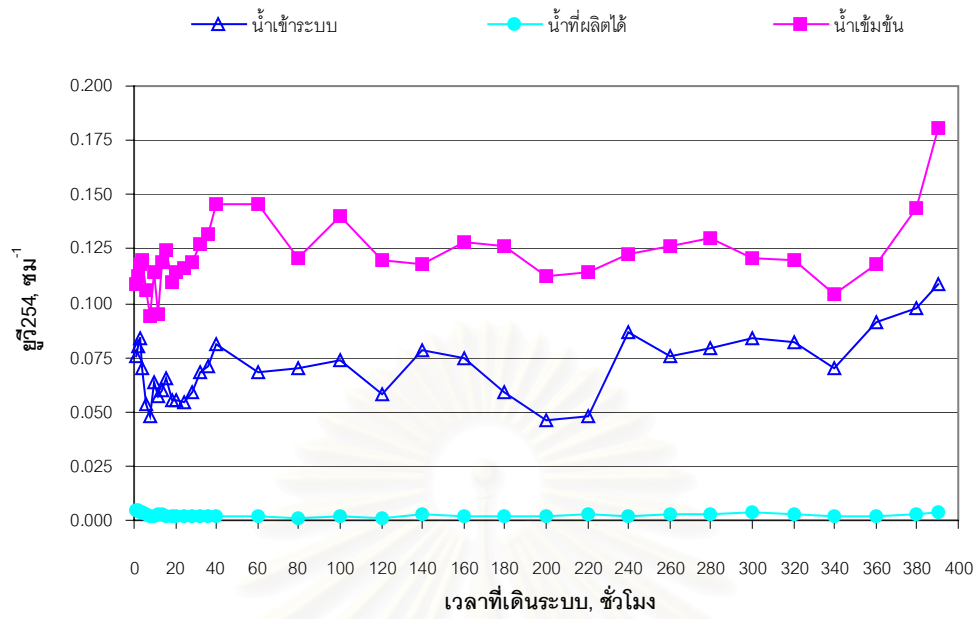


รูปที่ 4.16 ร้อยละการกำจัดค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำของเมมเบรนที่ช่วงเวลาต่าง ๆ

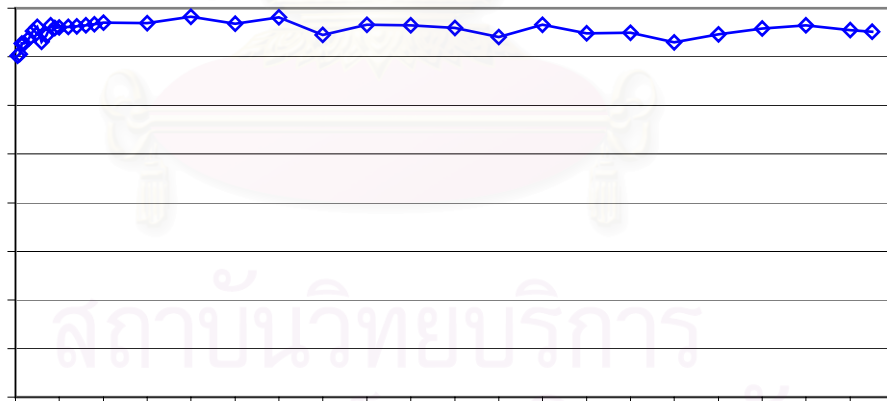
4.3.4 ผลของการเดินระบบต่อเนื้อที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อ NOM ในรูปของยูวี 254

จากการทดลองพบว่าค่ายูวี 254 ของน้ำ permeate ที่ผลิตได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.001-0.005 cm^{-1} และมีร้อยละการกำจัดอยู่ในช่วง 95-98 และพบว่าค่าน้ำ Concentrate มีค่าแปรตามน้ำที่เข้าระบบและในช่วงชั่วโมงที่ 360 พบว่า NOM ในรูปของยูวี 254 ของน้ำ concentrate มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.11 cm^{-1} เป็น 0.18 cm^{-1} ในชั่วโมงที่ 390 แสดงให้เห็นว่ามีการสะสมตัวของสารต่าง ๆ หน้าผิวของเมมเบรนมากขึ้นเป็นเหตุให้ค่าฟลักซ์ของน้ำ permeate มีค่าลดลง แต่คุณภาพน้ำ permeate ที่ผลิตได้อยู่ในช่วงเดียวกันไม่ได้แปรตามค่าน้ำเข้ามากนัก เพราะ NOM ที่อยู่ในรูปของยูวี 254 มีขนาดโมเลกุลใหญ่

เหตุผลที่ร้อยละการกำจัด NOM ในรูปของยูวี 254 มีค่ามากกว่าการกำจัด สารอินทรีย์ละลายน้ำ เพราะว่า NOM ที่อยู่ในรูปของยูวี 254 มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า NOM ที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ละลายน้ำ ซึ่งอาจมีขนาดโมเลกุลเล็กมากจนสามารถไหลผ่านรูของเมมเบรนได้



รูปที่ 4.17 NOM ในรูปของยูวี 254 ของน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



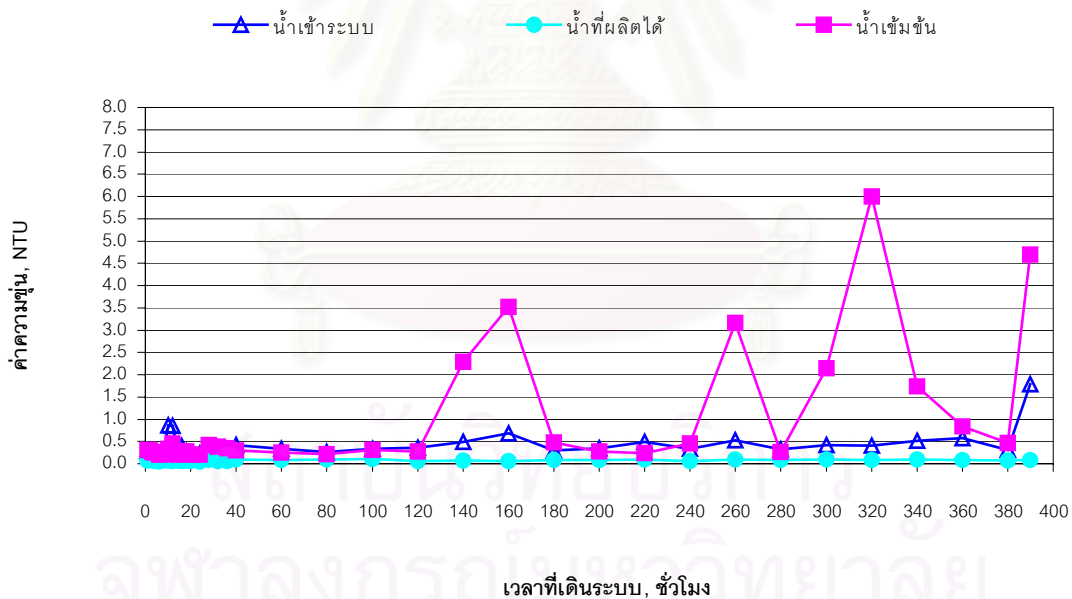
รูปที่ 4.18 ร้อยละการกำจัด NOM ในรูปของยูวี 254 ของเมมเบรนที่ช่วงเวลาต่าง ๆ

4.3.5 ผลของการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อค่าความขุ่น

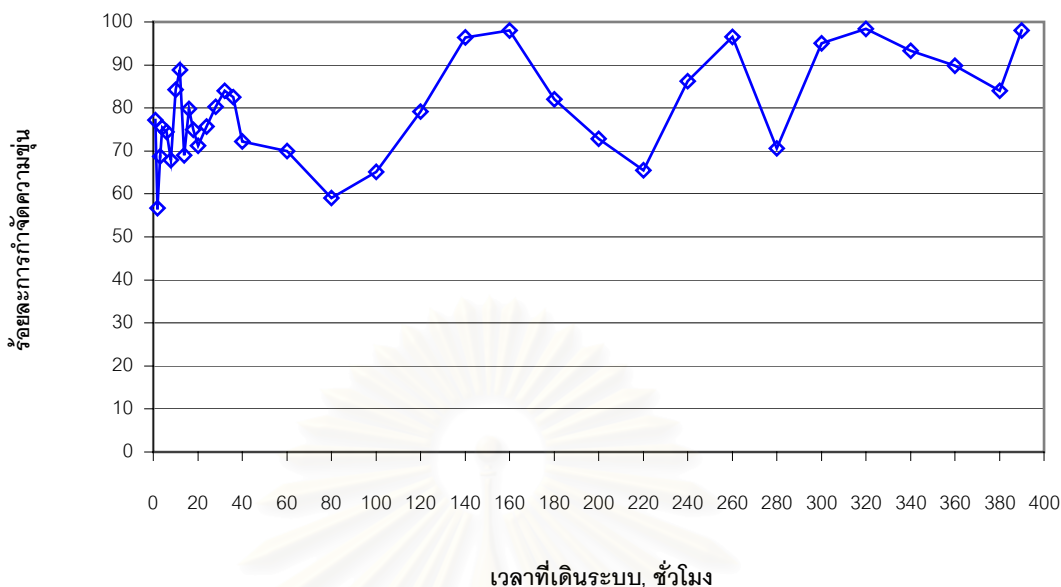
จากรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าร้อยละการกำจัดความขุ่นมีค่าไม่ค่อยคงที่คือที่ช่วงร้อยละ 60-98 เนื่องจากค่าความแปรปรวนของค่าน้ำเข้าและค่าความขุ่นของน้ำ Concentrate ที่นำมาเวียนกลับมีค่าอยู่ในช่วง 0.2-6.0 NTU ซึ่งมีการสะสมตัวอยู่หน้าผิวเมมเบรนมากทำให้ความขุ่นรวมของน้ำที่เข้าระบบเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก แต่ค่าความขุ่นของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีความขุ่นค่อนข้างคงที่ คือ ช่วงค่า 0.05-0.13 NTU ทำให้ร้อยละการกำจัดมีค่าไม่คงที่

เหตุที่น้ำ Concentrate มีค่าไม่คงที่อาจเนื่องมาจากเกิดการสะสมตัวของสารหน้าพื้นผิวเมมเบรนที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าเมมเบรน เมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่อง สารต่าง ๆ ที่มีขนาดใหญ่ที่สะสมอยู่เหล่านั้นได้หลุดออกมาทำกับน้ำ Concentrate ที่บางส่วนได้ปล่อยทิ้งและนำเข้ามาใช้อีก

เมื่อสารเหล่านั้นหลุดออกมาทำให้ค่าความขุ่นของน้ำ Concentrate มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.19 ค่าความขุ่นของน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



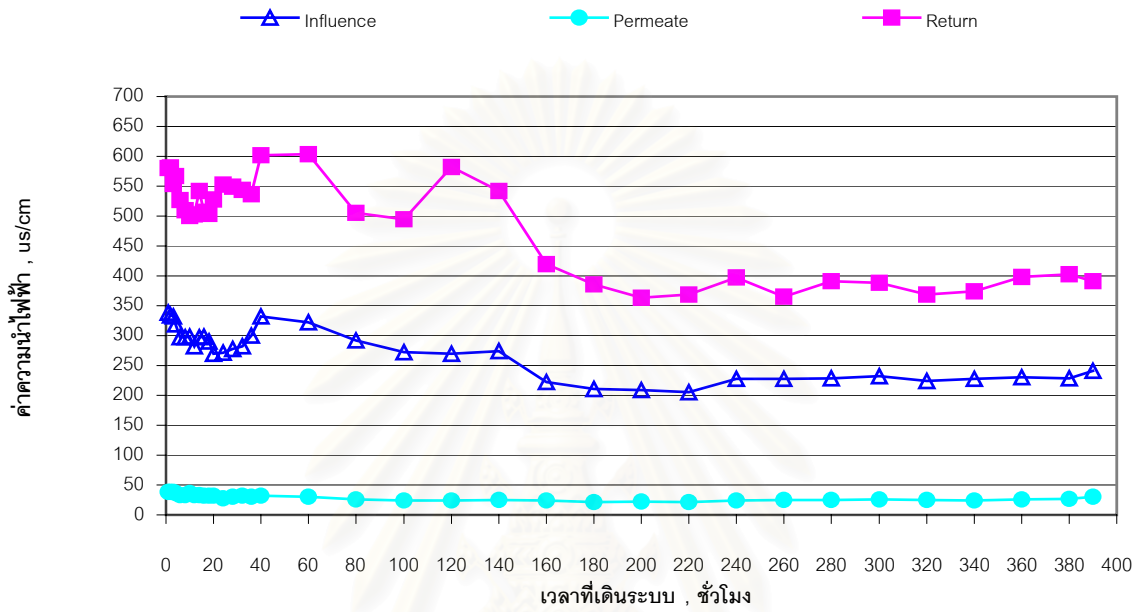
รูปที่ 4.20 ร้อยละการกำจัดค่าความขุ่น

4.3.6 ผลของการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อค่าความนำไฟฟ้า

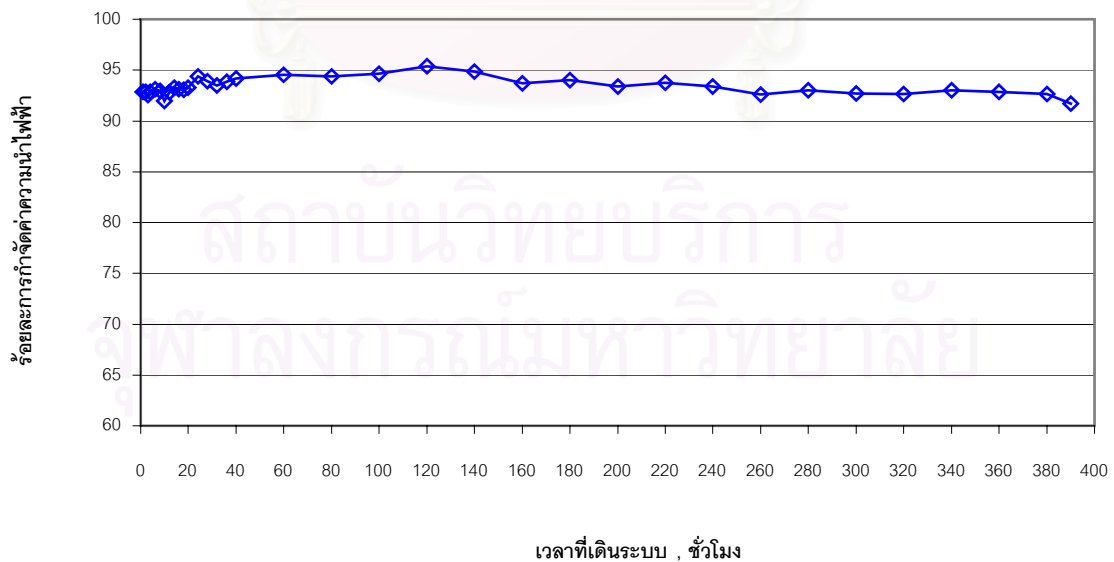
จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงให้เห็นว่าร้อยละการกำจัดค่าความนำไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 92-95% ซึ่งค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ Permeate มีค่าความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 21-38 $\mu\text{s}/\text{cm}$ และค่าน้ำ Concentrate มีค่าอยู่ในช่วง 360-600 $\mu\text{s}/\text{cm}$ มีค่าแปรตามค่าน้ำที่เข้าระบบที่มีค่าอยู่ในช่วง 200-350 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ร้อยละการกำจัดค่าความนำไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 91-94 ซึ่งถือว่ามีค่าที่ค่อนข้างคงที่

การที่เมมเบรนมีประจุไฟฟ้าหน้าผิวเมมเบรนทำให้เกิดกลไกที่เรียกว่ากลไกการผลักระหว่างประจุไฟฟ้าของ NOM และเมมเบรน จากการทดลองของ Waypa และคณะ (1997) พบว่าค่าการกำจัด NaCl ในสารละลายจะลดลงเมื่อประจุลบของเมมเบรนมีค่าลดลงซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนของไอออนประจุลบหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโพลีเมอร์ของเมมเบรน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างกลุ่มทำปฏิกิริยาที่อยู่ติดกัน ดังนั้นที่ค่าพีเอชสูงขึ้นจึงทำให้ค่าการกำจัดค่าความนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นและยังทำการหาค่า IEP (Isoelectric point) คือ ค่าพีเอชลดต่ำลงจนทำให้ประจุลบที่ผิวของเมมเบรนมีค่าลดลงจนถึงค่าหนึ่ง ที่จุดนี้ประจุของเมมเบรนจะกลับเป็นประจุบวก ส่งผลให้อิออนสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้

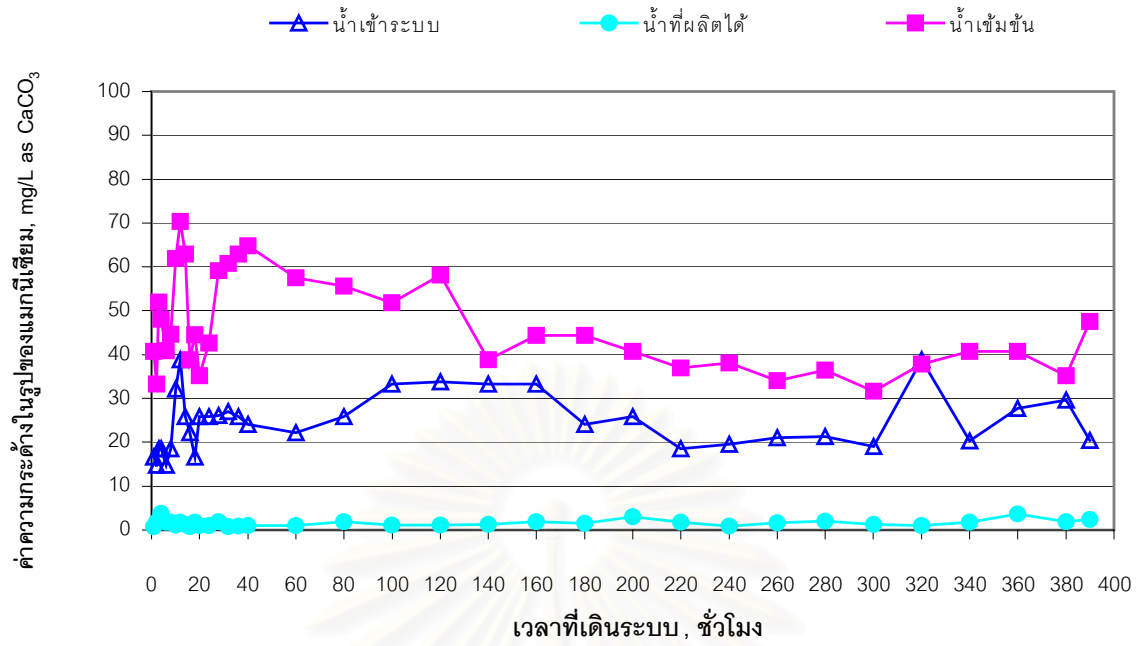
ง่าย ช่วงที่หาค่า IEP ของ RO เมมเบรนที่ใช้ค่าความดันต่ำ (Low-pressure RO Membrane) ชนิด TFCL พบว่าค่า IEP มีค่าใกล้เคียง 4.4 แต่เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้ค่าพีเอชที่เข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 6.85-7.46 ซึ่งมีความค่อนข้างคงที่จึงถือว่าพีเอชประมาณเป็นกลางนี้ มีผลน้อยมากต่อการลดลงของประสิทธิภาพของการกำจัดค่าความนำไฟฟ้า



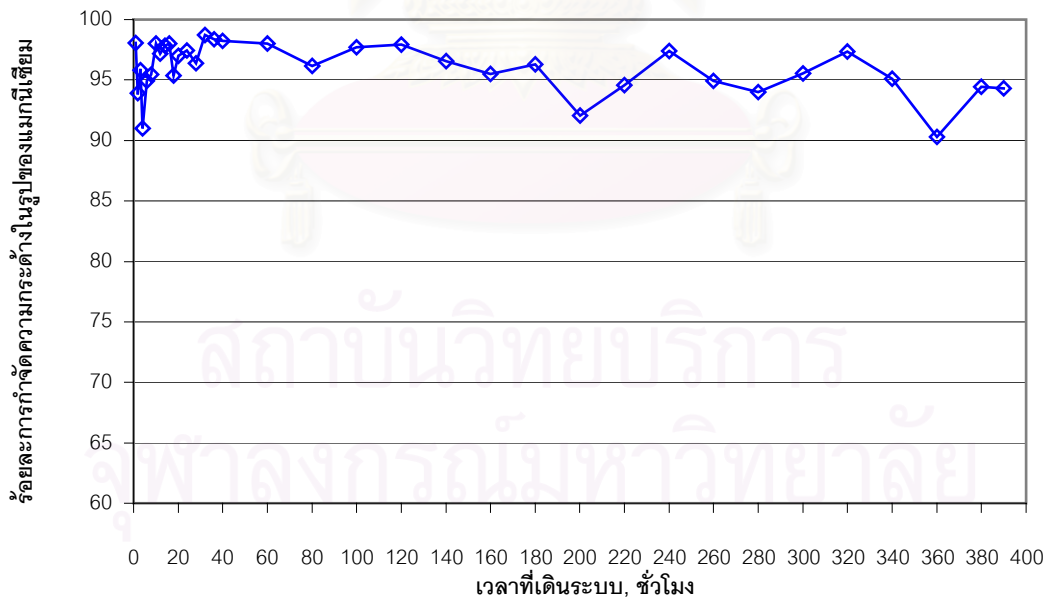
รูปที่ 4.21 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



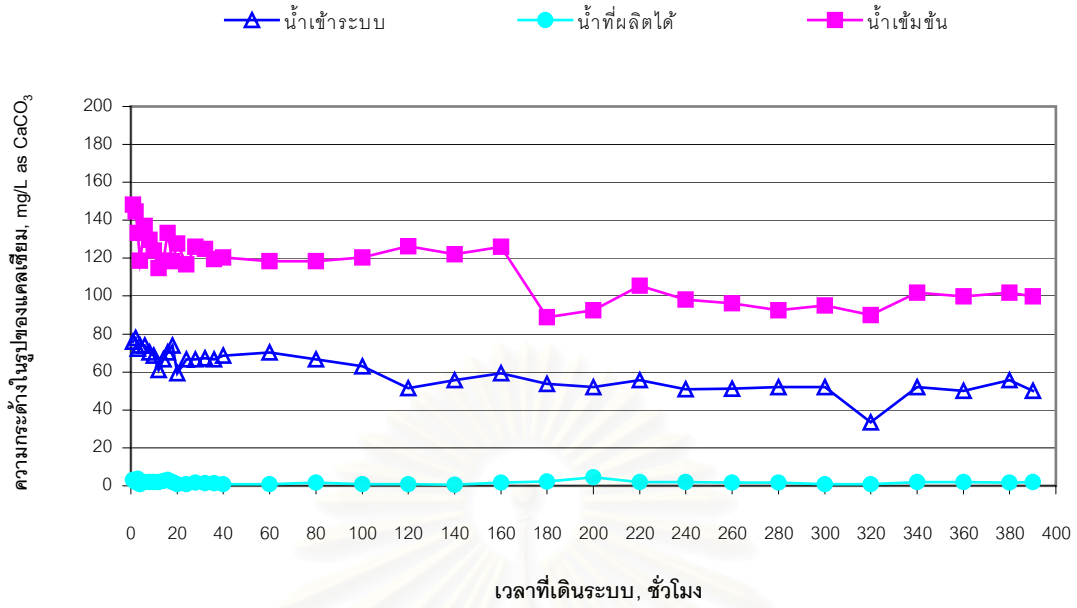
รูปที่ 4.22 ร้อยละการกำจัดค่าความนำไฟฟ้า



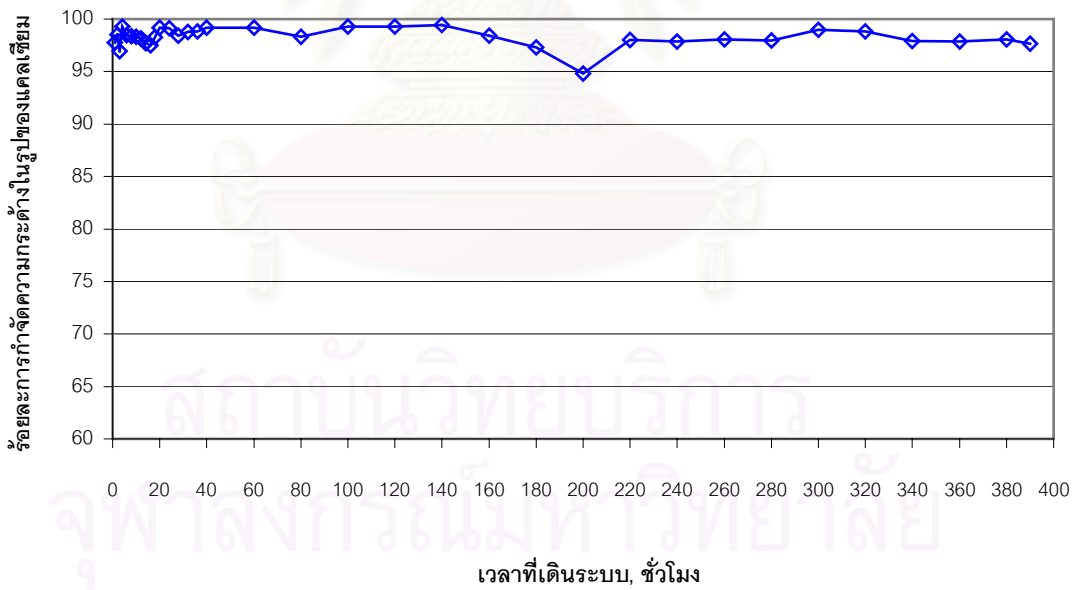
รูปที่ 4.23 ค่าความกระด้างทั้งหมดของน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ



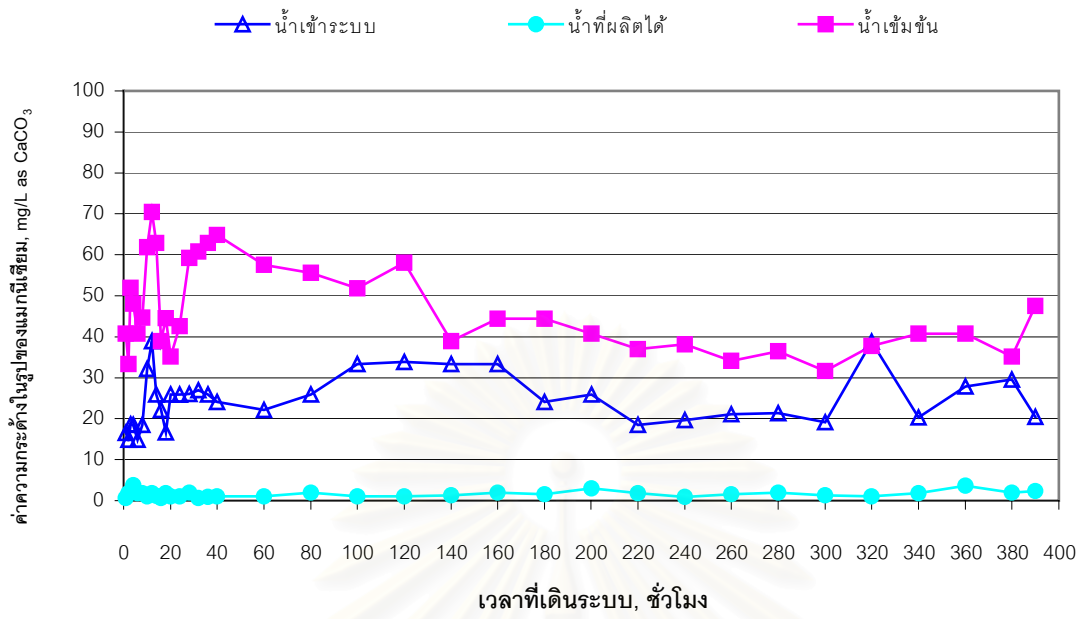
รูปที่ 4.24 ร้อยละการกำจัดความกระด้างทั้งหมด



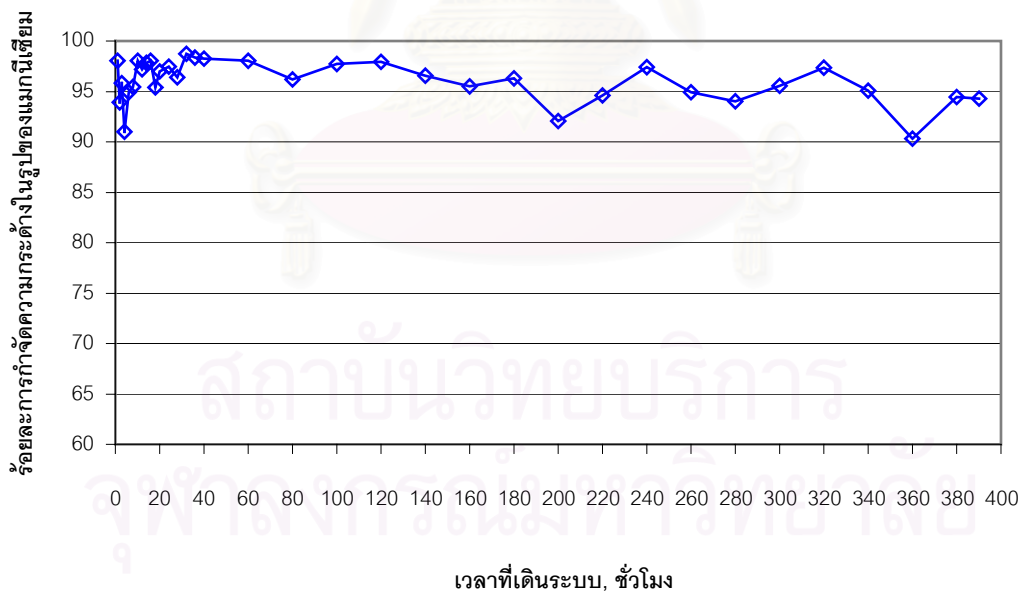
รูปที่ 4.25 ค่าความกระด้างในรูปของแคลเซียมของน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.26 ร้อยละการกำจัดความกระด้างในรูปของแคลเซียม



รูปที่ 4.27 ค่าความกระด้างในรูปของแมกนีเซียมของน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.28 ร้อยละการกำจัดความกระด้างในรูปของแมกนีเซียม

4.3.7 ผลของการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อค่าความกระด้าง

จากรูปที่ 4.23-4.28 จะพบว่า การกำจัดค่าความกระด้างไม่ว่าจะเป็นค่าความกระด้างที่อยู่ในรูปของแคลเซียม และ แมกนีเซียม สามารถกำจัดความกระด้างได้มากถึงร้อยละ 91-99 โดยค่าของแคลเซียมและแมกนีเซียมของน้ำ permeate มีค่าอยู่ในช่วง 1-7 มก./ล. ส่วนค่าน้ำที่เข้าระบบมีแคลเซียมและแมกนีเซียมอยู่ในช่วง 15-70 มก./ล. และน้ำ concentrate มีค่าอยู่ในช่วง 30-120 มก./ล. จะเห็นได้ว่าค่าแคลเซียมและแมกนีเซียมของน้ำ concentrate มีค่าสูงกว่าน้ำเข้า 2-3 เท่า จึงมีความจำเป็นที่จะต้องระบายน้ำ concentrate จากระบบเพื่อไม่ให้เกิดการสะสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมหน้าผิวเมมเบรนมากเกินไป เนื่องจากสภาพที่มีน้ำ concentrate เข้มข้นมากกว่าน้ำเข้าหลายเท่าเอื้ออำนวยให้มีการตกผลึกของ CaCO_3 และ/หรือ CaSO_4 ได้ เนื่องจาก CaCO_3 มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ

เมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่องจนถึงชั่วโมงที่ 390 จะเห็นได้ว่าการลดลงของค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้ ประมาณ 40% ขั้นตอนต่อไปคือการทำความสะอาดเมมเบรนเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบและค่าฟลักซ์ที่ได้หลังการทำความสะอาดระบบ

4.4 การล้างเมมเบรนเมมเบรนและการเดินระบบนาโนฟิลเตรชันอย่างต่อเนื่อง

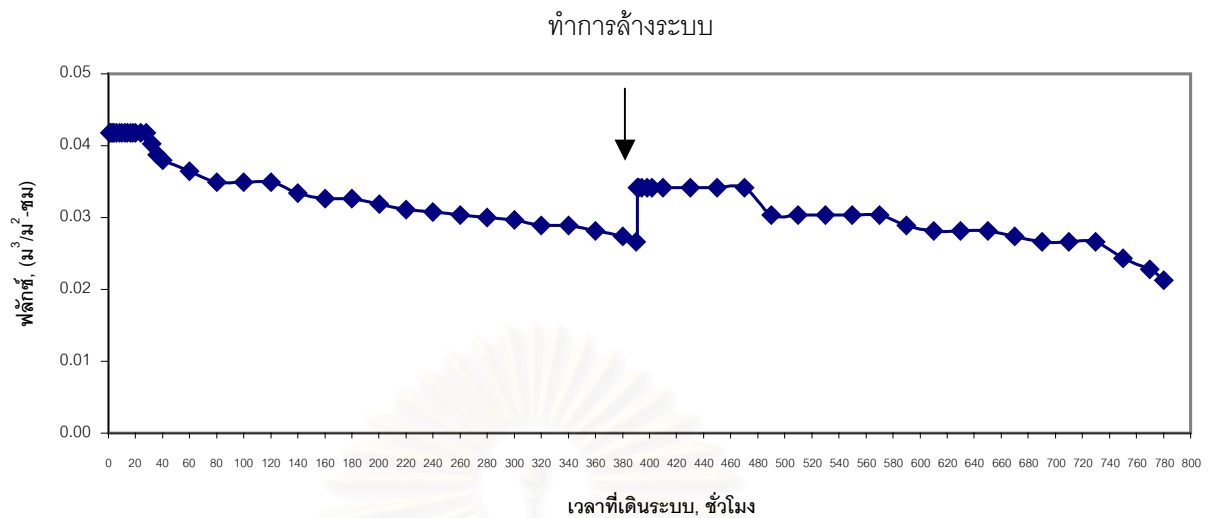
หลังจากได้ทำการเดินระบบนาโนฟิลเตรชันอย่างต่อเนื่อง พบว่ามีการลดลงของค่าฟลักซ์อย่างต่อเนื่องจากค่าฟลักซ์เริ่มต้นร้อยละ 40 แสดงให้เห็นว่าเกิดการอุดตันบนผิวหน้าของเมมเบรน จึงจำเป็นต้องมีการล้างเมมเบรนเมมเบรน โดยขั้นตอนนี้สารเคมีที่ใช้ในการล้างเมมเบรนคือ

- กรดซิตริก ความเข้มข้น 20 ก./ล.และอีดีทีเอ ความเข้มข้น 20 ก./ล.
- อีดีทีเอ ความเข้มข้น 10 ก./ล.

4.4.1 ผลของการล้างเมมเบรนเมมเบรนต่อค่าฟลักซ์

จากการล้างเมมเบรนเมมเบรนและได้ทำการเดินระบบต่อเนื่องต่อโดยใช้ค่าความดันเริ่มต้นที่ 4 bar และ เปอร์เซ็นต์ Recovery ที่ 50% พบว่าค่าฟลักซ์ของเมมเบรนมีค่า 0.0342 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$. ซึ่งมีค่าลดลงหลังจากการเดินระบบต่อเนื่องในครั้งแรก คิดเป็นร้อยละ 82 ของค่าฟลักซ์เดิม แสดงให้เห็นว่าการล้างเมมเบรนเมมเบรนสามารถล้างสารที่สะสมที่พื้นผิวเมมเบรนออกได้ไม่หมด เมื่อสิ่งทีสะสมในเมมเบรนบางส่วนไม่สามารถล้างเมมเบรนได้หมดทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำ permeate ที่ผลิตได้มีค่าลดลงจากเดิม

เมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่องค่าฟลักซ์จะมีค่าเริ่มที่ 0.0342 $\text{m}^3/\text{ชม}$. หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงในชั่วโมงที่ 80 เหตุผลที่ค่าฟลักซ์มีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงชั่วโมงที่ 390 ค่าฟลักซ์มีค่าลดลงเป็น 0.0213 $\text{m}^3/\text{ชม}$. เนื่องมาจากเกิดการสะสมตัวของสารต่าง ๆ ในน้ำที่หน้าพื้นที่ผิวของเมมเบรน เมื่อเกิดการสะสมน้ำจึงไหลผ่านได้น้อยลงเป็นผลให้ค่าฟลักซ์ที่ได้ลดลงด้วย เหตุการณ์เช่นนี้เรียกว่าการเกิด Concentration Polarization (CP) คือเมื่อตัวถูกละลายไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้จะสะสมอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้ค่าความเข้มข้นบริเวณนั้นสูงกว่าน้ำที่เข้าระบบ ดังนั้นการเกิด CP ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง

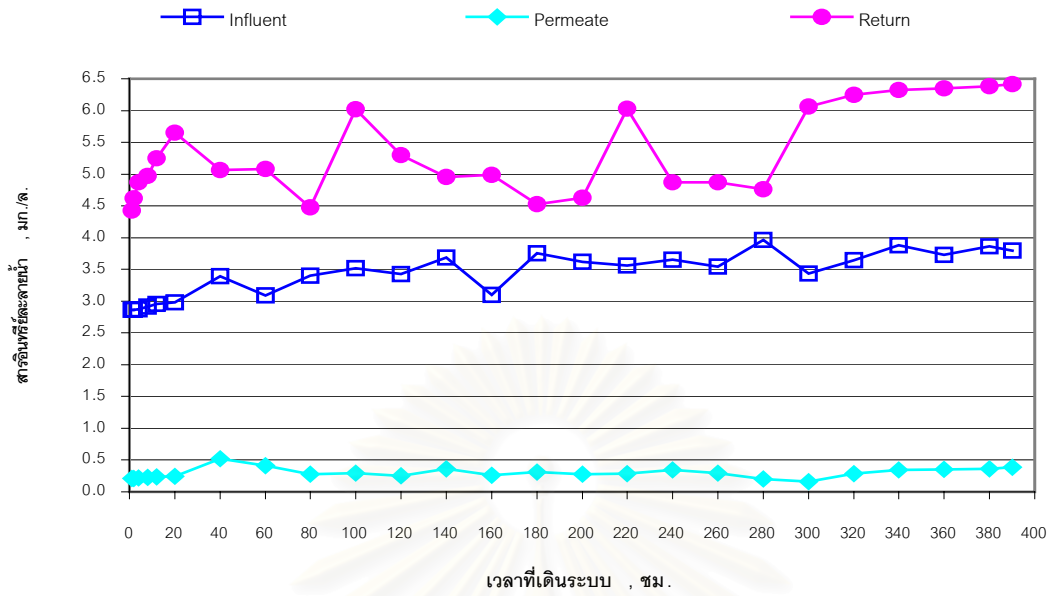


รูปที่ 4.29 ผลของค่าฟลักซ์ต่อการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง
เมมเบรน

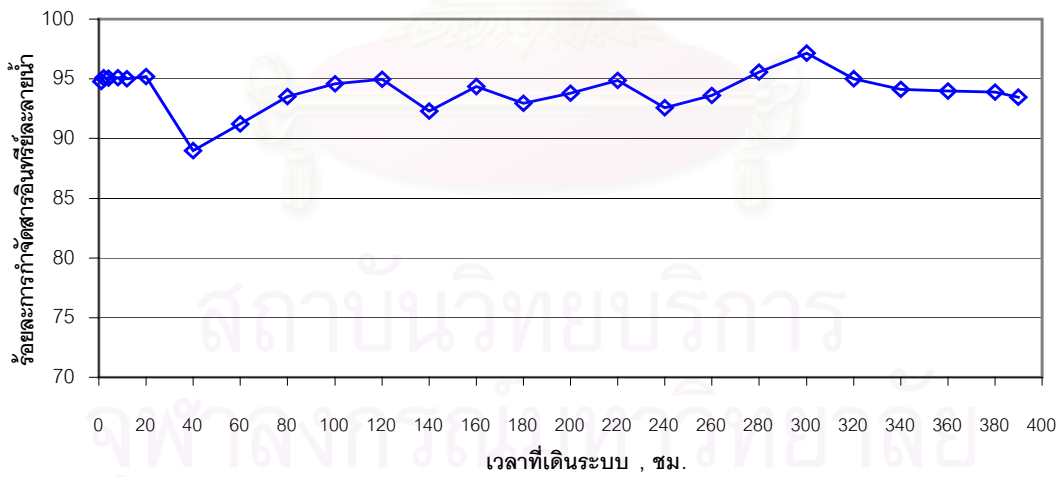
4.4.2 ผลของการทำความสะอาดเมมเบรนต่อค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ

จากการล้างเมมเบรนแล้วทำการเดินระบบต่อเนื่อง พบว่ามีการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ร้อยละ 89-97 ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับการเดินระบบต่อเนื่องก่อนที่จะล้างเมมเบรน แสดงให้เห็นว่าการเกิด Concentration Polarization มีผลน้อยมากต่อการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.16-0.52 มก./ล. ซึ่งถือว่าระบบนาโนฟิลเตรชันกำจัดค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ดีมาก

ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำ concentrate ที่ใช้เวียนกลับมาเข้าระบบใหม่มีค่าสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 4.4-6.3 มก./ล. โดยจะเห็นได้จากกราฟว่า ในช่วงชั่วโมงที่ 300 ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำของค่าน้ำ concentrate มีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ แสดงให้เห็นถึงการสะสมตัวของสารอินทรีย์หน้าผิวเมมเบรนและแสดงให้เห็นความสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์ที่ลดลงจนใกล้ถึงเวลาล้างเมมเบรน



รูปที่ 4.30 ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน



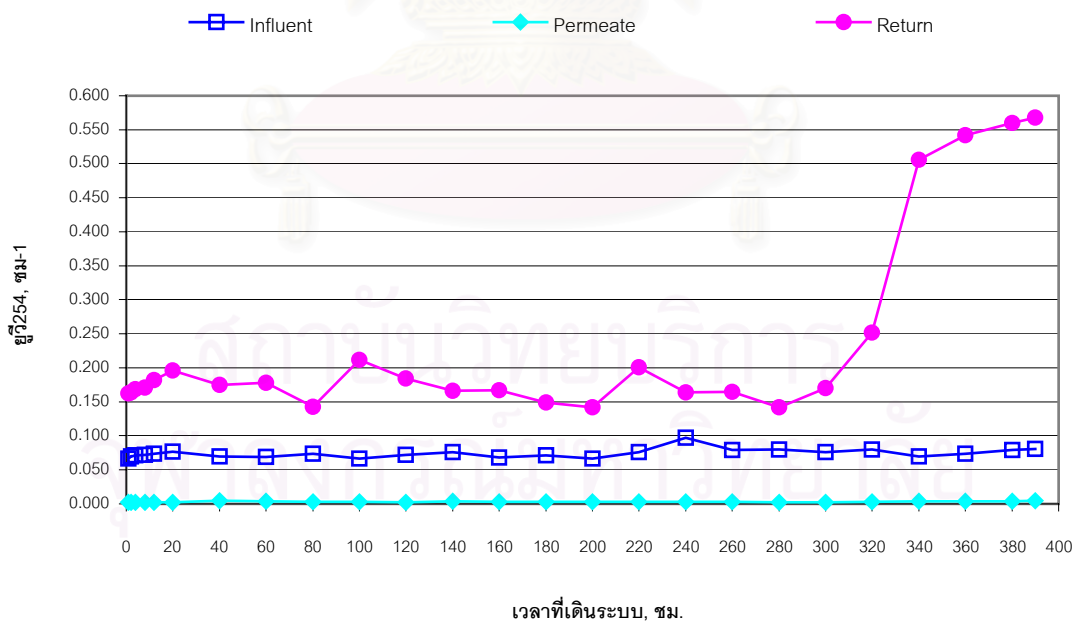
รูปที่ 4.31 ร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน

4.4.3 ผลของการล้างเมมเบรนเมมเบรนต่อ NOM ในรูปของยูวี 254

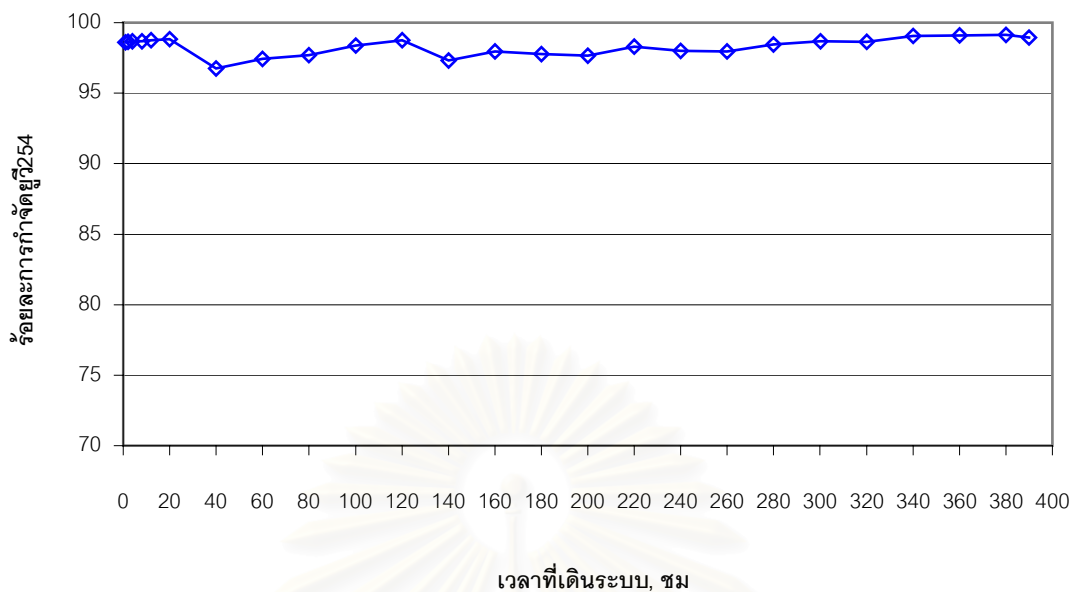
จากรูปที่ 4.32 และ 4.33 แสดงให้เห็นผลของการล้างเมมเบรนต่อค่ายูวี 254 โดยที่ค่ายูวี 254 ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีค่าอยู่ในช่วง $0.002-0.005 \text{ cm}^{-1}$ และมีร้อยละการกำจัดอยู่ในช่วง 96-99 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าน้ำสะอาดที่ผลิตได้ในการเดินระบบแบบต่อเนื่องก่อนที่จะล้างเมมเบรน แสดงให้เห็นว่าหลังการล้างเมมเบรนแล้วประสิทธิภาพการกำจัด NOM ในรูปของยูวี 254 อยู่ในช่วงค่าที่สูงเหมือนกับช่วงก่อนล้าง และพบว่าค่าน้ำ Concentrate มีค่าแปรตามน้ำที่เข้าระบบ แต่คุณภาพน้ำสะอาดที่ผลิตได้อยู่ในช่วงเดียวกันไม่ได้แปรตามค่าน้ำเข้ามากนัก เพราะ NOM ที่อยู่ในรูปของยูวี 254 มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ทำให้เมมเบรนกำจัดได้ดี

และ NOM ในรูปของยูวี 254 ของน้ำ Concentrate ในช่วงชั่วโมงที่ 300 มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แสดงให้เห็นว่าที่หน้าพื้นผิวของเมมเบรนเริ่มมีการสะสมตัวของสารต่าง ๆ ในน้ำมากขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์ที่ได้

เหตุผลที่ร้อยละการกำจัด NOM ในรูปของยูวี 254 มีค่ามากกว่าการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำเพราะว่า NOM ที่อยู่ในรูปของยูวี 254 มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า NOM ที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ละลายน้ำ ซึ่งอาจมีขนาดโมเลกุลเล็กมากจนสามารถไหลผ่านรูของเมมเบรนได้



รูปที่ 4.32 NOM ในรูปของยูวี 254 ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน



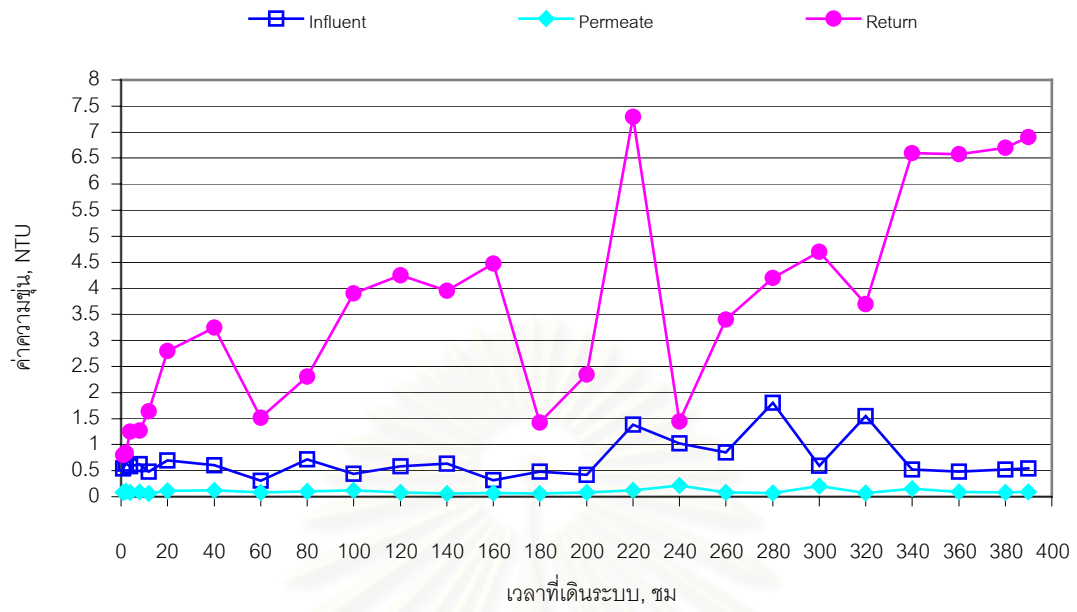
รูปที่ 4.33 ร้อยละการกำจัด NOM ในรูปของยูวี 254 ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้าง
เมมเบรน

4.4.4 ผลของการล้างเมมเบรนเมมเบรนต่อค่าความขุ่น

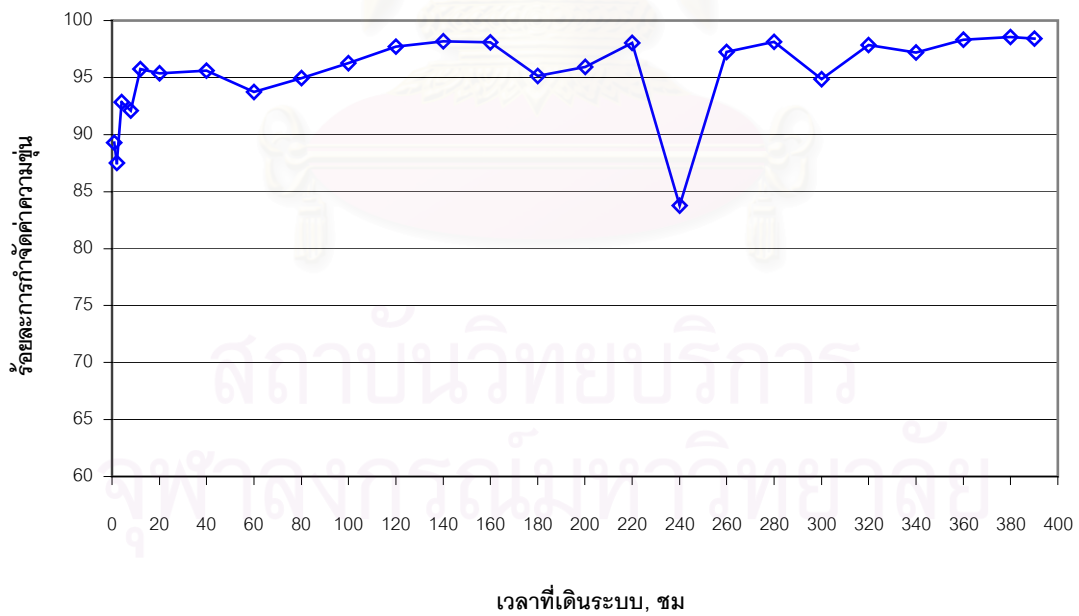
จากรูปที่ 4.34 และ 4.35 แสดงให้เห็นว่าร้อยละการกำจัดความขุ่นมีค่าอยู่ในช่วง 83-98 เนื่องจากค่าความแปรปรวนของค่าน้ำเข้าซึ่งรับน้ำจากถังกรองทรายรับน้ำมาจากหลายบ่อ ซึ่งแต่ละบ่อมีค่าความขุ่นไม่เท่ากันและของน้ำ Concentrate ที่นำมาเวียนกลับมีค่าอยู่ในช่วง 0.8-7.3 NTU ซึ่งสะสมอยู่ที่ผิวเมมเบรนมากทำให้ความขุ่นรวมของน้ำเข้าระบบเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากดังนั้นร้อยละการกำจัดจึงไม่คงที่

แต่ค่าความขุ่นของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีความขุ่นค่อนข้างคงที่ คือ ช่วงค่า 0.06-0.22 NTU ซึ่งเป็นค่าที่ถือว่าน้อยมากเพราะความขุ่นเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้ง่ายต่อการกำจัดด้วยเมมเบรน

เหตุที่น้ำ Concentrate มีค่าไม่คงที่อาจเนื่องมาจากเกิดการสะสมตัวของสารหน้าพื้นผิวเมมเบรนที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าเมมเบรน เมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่อง สารต่าง ๆ ที่มีขนาดใหญ่ที่สะสมอยู่เหล่านั้นได้หลุดออกมากับน้ำ Concentrate ที่บางส่วนได้ปล่อยทิ้งและนำเข้ามาใช้อีก เมื่อสารเหล่านั้นหลุดออกมาทำให้ค่าความขุ่นของน้ำ Concentrate มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย



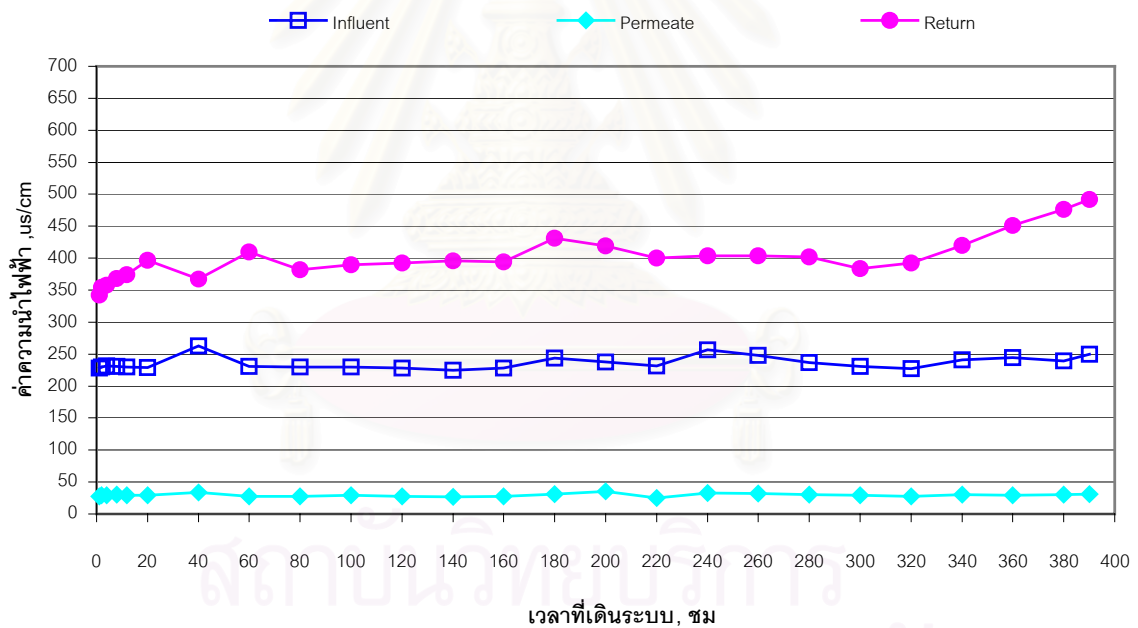
รูปที่ 4.34 ค่าความขุ่นที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน



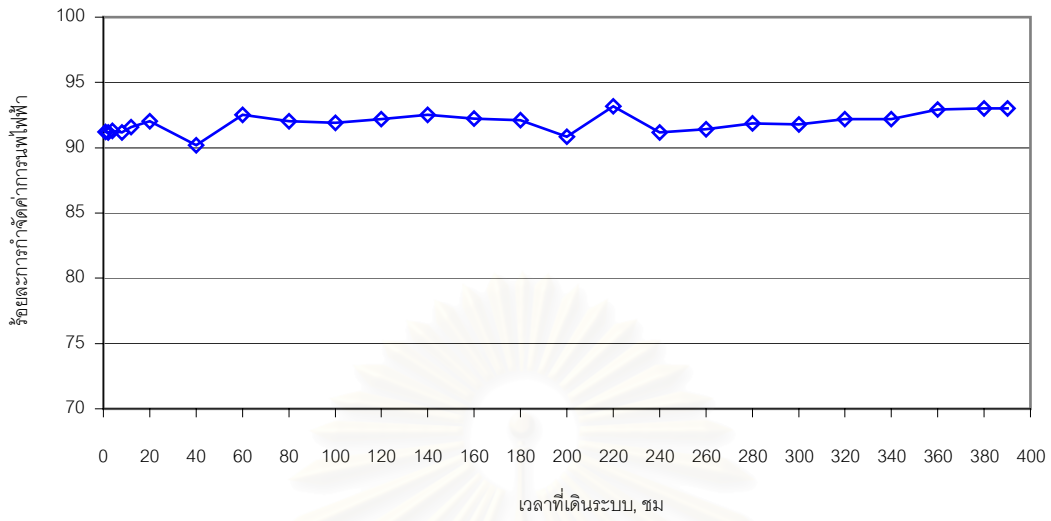
รูปที่ 4.35 ร้อยละการกำจัดความขุ่นที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน

4.4.5 ผลของการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อค่าความนำไฟฟ้า

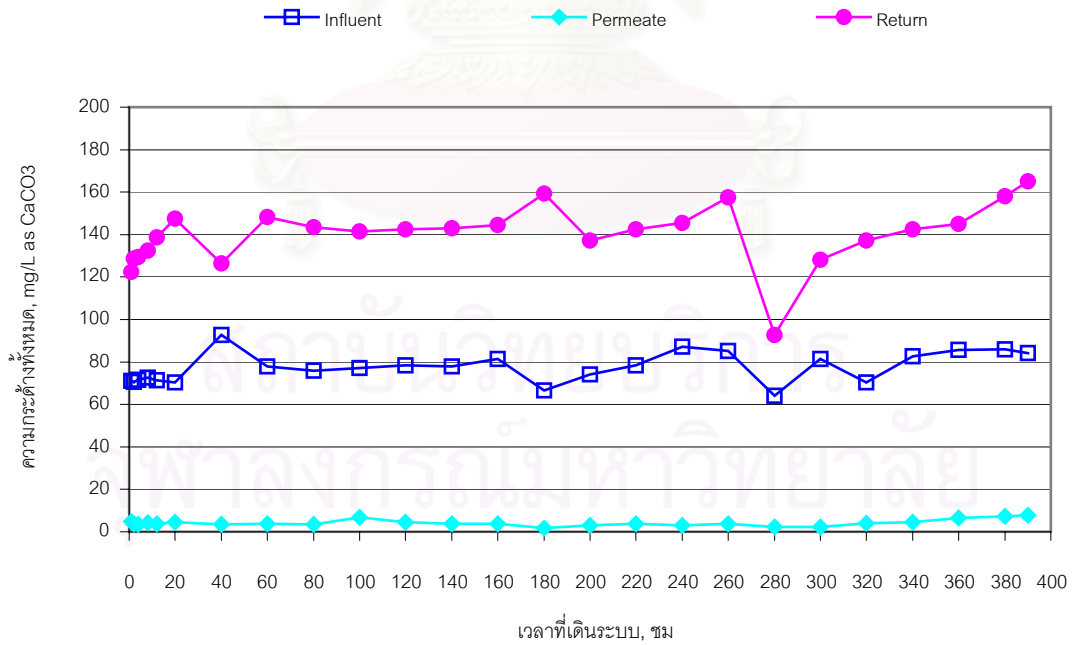
จากรูปที่ 4.36 และ 4.37 แสดงให้เห็นว่าร้อยละการกำจัดค่าความนำไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 90-92 จะเห็นได้ว่าร้อยละการกำจัดค่าความนำไฟฟ้ามีค่าค่อนข้างคงที่ แม้ว่าค่าฟลักซ์จะลดลงก็ตาม ซึ่งค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ Permeate มีค่าความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 27-34 $\mu\text{s/cm}$ และน้ำเข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 220-260 $\mu\text{s/cm}$ และค่าน้ำ Concentrate มีค่าแปรตามค่าน้ำที่เข้าระบบ โดยมีค่าความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 340-492 $\mu\text{s/cm}$ โดยจะเห็นได้ว่าค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ concentrate มีค่าเพิ่มตามเวลาที่เดินระบบเนื่องจากเกิดการสะสมตัวของอิออนที่ผิวหน้าเมมเบรน เนื่องจากกลไกการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าเกิดจากแรงผลักทางไฟฟ้าของประจุที่หน้าผิวเมมเบรนและประจุในน้ำ



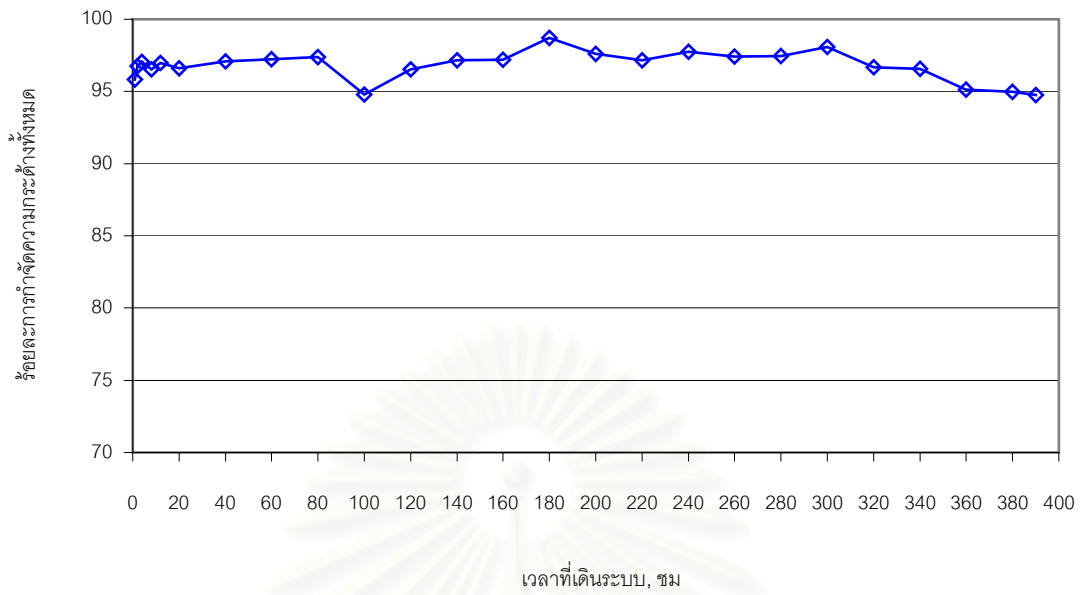
รูปที่ 4.36 ค่าความนำไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน



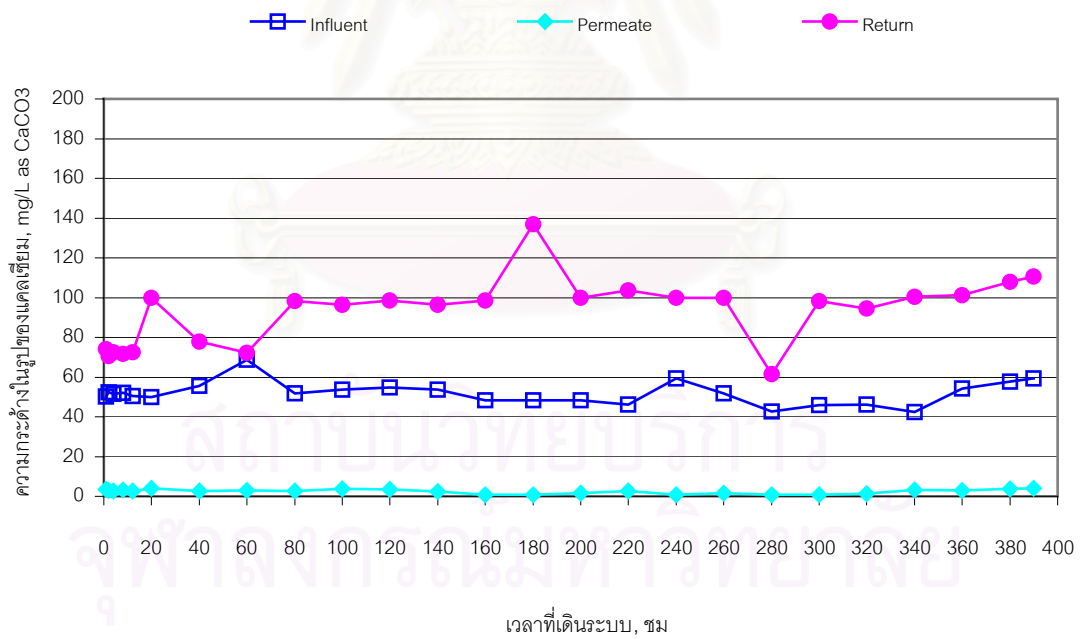
รูปที่ 4.37 ร้อยละการกำจัดความนำไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน



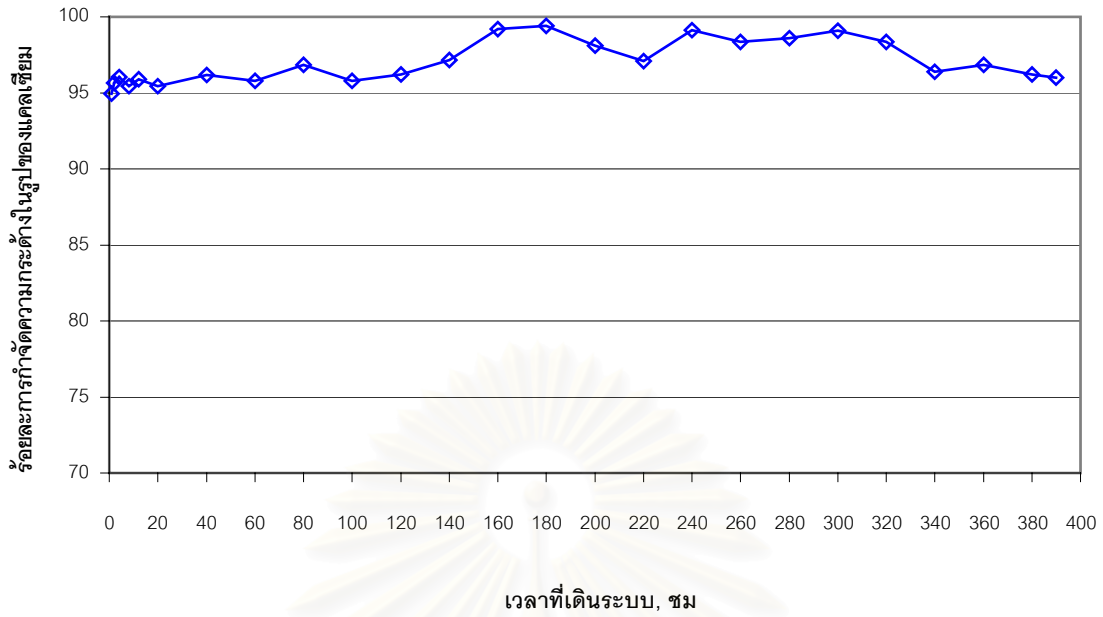
รูปที่ 4.38 ค่าความกระด้างทั้งหมดที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน



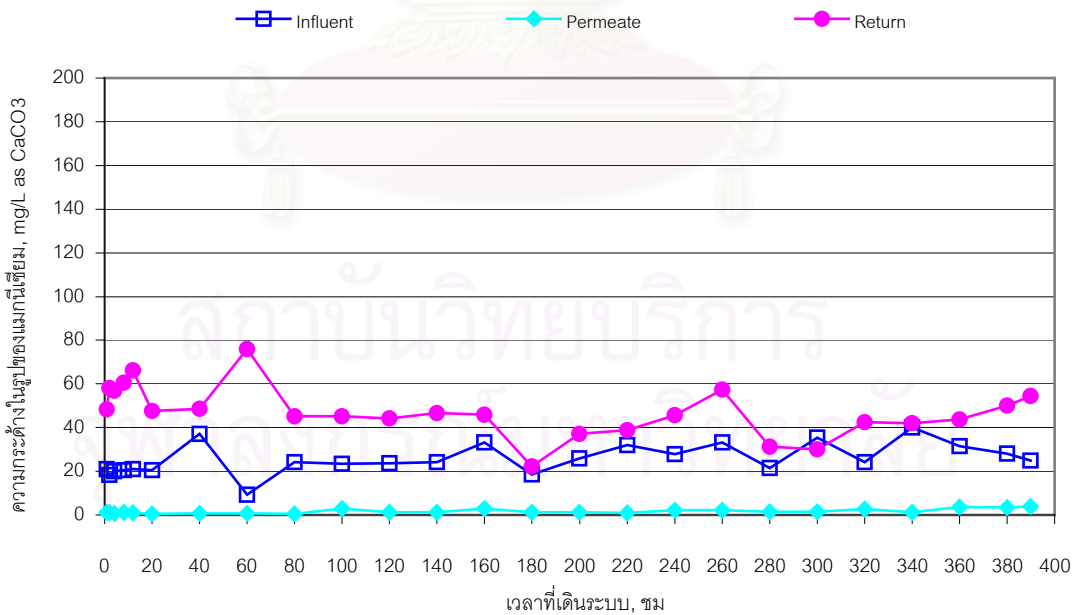
รูปที่ 4.39 ร้อยละการกำจัดความกระด้างทั้งหมดที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน



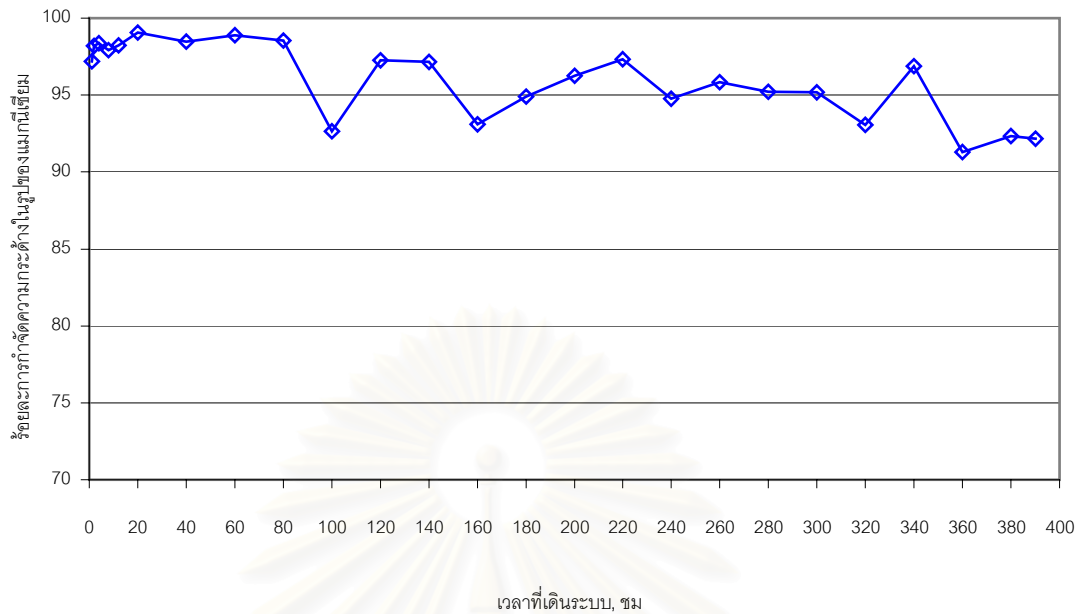
รูปที่ 4.40 ค่าความกระด้างในรูปของแคลเซียมที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน



รูปที่ 4.41 ร้อยละการกำจัดความกระด้างในรูปของแคลเซียมที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน



รูปที่ 4.42 ค่าความกระด้างในรูปของแมกนีเซียมที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน



รูปที่ 4.43 ร้อยละการกำจัดความกระด้างในรูปของแมกนีเซียมที่ช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการล้างเมมเบรน

4.4.6 ผลของการเดินระบบต่อเนื่องที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อค่าความกระด้าง

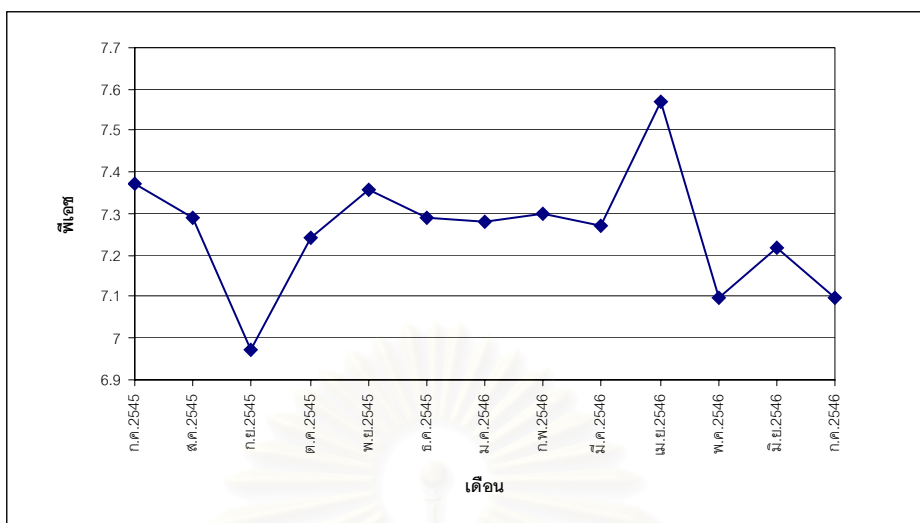
จากรูปที่ 4.38-4.43 จะพบว่าการกำจัดค่าความกระด้างไม่ว่าจะเป็นค่าความกระด้างที่อยู่ในรูปของแคลเซียมหรือแมกนีเซียม พบว่าสามารถกำจัดความกระด้างได้มากถึงร้อยละ 93-98 โดยค่าของแคลเซียมและแมกนีเซียมของค่าน้ำ permeate มีค่าอยู่ในช่วง 1-8 มก./ล. น้ำเข้าระบบ 10-80 มก./ล. และน้ำ concentrate 20-100 มก./ล. ซึ่งการที่เมมเบรนสามารถกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำได้มาก ทำให้ที่หน้าผิวเมมเบรนมีการสะสมตัวของแคลเซียมและแมกนีเซียมอยู่สูงโดยที่เห็นได้จากค่าน้ำ concentrate

เมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่องหลังจากการล้างเมมเบรนจนถึงชั่วโมงที่ 390 จะเห็นได้ว่าการลดลงของค่าฟลักซ์ของน้ำ permeate ประมาณร้อยละ 40 จึงจำเป็นต้องมีการล้างเมมเบรน

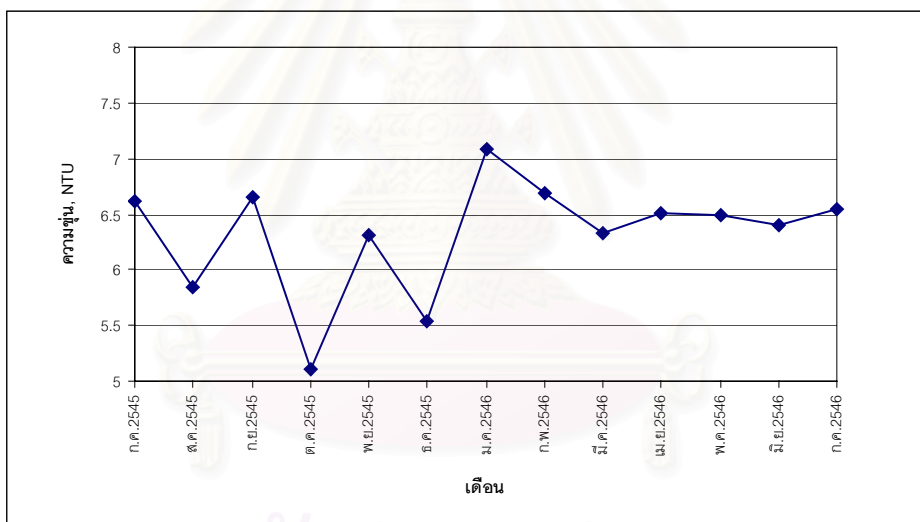
4.5 ผลการเดินระบบต่อเนื่องของระบบนาโนฟิลเตรชันเมื่อใช้ไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment

การทดลองในขั้นนี้ทำการเดินระบบนาโนฟิลเตรชันแบบต่อเนื่องโดยค่าที่ใช้เดินระบบเป็นค่าที่ได้หาสภาวะการเดินระบบของขั้นตอนที่ 4.2 คือเปอร์เซ็นต์ Recovery 70% และที่ความดัน 4 บาร์ ได้มีการนำระบบไมโครฟิลเตรชัน ขนาดรูกรวง 0.1 μm . แบบ Hollow fiber มีขนาดพื้นที่ผิว 8 m^2 เป็น Pre-treatment รับน้ำที่ผ่าน Solids Contact Clarifier ของการประปานครหลวง เป็นน้ำที่เข้าระบบไมโครฟิลเตรชัน

จากผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของน้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขนโดย ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ระบบผลิตฝายโรงงานผลิตน้ำบางเขนตามรายงานประจำปี 2545-2546 ดังแสดงในรูปที่ 4.45 ซึ่งเป็นน้ำเข้าระบบทดลองตลอดการทดลองในขั้นตอนนี้ พบว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ อยู่ในเกณฑ์ควบคุมคุณภาพน้ำของการประปานครหลวง จากรูปที่ 4.42ก แสดงค่า pH ของน้ำเข้าระบบในปี 2545-2546 โดยปี 2545 มีค่าอยู่ในช่วง 6.97-7.36 และในปี 2546(ม.ค.-ก.ค.) มีค่าอยู่ในช่วง 7.10-7.57 จากรูปที่ 4.42ข แสดงค่าความขุ่นของน้ำเข้าระบบโดยที่ค่าความขุ่นมีค่าค่อนข้างต่ำตลอดทั้งปี เมื่อพิจารณาค่าความขุ่นสูงสุดของน้ำเข้าระบบไมโครฟิลเตรชันในเดือนมกราคม ปี 2546 เท่ากับ 7.09 NTU ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำและสามารถใช้กับระบบไมโครฟิลเตรชันได้



รูปที่ 4.44ก แสดงค่า pH ของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนในช่วงเดือน ก.ค.2545-ก.ค.2546



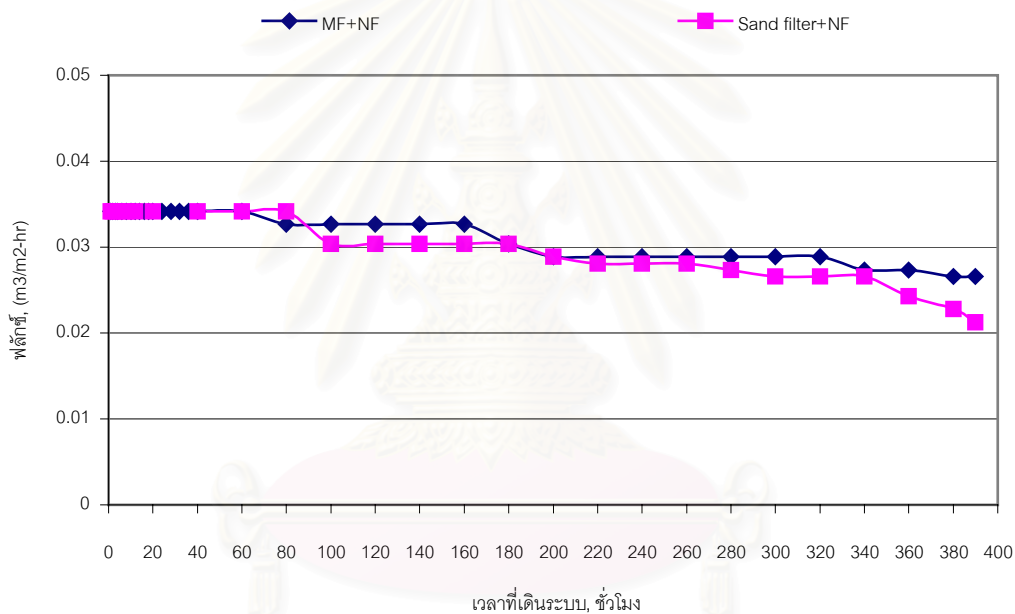
รูปที่ 4.44ข แสดงค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนในช่วงเดือน ก.ค.2545 – ก.ค.2546

รูปที่ 4.44 พารามิเตอร์แสดงคุณภาพน้ำที่ผ่านขั้นตอนการตกตะกอนของโรงผลิตน้ำประปาบางเขน ในปี พ.ศ. 2545-2546

แหล่งข้อมูล : รายงานผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต ฝ่ายควบคุมการผลิตน้ำ สำนักการผลิตน้ำบางเขน

4.5.1 ผลต่อค่าฟลักซ์

จากรูปที่ 4.45 ระบบไมโครฟิลเตรชันสามารถกำจัดสารต่าง ๆ ในน้ำที่ออกจาก Solids Contact Clarifier ได้ ทำให้ค่าฟลักซ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันกับน้ำเข้าระบบที่รับน้ำจากกระบวนการกรองทรายคือค่าฟลักซ์เริ่มต้น $0.0342 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$ และเริ่มลดลงเป็น $0.0327 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$ ในช่วงเวลาที่ 80 และลดลงเป็น $0.0266 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$ ในช่วงเวลาที่ 390 พบว่ามีการลดลงของค่าฟลักซ์ร้อยละ 20 แสดงให้เห็นว่าการที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment สามารถลดปัญหาการเกิด fouling ได้ดีพอสมควร เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเข้าระบบที่มาจากกระบวนการกรองทรายที่ฟลักซ์ลดลงเป็นร้อยละ 40 เมื่อทำการเดินระบบถึงช่วงเวลาที่ 390



รูปที่ 4.45 ผลต่อค่าฟลักซ์ของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment เปรียบกับกระบวนการกรองทราย

4.5.2 ผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ

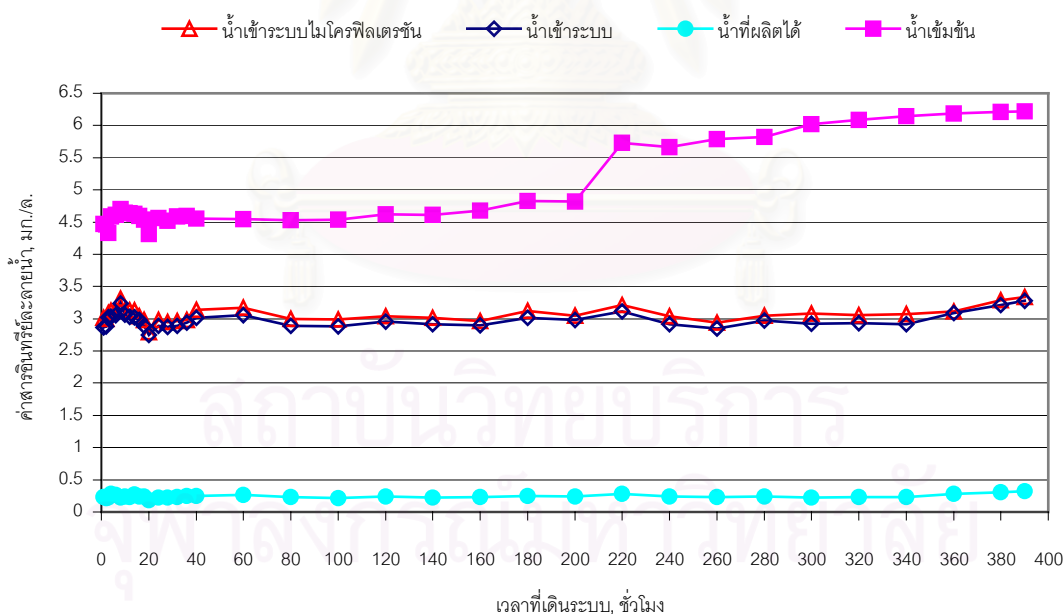
จากรูปที่ 4.46 แสดงให้เห็นว่าค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำที่เข้าและออกจากระบบไมโครฟิลเตรชันมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากสารอินทรีย์ละลายน้ำมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าขนาดรูของระบบ

ไมโครฟิลเตรชันทำให้ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ออกจากไมโครฟิลเตรชันมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าเข้าระบบ

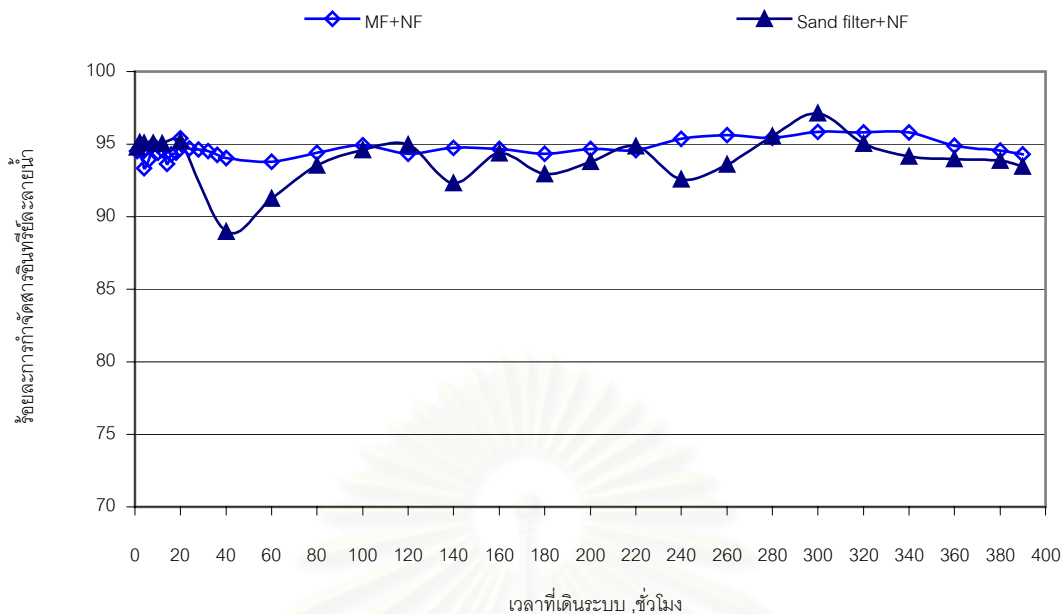
ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำ permeate ที่ผลิตได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.3 มก./ล. ซึ่งถือว่าระบบนาโนฟิลเตรชันกำจัดค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ดีมาก และระบบไมโครฟิลเตรชันทำให้ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำมีค่าที่ถือว่าค่อนข้างคงที่คือ 2.6-3.2 มก./ล.

ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำ concentrate ที่ใช้เวียนกลับมาเข้าระบบใหม่มีค่าสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 4.3-6.2 มก./ล. โดยจะเห็นได้จากกราฟว่า ในช่วงชั่วโมงที่ 300 ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำของค่าน้ำเข้มข้นมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ แสดงให้เห็นถึงการสะสมตัวของสารอินทรีย์หน้าผิวเมมเบรนและแสดงให้เห็นความสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์ที่ลดลง

จากรูปที่ 4.47 จะเห็นได้ว่าร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำของระบบนาโนฟิลเตรชันที่รับน้ำจากระบบไมโครฟิลเตรชันสามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ในช่วงร้อยละ 93-95 ซึ่งถือว่ามีค่าค่อนข้างคงที่และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบนาโนฟิลเตรชันที่รับน้ำเข้าระบบจากกระบวนการกรองทรายจะเห็นได้ว่า น้ำที่ผ่านระบบไมโครฟิลเตรชันแล้วจะมีค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ค่อนข้างคงที่ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำอยู่ในช่วงที่คงที่



รูปที่ 4.46 สารอินทรีย์ละลายน้ำของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment



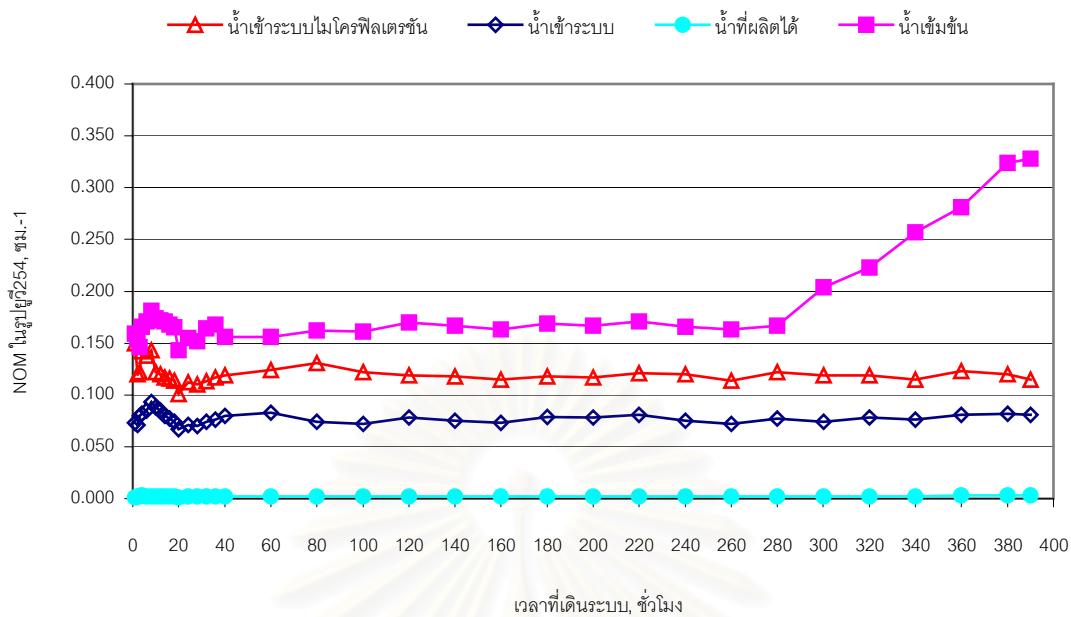
รูปที่ 4.47 ร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment เปรียบเทียบกับกระบวนการกรองทราย

4.5.3 ผลต่อการกำจัด NOM ในรูปของยูวี 254

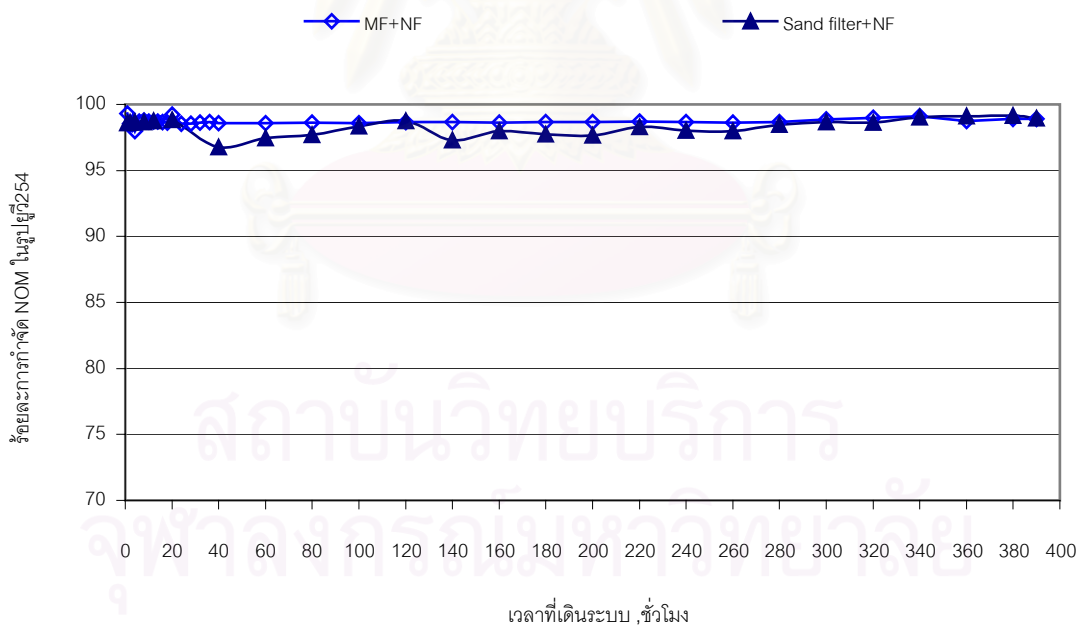
จากรูปที่ 4.48 และรูปที่ 4.49 แสดงให้เห็นผลของการใช้ระบบ Pre-treatment ของระบบไมโครฟิลเตรชันต่อค่ายูวี 254 โดยที่ค่ายูวี 254 ของน้ำเข้าระบบนาโนฟิลเตรชันมีค่าลดลงจากน้ำที่เข้าระบบไมโครฟิลเตรชัน เนื่องจาก สารอินทรีย์ในรูปของค่ายูวี 254 มีขนาดโมเลกุลใหญ่บางส่วนสามารถถูกกำจัดได้โดยไมโครฟิลเตรชัน

และ NOM ในรูปของยูวี 254 ของน้ำ permeate ที่ผลิตได้มีค่าอยู่ในช่วง $0.002-0.005 \text{ cm}^{-1}$ และมีร้อยละการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 97-98 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าน้ำ permeate ที่ผลิตได้ในการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยรับน้ำเข้าจากกระบวนการกรองทราย และพบว่าค่าน้ำ Concentrate มีค่าแปรตามน้ำที่เข้าระบบ แต่คุณภาพน้ำ permeate ที่ผลิตได้อยู่ในช่วงเดียวกันไม่ได้แปรตามค่าน้ำเข้ามากนัก เพราะ NOM ที่อยู่ในรูปของยูวี 254 มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ทำให้เมมเบรนกำจัดได้ดี

และ NOM ในรูปของยูวี 254 ของน้ำ Concentrate ในช่วงชั่วโมงที่ 300 มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แสดงให้เห็นว่าที่หน้าพื้นผิวของเมมเบรนเริ่มมีการสะสมตัวของสารต่าง ๆ ในน้ำมากขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์ที่ได้



รูปที่ 4.48 ค่ายูวี₂₅₄ ของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment

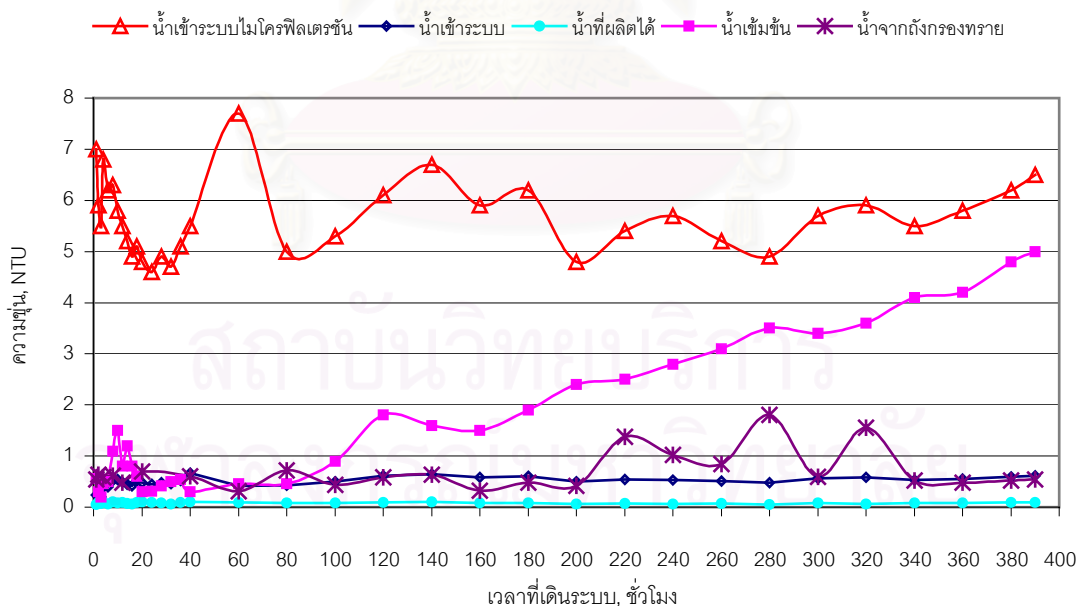


รูปที่ 4.49 ร้อยละการกำจัด NOM ในรูปของยูวี₂₅₄ ของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment เปรียบเทียบกับกระบวนการกรองทราย

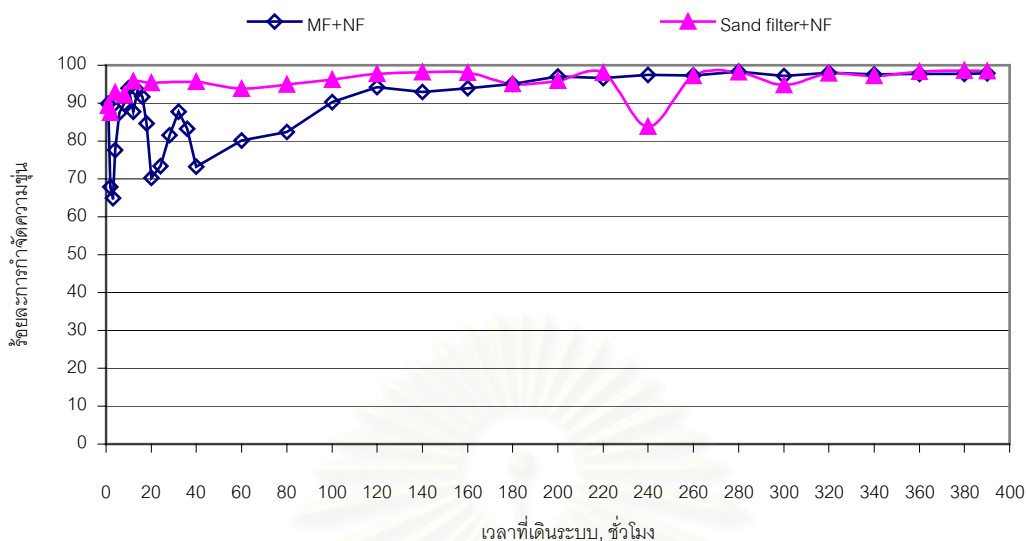
4.5.4 ผลต่อการกำจัดค่าความขุ่น

จากการทดลองใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment รับน้ำจากการตกตะกอน ก่อนที่จะเข้าระบบนาโนฟิลเตรชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.50 พบว่า ระบบไมโครฟิลเตรชันสามารถกำจัดความขุ่นได้ดี โดยกำจัดได้จากค่าความขุ่นช่วง 4.5-7.7 NTU เป็นค่าน้ำที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันได้ในความขุ่นที่อยู่ในช่วง 0.2-0.7 NTU ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ต่ำ สามารถเป็นน้ำเข้าของระบบนาโนฟิลเตรชันได้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความขุ่นของกระบวนการกรองทรายซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.4-1.8 NTU จะเห็นได้ว่าความขุ่นที่ผ่านกระบวนการกรองทรายมีค่าไม่สม่ำเสมอเท่าใดนัก

และระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดความขุ่นที่เข้าระบบได้ร้อยละ 68-98 ดังแสดงในรูปที่ 4.51 โดยมีช่วงความขุ่นน้ำ permeate อยู่ในช่วง 0.05-0.1 NTU ซึ่งถือว่าเป็นค่าน้ำที่มีความขุ่นต่ำมาก เหตุผลที่ระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดความขุ่นให้เหลือน้อยกว่า 0.1 NTU ได้ เพราะว่าความขุ่นมีขนาดใหญ่พอที่ระบบสามารถกำจัดออกให้มีค่าเหลือน้อยได้



รูปที่ 4.50 ค่าความขุ่นของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatmentเปรียบเทียบกับกระบวนการกรองทราย

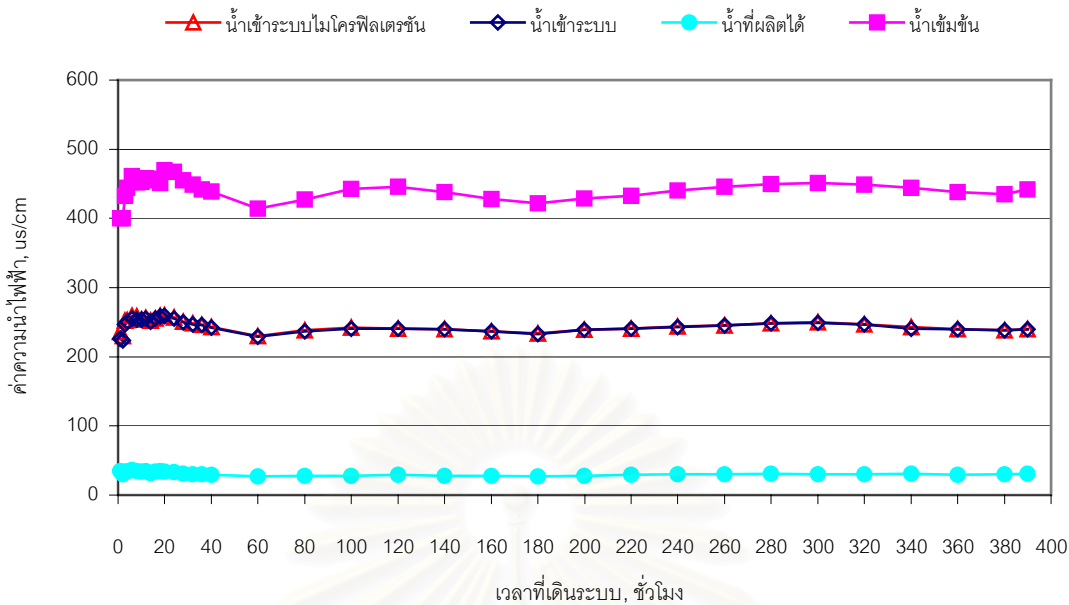


รูปที่ 4.51 ร้อยละการกำจัดค่าความขุ่นของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment เปรียบเทียบกับกระบวนการกรองทราย

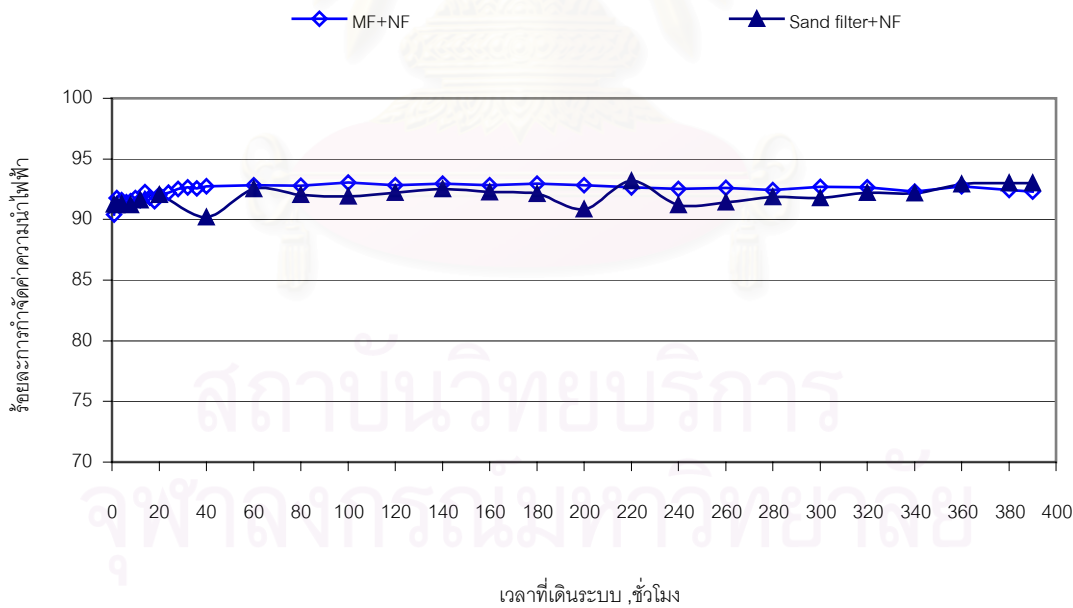
4.5.5 ผลต่อค่าความนำไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.52 และ 4.53 แสดงให้เห็นว่าระบบไมโครฟิลเตรชันไม่สามารถกำจัดค่าความนำไฟฟ้า โดยที่ค่าความนำไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 226-260 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองทรายที่เป็นค่าน้ำเข้าระบบของนาโนฟิลเตรชันในการทดลองขั้นที่ 4.2-4.4

ส่วนระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดค่าความนำไฟฟ้าได้ร้อยละ 90-93 เนื่องจากนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนมีประจุไฟฟ้าที่ผิวหน้าเมมเบรน จึงเกิดกลไกการผลักกันระหว่างประจุที่ผิวหน้าของเมมเบรนกับไอออนในน้ำ โดยค่าความนำไฟฟ้าที่ได้จากน้ำ permeate ของระบบนาโนฟิลเตรชันมีค่าอยู่ในช่วง 27-36 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ส่วนค่าความนำไฟฟ้าที่ของน้ำเข้มข้นที่นำมาเข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 400-470 $\mu\text{s}/\text{cm}$



รูปที่ 4.52 ค่าความนำไฟฟ้าของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-Treatment



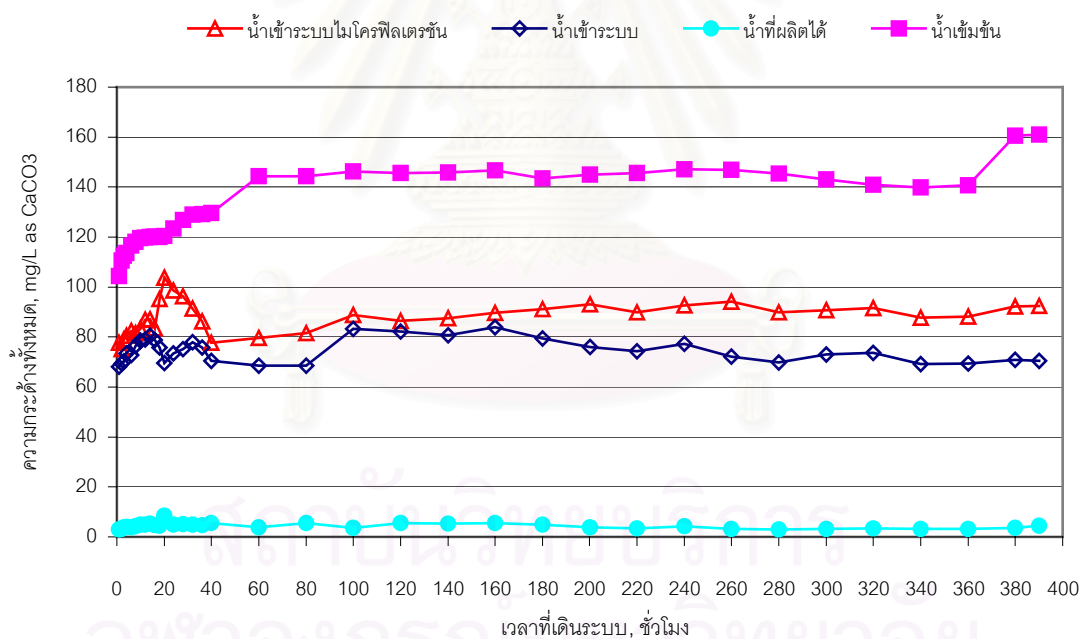
รูปที่ 4.53 ร้อยละการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment เปรียบเทียบกับกระบวนการกรองทราย

4.5.6 ผลต่อการกำจัดความกระด้าง

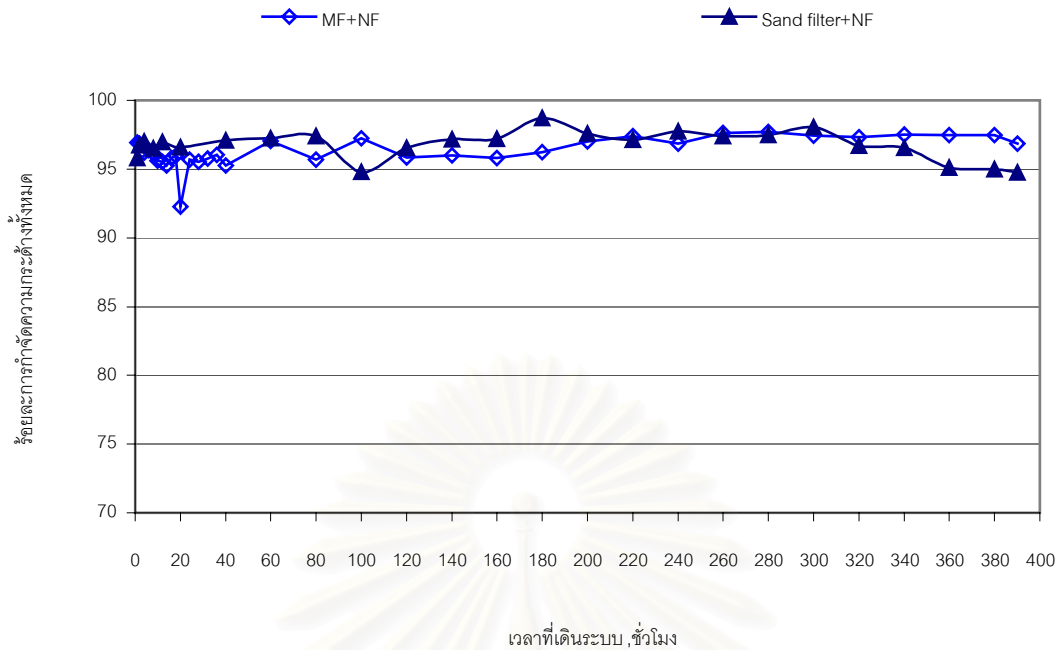
พบว่าระบบไมโครฟิลเตรชันกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียมได้ประมาณร้อยละ 10 ทำให้ค่าของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันมีค่าอยู่ในช่วง 30-60 มก./ล. และน้ำ concentrate 30-110 มก./ล.

จากรูปที่ 4.54-4.59 จะพบว่าการกำจัดค่าความกระด้างไม่ว่าจะเป็นค่าความกระด้างที่อยู่ในรูปของแคลเซียมหรือแมกนีเซียม พบว่าสามารถกำจัดความกระด้างได้มากถึงร้อยละ 92-97 โดยค่าของแคลเซียมและแมกนีเซียมของค่าน้ำ permeate มีค่าอยู่ในช่วง 1-6 มก./ล.

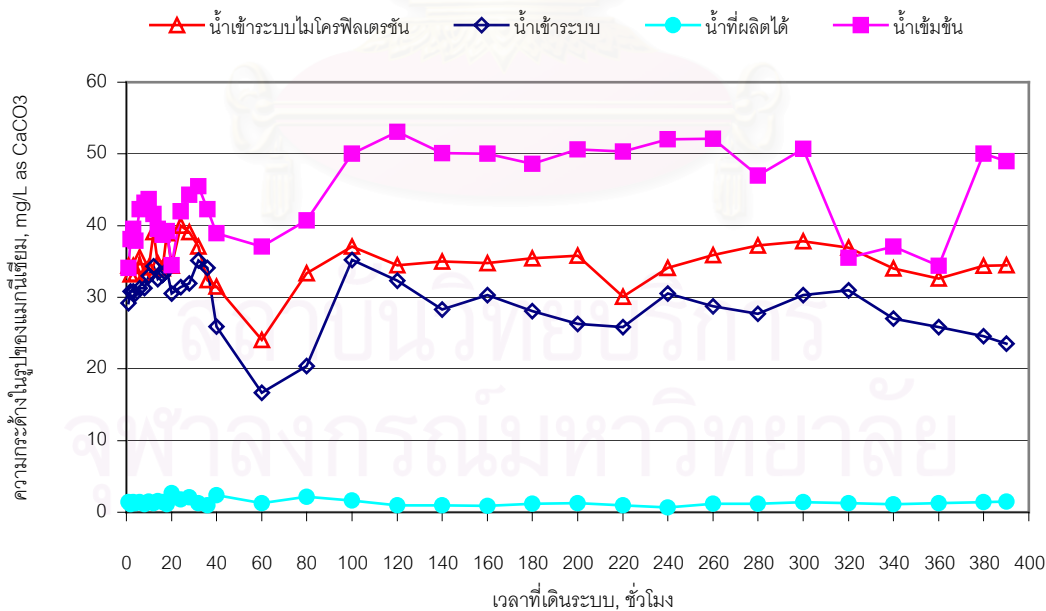
ระบบนาโนฟิลเตรชันที่มีระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment สามารถกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียมได้ดีกว่าที่ใช้กระบวนการกรองทราย



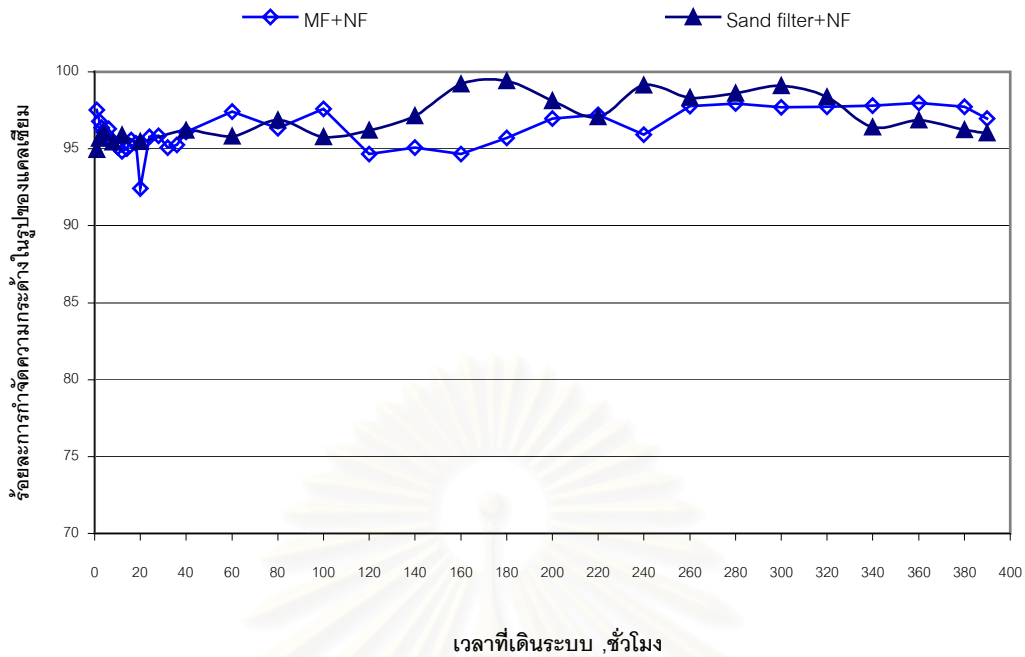
รูปที่ 4.54 ค่าความกระด้างทั้งหมดของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment



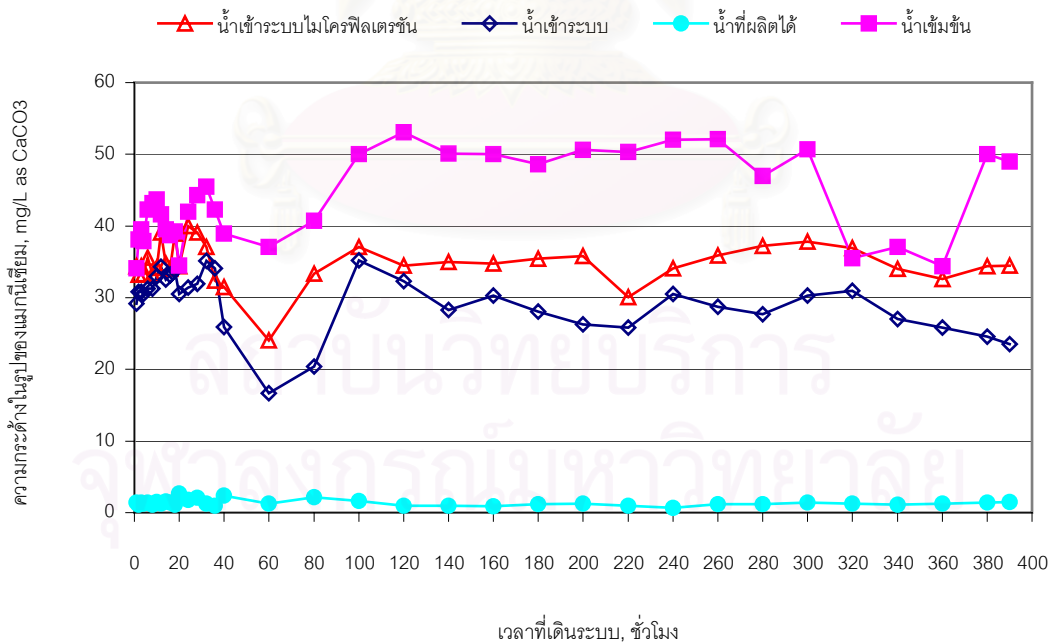
รูปที่ 4.55 ร้อยละการกำจัดความกระด้างทั้งหมดของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatmentเปรียบเทียบกับกระบวนการกรองทราย



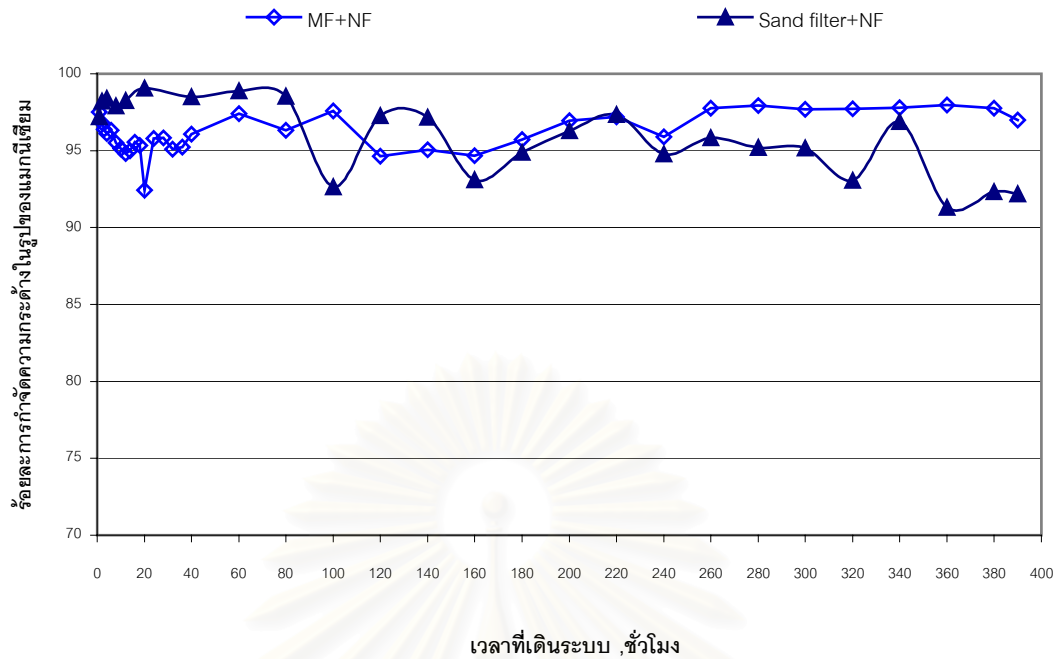
รูปที่ 4.56 ค่าความกระด้างในรูปของแคลเซียมของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment



รูปที่ 4.57 ร้อยละการกำจัดค่าคลอโรฟิลล์ของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment เปรียบเทียบกับกระบวนการกรองทราย



รูปที่ 4.58 ค่าความกระด้างในรูปของแมกนีเซียมของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatment



รูปที่ 4.59 ร้อยละการกำจัดค่าแมกนีเซียมของระบบนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็น Pre-treatmentเปรียบเทียบกับกระบวนการกรองทราย

4.5.7 ผลต่อการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.3ก ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมดและโคลิฟอร์มแบคทีเรียของน้ำจากกระบวนการกรองทรายและระบบนาโนฟิลเตรชัน

ชั่วโมงที่	Total Coliform Bacteria (MPN/100ml)		Fecal Coliform Bacteria (MPN/100ml)	
	ถังกรองทราย	NF	ถังกรองทราย	NF
80	120	N.D.	75	N.D.
160	75	N.D.	75	N.D.
240	93	N.D.	64	N.D.
320	64	N.D.	64	N.D.
390	75	N.D.	64	N.D.

หมายเหตุ N.D. = ไม่สามารถตรวจพบได้

ตารางที่ 4.3ข ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมดและโคลิฟอร์มแบคทีเรียของน้ำจากระบบไมโครฟิลเตรชัน และระบบนาโนฟิลเตรชัน

ชั่วโมง ที่	Total Coliform Bacteria (MPN/100ml)		Fecal Coliform Bacteria (MPN/100ml)	
	MF	NF	MF	NF
80	21	N.D.	N.D.	N.D.
160	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
240	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
320	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
390	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

หมายเหตุ N.D. = ไม่สามารถตรวจพบได้

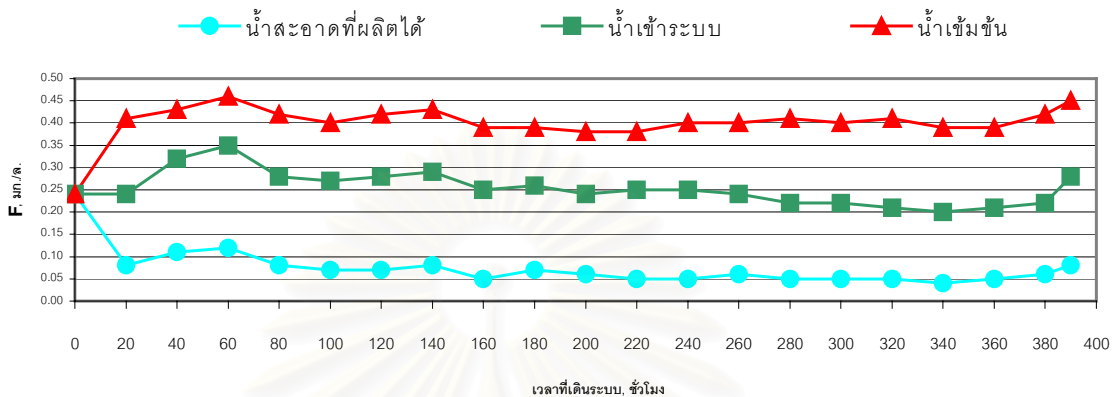
จากตารางที่ 4.3ก และ ตารางที่ 4.3ข จากการตรวจหาปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำพบว่า ระบบไมโครฟิลเตรชันสามารถกำจัดโคลิฟอร์มได้ดีกว่ากระบวนการกรองทรายโดยพบโคลิฟอร์มทั้งหมดเมื่อเดินระบบที่ 80 ชั่วโมงแต่ไม่พบฟีคอลลโคลิฟอร์ม ส่วนระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดโคลิฟอร์มและฟีคอลลโคลิฟอร์มได้ทั้งหมด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

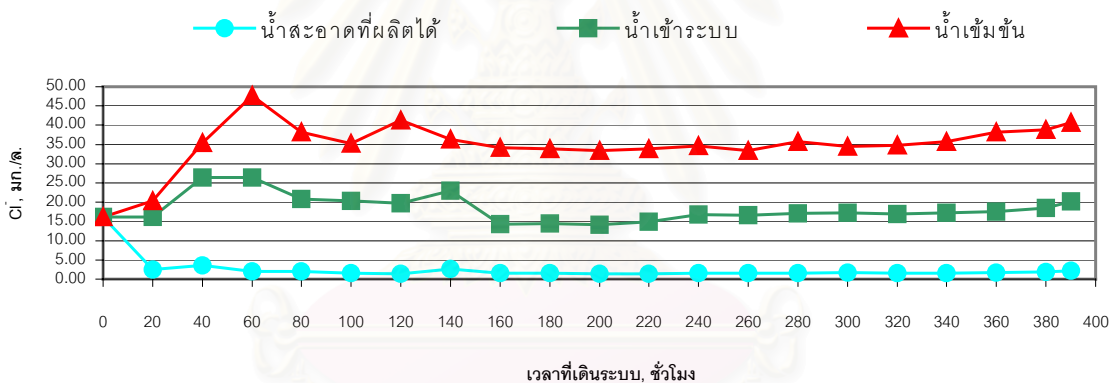
4.6 ผลการเดินระบบต่อเนื่องต่อการกำจัดไอออนในน้ำ

สำหรับการศึกษาในขั้นตอนนี้มุ่งเน้นที่การศึกษาถึงประสิทธิภาพกำจัดไอออนลบ ได้แก่ F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} ส่วนไอออนบวก ได้แก่ Ca^{2+} , Mg^{2+}

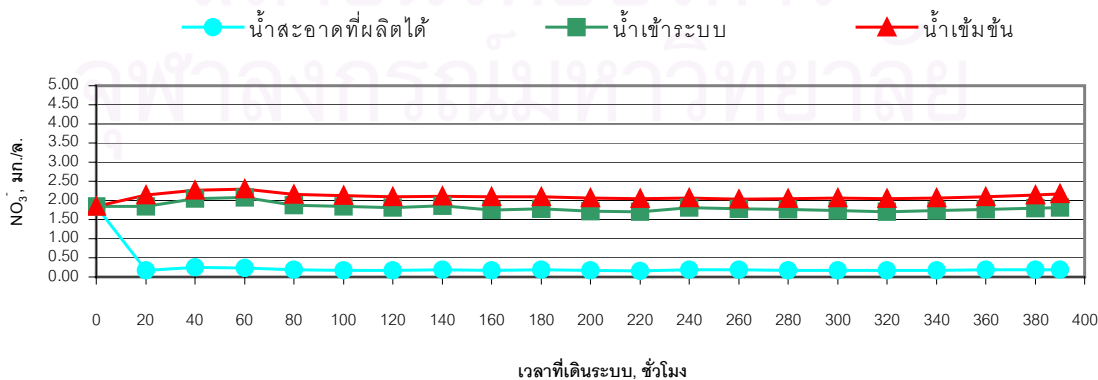
4.6.1 ผลการเดินระบบต่อเนื่องต่อการกำจัดไอออนลบในน้ำ



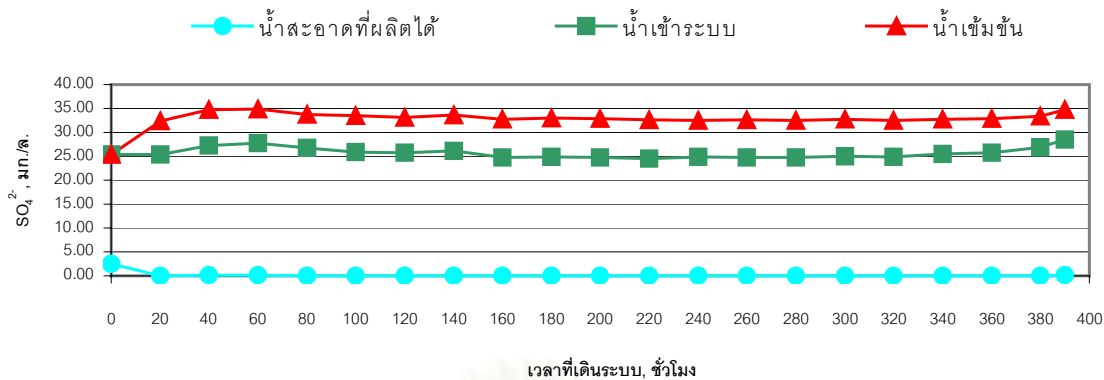
รูปที่ 4.60 แสดงค่าฟลูออไรด์ในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ



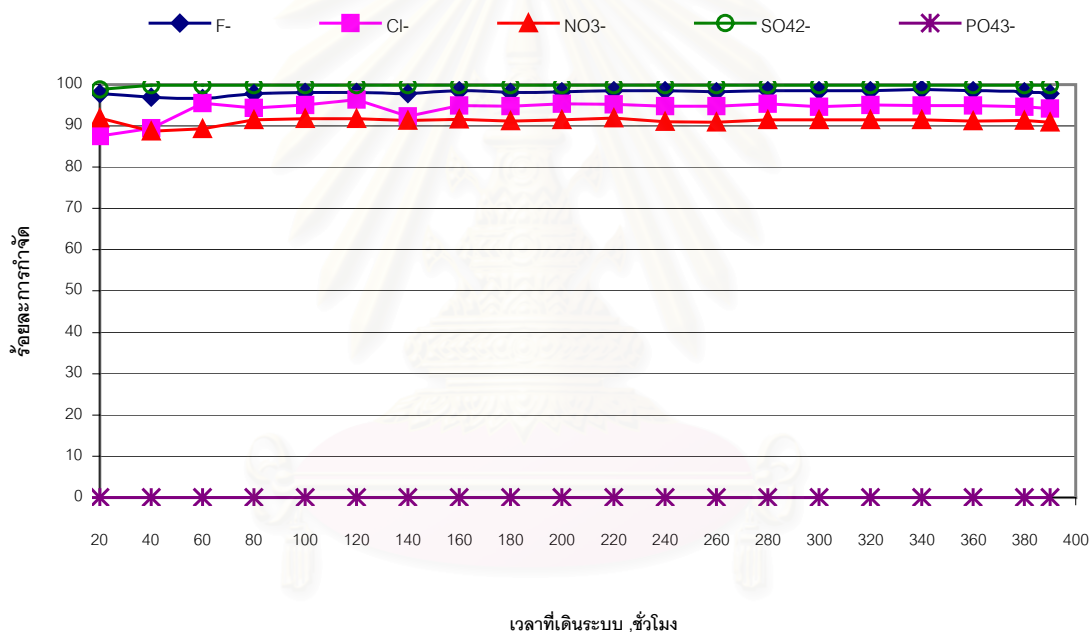
รูปที่ 4.61 แสดงค่าคลอไรด์ในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ



รูปที่ 4.62 แสดงค่าไนเตรทในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ



รูปที่ 4.63 แสดงค่าซัลเฟตในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ

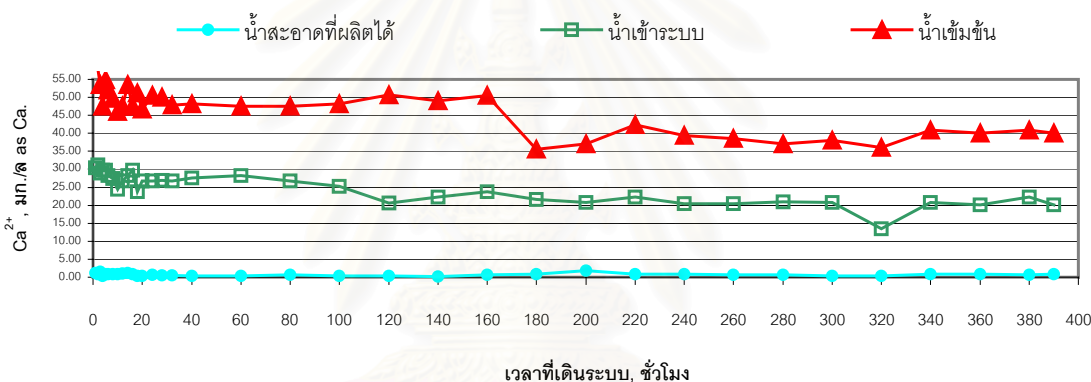


รูปที่ 4.64 ร้อยละการกำจัดอิออนลบในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ

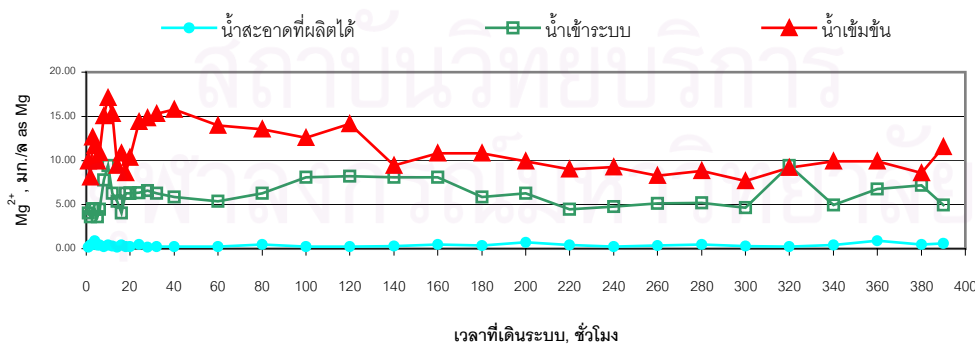
จากผลการทดลองพบว่าอิออนลบในน้ำถูกกำจัดออกจากน้ำด้วยกลไกการผลักของเมมเบรน เนื่องจากที่ผิวหน้าของเมมเบรนมีประจุลบเนื่องจากการแตกตัวของโพลีเมอร์ของเมมเบรน ชั้น Active Layer ที่พีเอชของน้ำช่วงเป็นกลางถึงด่างเล็กน้อย ดังนั้นอิออนลบในน้ำจะถูกแรงผลักทางไฟฟ้าของประจุลบที่ผิวหน้าของเมมเบรนทำให้ร้อยละการกำจัดของอิออนในน้ำมีค่าสูงคือฟลูออไรด์ร้อยละ 93-98 คลอไรด์ร้อยละ 90-96 ไนเตรทร้อยละ 88-91 ซัลเฟตร้อยละ 98-99

การที่เมมเบรนสามารถกำจัดซัลเฟตได้มากที่สุด มีเหตุผลเนื่องมาจากซัลเฟตเป็นไอออนวาเลนซ์ลบสอง และยังสามารถกำจัดไอออนลบวาเลนซ์เดียว (Monovalent Anion) ได้มาก ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิจัยของ Ratanatumskul และคณะ (1996) ซึ่งพบว่าเมมเบรนชนิด NTR-759HR สามารถกำจัดไอออนลบวาเลนซ์เดียวได้มากโดยใช้ค่าความดันอย่างน้อย 2 บาร์ และสามารถกำจัดซัลเฟตได้มากที่สุด โดยเรียงลำดับความชอบของเมมเบรนดังนี้คือ $SO_4^{2-} > Cl^- > NO_2^- > NO_3^-$ ส่วนการทดลองครั้งนี้เรียงลำดับความชอบของเมมเบรนในการกำจัดไอออนลบในน้ำได้ดังนี้คือ $SO_4^{2-} > F^- > Cl^- > NO_3^-$ ซึ่งฟอสเฟตไม่มีการถูกกำจัดเนื่องจากไม่มีไอออนลบในรูปของฟอสเฟตเข้าระบบ

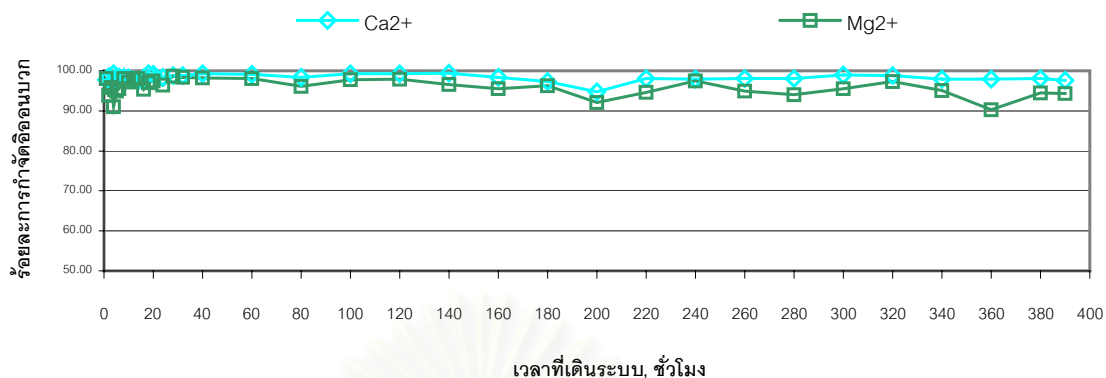
4.6.2 ผลการเดินระบบต่อเนื่องต่อการกำจัดไอออนบวกในน้ำ



รูปที่ 4.65 แสดงค่าแคลเซียมในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ



รูปที่ 4.66 แสดงค่าแมกนีเซียมในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ



รูปที่ 4.67 ร้อยละการกำจัดไอออนบวกในน้ำกับเวลาที่เดินระบบ

จากการทดลองพบว่าการกำจัดไอออนบวกในน้ำเมมเบรนสามารถกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากหลักสมดุขยทางไฟฟ้าที่เป็นกลางคือเมื่อไอออนลบถูกกลไกการผลักทางไฟฟ้าที่ประจุผิวหน้าเมมเบรนผลักออกมาทำให้ประจุบวกในน้ำไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ด้วยเนื่องจากประจุลบของไอออนลบในน้ำมีแรงดึงดูดกับประจุบวกของไอออนบวกทำให้สามารถกำจัดไอออนบวกในน้ำได้มากเช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 4.67 พบว่าเมมเบรนสามารถกำจัดไอออนบวกคือแคลเซียมและแมกนีเซียมได้มากถึงร้อยละ 90-99 ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละการกำจัดของไอออนลบในน้ำที่ทำการทดลอง

4.7 ผลการศึกษาการลดความต้องการคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคเปรียบเทียบระหว่างน้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชันกับน้ำที่ไม่ได้ผ่านระบบ

ทำการทดลองเติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodiumhypochlorite) ในน้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชันและน้ำที่เข้าระบบ และน้ำ concentrate ที่เวียนกลับมาเข้าระบบ

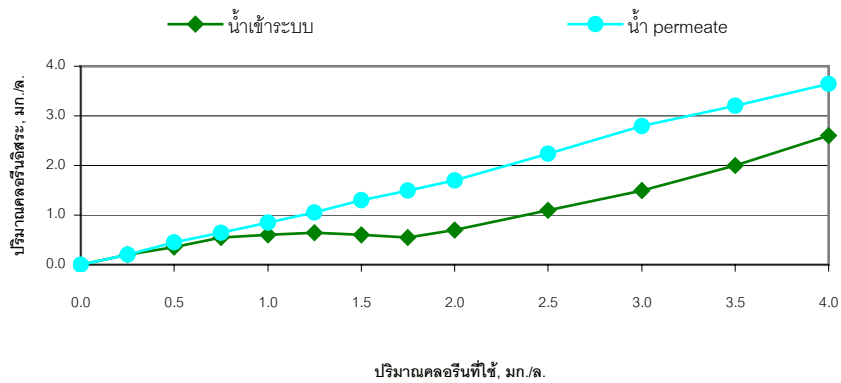
ผลจากการทดลองเติมคลอรีนให้กับน้ำที่ผ่านระบบแล้ว 80, 160, 240, และ 390 ชั่วโมง ผลที่ได้คือ น้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถลดความต้องการคลอรีนได้ดีมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ปริมาณคลอรีนที่ใช้เพื่อทำให้น้ำมีค่าคลอรีนอิสระเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เหตุที่ต้องควบคุมค่าคลอรีนอิสระไว้เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นค่าที่การประปานครหลวงควบคุมให้น้ำมีค่าคลอรีนอิสระไว้เพื่อให้มีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคที่อาจเข้ามาในระบบท่อจ่ายน้ำประปาก่อนที่จะถึงบ้านเรือนผู้ใช้น้ำประปา

จากตารางที่ 4.4 พบว่าน้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถลดความต้องการคลอรีนได้ร้อยละ 50 เนื่องจากว่าระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำและสารต่าง ๆ ในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงสามารถลดปริมาณความต้องการคลอรีนได้มาก

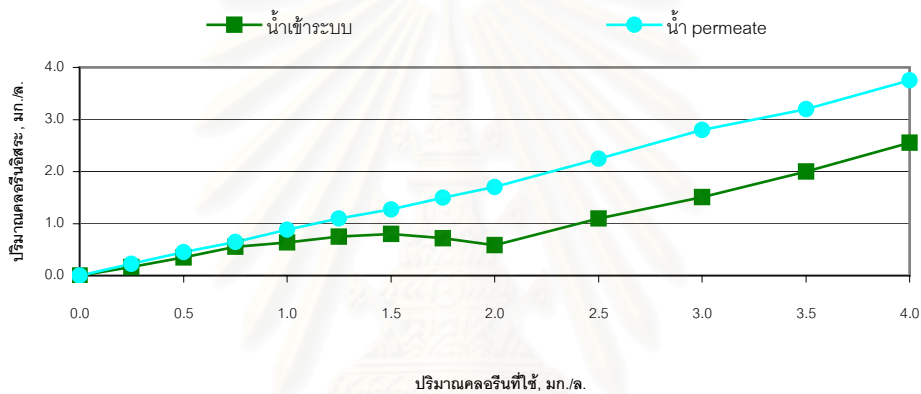
ในรูปที่ 4.68-4.72 แสดงให้เห็นถึงปริมาณคลอรีนที่เติมและปริมาณคลอรีนอิสระที่หลงเหลืออยู่ในน้ำในเวลาที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.4 ปริมาณคลอรีนที่ใช้เพื่อทำให้น้ำมีค่าคลอรีนอิสระเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

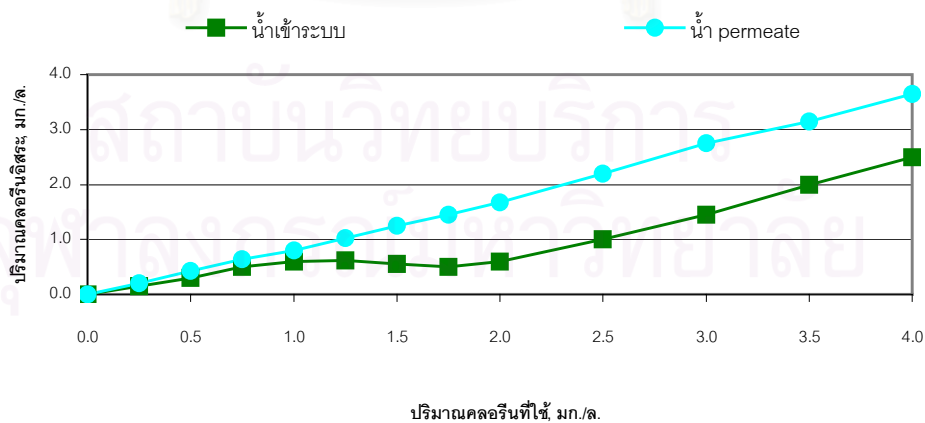
ชั่วโมงที่	ปริมาณคลอรีนที่ใช้, มิลลิกรัมต่อลิตร	
	น้ำเข้าระบบ	น้ำผ่านระบบนาโนฟิลเตรชัน
80	2.4	1.1
160	2.5	1.2
240	2.7	1.1
320	2.5	1.1
390	2.4	1.25



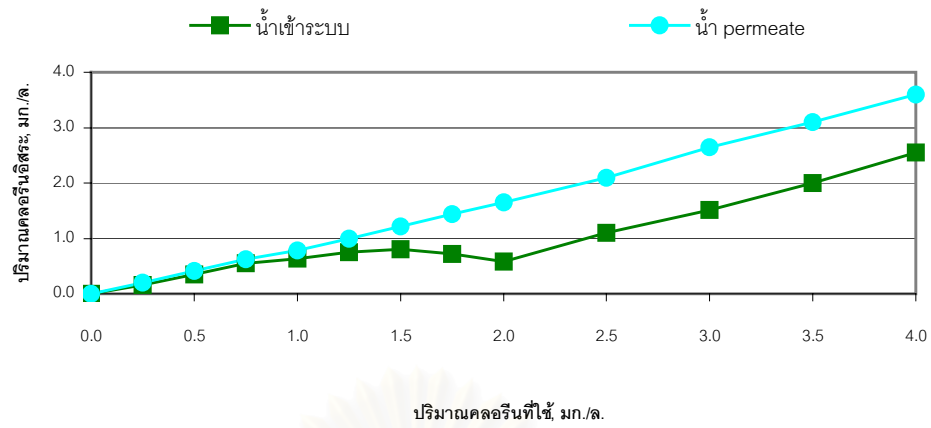
รูปที่ 4.68 การเติมคลอรีนให้กับน้ำหลังจากการเดินระบบ 80 ชั่วโมง



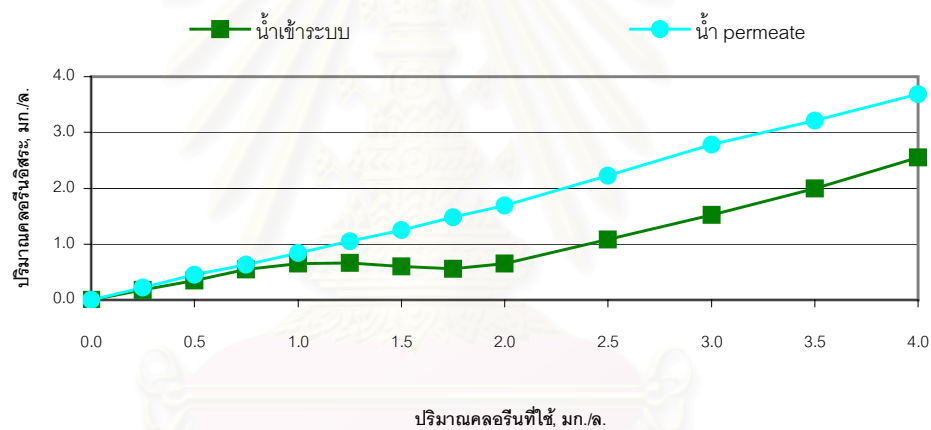
รูปที่ 4.69 การเติมคลอรีนให้กับน้ำหลังจากการเดินระบบ 160 ชั่วโมง



รูปที่ 4.70 การเติมคลอรีนให้กับน้ำหลังจากการเดินระบบ 240 ชั่วโมง



รูปที่ 4.71 การเติมคลอรีนให้กับน้ำหลังการเดินระบบ 320 ชั่วโมง



รูปที่ 4.72 การเติมคลอรีนให้กับน้ำหลังการเดินระบบ 390 ชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.8 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์ละลายน้ำ NOM ในรูปของยูวี 254 และสารไตรฮาโลมีเทน

4.8.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดกับค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ

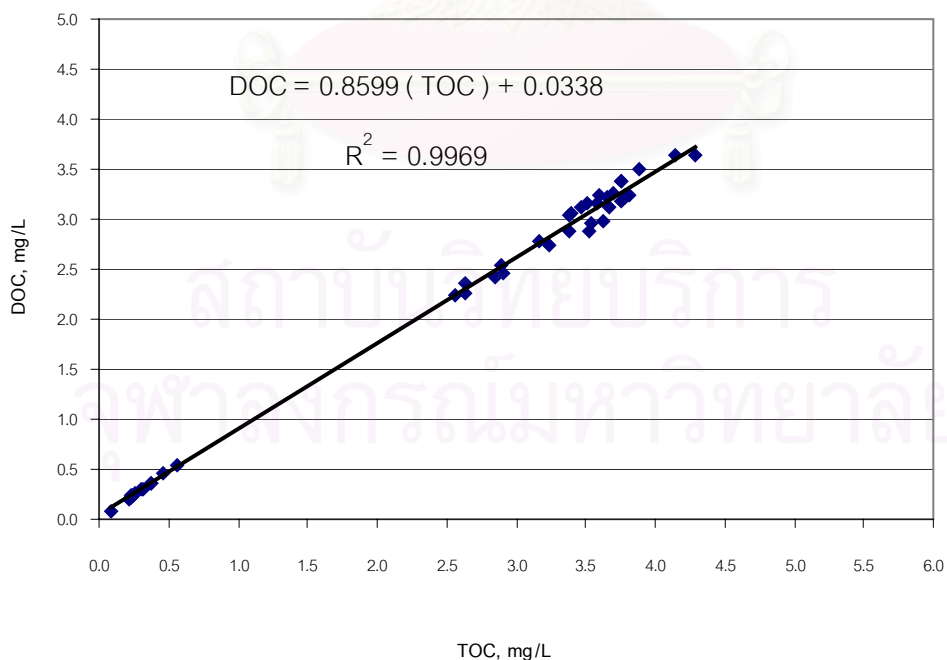
จากการวิเคราะห์ค่าสารอินทรีย์ทั้งหมดกับค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำในการทดลองและหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสอง พบว่าความสัมพันธ์สามารถเขียนประมาณได้เป็นสมการเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.73

$$\text{DOC} = 0.8599 (\text{TOC}) + 0.0338$$

เมื่อ TOC คือสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

DOC คือสารอินทรีย์ละลายน้ำ หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

พิจารณาค่า Regression ที่ได้ค่อนข้างสูงซึ่งจาก AWWA (1993) ได้แบ่งระดับความสัมพันธ์ของค่า Regression ออกเป็น 4 ระดับคือที่ $R^2 > 0.9$ (เป็นความสัมพันธ์ระดับที่ดี), $0.7 < R^2 < 0.9$ (เป็นความสัมพันธ์ระดับปานกลาง), $0.5 < R^2 < 0.7$ (เป็นความสัมพันธ์ระดับพอใช้) และ $R^2 < 0.5$ (เป็นความสัมพันธ์ระดับต่ำ) ซึ่งค่า R^2 ที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.9969 ซึ่งมากกว่า 0.9 ดังนั้นจึงจัดว่าเป็นความสัมพันธ์ในระดับที่ดี สามารถใช้แสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดกับสารอินทรีย์ละลายน้ำได้



รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดกับค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ

4.8.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำกับNOM ในรูปของยูวี 254

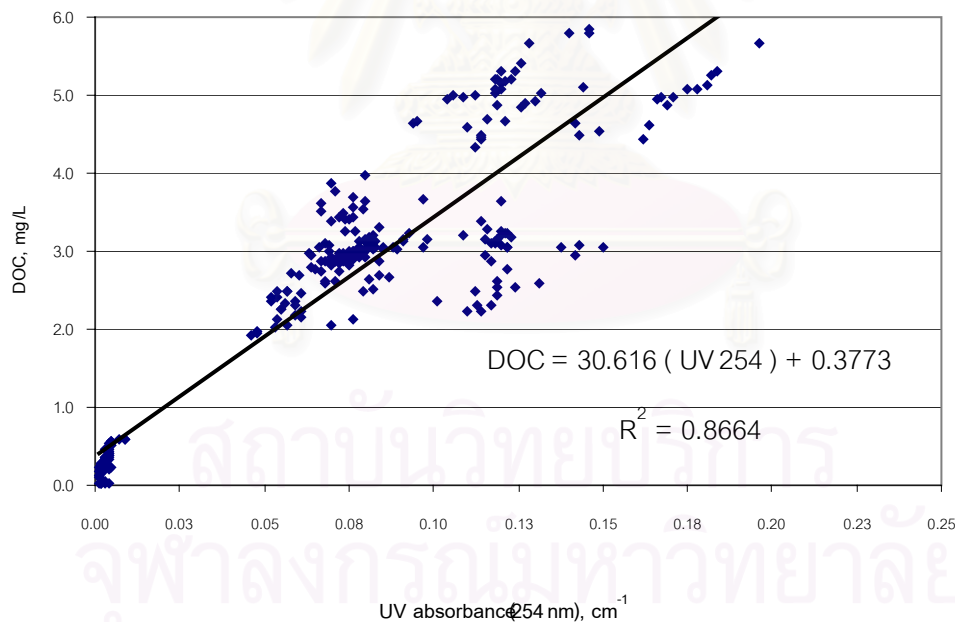
จากการวิเคราะห์NOM ในรูปของยูวี 254 กับค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำในการทดลองและหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสอง พบว่าความสัมพันธ์สามารถเขียนประมาณได้เป็นสมการเส้นตรง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.74

$$\text{DOC} = 30.616 (\text{UV } 254) + 0.3773$$

เมื่อ UV 254 คือNOM ในรูปของยูวี 254 หน่วยเป็น cm^{-1}

DOC คือค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณาค่า Regression ที่ได้พบว่าค่า $R^2=0.8664$ ซึ่งสามารถแบ่งระดับความสัมพันธ์ได้คือมีความสัมพันธ์ปานกลางถึงค่อนข้างดี สามารถใช้แสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างNOM ในรูปของยูวี 254 และค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำได้

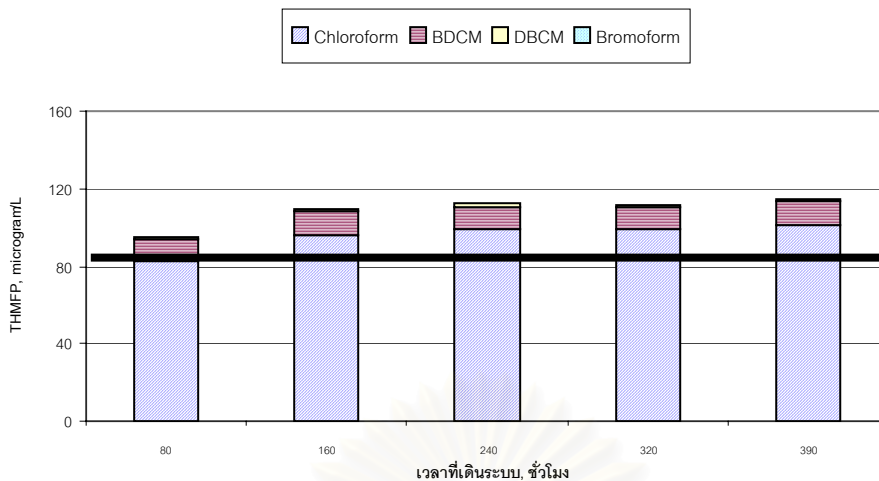


รูปที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างNOM ในรูปของยูวี 254 กับค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ

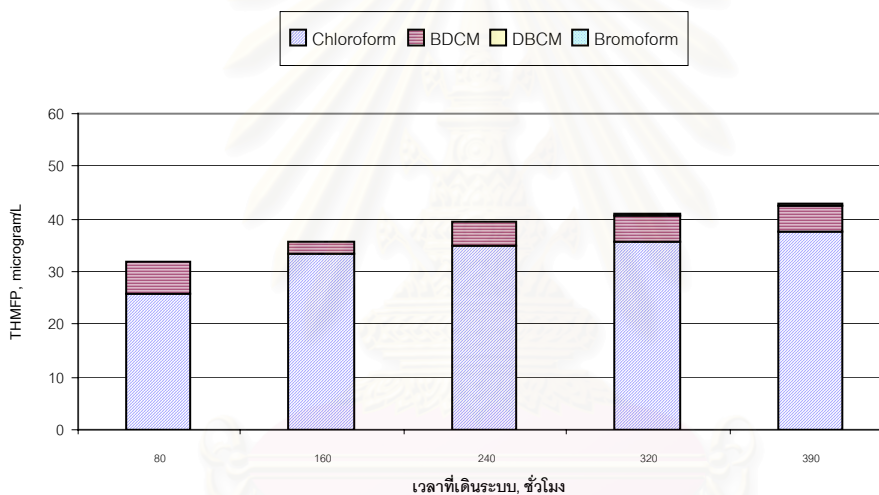
4.8.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างไตรฮาโลมีเทนกับสารอินทรีย์ละลายน้ำและ NOM ในรูปของยูวี 254

ค่าไตรฮาโลมีเทนที่ใช้ในการวิจัยทั้งหมดเป็นค่า THMFP ซึ่งเป็นค่าไตรฮาโลมีเทนที่อาจเกิดขึ้นได้โดยใช้เวลาสัมผัสเท่ากับ 48 ชั่วโมง สาเหตุที่เลือกเวลาสัมผัสเป็น 48 ชั่วโมงนั้น เพราะจากข้อมูลของส่วนวิจัยและพัฒนาคุณภาพน้ำ กองควบคุมคุณภาพแหล่งน้ำ ฝ่ายวางแผนการผลิต และควบคุมคุณภาพ การประปานครหลวง ที่ว่าน้ำประปาสามารถอยู่ในระบบท่อจ่ายน้ำของการประปานครหลวงได้นานที่สุดเท่ากับ 48 ชั่วโมงหรือ 2 วัน ทางผู้วิจัยจึงดูโอกาสการเกิดของสารไตรฮาโลมีเทนให้ได้มากที่สุด ดังนั้น วิธีการนี้จึงเหมาะสมกับระบบท่อจ่ายน้ำของการประปานครหลวงเท่านั้น

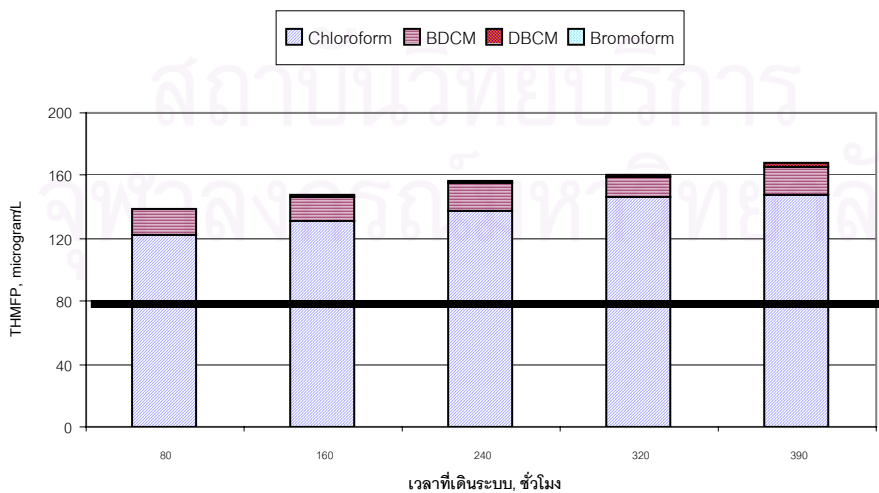
จากการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนดังแสดงในรูปที่ 4.75-4.77 พบว่าค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำที่ยังไม่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชัน(น้ำเข้าระบบ) มีค่ามากกว่าค่าไตรฮาโลมีเทนที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชันแล้วซึ่งสามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้มาก แสดงว่าสารอินทรีย์ละลายน้ำเป็นสารตั้งต้นทำให้เกิดไตรฮาโลมีเทน และเมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนของสารที่รวมเป็นสารไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิดได้แก่ Chloroform, Bromodichloromethane, Dibromochloromethane และ Bromoform ซึ่งจากการทดลองพบว่า Chloroform เป็นสารที่มีมากที่สุดในไตรฮาโลมีเทน เมื่อเทียบกับสารอื่น โดยในทุกตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนพบว่ามีค่า Chloroform มากกว่าร้อยละ 90 ของสัดส่วนทั้งหมด สาเหตุเนื่องมาจากการประปานครหลวงใช้วิธีฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน จึงทำให้สารที่เกิดมากที่สุดเป็น Chloroform ที่มีสารประกอบเป็นคลอรีน



รูปที่ 4.75 ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำที่เข้าระบบ



รูปที่ 4.76 ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำ permeate



รูปที่ 4.77 ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำ concentrate

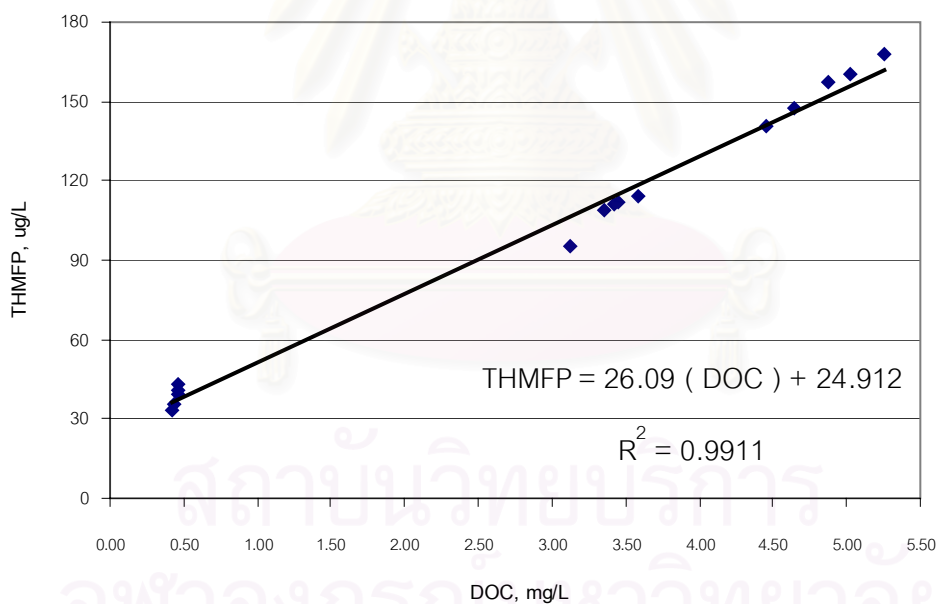
จากการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนกับค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำในการเดินระบบต่อเนื่อง และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสอง พบว่าความสัมพันธ์สามารถเขียนประมาณได้เป็นสมการเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.78

$$\text{THMFP} = 25.09 (\text{DOC}) + 24.912$$

เมื่อ DOC คือค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

THMFP คือค่าไตรฮาโลมีเทน หน่วยเป็นไมโครกรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณาค่า Regression ที่ได้พบว่าค่า $R^2 = 0.9911$ ซึ่งสามารถแบ่งระดับความสัมพันธ์ได้คือมีความสัมพันธ์ที่ดี สามารถใช้แสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าไตรฮาโลมีเทนและค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำได้



รูปที่ 4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์ละลายน้ำกับค่าไตรฮาโลมีเทน

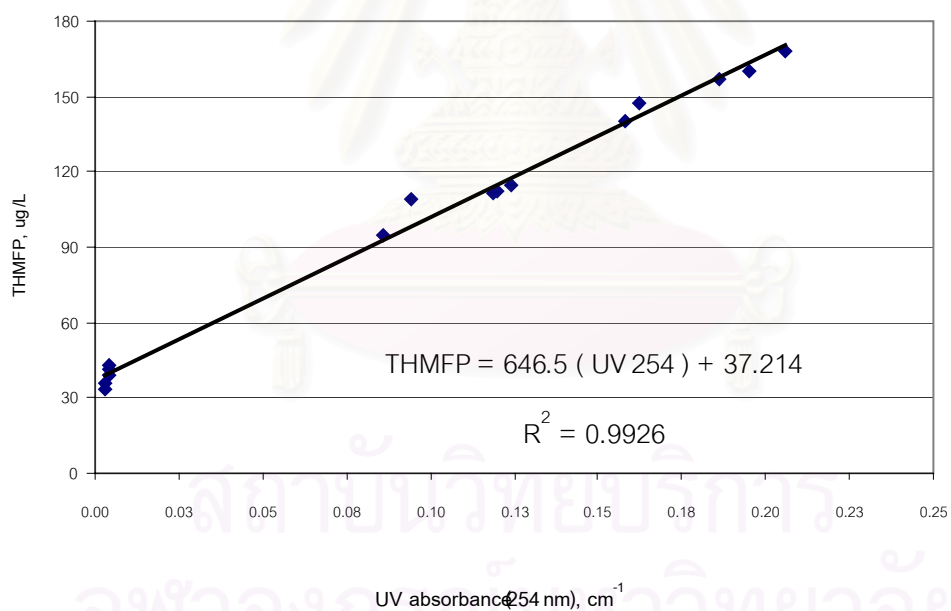
จากการวิเคราะห์ค่าไทรฮาโลมีเทนกับNOM ในรูปของยูวี 254 ในการเดินระบบต่อเนื่อง และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสอง พบว่าความสัมพันธ์สามารถเขียนประมาณได้เป็นสมการเส้นตรง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.79

$$\text{THMFP} = 646.5 (\text{UV } 254) + 37.214$$

เมื่อ UV 254 คือ NOM ในรูปของยูวี 254 หน่วยเป็น cm^{-1}

THMFP คือค่าไทรฮาโลมีเทน หน่วยเป็นไมโครกรัมต่อลิตร

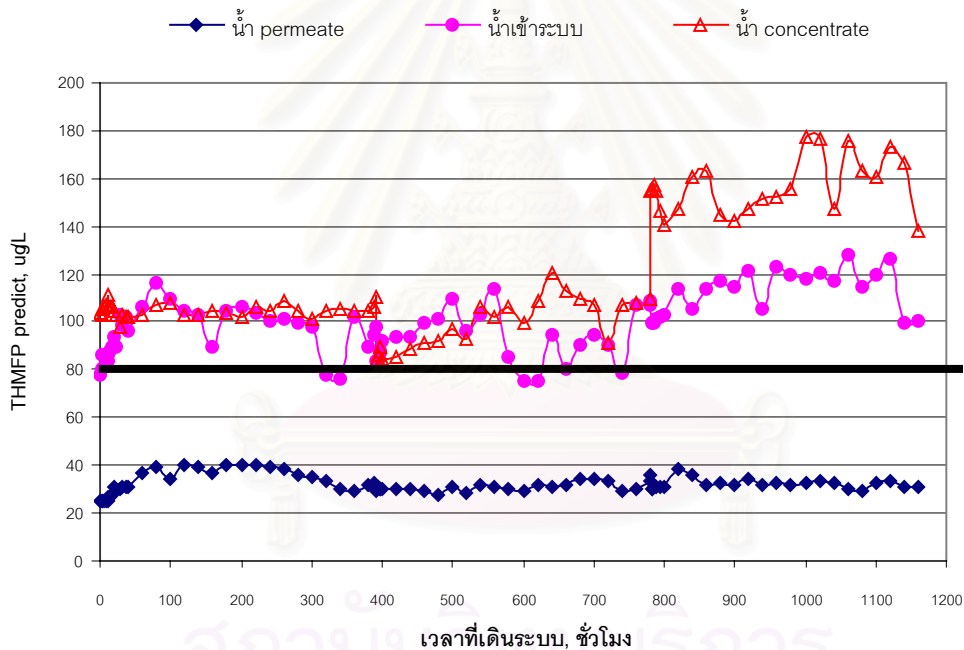
เมื่อพิจารณาค่า Regression พบว่ามีค่า $R^2=0.9926$ ซึ่งสามารถแบ่งระดับความสัมพันธ์ได้คือมีความสัมพันธ์ที่ดี สามารถใช้แสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าไทรฮาโลมีเทน และยูวี 254 ได้



รูปที่ 4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไทรฮาโลมีเทนกับNOM ในรูปของยูวี 254

4.8.4 การศึกษาถึงการทำนายค่า THMFP

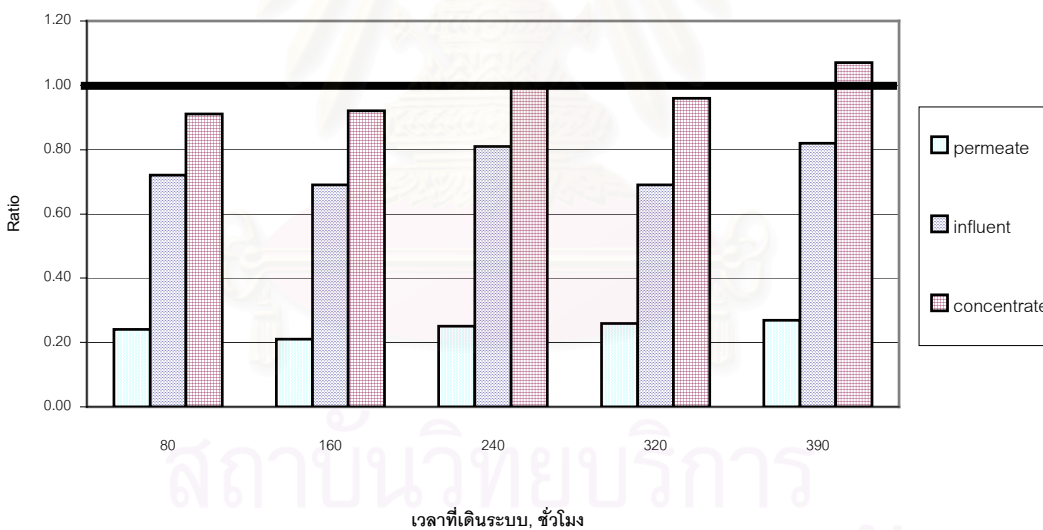
จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไตรฮาโลมีเทนกับค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ นำมาแสดงผลในรูปแบบกราฟดังรูปที่ 4.69 พบว่าน้ำที่เข้าระบบมีค่าไตรฮาโลมีเทน (THMFP) ที่ทำนายได้สูงกว่า 80 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นมาตรฐานของ US.EPA อยู่แทบทั้งสิ้นตลอดการทำการทดลองเดินระบบที่ช่วงต่าง ๆ ส่วนน้ำที่ผ่านระบบนาโนฟิลเตรชันพบว่าสามารถกำจัดค่าไตรฮาโลมีเทนได้ดีมาก โดยที่มีค่าไม่เกิน 40 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mulford และคณะ (1999) ซึ่งทำการทดลองเดินระบบนาโนฟิลเตรชันจำลองจากโรงผลิตน้ำจริงในระดับ Pilot-scale พบว่าค่า THMFP มีค่า 35 ไมโครกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.80 กราฟแสดงการทำนายค่าไตรฮาโลมีเทน

ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้นที่พบว่าการวิเคราะห์โอกาสการเกิดค่าไตรฮาโลมีเทน (THMFP) จากน้ำที่เข้าระบบ ในช่วงการทดลองเดินระบบพบว่ามีความเกินมาตรฐานของ US.EPA ซึ่งกำหนดมาตรฐานไว้ที่ 80 ไมโครกรัมต่อลิตร อยู่เป็นจำนวนหลายตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.80 ซึ่งแสดงว่าน้ำที่ยังไม่ได้ผ่านการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำมีโอกาสก่อให้เกิดค่าไตรฮาโลมีเทนที่เกินมาตรฐาน US.EPA ได้และอาจจะมีผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนได้

แต่เมื่อพิจารณามาตรฐานขององค์การอนามัยโลก จาก Guidelines for Drinking-water Quality 2nd Edition (WHO, 1993) ที่การประปานครหลวงใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมปริมาณไตรฮาโลมีเทนของน้ำประปาในระบบจ่ายน้ำประปา องค์การอนามัยโลกได้กำหนดมาตรฐานสำหรับไตรฮาโลมีเทนไว้ในผลรวมของอัตราส่วนความเข้มข้นของสารประกอบทั้งสี่ที่รวมเป็นสารไตรฮาโลมีเทนกับค่าแนะนำที่ทางองค์การอนามัยโลกได้กำหนดไว้ไม่เกิน 1 เมื่อพิจารณาค่าผลรวมของอัตราส่วนดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 4.81 พบว่าผลรวมอัตราส่วนของสารประกอบทั้งสี่ที่รวมเป็นสารไตรฮาโลมีเทนไม่เกินมาตรฐาน



รูปที่ 4.81 แสดงค่าไตรฮาโลมีเทนตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก

4.8.5 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์ละลายน้ำ สารไตรฮาโลมีเทนและ NOM ในรูปของค่ายูวี 254

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์ละลายน้ำ สารไตรฮาโลมีเทน และ NOM ในรูปของค่ายูวี 254 พบว่าค่าทั้งสามมีความสัมพันธ์กันถือว่าอยู่ในระดับที่ดี โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์ละลายน้ำและสารไตรฮาโลมีเทนมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9911 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง NOM ที่อยู่ในรูปของยูวี 254 และสารไตรฮาโลมีเทนมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9926 จะเห็นได้ว่าค่า R^2 จากความสัมพันธ์ทั้งสองค่าที่ได้เป็นค่าความสัมพันธ์ในระดับที่ดีพอที่จะยอมรับได้

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้กล่าวมาแล้วพอที่จะสรุปได้ว่าค่าทั้งสามมีความสัมพันธ์กันในระดับที่ดี และสามารถนำค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำและ NOM ในรูปของยูวี 254 เป็นดัชนีในการชี้วัดสารไตรฮาโลมีเทนได้ เนื่องจากการตรวจสอบติดตามค่าไตรฮาโลมีเทนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่ฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนมีความสำคัญ และการตรวจสอบติดตามค่าไตรฮาโลมีเทนนั้นทำได้ลำบาก เพราะจะต้องใช้เวลาในการเตรียมเครื่องมือและต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้และความชำนาญอย่างสูง จำเป็นต้องมีการฝึกฝน อีกทั้งราคาของเครื่องวิเคราะห์สารไตรฮาโลมีเทนมีราคาสูง การที่สามารถนำค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำซึ่งสามารถติดตามตรวจสอบได้สะดวกและรวดเร็ว บุคลากรที่ตรวจสอบไม่จำเป็นต้องได้รับการฝึกฝนมากเหมือนดังสารไตรฮาโลมีเทนและราคาของเครื่องมือที่วิเคราะห์ไม่สูงมากนัก ส่วนค่ายูวี 254 ที่เป็นตัวแทนของ NOM ในน้ำ สามารถใช้ตรวจสอบติดตามสารไตรฮาโลมีเทนได้และมีความสะดวกรวดเร็วกว่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ ตารางที่ 4.5 เป็นตารางที่ใช้แสดงค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำและค่ายูวี 254 ที่เทียบเท่าสารไตรฮาโลมีเทนที่ 80 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นมาตรฐานของ US.EPA ที่ได้จากการความสัมพันธ์ของการทดลอง

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าที่ใช้ในการตรวจติดตามสารไตรฮาโลมีเทน

สารที่ใช้เป็นตัวแทนในการตรวจสอบติดตาม	ค่าเทียบเท่ากับไตรฮาโลมีเทน 80 ไมโครกรัมต่อลิตร
สารอินทรีย์ละลายน้ำ, มิลลิกรัมต่อลิตร	2.2
ค่ายูวี 254, ซม ⁻¹	0.067

4.9 การวิเคราะห์ข้อมูลและเกณฑ์ในการออกแบบ

4.9.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการเดินระบบ

จากการทดลองหาความต้องการคลอรีนพบว่าระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถลดความต้องการคลอรีนได้ประมาณ 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือร้อยละ 50 ของความต้องการคลอรีนก่อนเข้าระบบ เนื่องจากระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากับคลอรีน การที่จะให้คลอรีนมีปริมาณพอที่จะฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (มีคลอรีนอิสระในน้ำ) จำเป็นจะต้องให้คลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ละลายน้ำให้หมดเสียก่อน เมื่อสารอินทรีย์ละลายน้ำลดลงทำให้คลอรีนที่จะทำปฏิกิริยาลดลงด้วย

อย่างไรก็ตาม ยังมีผลประโยชน์ที่ไม่สามารถประเมินค่าได้อีก คือการลดปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำ ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งที่มีผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้น้ำโดยตรง จากการลดปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำและปริมาณความต้องการคลอรีนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำและปริมาณคลอรีนที่เติมลงไปจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณค่าไตรฮาโลมีเทนที่เกิดขึ้นในน้ำประปา โดยระบบสามารถลดปริมาณไตรฮาโลมีเทนได้สูงสุดถึงร้อยละ 90 ซึ่งเป็นผลที่น่าพอใจมาก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยระบบนาโนฟิลเตรชันเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการควบคุมไตรฮาโลมีเทน ที่มีแนวโน้มที่จะมากขึ้นในอนาคต

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินระบบ

รายการ	ค่าใช้จ่าย
ค่าลงทุนเริ่มต้นและอุปกรณ์, บาท	200,000
ค่าดำเนินระบบต่อเดือน, บาท	
- ค่าสารเคมี, บาท	6000
- ค่าไฟ, บาท	3600
ค่าลงทุนและดำเนินระบบต่อหน่วย, บาท/ลูกบาศก์เมตร	37.5

หมายเหตุ รายละเอียดและรายการการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ข

4.9.2 เกณฑ์การออกแบบระบบกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยระบบนาโนฟิลเตรชัน

ผลการทดลองเดินระบบขนาดทดสอบดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นพอจะสรุปเป็นเกณฑ์การออกแบบได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สรุปเกณฑ์การออกแบบระบบนาโนฟิลเตรชัน

รายการ	ค่าที่แนะนำ
ขนาดพื้นที่ผิวของเมมเบรน, ตารางเมตร	7.9
เปอร์เซ็นต์ Recovery, %	50
ความดันที่ใช้, บาร์	4
ค่าฟลักซ์ที่ใช้, $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$	0.0342
ปริมาณน้ำที่กรองได้, $\text{m}^3/\text{วัน}$	6.5
ระยะเวลาแต่ละช่วงที่ต้องล้างระบบ, วัน	30
ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำที่เข้าระบบ, มิลลิกรัมต่อลิตร	2-6
ร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ	85-95

ค่าต่าง ๆ ที่แสดงในตารางที่ 4.6 เป็นค่าที่ได้จากการทดลองเดินระบบขนาดทดสอบ การติดตั้งระบบติดตั้งอยู่ต่อจากกระบวนการกรองทรายแบบกรองเร็ว น้ำที่เข้าสู่ระบบมีความขุ่นค่อนข้างต่ำ โดยความขุ่นสูงที่สุดมีค่าไม่เกิน 1 NTU

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของระบบนาโนฟิลเตรชันในการกำจัด NOM ออกจากน้ำที่ผ่านขั้นตอนการกรองโดยถังกรองทรายในกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน การประปานครหลวง ที่ทำการทดลองในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบต่อเนื่อง การใช้ความดันที่มากขึ้นในการดำเนินระบบ ทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มากขึ้น และการใช้เปอร์เซ็นต์Recovery สูง ๆ ทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้นและไม่ต้องสูญเสียน้ำที่ออกจากระบบมากเกินไป แต่การที่มีเปอร์เซ็นต์Recovery สูงมากเกินไป ทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนและเร่งเมมเบรนให้เสื่อมสภาพได้เร็วยิ่งขึ้น

2. การเดินระบบต่อเนื่องในการทดลองครั้งนี้ทำการทดลองที่ความดัน 4 บาร์และเปอร์เซ็นต์ Recovery ที่ 50 % ให้ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้ 0.0418 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$ สามารถเดินระบบไปได้เป็นเวลา 390 ชั่วโมงค่าฟลักซ์จึงลดลงเป็น 40%ของค่าฟลักซ์เริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าเกิดฟาวลิงที่ผิวหน้าเมมเบรน มีสารต่าง ๆ ในน้ำสะสมหน้าพื้นผิวเมมเบรนมาก จำเป็นต้องทำความสะอาดด้วยสารเคมีเพื่อรักษาสภาพเมมเบรนให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานยิ่งขึ้น

3. หลังจากการทำความสะอาดเมมเบรนแล้วพบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีค่าที่ 0.0342 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$ ที่ความดัน 4 บาร์และเปอร์เซ็นต์Recovery 50% แสดงให้เห็นถึงเกิดการสะสมของสารต่าง ๆ ที่ผิวหน้าของเมมเบรน เมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่องหลังจากการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมีแล้วพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำและสารอื่น ๆ เช่นเดียวกับก่อนการล้างเมมเบรนและสามารถเดินระบบต่อไปได้อีก 390 ชั่วโมงจึงเกิดการลดลงของค่าฟลักซ์ ทำให้ต้องทำความสะอาดเมมเบรนอีกครั้ง

4. เมื่อใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันขนาดรูกรอง 0.1 μm . เป็นระบบ Pre-treatment ในการรับน้ำเข้าระบบที่ผ่านกระบวนการตกตะกอน พบว่าประสิทธิภาพของระบบไมโครฟิลเตรชันมีค่าที่ดีกว่าประสิทธิภาพที่ผ่านการกรองด้วยถังกรองทรายและประสิทธิภาพค่อนข้างคงที่ ส่วนข้อได้เปรียบของระบบไมโครฟิลเตรชันคือใช้พื้นที่ในการก่อสร้างน้อยกว่าถังกรองทรายมากและสามารถกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้ และประสิทธิภาพการทำงานของระบบนาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพที่ดีมากไม่ว่าจะรับน้ำเข้าที่ผ่านการกรองทรายหรือผ่านระบบไมโครฟิลเตรชัน สามารถกำจัดค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำได้มากกว่า 90% และค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ออกจากระบบนาโนฟิลเตรชันมีค่าต่ำกว่า 0.5 มก./ล. ทำให้ค่าตั้งต้นในการเกิดไตรฮาโลมีเทนลดลงเช่นกัน

5. ระบบสามารถลดความต้องการคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคได้ประมาณ 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือประมาณร้อยละ 50 ของที่ต้องเติมคลอรีนในระบบก่อนผ่านระบบนาโนฟิลเตรชัน เพราะการมีสารอินทรีย์ละลายน้ำทำให้สิ้นเปลืองคลอรีนในการทำปฏิกิริยา ก่อนที่จะมีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรค

6. ระบบนาโนฟิลเตรชันสามารถลดปริมาณไตรฮาโลมีเทนที่เกิดขึ้นได้สูงสุดถึงร้อยละ 90 เพราะสารอินทรีย์ละลายน้ำเป็นสารตั้งต้นของการเกิดไตรฮาโลมีเทน มีปริมาณลดลง โดยค่า Regression ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำและไตรฮาโลมีเทนมีค่า 0.9911 ซึ่งอยู่ในระดับความสัมพันธ์ที่ดีและแม้ว่าขณะนี้สารไตรฮาโลมีเทนในตัวอย่างที่ทำการวัดยังอยู่ในมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก แต่พบว่าในหลายตัวอย่างที่ทำการวัดสารไตรฮาโลมีเทนยังเกินมาตรฐานถ้าเทียบกับมาตรฐานที่มีความเข้มงวดมากกว่าของ USE.PA ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 80 ไมโครกรัมต่อลิตร เพราะฉะนั้นการควบคุมสารไตรฮาโลมีเทนโดยการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำมีความจำเป็นอย่างมาก

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไป

1. ควรมีการวิจัยเกี่ยวกับการนำระบบนาโนฟิลเตรชันมาใช้จริง โดยศึกษาในด้านการก่อสร้าง ราคาก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบ และจุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ เพราะในการวิจัยนี้ศึกษาในการกำจัด NOM ในน้ำทางด้านเทคนิค ค่าใช้จ่ายที่นำมาแสดงเป็นเพียงการคำนวณราคาในการใช้จ่ายระบบ ไม่ได้รวมถึงค่าการก่อสร้างระบบ

2. ควรมีการศึกษาระบบนาโนฟิลเตรชันในระดับ Prototype หรือ Full-scale ต่อไปโดยผลจากงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้ระดับ Pilot-scale ทำให้สามารถเลือกใช้ค่าสภาวะในการเดินระบบที่เหมาะสม ดังนั้นจึงควรทำการวิจัยศึกษาถึงสมรรถนะของระบบนาโนฟิลเตรชันในการกำจัด NOM ออกจากรน้ำโดยใช้ในระดับที่ใช้งานได้จริง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. วิศวกรรมกรรมประปา เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : 2539.

ภาษาอังกฤษ

Allgeier, S. C. and Summers, R. S. Evaluating NF for DBP control with the RBSMT

Journal AWWA, 87, 3 (1995) : 87-99.

Amy, G. L., Alleman, B. C. and Cluff, C. B. Removal of dissolved organic matter by

Nanofiltration Journal of environmental Engineering, 116 (1990) : 200-205.

APHA, AWWA, WPCF Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Washington : American Public Health Association, (1995).

Bhattacharyya, D. and Williams, M. E. Separation of hazardous organics by low pressure

reverse osmosis membranes-phase 2. Final report. EPA Project Summary. Jan. : 1-7. (1992a).

Bhattacharyya, D. and Williams, M. E. Theory. Membrane Handbook. Chapman & Hall ,

(1992b) : 269-275.

Blau, T. J., Taylor, J. S., Morris, K. E. and Mulford. DBP Control by Nanofiltration: Cost

and Performance Journal AWWA, 84 No.12 (1992) : 104.

Cartwright, P. Membranes meet new environmental challenges Journal of Chemical

Engineering, (1994) : 84-87.

Chellam, S., Jacangelo, J. G., Bonacquisti, T. P. and Schauer, B. A. Effect of

pretreatment on surface water nanofiltration Journal AWWA, 89, 10 (1997) : 77-89.

Chris, R. Current AwwaRF research and publications from previous projects on

NOM. (2002). Available from: <http://www.waterquality.crc.org.au/nom/F9.htm>

Chrisman, R. F. and Ghassemi, M. Chemical nature of organic color in water Journal

AWWA 58 (June 1966): 723-741.

- Cluff, C. B. Slow sand/nanofiltration treatment for secondary treated Wastewater Desalination, 88 (1992) : 53-67.
- Crozes, G., White, P. and Marshall, M. Enhanced coagulation:its effect on NOM Removal and chemical costs Journal AWWA, 87 No.1 (1995) : 78-89.
- Digiano, F.A., Arweiler, S. and Riddick, J.A. Alternative tests for evaluating NF fouling Journal AWWA, 92 : 2 (2000) : 103-115.
- Duranceau, S. J., Taylor, J. S. and Mulford, L. A. SOC removal in a membrane Softening process Journal AWWA, 84 No.1 (1992) : 86-78.
- Dyke, C. A. and Bartels, C. R. Removal of organics from offshore produced waters using nanofiltration membrane technology Environmental Progress, 30 No.3 (1990) :183-186.
- Eaton, A. Measuring UV-absorbing organics: a standard method Journal AWWA, 87 No.2 (1995) : 86-90.
- Edzwald, J. K., Becker, W. C. and Wattier, K. L. Surrogate parameters for monitoring organic matter and THM precursors Journal AWWA, 77 No.4 (1985) : 122-132.
- Eriksson, P. K. Nanofiltration extends the range of membrane filtration Environmental Progress 7 (1988) : 1-12.
- Fu, P., Ruiz, H., Thompson, K. and Spangenberg, C. Selecting membranes for Removing NOM and DBP precursors Journal AWWA, 86 No.12 (1994) : 55-72.
- Gassemi, M. and Chrisman, R. F. Properties of yellow organic acids of natural waters Limn. Oceanog., 13 (1968) : 583.
- Gjessing, E. T. Humic substance in natural water: Method for separation and Characterization.Proceeding of IPB.Symposium:Amsterdam (1966) : 191-201.
- Goel, S., Hozalski, R. M. and Bouwer, E. J. Biodegradation of NOM: effect of NOM source and ozone dose Journal AWWA, 87 No.1 (1995) : 90-105.
- Hanra, A. M., Allgeier, S. C. and Summers, R.S. Assessment of nanofiltration membranes for NOM and bromide removal from surface waters, U.S.A.(Unpublished Manusript).
- Jacangelo, J. G. , Demarco, J. , Owen, D. M. , and Randtke, S. J. Selected processes for removing NOM: an overview Journal AWWA, 87 No.1 (1995) : 64-77.
- Kavanaugh, M. C. Modified coagulation for improved removal of Trihalomethane Precursors Journal AWWA, 70 No.11 (1978) : 613-620.

- Koottatep, S. Removal of humic substances from natural waters by reverse osmosis. Doctoral dissertation, Engineering, The Norwegian Institute of Technology, (1979).
- Laconti, A. B. , Chludzinski, P. J. , and Fickett, A. P. Morphology and reverse osmosis properties of sulfonated 2,6. Dimethyle polyphenylene oxide membranes. Reverse Osmosis Membrane Reserch. Plenum Press New York., (1972).
- Laine, J. M. , Jacangelo, J. G. , Cummings, E. W. , Carns, K. E. , and Mallevalle, J. Influence of bromide on low-pressure membrane filtration for controlling DPBs in surface waters Journal AWWA, 85 No.6 (1993) : 87-99.
- Marsono, B. D. Removal of Trihalomethane Precursors by Nanofiltration. Master's thesis. Engineering, Asian Institute of Technology, (1996).
- Maynarovich, 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.
- McCreary, J. J. and Snoeyink, V. L. Characterization and Activated Carbon Adsorption of Several Humic Substances Water Reserch, 14 (1979) : 151-160.
- Mulford, L. A., Taylor, J. S., Nickerson, D. M., and Chen, S. S. NF performance at full and pilot scale. Journal AWWA, 91 No.6 (1999) : 64-75.
- Najm, I. N. and Krasner, S. W. Effect of bromide and NOM on by-product formation Journal AWWA, 87 No.1 (1995) : 106-115.
- Najm, I. N., Patania, N. L., Jacangelo, J. G., and Krasner, S. W. Evaluating surrogates for disinfection by-products. Journal AWWA, 86 No.6 (1994) : 98-106.
- National Research Council (U.S.), Panel on Low Molecular Weight Halogenated Hydrocarbons. Chloroform, carbon tetrachloride, and other halomethanes : an environmental assessment., Washington : National Academy of Sciences. (1978).
- Nilson, J. A., and DiGiano, F. A. Influence of NOM composition on nanofiltration. Journal AWWA, 88 No.5 (1996) : 53-66.
- Oliver, B. G., and Lawrence, J. Haloform in drinking water: A study of precursors and precursors removal. Journal AWWA, 71 No.3 (1979) : 161-163.
- 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).
- Owen, D. M., Amy, G. L., Chowdhury, Z. K., Paode, R.; McCoy, G., and Viscosil, K. NOM Characterization and treatability. Journal AWWA, 87 No.1 (1995) : 46-63.
- Petersen, R. J. and Cadotte, J. E. Handbook of Industrial membrane technology. Park Ridge, New Jersey, USA.: Noyes Publications, (1990).
- Pontius, F. W. New horizons in federal regulation. Journal AWWA, 90 No.3 (1998) : 38-50.
- Raman, L. P., Cheryan, M., and Rajagopalan, N. Consider nanofiltration for membrane separation. Chemical Engineering Progress (1994) : 68-74.
- Ratanatamskul, C., Yamamoto, K., Urase, T., and Ohgaki, S. Effect of operating Conditions on rejection of anionic pollutants in the water environment by nanofiltration especially in very low pressure range. Wat. Sci. Tech. 34 No.9 (1996) : 149-156.
- Ratanatamskul, C., Urase, T., and Yamamoto, K. Description of Behavior in Rejection of Pollution in Ultra Low Pressure Nanofiltration. Wat.Sci.Tech., 38 No.4-5 (1998) : 453-462.
- Reutenbach, R and Albrecht, R. Membrane Processes (1989) : 3.
- Reutenbach, R and Groschl, A. Separation potential of nanofiltration membrane. Desalination 77 (1990) : 73-84.
- Rudie, B. Hydrophilicity and Hydrophobicity.
<http://osmonics.com/products/Page772.htm>
- Schnizer, M. and Khan, S. U. Humic Substances in Environment. New York: Marcel Dekker, Inc. (1972).
- Schirg, P. and Widmer, F. Characterisation of nanofiltration membrane for the separation of aqueous dye-salt solution. Desalination 89 (1992) : 89-107.
- Seidel, A and Elimelech, M. Coupling between chemical and physical interaction in natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes: implications for fouling control. Journal of Membrane Science, 203 (2002) : 245-255.
- Stevenson, M., and Khan, S. U. Soil Organic Matter, Amsterdam : Elsevier, (1978).
- Symons, J. M., Beller, T. A., Arswell, K., Demarco, J., Kropp, K. L., Robeck, G. G.,

- Seeger, D. R., Slocum, C. J., Smith, B. L., and Stevents, A. A. National Organics Reconnaissance survey for Halogenated organics. Journal AWWA, 67 No.11(1975) : 634-647.
- Tan, L. and Amy, G. L. Comparing Ozonation and Membrane Separation for Color Removal and Disinfection By Product Control. Journal AWWA, 83 No.5 (1991) : 74-79.
- Taylor, J. S., Thomson, D. M., and Carswell, J. K. Applying Membrane Processes to Groudwater Sources for Triholomethane Precursor Control. Journal AWWA 79 No.9 (1987) : 72-82.
- Trussell, R. R. and Umphres, M. D. The Formation of Trihalomethanes. Journal AWWA, 70 No.11 (1978) : 604-612.
- Visvanathan, C., Marsono, B. D., and Basu, B. Removal of THMP by nanofiltration:Effects of interference parameters. Wat.Res. 32 No.12 (1998) : 3527-3538.
- Waypa, J. J., Elimelech, M., and Hering, J. G. Arsenic removal by RO and NF membranes. Journal AWWA, 89 No.10 (1997) : 102-114.
- Williamson, J. Understanding Crossflow Filtration. (1993).
<http://osmonics.com/products/page712.htm>
- Williamson, J. and Paulson, D. Select Engineering Principles of Crossflow Membrane Technology. (1990). <http://osmonics.com/products/page832.htm>



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก1 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัด NOM

% Recovery	Pressure (bar)	Flux , (m ³ /m ² -hr)	DOC(mg/L)				Turbidity(NTU)				Conduct.(us/cm)			
			Influenta	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด	Influenta	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด	Influenta	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด
10	2	0.0129	2.044	0.018	2.24	99.12	0.852	0.068	0.86	92.02	180	22	182	87.78
10	3	0.0144	2.122	0.019	2.1	99.1	0.871	0.061	0.88	93.00	183	18	185	90.16
10	4	0.0182	2.35	0.019	2.45	99.19	0.845	0.058	0.85	93.14	197	17	200	91.37
15	2	0.0148	2.142	0.02	2.19	99.07	0.943	0.084	0.95	91.09	180	25	185	86.11
15	3	0.0205	2.186	0.021	2.19	99.04	0.91	0.082	0.92	90.99	183	20	187	89.07
15	4	0.0243	2.242	0.021	2.23	99.06	0.894	0.079	0.9	91.16	179	18	183	89.94
20	2	0.0182	2.346	0.064	2.39	97.27	0.993	0.083	1	91.64	180	24	187	86.67
20	3	0.0253	2.423	0.076	2.442	96.86	0.964	0.075	0.97	92.22	176	20	183	88.64
20	4	0.0304	2.487	0.089	2.458	96.42	0.871	0.068	0.88	92.19	179	17	185	90.50
30	2	0.0182	2.625	0.228	2.62	97.01	0.886	0.074	0.9	91.65	261	30	278	88.51
30	3	0.0304	2.493	0.204	3.5	99.37	0.854	0.071	0.86	91.69	241	19	253	92.12
30	4	0.0395	2.999	0.213	4.005	99.48	0.812	0.068	0.82	91.63	247	18	260	92.71
40	2	0.0218	2.814	0.232	3.92	97.35	0.792	0.088	0.8	88.89	259	31	272	88.03
40	3	0.0304	2.958	0.239	3.97	97.89	0.785	0.081	0.81	89.68	254	26	268	89.76
40	4	0.0418	2.747	0.228	3.747	98.28	0.774	0.079	0.8	89.79	233	19	248	91.85
50	2	0.0253	3.124	0.452	5.34	95.77	0.742	0.083	0.76	88.81	274	31	290	88.69
50	3	0.0342	3.5	0.54	6.56	95.59	0.698	0.074	0.71	89.40	263	28	284	89.35
50	4	0.0418	3.258	0.367	4.42	97.74	0.681	0.068	0.69	90.01	247	23	263	90.69

ตารางที่ ก1 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัด NOM(ต่อ)

% Recovery	Pressure (bar)	Flux , (m ³ /m ² -hr)	DOC(mg/L)				Turbidity(NTU)				Conduct.(us/cm)			
			Influenta	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด	Influenta	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด	Influenta	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด
60	2	0.0253	3.045	0.572	4.045	92.41	0.624	0.085	0.64	86.38	254	38	262	85.04
60	3	0.0304	2.975	0.562	3.975	93.86	0.638	0.086	0.65	86.52	258	38	265	85.27
60	4	0.0428	2.467	0.458	3.467	93.42	0.657	0.088	0.67	86.61	257	36	266	85.99
70	2	0.0304	3.051	0.597	4.051	91.69	0.619	0.084	0.63	86.43	264	48	273	81.82
70	3	0.0342	3.119	0.598	4.12	92.30	0.685	0.091	0.69	86.72	261	47	282	81.99
70	4	0.0452	3.026	0.582	4.115	92.49	0.642	0.089	0.66	86.14	258	45	271	82.56

สถาบันวิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก1 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัด NOM(ต่อ)

% Recovery	Pressure (bar)	อุณหภูมิ(°C)			pH			UV254(cm ⁻¹)			Total Hardness (mg/L as CaCO ₃)				
		Influenta	Permeate	Return	Influenta	Permeate	Return	Influenta	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด	Influenta	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด
10	2	28.9	30.0	30.0	7.29	6.89	7.35	0.057	0.001	0.060	98.25	72.14	7.85	73	89.12
10	3	28.8	29.8	29.8	7.38	7.05	7.42	0.054	0.002	0.055	96.30	71.01	7.2	72	89.86
10	4	28.8	29.6	29.6	7.40	7.21	7.45	0.052	0.002	0.054	96.15	72.24	7.41	73	89.74
15	2	29.0	30.5	30.5	7.25	7.13	7.33	0.061	0.004	0.064	93.44	64.13	7.42	65	88.43
15	3	29.0	30.0	30.0	7.20	7.14	7.31	0.059	0.003	0.062	94.92	65.17	7.85	66.5	87.95
15	4	28.8	29.8	29.8	7.14	7.03	7.25	0.061	0.002	0.063	96.72	65.25	8.11	65.80	87.57
20	2	29.1	31.2	31.2	7.55	7.19	7.67	0.056	0.003	0.060	94.64	66.13	7.41	67	88.79
20	3	29.1	30.3	30.3	7.27	6.86	7.38	0.052	0.002	0.055	96.15	67.27	7.38	67.8	89.03
20	4	29.1	30.0	30.0	7.30	6.91	7.42	0.054	0.002	0.058	96.30	66.13	8.14	66.9	87.69
30	2	31.2	34.6	34.6	7.15	6.72	7.26	0.068	0.002	0.070	97.06	92.59	7.41	93.4	92.00
30	3	31.0	32.9	32.9	7.09	6.56	7.2	0.057	0.004	0.060	92.98	81.5	3.70	82.50	95.46
30	4	32.0	33.2	33.2	7.15	6.48	7.28	0.069	0.003	0.072	95.65	77.78	3.70	78.80	95.24
40	2	33.5	35.4	35.4	7.20	6.68	7.31	0.075	0.005	0.078	93.33	78.84	7.41	79	90.60
40	3	33.0	35.0	35.0	7.16	6.70	7.28	0.076	0.003	0.080	96.05	79.99	7.40	81.20	90.75
40	4	33.0	34.5	34.5	7.40	7.04	7.51	0.072	0.003	0.079	95.83	81.61	7.40	83.00	90.93
50	2	34.2	35.8	35.8	7.36	6.87	7.48	0.078	0.004	0.083	94.87	90.57	7.42	92.5	91.81
50	3	33.0	34.8	34.8	7.21	6.76	7.32	0.073	0.004	0.085	94.52	91.54	5.6	92.8	93.88
50	4	33.0	35.5	35.5	7.34	6.85	7.43	0.077	0.003	0.087	96.10	86.2	3.4	90.4	96.06

ตารางที่ ก1 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัด NOM(ต่อ)

% Recovery	Pressure (bar)	อุณหภูมิ(°C)			pH			UV254(cm ⁻¹)				Total Hardness (mg/L as CaCO ₃)			
		Influenta	Permeate	Return	Influenta	Permeate	Return	Influenta	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด	Influenta	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด
60	2	31.0	32.6	32.6	7.40	7.12	7.52	0.066	0.005	0.071	92.42	95.61	7.41	97.2	92.25
60	3	31.0	33.4	33.4	7.36	7.08	7.49	0.063	0.005	0.075	92.06	94.86	7.42	95.8	92.18
60	4	32.0	34.5	34.5	7.44	7.20	7.53	0.061	0.003	0.074	95.08	96.3	7.4	97.5	92.32
70	2	32.5	33.5	33.5	7.37	7.14	7.49	0.097	0.009	0.101	90.72	77.89	10.2	78.6	86.90
70	3	31.5	33.2	33.2	7.21	6.85	7.35	0.091	0.009	0.104	90.11	81.46	12.1	82.4	85.15
70	4	30.5	32.5	32.5	7.41	7.11	7.52	0.089	0.007	0.098	92.13	74.1	11.1	76.2	85.02

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก1 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัด NOM(ต่อ)

% Recovery	Pressure (bar)	Calcium Hardness(mg/L as CaCO3)				Manesium Hardness(mg/L as CaCO3)			
		Influenta	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด	Influenta	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด
10	2	20.8	3.8	21	96.5	51.34	4.05	52	95.6
10	3	20.6	3.2	21	96.2	50.41	4	51	95.7
10	4	20.8	1.6	22	95.8	51.44	5.81	51	95.9
15	2	17.6	3.2	18	95.9	46.53	4.22	47	94.5
15	3	18.4	3.2	19.2	95.4	46.77	4.65	47.3	94.8
15	4	18.2	1.6	22	95.2	47.05	6.51	43.8	95.1
20	2	17.6	3.2	20	95.2	48.53	4.21	47	94.5
20	3	18.6	1.6	22	95.1	48.67	5.78	45.8	94.6
20	4	18.6	1.6	23	95	47.53	6.54	43.9	94.8
30	2	62.96	3.71	65	94.11	29.63	3.7	28.4	93.2
30	3	68.89	2.74	70	96.02	12.61	0.96	12.5	93.5
30	4	66.67	2.6	70	96.10	11.11	1.1	8.8	93.7
40	2	67.62	3.7	68.5	94.53	11.22	3.71	10.5	92
40	3	67.03	3.7	68	94.48	12.96	3.7	13.2	92.1
40	4	68.33	1.85	67	97.29	13.28	5.55	16	92.4
50	2	68.95	3.7	70	94.63	21.62	3.72	22.5	92
50	3	68.73	3.7	71	94.62	22.81	1.9	22.8	92.4
50	4	60.67	1.85	65	96.95	25.53	1.55	25.4	92.5

ตารางที่ ก1 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัด NOM(ต่อ)

% Recovery	Pressure (bar)	Calcium Hardness(mg/L as CaCO ₃)				Manesium Hardness(mg/L as CaCO ₃)			
		Influente	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด	Influente	Permeate	Return	ร้อยละการกำจัด
60	2	67.81	5.41	68	92.02	27.8	2.00	29.2	92.81
60	3	68.7	5.81	68.5	91.54	26.16	1.61	27.3	93.85
60	4	66.7	7.01	67.8	89.49	29.6	0.39	29.7	98.68
70	2	62.47	8.52	65	86.36	15.42	1.68	13.6	92.5
70	3	64.21	8.41	66	86.90	17.25	3.69	16.4	89.5
70	4	59.26	7.41	64	87.50	14.84	3.69	12.2	88.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก1 ผลของค่าความดันและเปอร์เซ็นต์ Recovery ต่อประสิทธิภาพการกำจัด NOM(ต่อ)

% Recovery	Pressure (bar)	Feed flow (m ³ /hr)	Return flow (m ³ /hr)
10	2	1.02	0.18
10	3	1.14	0.48
10	4	1.44	0.54
15	2	0.78	0.42
15	3	0.96	0.66
15	4	1.284	0.696
20	2	0.66	0.54
20	3	0.9	0.72
20	4	1.2	0.78
30	2	0.48	0.72
30	3	0.798	0.822
30	4	0.96	1.02
40	2	0.432	0.768
40	3	0.63	0.99
40	4	0.75	1.23
50	2	0.396	0.804
50	3	0.54	1.08
50	4	0.66	1.32
60	2	0.348	0.852
60	3	0.48	1.14
60	4	0.558	1.422
70	2	0.342	0.858
70	3	0.432	1.188
70	4	0.51	1.47



ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 ผลการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

เวลา, ชั่วโมง	Flux, ($m^3/m^2 \cdot hr$)	%Recovery	Pressure , (bar)	pH			Temp ,(°C)			Turbidity ,(NTU)			Conductivity ,(μs/cm)		
				Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return
1	0.0418	50	4	6.99	6.73	7.5	29.8	31.7	31.7	0.29	0.07	0.31	338	38	580
2	0.0418	50	4	7.01	6.55	7.33	30	32.2	32.2	0.30	0.13	0.3	334	38	581
3	0.0418	50	4	6.99	6.48	7.28	31.4	33.2	33.2	0.24	0.08	0.26	332	38	554
4	0.0418	50	4	6.95	6.47	7.21	32.5	34	34	0.22	0.06	0.25	319	37	567
6	0.0418	50	4	6.85	6.38	7.4	32.3	33.8	33.8	0.18	0.05	0.2	297	33	527
8	0.0418	50	4	7.08	6.61	7.51	32.5	34.2	34.2	0.21	0.07	0.22	297	33	510
10	0.0418	50	4	7.11	6.64	7.39	32	33.4	33.4	0.86	0.07	0.34	298	37	500
12	0.0418	50	4	7.05	6.67	7.49	29.8	31.6	31.6	0.85	0.06	0.46	282	33	503
14	0.0418	50	4	7	6.52	7.44	30	31.8	31.8	0.33	0.07	0.2	297	33	542
16	0.0418	50	4	7.07	6.59	7.38	30.4	32.2	32.2	0.40	0.06	0.27	298	32	507
18	0.0418	50	4	7.13	6.57	7.37	30.8	32.8	32.8	0.28	0.07	0.28	290	32	504
20	0.0418	50	4	6.98	6.55	7.24	30	32	32	0.24	0.06	0.2	270	32	528
24	0.0418	50	4	7.1	6.54	7.35	31.2	33	33	0.23	0.05	0.2	271	28	553
28	0.0418	50	4	7.08	6.52	7.32	30	32	32	0.35	0.08	0.42	278	30	549
32	0.0403	49.1	4	7.14	6.48	7.36	29.6	31.4	31.4	0.36	0.06	0.38	282	32	544
36	0.0387	48.1	4	7.04	6.5	7.31	29.5	31.2	31.2	0.32	0.06	0.35	300	30	537
40	0.0380	47.6	4	6.96	6.65	7.24	30	31.8	31.8	0.42	0.09	0.3	332	32	602
60	0.0365	47.1	4	6.95	6.63	7.37	29.8	31.5	31.5	0.33	0.08	0.25	322	30	604

ตารางที่ 1 ผลการเดินระบบแบบต่อเนื่อง(ต่อ)

เวลา, ชั่วโมง	Flux, (m ³ /m ² -hr)	%Recovery	Pressure , (bar)	pH			Temp ,(°C)			Turbidity ,(NTU)			Conductivity ,(µs/cm)		
				Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return
80	0.0349	46.5	4	6.91	6.36	7.24	30	32	32	0.26	0.09	0.21	292	26	505
100	0.0349	46.5	4	7.17	6.4	7.43	31	32.5	32.5	0.34	0.11	0.31	272	24	495
120	0.0349	46.5	4	6.93	6.3	7.25	30.5	32.5	32.5	0.36	0.06	0.27	270	24	582
140	0.0334	45.4	4	7.1	6.43	7.42	30	32	32	0.49	0.07	2.29	274	25	542
160	0.0327	44.8	4	7.28	6.77	7.52	31	33	33	0.68	0.06	3.52	222	24	420
180	0.0327	44.8	3.8	7.25	6.84	7.58	30.5	31.7	31.7	0.30	0.08	0.48	211	21	386
200	0.0319	44.7	3.8	7.11	6.58	7.44	31	32.8	32.8	0.35	0.08	0.28	209	22	363
220	0.0311	44.6	3.8	7.46	6.79	7.75	30	31.9	31.9	0.49	0.1	0.24	205	21	369
240	0.0308	44.5	3.7	7.17	6.53	7.58	29.8	31.8	31.8	0.34	0.06	0.46	228	24	397
260	0.0304	44.2	3.65	7.14	6.55	7.48	29.7	31.2	31.2	0.53	0.09	3.16	228	25	365
280	0.0300	43.9	3.65	7.22	6.61	7.53	30.1	32	32	0.32	0.08	0.26	229	25	391
300	0.0296	43.6	3.6	7.2	6.58	7.52	29.8	31.6	31.6	0.42	0.09	2.14	232	26	388
320	0.0289	43.7	3.5	7.14	6.52	7.5	28.9	31	31	0.41	0.08	6	224	25	369
340	0.0289	43.7	3.4	7.24	6.49	7.52	30.4	32	32	0.52	0.1	1.74	228	24	374
360	0.0281	43.0	3.3	7.2	6.51	7.48	30.2	31.8	31.8	0.58	0.08	0.84	230	26	398
380	0.0273	42.4	3.3	7.15	6.42	7.44	31	32.8	32.8	0.31	0.07	0.47	229	27	403
390	0.0266	41.7	3.2	7.06	6.47	7.52	29.5	31.5	31.5	1.79	0.08	4.7	241	30	391

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 ผลการเดินระบบแบบต่อเนื่อง(ต่อ)

เวลา, ชั่วโมง	DOC, (mg/L)			UV254, (cm ⁻¹)			Total Hardness , (mg/L)			Calcium Hardness , (mg/L)			Magnesium Hardness , (mg/L)		
	Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return
1	2.902	0.540	4.984	0.076	0.005	0.109	92.6	3.7	188.9	76	3	148.2	16.6	0.7	40.7
2	2.918	0.522	4.997	0.080	0.005	0.112	92.6	3.7	177.8	77.8	1.9	144.5	14.8	1.8	33.3
3	2.860	0.413	5.023	0.084	0.004	0.118	90.8	5.6	185.2	72.2	3.7	133.3	18.6	1.9	51.9
4	2.810	0.395	5.071	0.070	0.004	0.120	92.6	4.6	166.7	74.1	0.8	118.6	18.5	3.8	48.1
6	2.014	0.314	4.988	0.053	0.003	0.106	88.9	3.7	177.8	74.1	1.9	137	14.8	1.8	40.8
8	1.964	0.215	4.652	0.048	0.002	0.094	88.9	3.7	174.3	70.4	1.9	129.6	18.5	1.8	44.7
10	2.953	0.165	4.437	0.064	0.002	0.114	100.7	3	186	68.6	1.9	124.1	32.1	1.1	61.9
12	2.479	0.248	4.676	0.057	0.003	0.095	100	3.7	185.2	61.1	1.9	114.8	38.9	1.8	70.4
14	2.682	0.295	5.214	0.060	0.003	0.119	92.6	3.7	181.5	66.7	2.5	118.6	25.9	1.2	62.9
16	2.782	0.168	5.301	0.065	0.002	0.124	92.6	3.7	172.2	70.4	3	133.3	22.2	0.7	38.9
18	2.248	0.204	4.581	0.055	0.002	0.110	90.8	3.7	163	74.1	1.9	118.5	16.7	1.8	44.5
20	2.267	0.225	4.486	0.055	0.002	0.114	85.2	1.9	163	59.3	0.9	127.8	25.9	1	35.2
24	2.417	0.215	4.685	0.054	0.002	0.116	92.6	1.9	159.3	66.7	0.9	116.7	25.9	1	42.6
28	2.368	0.198	4.865	0.059	0.002	0.119	92.8	3.7	185.2	66.7	1.8	126	26.1	1.9	59.2
32	2.587	0.214	4.897	0.068	0.002	0.127	94.2	2.1	185.6	67.2	1.4	124.8	27	0.7	60.8
36	2.625	0.21	5.014	0.071	0.002	0.132	92.6	2.2	182.4	66.7	1.3	119.5	25.9	0.9	62.9
40	2.645	0.201	5.846	0.081	0.002	0.146	92.8	1.9	185.2	68.7	0.9	120.4	24.1	1	64.8
60	2.874	0.164	5.798	0.068	0.002	0.146	92.6	1.9	176	70.4	0.9	118.5	22.2	1	57.5

ตารางที่ ๑๑ ผลการเดินระบบแบบต่อเนื่อง(ต่อ)

เวลา, ชั่วโมง	DOC, (mg/L)			UV254, (cm ⁻¹)			Total Hardness , (mg/L)			Calcium Hardness , (mg/L)			Magnesium Hardness , (mg/L)		
	Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return	Influence	Permeate	Return
80	2.933	0.108	4.678	0.070	0.001	0.121	92.6	3.7	174.1	66.7	1.8	118.5	25.9	1.9	55.6
100	3.248	0.244	5.784	0.074	0.002	0.140	96.3	1.9	172.2	63	0.8	120.4	33.3	1.1	51.8
120	2.725	0.134	5.302	0.058	0.001	0.120	85.2	1.9	184.5	51.4	0.8	126.4	33.8	1.1	58.1
140	2.985	0.268	5.217	0.078	0.003	0.118	88.9	1.9	161.1	55.6	0.6	122.2	33.3	1.3	38.9
160	3.408	0.239	5.672	0.075	0.002	0.128	92.6	3.7	170.4	59.3	1.8	126	33.3	1.9	44.4
180	2.314	0.212	5.421	0.059	0.002	0.126	77.8	3.7	133.3	53.7	2.2	88.9	24.1	1.5	44.4
200	1.922	0.171	4.322	0.046	0.002	0.112	77.8	7.4	133.3	51.9	4.4	92.6	25.9	3	40.7
220	1.942	0.276	4.461	0.048	0.003	0.114	74.1	3.7	142.6	55.6	1.9	105.6	18.5	1.8	37
240	2.672	0.238	5.214	0.087	0.002	0.123	70.4	2.8	136.3	50.8	1.9	98.2	19.6	0.9	38.1
260	2.118	0.248	4.842	0.076	0.003	0.126	72.2	3.3	130.4	51.1	1.7	96.3	21.1	1.6	34.1
280	2.498	0.347	4.921	0.079	0.003	0.130	73.4	3.7	128.9	52.1	1.7	92.5	21.3	2	36.4
300	2.684	0.375	5.184	0.084	0.004	0.121	71.1	2.2	126.7	52	0.9	95	19.1	1.3	31.7
320	2.520	0.321	5.162	0.082	0.003	0.120	72.2	1.9	127.8	33.4	0.9	90	38.8	1	37.8
340	2.052	0.171	4.942	0.070	0.002	0.104	72.2	3.7	142.6	51.9	1.9	101.9	20.3	1.8	40.7
360	3.160	0.211	5.073	0.091	0.002	0.118	77.8	5.6	140.7	50	1.9	100	27.8	3.7	40.7
380	3.158	0.342	5.103	0.098	0.003	0.144	85.2	3.7	137.1	55.6	1.8	101.9	29.6	1.9	35.2
390	3.212	0.430	5.124	0.109	0.004	0.181	70.4	4.5	147.5	50	2.1	100	20.4	2.4	47.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการล้างเมมเบรนและการเดินระบบต่อเนื่อง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค1ผลการเดินระบบแบบต่อเนื่องหลังการล้างเมมเบรน(ต่อ)

เวลา, ชั่วโมง	Flux, (m ³ /m ² -hr)	%Recovery	Pressure , (bar)	pH			Temp			Turbidity			Conductivity		
				Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return
1	0.0342	50	4	7.12	6.40	7.32	28.4	30.2	30.2	0.54	0.08	0.80	228	28	342
2	0.0342	50	4	7.10	6.38	7.35	28.7	30.3	30.3	0.64	0.10	0.84	230	29	354
4	0.0342	50	4	7.05	6.36	7.42	28.5	30.4	30.4	0.58	0.08	1.25	232	29	358
8	0.0342	50	4	6.98	6.35	7.40	29.4	30.8	30.8	0.62	0.09	1.27	231	30	368
12	0.0342	50	4	7.04	6.32	7.45	29.0	30.2	30.2	0.48	0.06	1.64	230	29	374
20	0.0342	50	4	7.10	6.34	7.59	28.8	30.5	30.5	0.70	0.11	2.80	229	29	397
40	0.0342	50	4	6.97	6.28	7.32	28.8	30.6	30.6	0.60	0.12	3.25	263	34	367
60	0.0342	50	4	7.04	6.35	7.63	30.1	31.8	31.8	0.31	0.08	1.52	231	28	410
80	0.0342	50	4	7.28	6.59	7.78	30.7	32.5	32.5	0.72	0.10	2.30	230	28	382
100	0.0304	47.1	3.8	7.07	6.47	7.54	29.7	31.8	31.8	0.44	0.12	3.90	230	29	390
120	0.0304	47.1	3.8	7.05	6.51	7.52	29.5	31.4	31.4	0.58	0.08	4.25	228	28	392
140	0.0304	47.1	3.8	7.12	6.59	7.60	29.3	31.0	31.0	0.64	0.06	3.95	225	27	396
160	0.0304	47.1	3.8	7.10	6.47	7.50	30.3	31.8	31.8	0.32	0.07	4.48	228	28	394
180	0.0304	47.1	3.8	7.14	6.52	7.61	30.9	32.5	32.5	0.48	0.06	1.42	244	31	431
200	0.0289	45.8	3.6	6.91	6.31	7.21	31.4	33.4	33.4	0.42	0.08	2.35	238	35	419
220	0.0281	45.1	3.6	7.32	6.73	7.68	30.9	33.2	33.2	1.38	0.12	7.29	232	25	400
240	0.0281	45.1	3.6	7.20	6.44	7.72	30.5	32.8	32.8	1.02	0.22	1.44	257	33	404
260	0.0281	45.1	3.6	7.25	6.40	7.54	30.4	32.6	32.6	0.85	0.08	3.40	248	32	404

ตารางที่ ค1ผลการเดินระบบแบบต่อเนื่องหลังการล้างเมมเบรน(ต่อ)

เวลา, ชั่วโมง	Flux, (m^3/m^2-hr)	%Recovery	Pressure , (bar)	pH			Temp			Turbidity			Conductivity		
				Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return
280	0.0273	44.4	3.6	7.23	6.37	7.36	30.8	32.8	32.8	1.80	0.07	4.20	237	30	402
300	0.0266	44.3	3.6	7.26	6.40	7.68	29.7	31.6	31.6	0.59	0.20	4.70	231	29	384
320	0.0266	45.5	3.6	7.30	6.41	7.60	29.5	30.5	30.5	1.55	0.07	3.70	227	28	392
340	0.0266	45.5	3.6	7.12	6.46	7.53	28.5	31.0	31.0	0.52	0.15	6.60	241	30	420
360	0.0243	45.5	3.6	7.14	6.45	7.55	29.0	30.8	30.8	0.48	0.09	6.58	245	29	451
380	0.0228	45.5	3.5	7.08	6.38	7.58	28.5	30.6	30.6	0.52	0.08	6.7	239	30	476
390	0.0213	45.5	3.5	7.15	6.42	7.62	28.8	30.5	30.5	0.54	0.09	6.9	250	31	492

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑1 ผลการเดินระบบแบบต่อเนื่องหลังการล้างเมมเบรน(ต่อ)

เวลา, ชั่วโมง	DOC, (mg/L)			UV254, (cm ⁻¹)			Total Hardness, (mg/L as CaCO ₃)			Calcium Hardness, (mg/L as CaCO ₃)			Magnesium Hardness, (mg/L as CaCO ₃)		
	Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return
1	2.864	0.214	4.425	0.067	0.002	0.162	71.2	4.7	122.4	50.3	3.5	74.1	20.9	1.2	48.3
2	2.861	0.208	4.617	0.070	0.002	0.164	70.7	3.8	128.6	52.4	2.9	70.5	18.3	0.9	58.1
4	2.874	0.221	4.874	0.071	0.002	0.169	71.7	3.5	129.3	51.6	2.7	72.5	20.1	0.8	56.8
8	2.915	0.224	4.971	0.072	0.002	0.171	72.5	4.2	132.4	52.1	3.1	71.8	20.4	1.1	60.6
12	2.952	0.238	5.248	0.074	0.002	0.182	71.4	3.8	138.7	50.4	2.8	72.6	21.0	1.0	66.1
20	2.982	0.247	5.654	0.077	0.002	0.196	70.4	4.5	147.5	50.0	4.1	100.0	20.4	0.4	47.5
40	3.394	0.521	5.066	0.070	0.005	0.175	92.6	3.5	126.3	55.6	2.8	77.8	37.0	0.7	48.5
60	3.088	0.410	5.078	0.069	0.004	0.178	77.8	3.7	148.2	68.6	3.0	72.2	9.2	0.7	76.0
80	3.400	0.276	4.476	0.074	0.003	0.143	76.0	3.4	143.4	51.9	2.8	98.2	24.1	0.6	45.2
100	3.522	0.298	6.021	0.067	0.003	0.212	77.1	6.7	141.5	53.7	3.7	96.3	23.4	3.0	45.2
120	3.424	0.248	5.297	0.072	0.002	0.184	78.4	4.5	142.5	54.7	3.4	98.4	23.7	1.1	44.1
140	3.686	0.362	4.954	0.076	0.004	0.166	77.8	3.7	143.0	53.7	2.5	96.3	24.1	1.2	46.7
160	3.100	0.260	4.985	0.068	0.003	0.167	81.5	3.7	144.5	48.2	0.7	98.6	33.3	3.0	45.9
180	3.758	0.308	4.526	0.071	0.003	0.149	66.7	1.8	159.3	48.2	0.7	137.0	18.5	1.1	22.3
200	3.616	0.275	4.630	0.067	0.003	0.142	74.1	3.0	137.1	48.2	1.7	100.0	25.9	1.3	37.1
220	3.562	0.285	6.026	0.076	0.003	0.201	78.4	3.7	142.5	46.3	2.7	103.7	32.1	1.0	38.8
240	3.654	0.343	4.872	0.097	0.003	0.164	87.1	3.0	145.6	59.3	0.8	100.0	27.8	2.2	45.6

ตารางที่ ค1ผลการเดินระบบแบบต่อเนื่องหลังการล้างเมมเบรน(ต่อ)

เวลา, ชั่วโมง	DOC, (mg/L)			UV254, (cm ⁻¹)			Total Hardness , (mg/L as CaCO ₃)			Calcium Hardness, (mg/L as CaCO ₃)			Magnesium Hardness, (mg/L as CaCO ₃)		
	Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return	Influent	Permeate	Return
260	3.545	0.294	4.867	0.079	0.003	0.165	85.2	3.7	157.5	51.9	1.5	100.0	33.3	2.2	57.5
280	3.964	0.205	4.762	0.080	0.002	0.142	64.1	2.2	92.6	42.6	0.8	61.4	21.5	1.4	31.2
300	3.434	0.158	6.062	0.076	0.002	0.170	81.5	2.3	128.2	46.0	0.8	98.2	35.5	1.5	30.0
320	3.642	0.285	6.244	0.080	0.003	0.252	70.4	4.1	137.1	46.3	1.4	94.5	24.1	2.7	42.6
340	3.878	0.342	6.322	0.070	0.004	0.506	82.6	4.5	142.5	42.5	3.2	100.4	40.1	1.3	42.1
360	3.73	0.351	6.351	0.074	0.004	0.542	85.7	6.5	145.0	54.2	2.9	101.2	31.5	3.6	43.8
380	3.864	0.36	6.384	0.079	0.004	0.56	86.0	7.2	158.0	57.8	3.7	108.0	28.2	3.5	50.0
390	3.792	0.385	6.42	0.081	0.005	0.568	84.2	7.8	165.0	59.3	4.0	110.5	24.9	3.8	54.5

สถาบันวิทยบริการ
 าลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ข้อมูลผลการเดินระบบต่อเนื่องเมื่อใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ

Pre-treatment

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง1 ผลการเดินระบบต่อเนื่องเมื่อใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment

ชั่วโมงที่	Flux, (m ³ /m ² -hr)	%Recovery	Pressure , (bar)	pH				Temp ,(°C)				Turbidity ,(NTU)				ร้อยละ การกำจัด
				Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	
1	0.0342	50	4	7.25	7.3	6.8	7.4	29	30	33	33	7	0.24	0.05	0.56	89.92
2	0.0342	50	4	7.26	7.22	6.76	7.44	28.7	28.8	31	31	5.9	0.2	0.09	0.3	67.86
3	0.0342	50	4	7.3	7.28	6.9	7.56	30.3	29.7	31.7	31.7	5.5	0.2	0.07	0.2	65.00
4	0.0342	50	4	7.27	7.3	6.8	7.6	30.4	30.6	33.1	33.1	6.8	0.39	0.1	0.46	77.58
6	0.0342	50	4	7.24	7.17	6.72	7.5	30	29.8	32.4	32.4	6.2	0.4	0.06	0.5	87.50
8	0.0342	50	4	7.3	7.16	6.43	7.28	28	28	31	31	6.3	0.52	0.1	1.1	89.84
10	0.0342	50	4	7.28	7.17	6.48	7.32	29.5	29.3	30.8	30.8	5.8	0.54	0.08	1.5	93.88
12	0.0342	50	4	7.25	7.14	6.45	7.39	28.3	28	30	30	5.5	0.49	0.09	0.8	87.80
14	0.0342	50	4	7.21	7.1	6.44	7.35	30	29.5	31.2	31.2	5.2	0.45	0.07	1.2	93.33
16	0.0342	50	4	7.15	7.08	6.46	7.36	30.4	30.2	31.8	31.8	4.9	0.42	0.06	0.8	91.71
18	0.0342	50	4	7.12	7.05	6.42	7.38	30.8	30.5	32.5	32.5	5.1	0.52	0.09	0.6	84.59
20	0.0342	50	4	7.06	7.02	6.44	7.37	31.3	31	33.2	33.2	4.8	0.48	0.1	0.3	70.24
24	0.0342	50	4	7.16	7.06	6.43	7.35	30.7	30.5	32	32	4.6	0.45	0.09	0.31	73.37
28	0.0342	50	4	7.2	7.01	6.49	7.38	29.8	29.6	31.1	31.1	4.9	0.48	0.08	0.42	81.48
32	0.0342	50	4	7.14	7.15	6.42	7.4	29.6	30.6	32.1	32.1	4.7	0.46	0.06	0.5	87.80
36	0.0342	50	4	7.18	7.12	6.44	7.41	30.8	30.5	32.6	32.6	5.1	0.52	0.09	0.54	83.21

ตารางที่ ๑1 ผลการเดินระบบต่อเนื่องเมื่อใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment (ต่อ)

ชั่วโมงที่	Flux, (m^3/m^2-hr)	%Recovery	Pressure , (bar)	pH				Temp ,(°C)				Turbidity ,(NTU)				ร้อยละ การกำจัด
				Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	
40	0.0342	50	4	7.3	7.11	6.48	7.48	31.1	31.1	33.1	33.1	5.5	0.67	0.1	0.3	73.26
60	0.0342	50	4	7.15	7	6.34	7.4	30.2	30.3	32.5	32.5	7.7	0.42	0.09	0.46	80.09
80	0.0327	48.9	3.8	7.04	6.9	6.37	7.42	31	30	32.5	32.5	5	0.43	0.08	0.46	82.38
100	0.0327	48.9	3.8	7.18	7.05	6.39	7.49	31.7	31.4	32.9	32.9	5.3	0.5	0.08	0.9	90.24
120	0.0327	48.9	3.8	7.16	7.14	6.45	7.45	31.2	29.8	31.3	31.3	6.1	0.62	0.09	1.8	94.25
140	0.0327	48.9	3.8	7.08	7.11	6.46	7.38	30	29.6	31.1	31.1	6.7	0.65	0.1	1.6	92.91
160	0.0327	48.9	3.8	7.05	7.07	6.41	7.41	30.7	30.5	32	32	5.9	0.58	0.08	1.5	93.92
180	0.0304	47.1	3.6	7.02	6.98	6.32	7.39	30.1	29.9	31.4	31.4	6.2	0.61	0.08	1.9	95.13
200	0.0289	45.8	3.6	7.15	7.12	6.44	7.52	29.5	29.3	30.8	30.8	4.8	0.5	0.06	2.4	97.03
220	0.0289	45.8	3.6	7.02	6.9	6.38	7.4	29.9	29.7	31.2	31.2	5.4	0.54	0.07	2.5	96.68
240	0.0289	45.8	3.6	7.11	7.08	6.42	7.44	30.4	30.2	31.7	31.7	5.7	0.53	0.06	2.8	97.44
260	0.0289	45.8	3.6	7.14	7.15	6.48	7.52	31	30.7	32.2	32.2	5.2	0.51	0.07	3.1	97.29
280	0.0289	45.8	3.6	7.12	7.1	6.47	7.48	30.8	30.6	32.2	32.2	4.9	0.48	0.05	3.5	98.27
300	0.0289	45.8	3.6	7.09	7.04	6.39	7.45	30.3	30.1	31.6	31.6	5.7	0.56	0.08	3.4	97.18
320	0.0289	45.8	3.6	7.2	7.18	6.46	7.53	29.7	29.7	31.2	31.2	5.9	0.58	0.06	3.6	98.00
340	0.0273	44.4	3.5	7.17	7.13	6.44	7.55	30.4	30.2	31.7	31.7	5.5	0.53	0.08	4.1	97.64
360	0.0273	44.4	3.5	7.1	7.07	6.4	7.51	31.2	31	31.8	31.8	5.8	0.55	0.08	4.2	97.69

ตารางที่ ง1 ผลการเดินระบบต่อเนื่องเมื่อใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment (ต่อ)

ชั่วโมงที่	Flux, (m^3/m^2-hr)	%Recovery	Pressure , (bar)	pH				Temp ,(°C)				Turbidity ,(NTU)				
				Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด
380	0.0266	43.8	3.5	7.14	7.11	6.45	7.54	30	29.8	31.3	31.3	6.2	0.59	0.09	4.8	97.73
390	0.0266	43.8	3.5	7.12	7.1	6.38	7.52	29	28.8	30.5	30.5	6.5	0.62	0.09	5	97.82

ตารางที่ ง1 ผลการเดินระบบต่อเนื่องเมื่อใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment (ต่อ)

ชั่วโมงที่	DOC, (mg/L)					UV254, (cm^{-1})					Conductivity ,(μs/cm)				
	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด
1	3.014	2.861	0.228	4.475	94.50894	0.15	0.073	0.001	0.159	99.29478	236	226	35	400	90.42
2	2.995	2.884	0.217	4.462	94.76654	0.12	0.071	0.002	0.154	98.5444	230	224	30	400	91.78
3	3.087	3.024	0.225	4.334	94.47446	0.122	0.08	0.002	0.146	98.49398	252	247	34	433	91.41
4	3.12	3.03	0.284	4.584	93.35393	0.142	0.082	0.003	0.166	97.98928	253	251	34	444	91.61
6	3.142	3.058	0.261	4.612	93.93193	0.138	0.085	0.002	0.171	98.69961	259	255	36	461	91.42
8	3.315	3.241	0.223	4.705	94.94583	0.143	0.093	0.002	0.181	98.77601	258	254	35	452	91.51
10	3.124	3.061	0.242	4.647	94.41083	0.122	0.088	0.002	0.174	98.72449	254	254	34	453	91.77
12	3.13	3.032	0.233	4.634	94.59848	0.12	0.085	0.002	0.172	98.70634	256	255	35	458	91.61
14	3.127	3.025	0.274	4.628	93.63885	0.117	0.080	0.002	0.171	98.6911	252	251	32	455	92.27
16	3.04	2.984	0.243	4.592	94.30967	0.116	0.077	0.002	0.168	98.66489	255	255	34	457	91.84
18	2.981	2.886	0.236	4.541	94.3943	0.114	0.074	0.002	0.165	98.6376	259	258	35	451	91.51

ตารางที่ ง1 ผลการเดินระบบต่อเนื่องเมื่อใช้ระบบไมโครฟิเดรชันเป็นระบบ Pre-treatment (ต่อ)

ชั่วโมงที่	DOC, (mg/L)					UV254, (cm ⁻¹)					Conductivity ,(µs/cm)				
	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด
20	2.794	2.745	0.184	4.311	95.39747	0.101	0.067	0.001	0.143	99.21753	260	259	34	470	92.05
24	2.984	2.886	0.224	4.562	94.70048	0.112	0.071	0.002	0.155	98.55282	257	255	33	467	92.23
28	2.951	2.872	0.225	4.524	94.63468	0.11	0.07	0.002	0.152	98.52507	251	250	31	455	92.51
32	2.963	2.887	0.232	4.589	94.53938	0.113	0.074	0.002	0.164	98.63014	248	247	30	449	92.68
36	2.98	2.942	0.245	4.594	94.25368	0.117	0.076	0.002	0.168	98.6631	246	246	30	442	92.55
40	3.14	3.012	0.252	4.551	94.06109	0.119	0.08	0.002	0.156	98.57955	243	242	29	439	92.74
60	3.175	3.054	0.264	4.542	93.78004	0.124	0.083	0.002	0.156	98.58557	230	229	27	414	92.84
80	2.994	2.891	0.234	4.528	94.42937	0.131	0.074	0.002	0.162	98.61496	238	237	28	427	92.80
100	2.991	2.885	0.214	4.534	94.90985	0.122	0.072	0.002	0.161	98.60335	242	241	28	443	93.05
120	3.041	2.954	0.243	4.62	94.33144	0.119	0.078	0.002	0.17	98.68074	241	241	29	446	92.84
140	3.01	2.912	0.225	4.611	94.73216	0.118	0.075	0.002	0.167	98.6541	240	240	28	438	92.97
160	2.964	2.898	0.231	4.675	94.65228	0.115	0.073	0.002	0.163	98.62069	237	237	28	428	92.82
180	3.121	3.01	0.252	4.825	94.35231	0.118	0.079	0.002	0.169	98.6755	234	233	27	422	92.97
200	3.043	2.984	0.237	4.822	94.67942	0.117	0.078	0.002	0.167	98.65952	239	239	28	429	92.84
220	3.211	3.113	0.281	5.734	94.60632	0.121	0.081	0.002	0.171	98.69281	241	241	29	433	92.65
240	3.041	2.914	0.236	5.661	95.38305	0.12	0.075	0.002	0.166	98.64682	244	243	30	440	92.51
260	2.94	2.845	0.228	5.784	95.61218	0.114	0.072	0.002	0.163	98.61878	245	245	30	446	92.61

ตารางที่ ง1 ผลการเดินระบบต่อเนื่องเมื่อใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment (ต่อ)

ชั่วโมงที่	DOC, (mg/L)				UV254, (cm ⁻¹)						Conductivity ,(μs/cm)				
	Influent	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ	Influent	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ	Influent	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ
	ที่เข้า MF				การกำจัด	ที่เข้า MF				การกำจัด	ที่เข้า MF				การกำจัด
280	3.05	2.972	0.239	5.82	95.44797	0.122	0.077	0.002	0.167	98.65772	248	248	31	450	92.43
300	3.084	2.92	0.225	6.021	95.83395	0.119	0.074	0.002	0.204	98.8764	250	249	30	451	92.69
320	3.055	2.93	0.228	6.088	95.82142	0.119	0.078	0.002	0.223	98.96907	247	247	30	449	92.66
340	3.068	2.916	0.23	6.146	95.81818	0.115	0.076	0.002	0.257	99.0942	243	241	31	444	92.32
360	3.115	3.087	0.284	6.184	94.89631	0.123	0.081	0.003	0.281	98.75519	240	240	29	438	92.72
380	3.289	3.214	0.305	6.211	94.56483	0.12	0.082	0.003	0.324	98.91147	238	238	30	435	92.42
390	3.34	3.28	0.32	6.22	94.31818	0.115	0.081	0.003	0.328	98.92319	240	240	31	442	92.28

ตารางที่ ง1 ผลการเดินระบบต่อเนื่องเมื่อใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment (ต่อ)

ชั่วโมงที่	Total Hardness ,(mg/L as CaCO ₃)					Calcium Hardness,(mg/L as CaCO ₃)					Magnesium Hardness,(mg/L as CaCO ₃)				
	Influent	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ	Influent	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ	Influent	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ
	ที่เข้า MF				การกำจัด	ที่เข้า MF				การกำจัด	ที่เข้า MF				การกำจัด
1	77.8	68.2	3	104.5	96.91	43.4	39	1.6	70.4	97.50	34.4	29.2	1.4	34.1	95.77
2	75.2	69.3	3.2	110.5	96.87	42	38.5	2.1	72.4	96.80	33.2	30.8	1.1	38.1	97.00
3	78.9	70.2	3.8	112.6	96.35	44.5	39.4	2.4	73.1	96.38	34.4	30.8	1.4	39.5	96.29
4	80.5	73.4	4	113.7	96.21	47.2	42.9	2.7	75.8	96.10	33.3	30.5	1.3	37.9	96.43
6	82.4	72.9	3.9	116.5	96.38	46.8	41.6	2.5	74.2	96.31	35.6	31.3	1.4	42.3	96.51
8	81.6	76.5	4.2	118.1	96.17	48.3	45.2	3.1	74.9	95.50	33.3	31.3	1.1	43.2	97.31

ตารางที่ ง1 ผลการเดินระบบต่อเนื่องเมื่อใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment (ต่อ)

ชั่วโมงที่	Total Hardness ,(mg/L as CaCO ₃)					Calcium Hardness,(mg/L as CaCO ₃)					Magnesium Hardness,(mg/L as CaCO ₃)				
	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด
10	83.2	78.5	4.9	119.5	95.60	49	45.5	3.4	75.8	95.12	34.2	33.0	1.5	43.7	96.39
12	86.9	79.1	5	119.8	95.52	47.8	44.8	3.7	78.2	94.83	39.1	34.3	1.3	41.6	96.76
14	87.1	80.5	5.3	120	95.27	52.3	48	3.7	80.5	95.00	34.8	32.5	1.6	39.5	95.80
16	83.4	78.7	4.7	120.2	95.80	49.4	45.6	3.3	81.5	95.56	34	33.1	1.4	38.7	96.27
18	95.3	75.8	4.5	120.1	95.95	56.4	42	3.4	80.9	95.35	38.9	33.8	1.1	39.2	97.11
20	103.7	69.7	8.5	120.4	92.29	69.3	39.2	5.8	85.9	92.42	34.4	30.5	2.7	34.5	91.99
24	98.6	73.5	4.9	123.4	95.68	58.6	42.1	3.1	81.4	95.78	40	31.4	1.8	42	95.49
28	96.3	75.1	5.2	126.8	95.53	57.2	43.2	3.1	82.5	95.85	39.1	31.9	2.1	44.3	94.98
32	91.4	77.9	5	128.9	95.79	54.3	42.8	3.7	83.4	95.09	37.1	35.1	1.3	45.5	97.01
36	86.2	75.8	4.7	129.1	96.03	53.8	41.7	3.7	86.8	95.24	32.4	34.1	1	42.3	97.54
40	77.8	70.4	5.6	129.7	95.25	46.3	44.5	3.2	90.8	96.08	31.5	25.9	2.4	38.9	93.39
60	79.6	68.5	3.8	144.4	97.06	55.6	51.9	2.5	107.4	97.40	24.1	16.7	1.3	37.0	96.06
80	81.5	68.5	5.6	144.4	95.70	48.1	48.1	3.4	103.7	96.33	33.3	20.4	2.2	40.7	94.12
100	88.9	83.3	3.7	146.3	97.23	51.9	48.1	2.1	96.3	97.58	37.0	35.2	1.6	50	96.59
120	86.4	82.1	5.5	145.6	95.86	51.9	49.8	4.5	92.5	94.64	34.5	32.3	1	53.1	97.96
140	87.5	80.7	5.3	145.9	96.01	52.5	52.4	4.3	95.8	95.06	35	28.3	1	50.1	97.81
160	89.6	83.9	5.6	146.7	95.83	54.8	53.6	4.7	96.7	94.66	34.8	30.3	0.9	50	98.05
180	91.2	79.5	4.9	143.5	96.25	55.8	51.4	3.7	94.9	95.71	35.4	28.1	1.2	48.6	97.30

ตารางที่ ง1 ผลการเดินระบบต่อเนื่องเมื่อใช้ระบบไมโครฟิลเตรชันเป็นระบบ Pre-treatment (ต่อ)

ชั่วโมงที่	Total Hardness ,(mg/L as CaCO ₃)					Calcium Hardness,(mg/L as CaCO ₃)					Magnesium Hardness,(mg/L as CaCO ₃)				
	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด	Influent ที่เข้า MF	Influent	Permeate	Return	ร้อยละ การกำจัด
200	93.2	76.1	3.9	144.9	97.03	57.4	49.8	2.6	94.3	96.96	35.8	26.3	1.3	50.6	97.16
220	89.9	74.3	3.4	145.7	97.41	59.8	48.5	2.4	95.4	97.21	30.1	25.8	1	50.3	97.80
240	92.7	77.2	4.2	147.2	96.85	58.6	46.7	3.5	95.2	95.91	34.1	30.5	0.7	52	98.53
260	94.1	72.1	3.1	146.8	97.65	58.2	43.4	1.9	94.7	97.75	35.9	28.7	1.2	52.1	97.47
280	89.9	69.8	3	145.5	97.70	52.7	42.1	1.8	98.5	97.94	37.2	27.7	1.2	47	97.22
300	90.7	73.1	3.3	143.1	97.44	52.9	42.8	1.9	92.4	97.70	37.8	30.3	1.4	50.7	97.00
320	91.5	73.6	3.4	140.9	97.33	54.6	42.6	2.1	105.4	97.74	36.9	31.0	1.3	35.5	96.24
340	87.8	69.2	3.1	139.9	97.53	53.8	42.2	2	102.8	97.79	34	27.0	1.1	37.1	96.86
360	88.2	69.4	3.2	140.8	97.47	55.6	43.6	1.9	106.4	97.98	32.6	25.8	1.3	34.4	96.02
380	92.3	70.8	3.6	160.5	97.47	57.9	46.2	2.2	110.5	97.75	34.4	24.6	1.4	50	96.88
390	92.5	70.5	4.5	161	96.85	58	47	3	112	96.97	34.5	23.5	1.5	49	96.58

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

ข้อมูลผลการศึกษาคำหาความต้องการคลอรีน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑1 ผลการทดลองหาความต้องการคลอรีนของน้ำชั่วโมงที่ 80

ปริมาณคลอรีนที่ใช้, มก./ล	ปริมาณคลอรีนตกค้าง, มก./ล.		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำ permeate	น้ำ concentrate
0	0	0	0
0.25	0.2	0.2	0.15
0.50	0.35	0.45	0.2
0.75	0.55	0.65	0.25
1.00	0.6	0.85	0.3
1.25	0.65	1.05	0.25
1.50	0.6	1.3	0.2
1.75	0.55	1.5	0.15
2.00	0.7	1.7	0.2
2.50	1.1	2.24	0.35
3.00	1.5	2.8	0.7
3.50	2	3.2	1.05
4.00	2.6	3.65	1.5

ตารางที่ ๑2 ผลการทดลองหาความต้องการคลอรีนของน้ำชั่วโมงที่ 160

ปริมาณคลอรีนที่ใช้, มก./ล	ปริมาณคลอรีนตกค้าง, มก./ล.		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำ permeate	น้ำ concentrate
0	0	0	0
0.25	0.16	0.23	0.13
0.50	0.35	0.45	0.2
0.75	0.55	0.65	0.24
1.00	0.64	0.88	0.3
1.25	0.75	1.1	0.35
1.50	0.8	1.27	0.45
1.75	0.72	1.5	0.3
2.00	0.58	1.7	0.2
2.50	1.1	2.25	0.3
3.00	1.51	2.8	0.65
3.50	2	3.2	1
4.00	2.55	3.75	1.45

ตารางที่ ๑3 ผลการทดลองหาความต้องการคลอรีนของน้ำชั่วโมงที่ 240

ปริมาณคลอรีนที่ใช้, มก./ล	ปริมาณคลอรีนตกค้าง, มก./ล.		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำ permeate	น้ำ concentrate
0	0	0	0
0.25	0.15	0.2	0.1
0.50	0.3	0.43	0.18
0.75	0.5	0.64	0.22
1.00	0.6	0.8	0.25
1.25	0.62	1.02	0.22
1.50	0.55	1.25	0.2
1.75	0.5	1.45	0.15
2.00	0.6	1.68	0.18
2.50	1	2.2	0.3
3.00	1.45	2.75	0.65
3.50	2	3.15	1
4.00	2.5	3.65	1.45


ตารางที่ ๑4 ผลการทดลองหาความต้องการคลอรีนของน้ำชั่วโมงที่ 320

ปริมาณคลอรีนที่ใช้, มก./ล	ปริมาณคลอรีนตกค้าง, มก./ล.		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำ permeate	น้ำ concentrate
0	0	0	0
0.25	0.16	0.2	0.11
0.50	0.35	0.41	0.18
0.75	0.55	0.62	0.22
1.00	0.64	0.78	0.28
1.25	0.75	1	0.35
1.50	0.8	1.22	0.42
1.75	0.72	1.44	0.3
2.00	0.58	1.65	0.2
2.50	1.1	2.1	0.3
3.00	1.51	2.65	0.64
3.50	2	3.1	1
4.00	2.55	3.6	1.42

ตารางที่ ๑5 ผลการทดลองหาความต้องการคลอรีนของน้ำชั่วโมงที่ 390

ปริมาณคลอรีนที่ใช้, มก./ล	ปริมาณคลอรีนตกค้าง, มก./ล.		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำ permeate	น้ำ concentrate
0	0	0	0
0.25	0.18	0.22	0.1
0.50	0.35	0.45	0.16
0.75	0.55	0.63	0.2
1.00	0.65	0.84	0.23
1.25	0.66	1.05	0.21
1.50	0.6	1.25	0.18
1.75	0.56	1.48	0.14
2.00	0.65	1.69	0.15
2.50	1.08	2.23	0.28
3.00	1.52	2.78	0.6
3.50	2	3.21	0.95
4.00	2.55	3.68	1.42

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



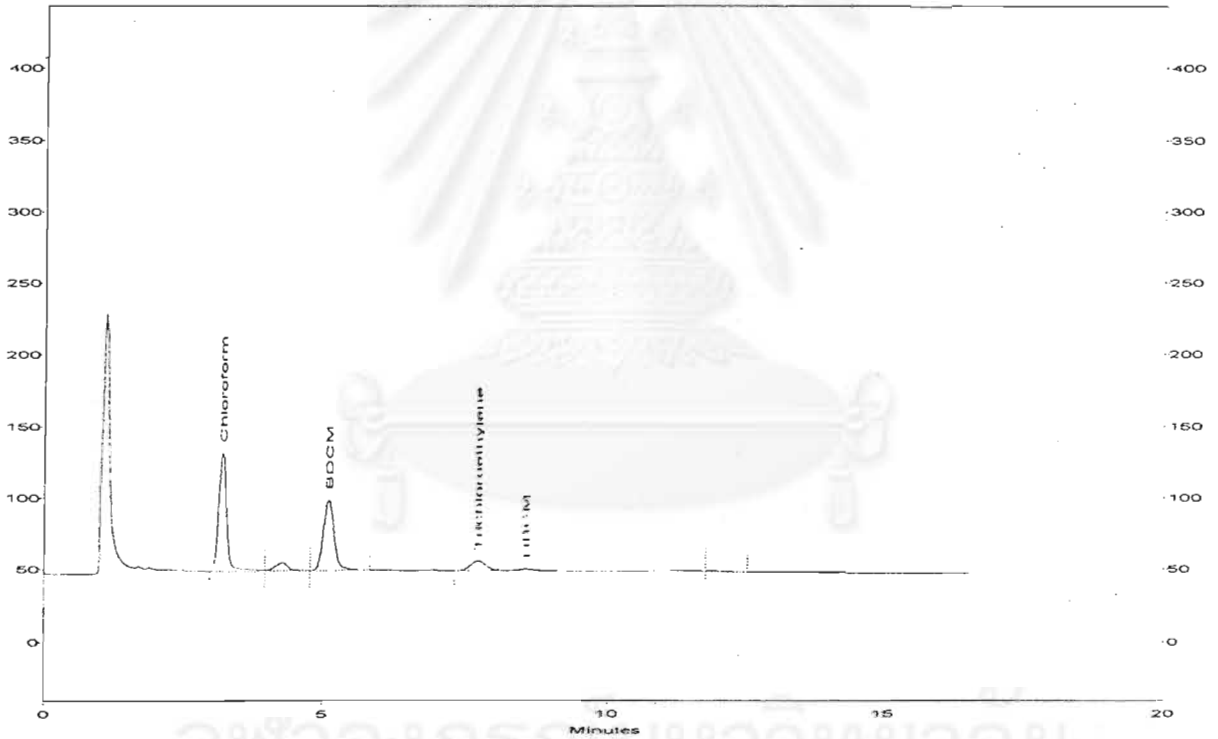
ภาคผนวก จ
ข้อมูลผลการวิเคราะห์ไตรชาโลมิเทน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.2	Chloroform	82685	82.3530
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
3	5.1	BDCM	49259	11.6822
4	7.8	Trichloroethyle	6738	42.5318
5	8.6	DBCM	1261	1.1308
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\thm\Thm127.41 -- Channel A

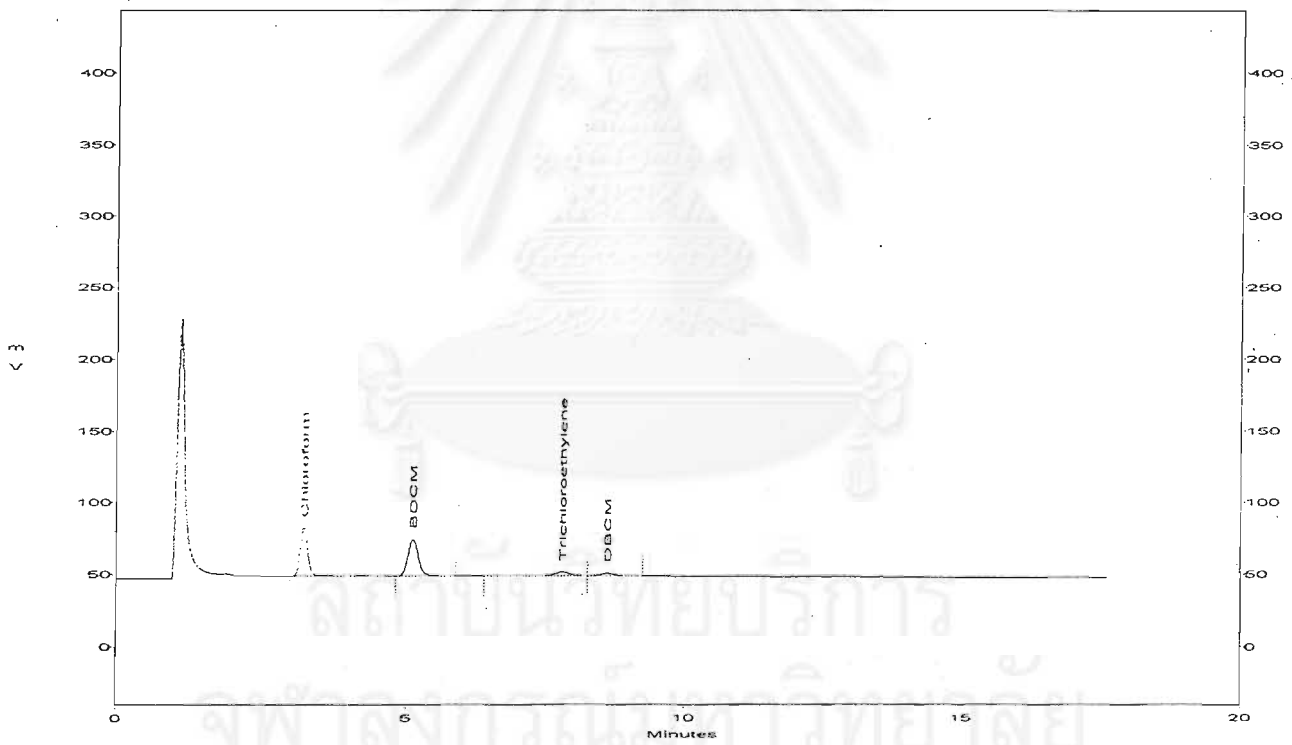


ผลการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำเข้าระบบชั่วโมงที่ 80

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.2	Chloroform	33589	25.9039
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
2	5.1	BDCM	25296	5.9991
3	7.8	Trichloroethyle	2577	18.1294
4	8.6	DBCM	1662	1.4904
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\thm\Thm127.37 -- Channel A

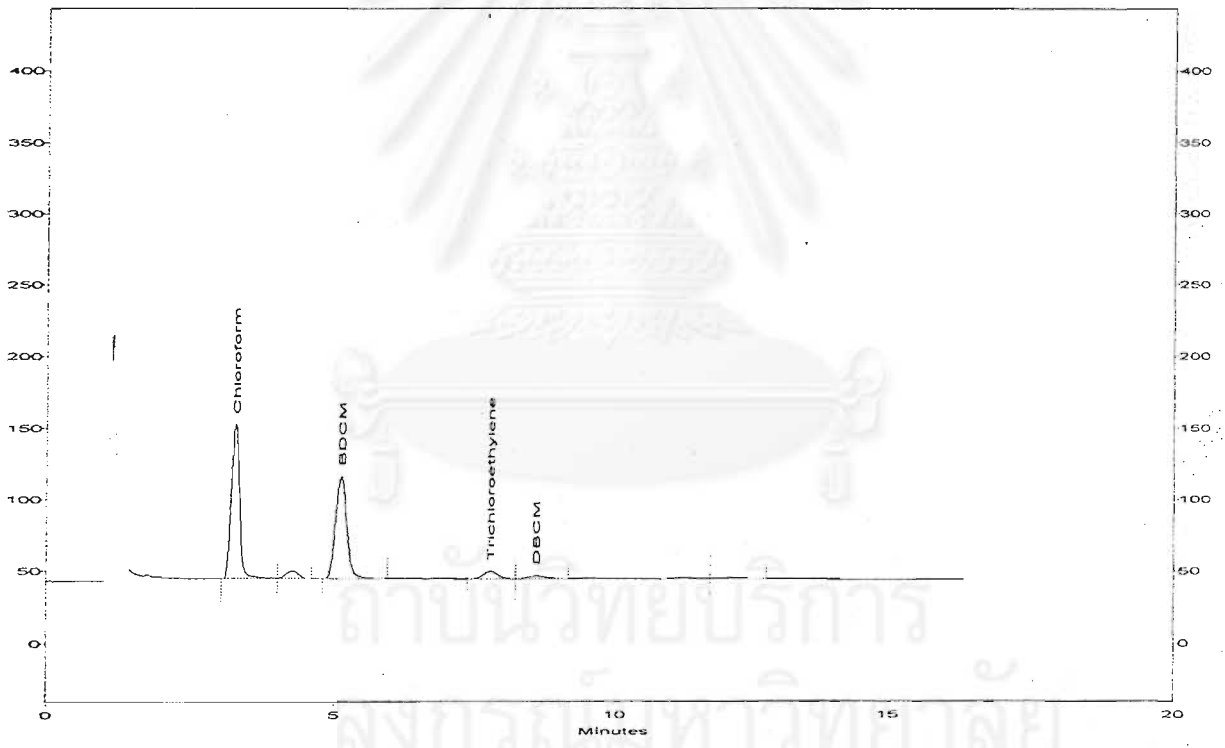


ผลการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำ permeate ชั่วโมงที่ 80

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.2	Chloroform	108118	121.6986
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
3	5.1	BDCM	71158	16.8757
4	7.8	Trichloroethyle	5144	33.3179
5	8.6	DBCM	1932	1.7325
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\thm\Thm127.10 -- Channel A

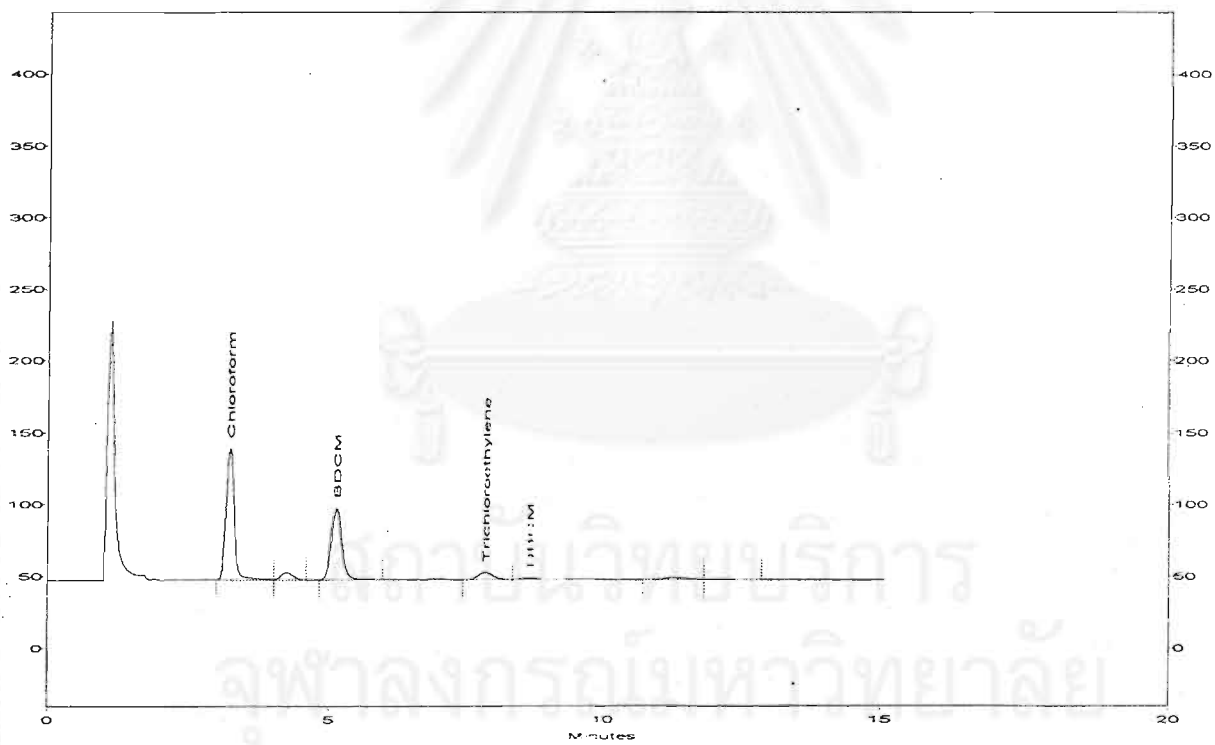


ผลการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำ concentrate ชั่วโมงที่ 80

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.3	Chloroform	91751	96.3784
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
3	5.1	BDCM	49448	11.7270
4	7.8	Trichloroethyle	5002	32.4971
5	8.6	DBCM	1114	0.9990
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\hmr\Tm127.40 -- Channel A

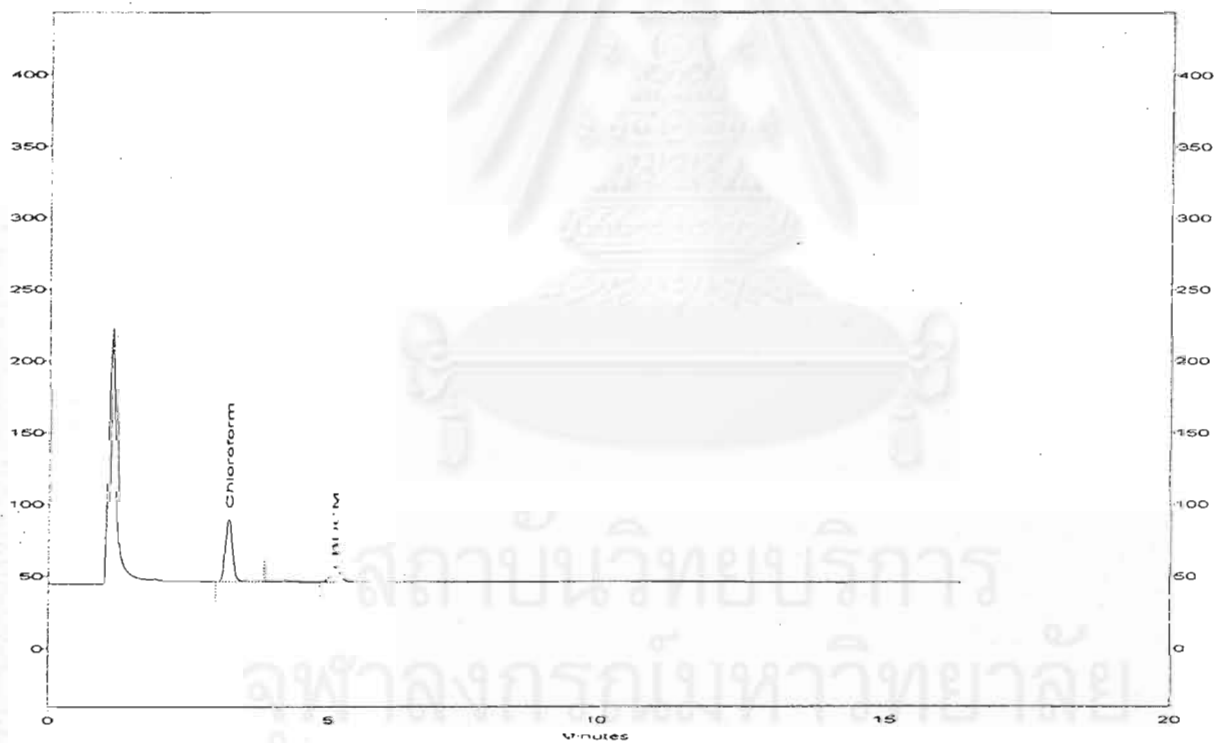


ผลการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำเข้าระบบชั่วโมงที่ 160

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.2	Chloroform	43276	33.3746
--	4.0	1,1,1Trichloroæ	0	0.0000
2	5.1	BDCM	10404	2.4674
--	7.5	Trichloroethyle	0	0.0000
--	8.8	DBCM	0	0.0000
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\Ch127.17 -- Channel A

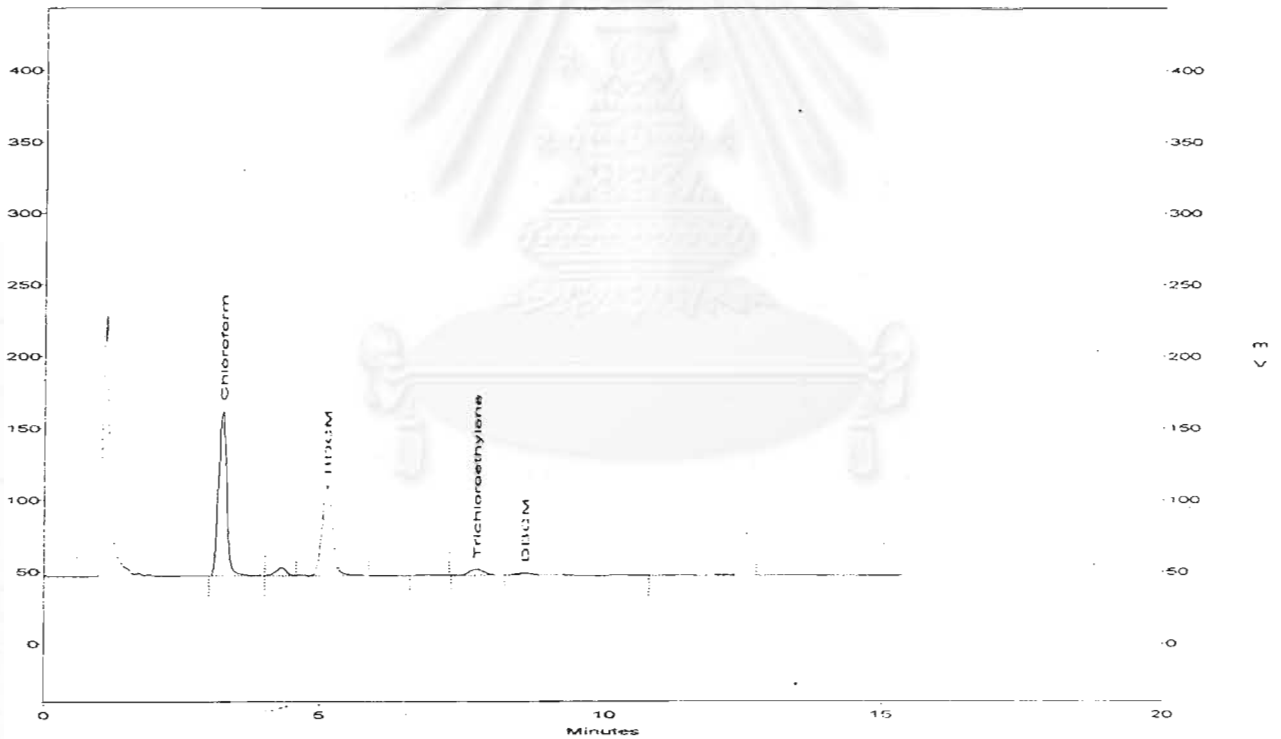


ผลการวิเคราะห์ค่าไดรฮาโดมีเทนของน้ำ cemente ชั่วโมงที่ 160

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.3	Chloroform	114205	131.1154
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
3	5.1	BDCM	63148	14.9760
5	7.8	Trichloroethyle	4087	27.2081
6	8.6	DBCM	1541	1.3819
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\thm\Thm127.42 -- Channel A

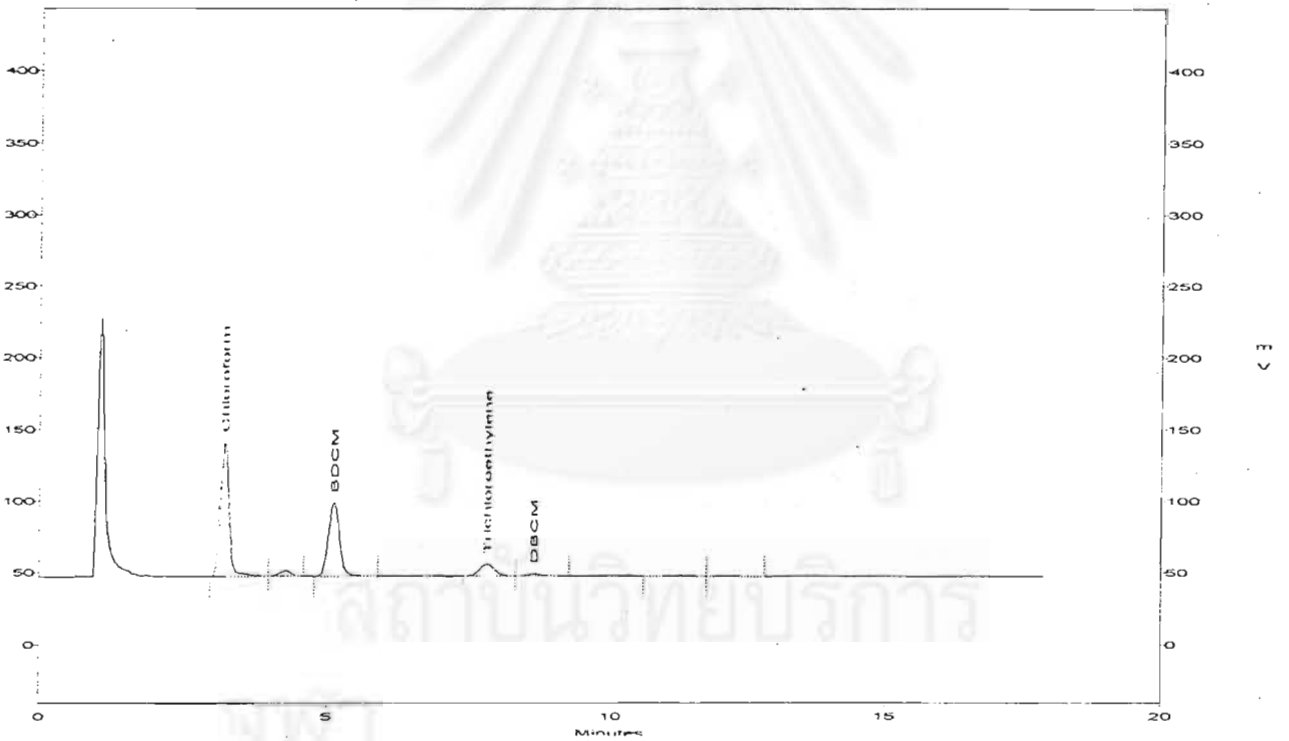


ผลการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำ concentrate ชั่วโมงที่ 160

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.2	Chloroform	93311	98.7918
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
3	5.1	BDCM	51148	12.1302
4	7.8	Trichloroethyle	8183	50.8844
5	8.6	DBCM	1298	1.1640
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\thm\Thm127.38 -- Channel A

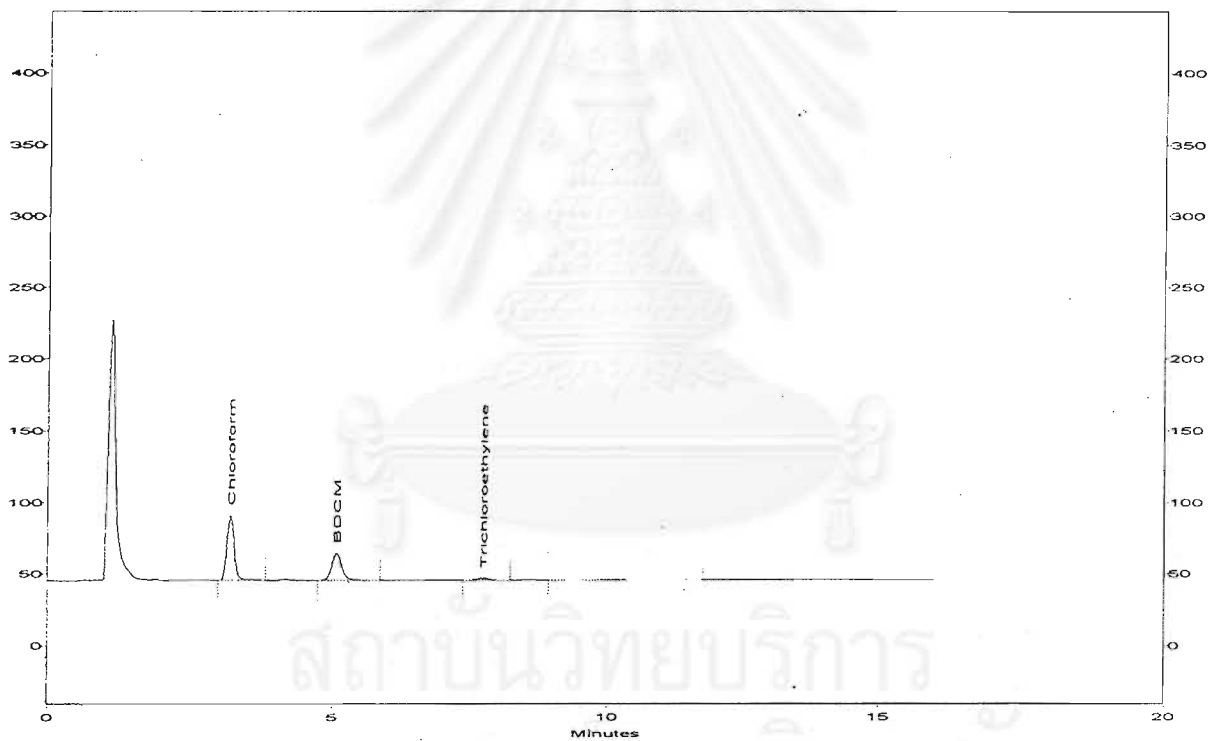


ผลการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำเข้าระบบชั่วโมงที่ 240

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.2	Chloroform	45341	34.9671
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
2	5.1	BDCM	18742	4.4448
3	7.7	Trichloroethyle	1528	10.6686
--	8.8	DBCM	0	0.0000
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\thm\Thm127.28 - Channel A

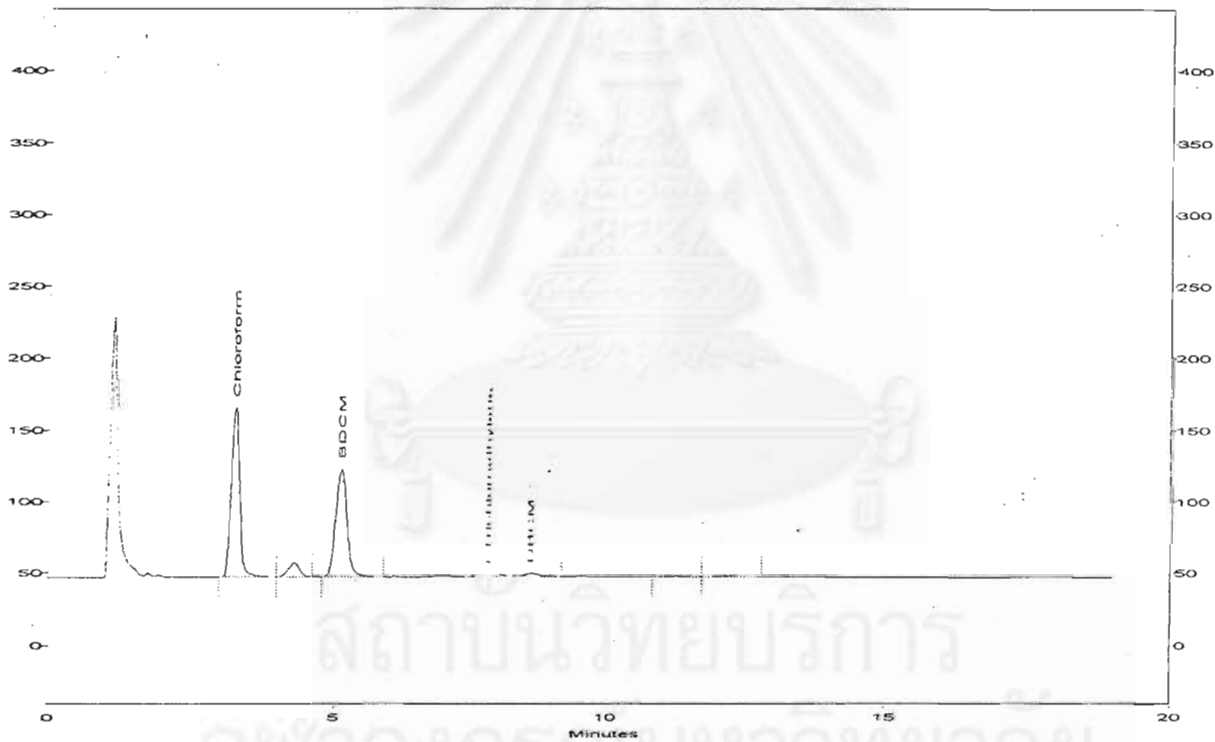


ผลการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำ permeate ชั่วโมงที่ 240

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.3	Chloroform	118350	137.5278
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
3	5.1	BDCM	75010	17.7892
4	7.8	Trichloroethyle	10500	64.2775
5	8.6	DBCM	1897	1.7011
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom4\hm\Tm127.35 -- Channel A

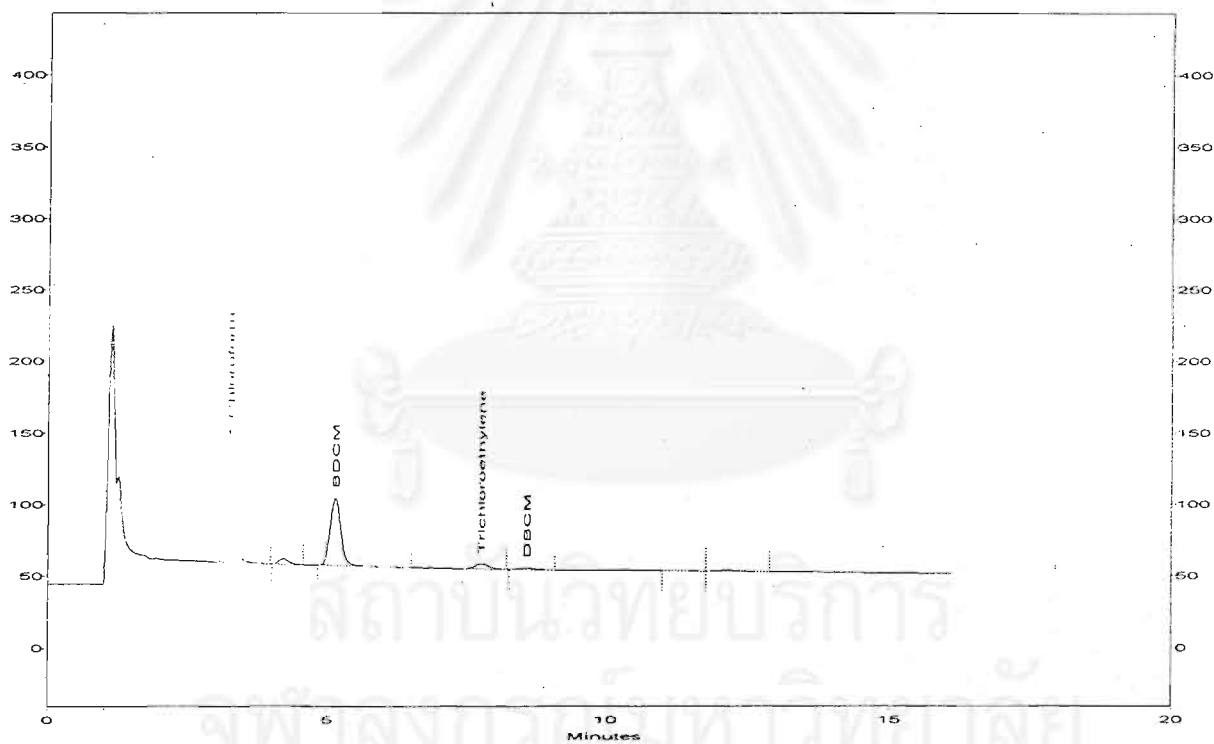


ผลการวิเคราะห์ค่าไดรฮาโดมิเทนร่งน้ำ concentrate ชั่วโมงที่ 240

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.3	Chloroform	93441	98.9929
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
3	5.1	BDCM	47286	11.2142
4	7.8	Trichloroethyle	3382	23.1329
5	8.6	DBCM	1071	0.9604
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\thm\Thm127.18 -- Channel A

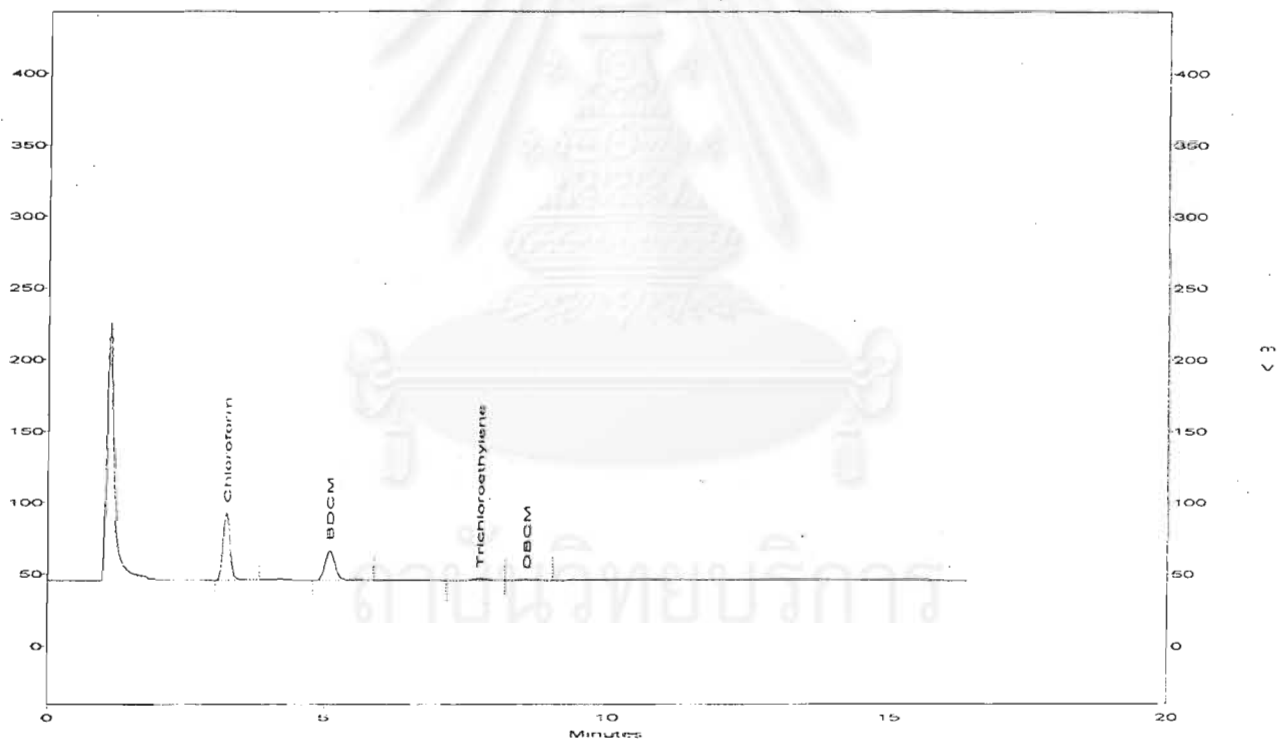


ผลการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำเข้าระบบชั่วโมงที่ 320

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.2	Chloroform	46471	35.8386
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
2	5.1	BDCM	20190	4.7882
3	7.8	Trichloroethyle	1211	8.4449
4	8.6	DBCM	538	0.4824
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom4\hm\Tdm127.23 -- Channel A

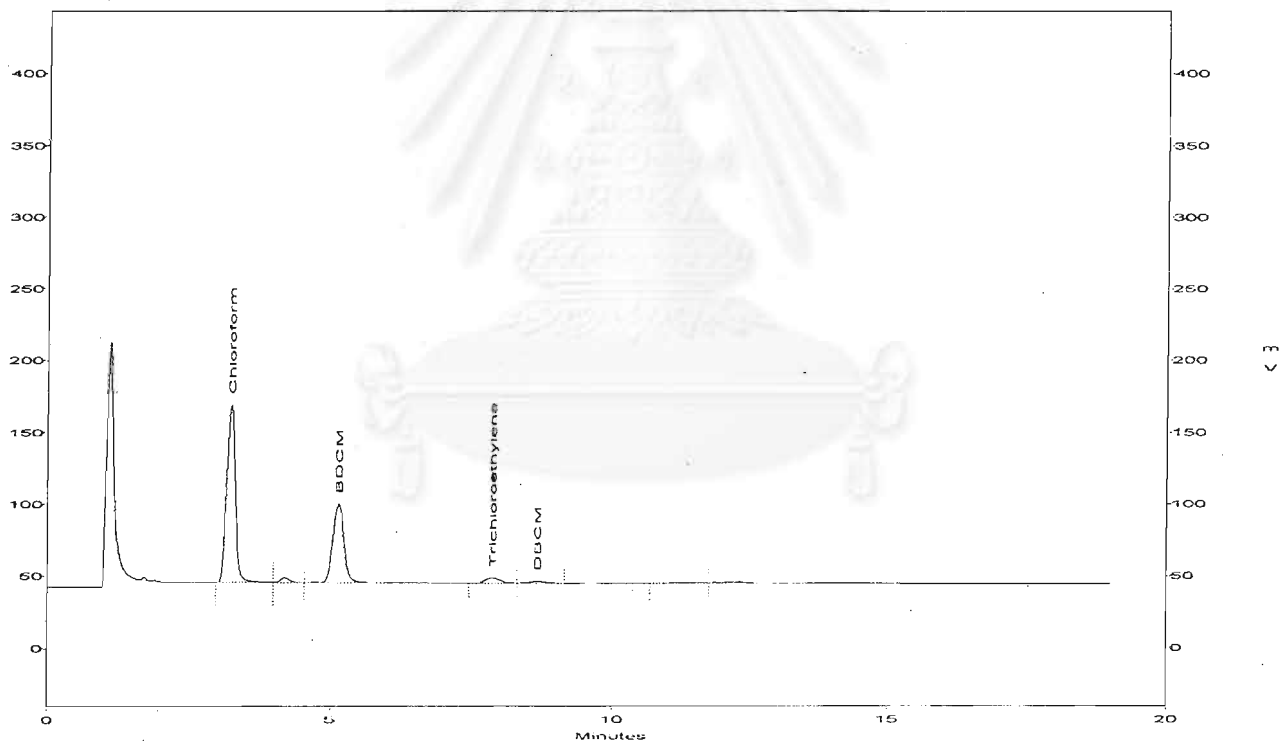


ผลการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำ permeate ชั่วโมงที่ 320

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.3	Chloroform	123931	146.1618
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
3	5.1	BDCM	54790	12.9939
4	7.8	Trichloroethyle	3597	24.3757
5	8.6	DBCM	1128	1.0115
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\hm\Tm127.4 -- Channel A

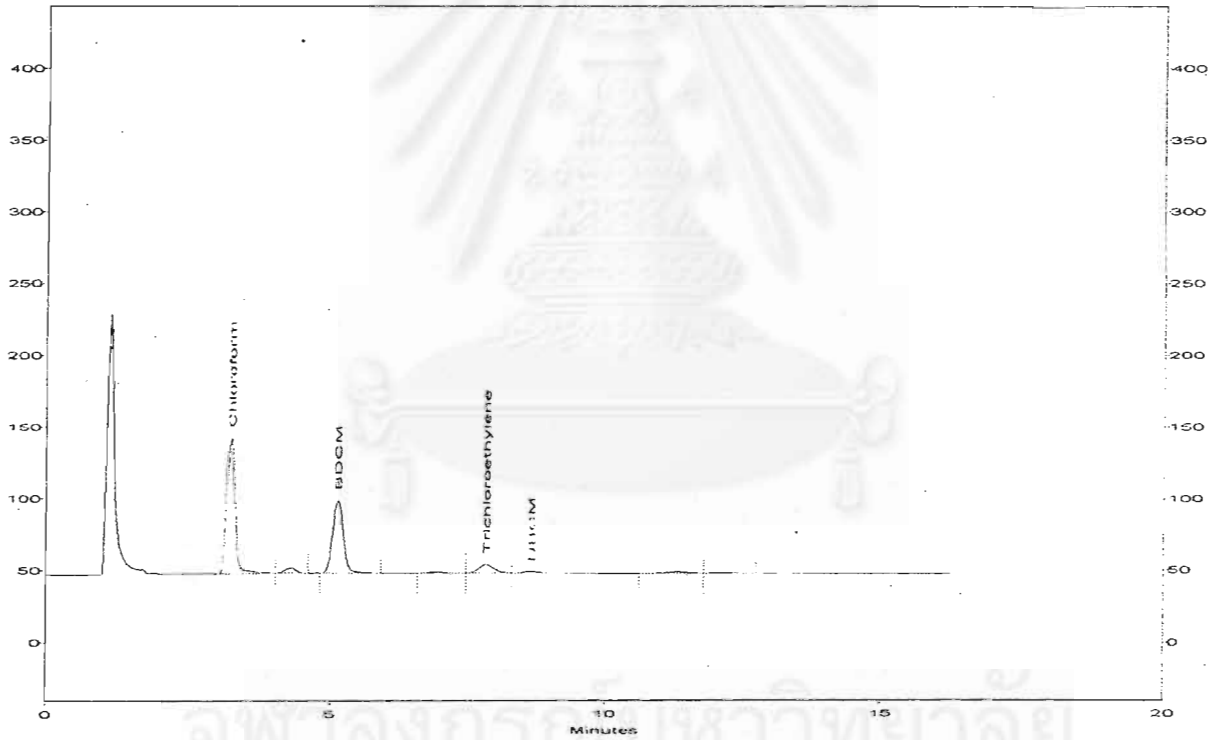


ผลการวิเคราะห์ค่าไดรสาโลมีเทนของน้ำ concentrate ชั่วโมงที่ 320

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.3	Chloroform	94911	101.2670
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
3	5.1	BDCM	51048	12.1064
5	7.8	Trichloroethyle	6211	39.4855
6	8.6	DBCM	1088	0.9757
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\hm\Thm127.39 -- Channel A

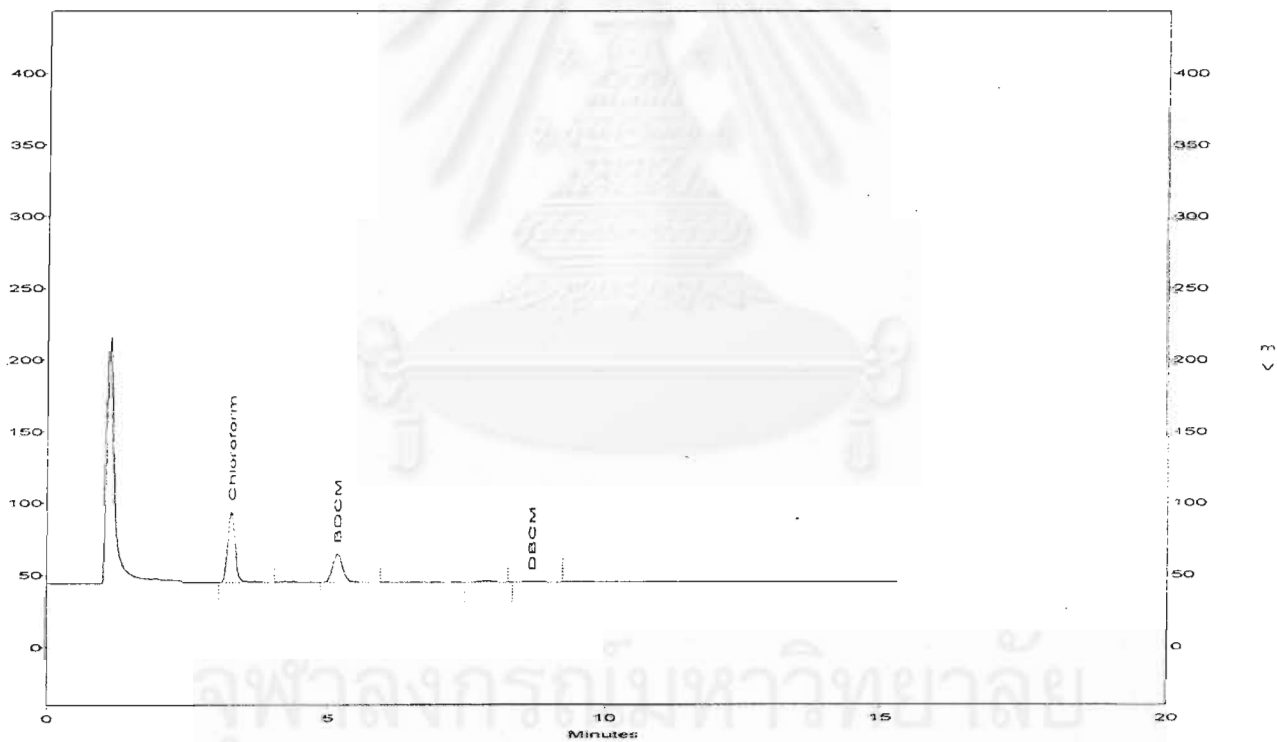


ผลการวิเคราะห์ค่าไดรฮาโลมีเทนของน้ำเข้าระบบชั่วโมงที่ 390

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.3	Chloroform	48858	37.6795
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
2	5.2	BDCM	19805	4.6969
--	7.5	Trichloroethyle	0	0.0000
4	8.7	DBCM	571	0.5120
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\thm\Thm127.12 -- Channel A

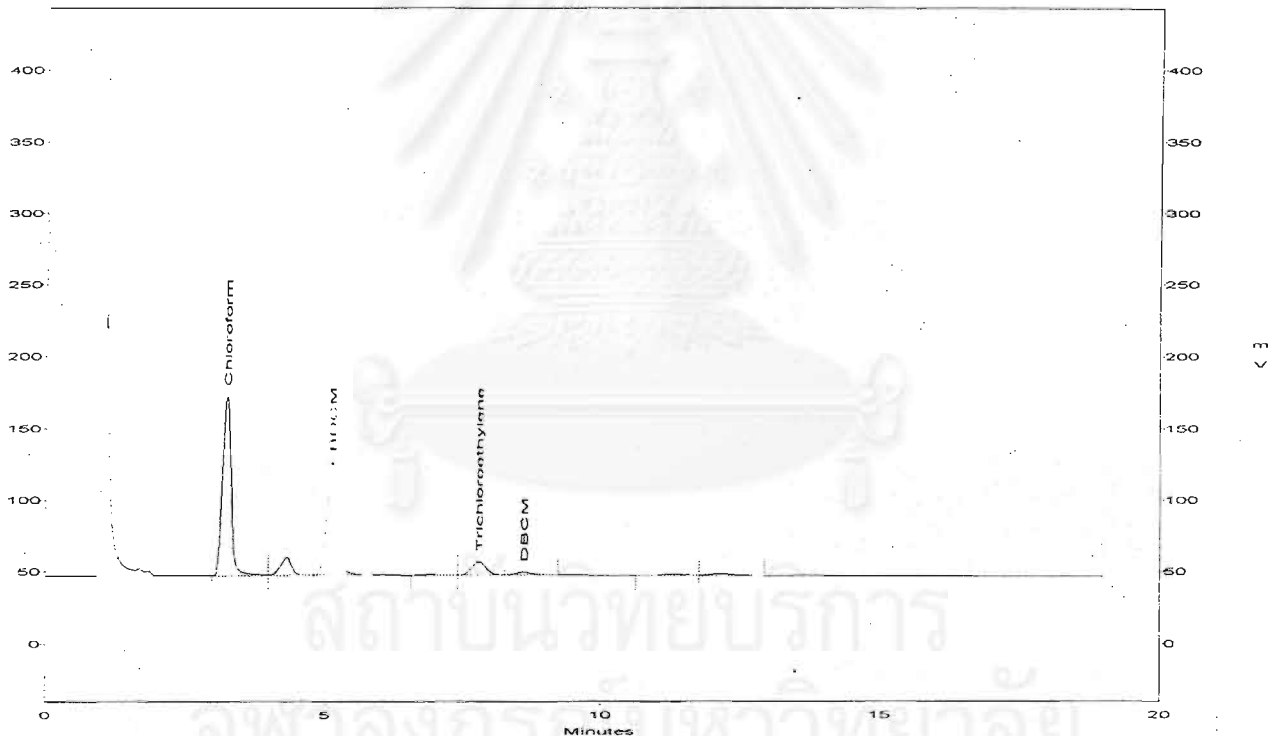


ผลการวิเคราะห์ค่าไดรฮาโลมีเทนของน้ำ permeate ชั่วโมงที่ 390

Channel A Results

Peak #	Time	Peak Name	Height	Conc.
1	3.3	Chloroform	124682	147.3236
--	4.0	1,1,1Trichloroe	0	0.0000
3	5.1	BDCM	78922	18.7170
5	7.8	Trichloroethyle	9133	56.3757
6	8.6	DBCM	1959	1.7567
--	9.7	Tetrachloroethy	0	0.0000
--	15.2	Bromoform	0	0.0000

c:\winchrom\chrom\thm\Thm127.36 -- Channel A



ผลการวิเคราะห์ค่าไตรฮาโลมีเทนของน้ำ concentrate ชั่วโมงที่ 390



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำหนดให้

ดอกเบี้ยเงินกู้ต่อปี, i

7.5%

อายุการใช้งานของเมมเบรน, ปี

5

1. ค่าใช้จ่ายในการลงทุนระบบ

$$F = P(1+i)^n$$

เมื่อ

$$P = \text{ค่าของเงินในปัจจุบัน}$$

$$= 200000 \text{ บาท}$$

$$n = \text{ปี}$$

$$= 5$$

ค่าใช้จ่ายในการลงทุนระบบ 287126 บาท

2. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบ

$$F = A[(1+i)^n - 1]/i$$

$$A = \text{ค่าสารเคมี} + \text{ค่าไฟ}$$

$$= 9600 + 3000$$

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบ 59033 บาท

3. ต้นทุนในการผลิตน้ำต่อหน่วย

เมื่อใน 1 ปี สามารถผลิตน้ำได้ 1575 ลูกบาศก์เมตร

$$F = A[(1+i)^n - 1]/i$$

$$A = 37.5 \text{ บาท}$$

าลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปรภาภรณ์ ผาติสุนทร เกิดเมื่อวันที่ 19 เมษายน 2523 สำเร็จการศึกษาปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย