

เครื่องต้นแบบระบบการกรองแบบนาโนสำหรับผลิตน้ำดื่มชุมชน



นายมรุพัชร จ่านงศ์วงศ์

ศูนย์วิทยพัชการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6544-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROTOTYPE OF NANOFILTRATION SYSTEM FOR MUNICIPAL DRINKING WATER PRODUCTION



Mr. Marupatch Jamnongwong

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 2004

ISBN 974-17-65444-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เครื่องต้นแบบระบบการกรองแบบนาโนสำหรับผลิตน้ำดื่มชุมชน

โดย

นายมรุพัชร จำนงค์วงศ์

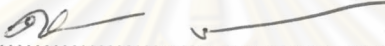
สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษา

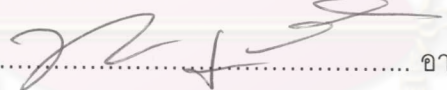
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)


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


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์)


มรุพงษ์ จ้งานวงศ์ : เครื่องต้นแบบระบบการกรองแบบนาโนสำหรับผลิตน้ำดื่มชุมชน.
(PROTOTYPE OF NANOFILTRATION SYSTEM FOR MUNICIPAL DRINKING WATER
PRODUCTION) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 162 หน้า.
ISBN 974-17-6544-4.

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพระบบการกรองด้วยเมมเบรนสำหรับผลิตน้ำดื่มชุมชน โดยพิจารณาถึงผลของปัจจัยต่างๆ คือ ชนิดของระบบเมมเบรน ความดัน ร้อยละ Recovery การเดินระบบระยะยาว ต่อประสิทธิภาพ และการใช้พลังงานของระบบเมมเบรนที่ต่างชนิดเปรียบเทียบกัน โดยใช้น้ำดิบเป็นน้ำประปา จากถังเก็บน้ำใต้ดิน ภายใน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยระบบบำบัดเบื้องต้น ระบบการกรองผ่านเมมเบรน และระบบบำบัดขั้นสุดท้ายด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยทำการเปรียบเทียบระบบการกรองที่ใช้การกรองแบบนาโนกับการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส และเปรียบเทียบการเดินระบบทั้งสองแบบที่ร้อยละ Recovery 50 และ60

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบเมมเบรนแบบนาโน ที่ใช้เมมเบรน FILMTEC NF90 ความดัน 5 บาร์ มีค่าฟลักซ์ 0.041 ม³/ม²-ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัด ความขุ่น มากกว่าร้อยละ 95 ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำ มากกว่าร้อยละ 97 แคลเซียมไอออน ร้อยละ 98 แมกนีเซียมไอออน ร้อยละ 99 เหล็กไอออน ร้อยละ 50 สังกะสีไอออน ร้อยละ 80 และไนเตรตไอออน ร้อยละ 70 สำหรับระบบเมมเบรนแบบรีเวอร์สออสโมซิส ใช้ เมมเบรน CMS RE2540-TE ความดัน 10 บาร์ มีค่าฟลักซ์ 0.045 ม³/ม²-ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัด ความขุ่น มากกว่าร้อยละ 95 ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำ มากกว่าร้อยละ 98 แคลเซียมไอออน ร้อยละ 99 แมกนีเซียมไอออนมากกว่าร้อยละ 99 เหล็กไอออน ร้อยละ 50 สังกะสีไอออน ร้อยละ 90 และไนเตรตไอออน ร้อยละ 90 น้ำดื่มที่ผลิตได้จากระบบเมมเบรนที่ทดลองทั้งสองระบบอยู่ในมาตรฐานน้ำดื่ม ยกเว้นค่าพีเอชที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ทำให้ต้องมีการปรับค่าพีเอชอีกขั้นตอนหนึ่งก่อนนำน้ำนี้ไปบริโภค และเนื่องจากการใช้ความดันที่น้อยกว่า ทำให้ระบบเมมเบรนแบบนาโนใช้พลังงานเพียง 5.76 กิโลวัตต์ ต่อ การผลิตน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ระบบเมมเบรนแบบ รีเวอร์สออสโมซิส ใช้พลังงาน 8.73 กิโลวัตต์ ต่อ การผลิตน้ำ 1 ลูกบาศก์ จากการศึกษากการเดินระบบระยะยาวพบว่า ร้อยละRecoveryไม่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำ แต่มีผลต่อค่า ฟลักซ์ โดยร้อยละ Recovery ที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการลดของค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการเดินระบบเมมเบรนทั้งสองระบบจึงลดลง โดยระบบเมมเบรนแบบรีเวอร์สออสโมซิสมีอัตราการลดของค่า ฟลักซ์มากกว่าระบบเมมเบรนแบบนาโนที่ ร้อยละ Recovery เดียวกัน และจากการศึกษาความสามารถในการกำจัดสาร ไตรฮาโลมีเทนในน้ำของระบบเมมเบรนทั้งสองระบบ พบว่ามีความสามารถในการกำจัดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 10 ทั้งสองระบบ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต.....มรุพงษ์ จ้งานวงศ์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4570482921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: DRINKING WATER / NANOFILTRATION / REVERSE OSMOSIS / MEMBRANE

MARUPATCH JAMNONGWONG : PROTOTYPE OF NANOFILTRATION SYSTEM FOR MUNICIPAL DRINKING WATER PRODUCTION. THESIS ADVISOR : ASST.PROF CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 162 pp. ISBN 974-17-6544-4.

The purpose of this research was to study the performance of the prototype of nanofiltration system for municipal drinking water produced based on the influence of membrane type, pressure, percentage of recovery, long-term operation and energy consumption compared with different types of membrane filtration system. The experiment was conducted by using tap water from storage tank at Chulalongkorn University

The prototype system was composed of pre-treatment, membrane filtration and post-treatment by UV disinfection. There were two processes of experiment compared with the performance between nanofiltration system and reverse osmosis system at the percentage of recovery at 50 and 60.

The result shown that nanofiltration system using FILMTEC NF90 and 5 bar-pressure gave flux 0.041 m³/m²-h which removed >95% of turbidity, >97% of total bacteria, 98% of Ca, 99% of Mg, 50% of Fe, 80% of Zn and 70% of NO₃. While reverse osmosis system using CMS-RE2540-TE and 10 bar-pressure gave flux 0.045 m³/m²-h which removed >95% of turbidity, >98% of total bacteria, 99% of Ca, >99% of Mg, 50% of Fe, 90% of Zn and 90% of NO₃. The water derived from both systems met drinking water standard except for pH. Therefore the both system must adjusted pH before being used as drinking water. Since the usage of lower pressure of nanofiltration system, the energy consumption reached 5.67 kw/m³ which was less than reverse osmosis system that consumed 8.73 kw/m³ of energy. As for long-termed operation, it came out that there was no effect with performance of removal. However, it was effect with flux by the more percentage of recovery the faster decrease rate of flux. So the duration of operating was reduced by the decrease of flux of reverse osmosis system which was faster than nanofiltration system when operated at the same percentage of recovery. Another result, Trihalomethane (THMs) removal experiment, shown that both type of membrane using in this research could remove THMs around 10% only.

Department Environmental Engineering
Field of study Environmental Engineering
Academic year 2004

Student's Signature.....*Marupatch Jamnongwong*
Advisor's Signature.....*Chavalit Rattil*

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล เป็นอย่างสูงที่ให้ความกรุณาในการให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการวิจัย พร้อมทั้งให้แนวคิดทางด้านวิชาการ ตลอดจนให้ความสนใจใส่ดูแล ตรวจสอบการเขียนวิทยานิพนธ์จนงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่มีส่วนได้ให้ความรู้แก่ตัวผู้วิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ กรรมการ รองศาสตราจารย์ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ ดร.เขมรัฐ โสธาทันท์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบ อนุมัติโครงร่างงานวิจัย และเป็นกรรมการในการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ พร้อมทั้งกรุณาให้คำชี้แนะและแนวทางรวมถึงโอกาสที่ให้ผู้วิจัยสามารถเขียนและปรับปรุงแก้ไขจนการสอบสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท โกลบอล วอเตอร์ ซีเอสเอ็มเอส คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่อนุเคราะห์อุปกรณ์เพื่อประกอบระบบสำหรับดำเนินการวิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา

คุณความดีและประโยชน์ทั้งหลายอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้บิดา มารดา ซึ่งเป็นผู้ให้ทุกอย่างแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฑ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 คำนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำ.....	3
2.1.1 กระบวนการบำบัดน้ำ.....	3
2.2 มาตรฐานน้ำใช้เพื่อการบริโภค.....	4
2.3 ผลผลิตต่อเนื่องจากการใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรคในน้ำ.....	7
2.3.1 ผลของผลผลิตต่อเนื่องจากการใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ที่มีต่อสุขภาพอนามัย.....	7
2.4 กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน.....	8
2.5 กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis).....	10
2.5.1 ความสามารถของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis).....	12
2.5.2 กลไกการทำงานของรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis).....	13
2.5.2.1 กลไกในการกำจัดเกลือต่างๆ.....	13
2.5.2.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์.....	14
2.6 กระบวนการกรองแบบนาโน (Nanofiltration).....	15
2.6.1 ความสามารถของกระบวนการการกรองนาโน.....	16
2.6.2 กลไกการทำงานของกระบวนการการกรองนาโน.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.2.1 กลไกการกำจัดเกลือต่างๆ.....	17
2.6.2.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์.....	17
2.7 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน.....	17
2.7.1 Concentration Polarization.....	17
2.7.2 อุณหภูมิและพีเอช.....	18
2.7.3 แรงดัน.....	19
2.7.4 ความเข้มข้นของน้ำดิบ.....	20
2.7.5 ระบบควบคุมอัตราไหลของน้ำเข้มข้นที่ต้องระบายทิ้ง.....	21
2.8 เมมเบรนสำหรับใช้กับระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน.....	21
2.9 โมดูลชนิดต่างๆของระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน.....	22
2.9.1 โมดูลแบบแผ่น (Plate and Frame Module).....	23
2.9.2 โมดูลแบบท่อ (Tubular Module).....	24
2.9.3 โมดูลแบบม้วน (Spiral Wound Module).....	25
2.9.4 โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module).....	26
2.10 ความจำเป็นในการเตรียมน้ำก่อนเข้าระบบรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองนาโน.....	28
2.10.1 การเกิดตะกอนบนเมมเบรน.....	28
2.10.2 การตกผลึกของเกลือและแมงกานีส.....	29
2.10.3 การอุดตันของเครื่องเนื่องจากสารแขวนลอย.....	29
2.10.4 การอุดตันเมมเบรนเนื่องจากคอลลอยด์.....	30
2.10.5 การอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์ (Biological Fouling).....	30
2.11 กระบวนการบำบัดน้ำดิบก่อนเข้าระบบเมมเบรน.....	31
2.11.1 การป้องกันสารแขวนลอยและคอลลอยด์.....	31
2.11.2 การป้องกันการทำลายเมมเบรนเนื่องจากคลอรีน.....	31
2.11.3 การป้องกันการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์.....	32
2.12 กระบวนการบำบัดน้ำหลังจากผ่านเมมเบรน.....	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.13 พารามิเตอร์สำหรับออกแบบและควบคุม.....	35
2.13.1 Water Flux (F_w).....	35
2.13.2 Salt Flux (F_s).....	36
2.13.3 Rejection Factor หรือ % Rejection.....	37
2.13.4 Recovery Factor หรือ % Recovery.....	38
2.5 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	38
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 แผนการทดลอง.....	42
3.2 ตัวแปรต่างๆใช้ในการทดลอง.....	42
3.2.1 ตัวแปรอิสระ.....	42
3.2.2 ตัวแปรตาม.....	42
3.2.3 ตัวแปรควบคุม.....	42
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	46
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.5.1 อุปกรณ์เพื่อการวิจัย.....	48
3.5.2 เครื่องมือเพื่อการวิเคราะห์.....	48
3.6 วิธีการวิเคราะห์.....	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	50
4.1 ลักษณะของน้ำดิบที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
4.2 ระบบบำบัดเบื้องต้น.....	54
4.2.1 ผลของระบบบำบัดเบื้องต้นต่อค่าพีเอช.....	55
4.2.2 ผลของระบบบำบัดเบื้องต้นต่อค่าความขุ่น.....	57
4.2.3 ผลของระบบบำบัดเบื้องต้นต่อปริมาณแบคทีเรีย.....	59
4.2.4 ผลของระบบบำบัดเบื้องต้นต่อปริมาณของไอออน.....	60
4.2.5 ผลของระบบบำบัดเบื้องต้นต่อค่ายูวี 254.....	62
4.3 กระบวนการกรองด้วยเมมเบรน.....	64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1 ผลของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด.....	64
4.3.1.1 กระบวนการกรองแบบนาโน.....	64
4.3.1.2 กระบวนการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส.....	68
4.3.1.3 เปรียบเทียบผลของอัตราการผลิตน้ำสะอาด	
ต่อการใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรนที่ต่างกัน.....	71
4.3.2 ผลของระบบการกรองเมมเบรนต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้.....	73
4.3.2.1 ระบบการกรองแบบนาโน.....	73
4.3.2.2 ระบบการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส.....	74
4.3.2.3 เปรียบเทียบผลของการใช้พลังงานไฟฟ้า	
ต่อการใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรนที่ต่างกัน.....	75
4.3.3 ผลของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนต่อพีเอช.....	75
4.3.3.1 กระบวนการกรองแบบนาโน.....	75
4.3.3.2 กระบวนการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส.....	77
4.3.3.3 เปรียบเทียบค่าพีเอชในน้ำสะอาด	
ต่อการใช้วิธีการกรองผ่านเมมเบรนที่ต่างกัน.....	80
4.3.4 ผลของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนต่อความขุ่น.....	80
4.3.4.1 กระบวนการกรองแบบนาโน.....	80
4.3.4.2 กระบวนการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส.....	82
4.3.4.3 เปรียบเทียบค่าความขุ่นในน้ำสะอาด	
ต่อการใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรนที่ต่างกัน.....	85
4.3.5 ผลของกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนต่อปริมาณแบคทีเรีย.....	86
4.3.5.1 กระบวนการกรองแบบนาโน.....	86
4.3.5.2 กระบวนการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส.....	89
4.3.5.3 เปรียบเทียบปริมาณแบคทีเรียในน้ำสะอาด	
ต่อการใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรนที่ต่างกัน.....	92
4.3.6 ผลของกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนต่อปริมาณของไอออน.....	92
4.3.6.1 กระบวนการกรองแบบนาโน.....	92

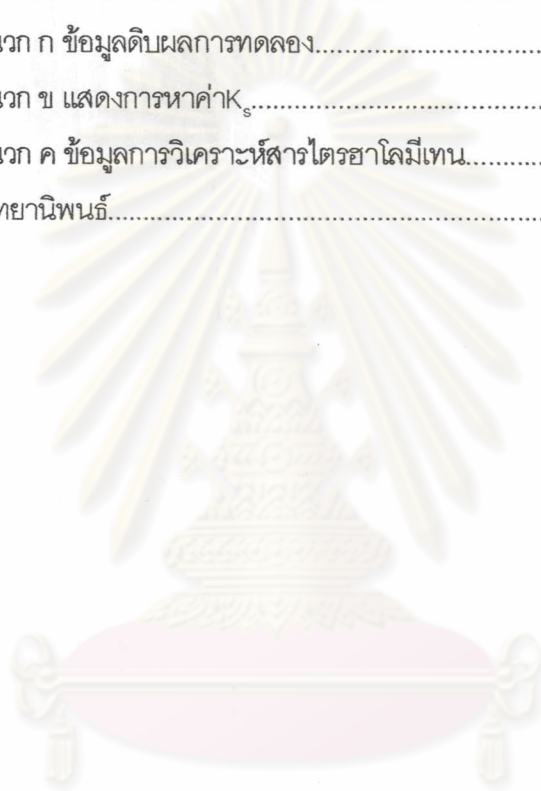
สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.6.2	กระบวนการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส.....	98
4.3.6.3	เปรียบเทียบปริมาณของไอออนในน้ำสะอาด ต่อการใช้กระบวนการกรองผ่าน เมมเบรนที่ต่างกัน.....	104
4.3.7	ผลของกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนต่อค่ายูวี 254.....	107
4.3.7.1	กระบวนการกรองแบบนาโน.....	107
4.3.7.2	กระบวนการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส.....	109
4.3.7.3	เปรียบเทียบค่ายูวี 254 ในน้ำสะอาด ต่อการใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรนที่ต่างกัน.....	112
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายูวี 254 กับปริมาณไตรฮาโลมีเทน.....	112
4.4.1	ผลของกระบวนการกรองแบบนาโน ต่อปริมาณไตรฮาโลมีเทนที่คำนวณได้.....	114
4.4.2	ผลของระบบการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส ต่อปริมาณไตรฮาโลมีเทนที่คำนวณได้.....	117
4.4.3	เปรียบเทียบปริมาณไตรฮาโลมีเทน ในน้ำสะอาดที่คำนวณได้ ต่อการใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรนที่ต่างกัน.....	120
4.5	สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนในน้ำที่ผลิตได้ และในน้ำที่เข้ากระบวนการกรองผ่านเมมเบรนแบบนาโน.....	121
4.6	การบำบัดขั้นสุดท้ายด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต.....	125
4.6.1	ระบบการกรองแบบนาโนร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเลต.....	125
4.6.2	ระบบการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิสร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเลต.....	126
4.7	การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและลงทุนในการเดินระบบ.....	128
4.7.1	เงินลงทุนเริ่มต้น.....	129
4.7.2	ต้นทุนด้านการดำเนินงาน.....	130
4.7.3	ต้นทุนต่อหน่วยการผลิต.....	131
4.8	เปรียบเทียบการผลิตน้ำดื่มระหว่าง ระบบการกรองแบบนาโนกับรีเวอร์สออสโมซิส.....	132
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไป	135

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	135
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไป.....	137
รายการอ้างอิง.....	138
ภาคผนวก.....	137
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบผลการทดลอง.....	141
ภาคผนวก ข แสดงการหาค่า K_s	153
ภาคผนวก ค ข้อมูลการวิเคราะห์สารไตรฮาโลมีเทน.....	157
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	162



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	มาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก.....	5
ตารางที่ 2.2	มาตรฐานน้ำดื่มของกระทรวงอุตสาหกรรม.....	6
ตารางที่ 2.3	เปรียบเทียบกระบวนการเมมเบรนชนิดต่างๆ.....	9
ตารางที่ 2.4	คุณสมบัติต่างๆของโมดูลทั้ง 4 แบบ.....	23
ตารางที่ 3.1	ลักษณะของเยื่อกรองที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	44
ตารางที่ 3.2	รูปแบบการเดินระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	46
ตารางที่ 3.3	จุดเก็บตัวอย่างน้ำและคุณภาพที่วิเคราะห์.....	47
ตารางที่ 3.4	วิธีวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....	49
ตารางที่ 4.1	คุณสมบัติของน้ำก่อนเข้าระบบผลิตที่ใช้ในการทดลอง.....	54
ตารางที่ 4.2	ค่าเฉลี่ยปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนที่คำนวณจากการวัดค่ายูวี 254 ของน้ำดิบ ก่อนเข้าระบบผลิตที่ใช้ในการทดลอง.....	114
ตารางที่ 4.3	ความสัมพันธ์ของสารแต่ละชนิดในน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าสู่ระบบ การกรองแบบนาโนที่ Recovery 50 %.....	122
ตารางที่ 4.4	รายละเอียดของเงินลงทุนเบื้องต้นของระบบรีเวอร์สออสโมซิส และระบบนาโนฟิลเตรชัน.....	129
ตารางที่ 4.5	รายละเอียดของเงินค่าดำเนินงานของระบบรีเวอร์สออสโมซิส และระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดอายุโครงการ.....	131
ตารางที่ 4.6	สรุปต้นทุนในการใช้ระบบรีเวอร์สออสโมซิสผลิตน้ำดื่ม.....	131
ตารางที่ 4.7	สรุปต้นทุนในการใช้ระบบนาโนฟิลเตรชันผลิตน้ำดื่ม.....	132
ตารางที่ 4.8	เปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่ผลิตได้จากระบบการกรองแบบนาโน และการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส.....	133

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ออสโมซิส (ก) และรีเวอร์สออสโมซิส (ข).....	11
รูปที่ 2.2	กลไกการกำจัดเกลือต่างๆของระบบรีเวอร์สออสโมซิส.....	13
รูปที่ 2.3	กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบรีเวอร์สออสโมซิส.....	15
รูปที่ 2.4	ความสามารถในการแยกของเมมเบรน.....	16
รูปที่ 2.5	Concentration Polarization ที่เกิดขึ้นในระบบเยื่อกรอง.....	18
รูปที่ 2.6	อิทธิพลของพีเอช และอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเมมเบรน.....	19
รูปที่ 2.7	อิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำดิบ และ Recovery ที่มีต่อคุณภาพของน้ำที่ผลิต.....	20
รูปที่ 2.8	อิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำดิบ และ Recovery ที่มีต่ออัตราผลิตน้ำ.....	21
รูปที่ 2.9	โมดูลแบบแผ่น.....	24
รูปที่ 2.10	โมดูลแบบท่อ.....	25
รูปที่ 2.11	โมดูลแบบม้วน.....	26
รูปที่ 2.12	ส่วนประกอบของโมดูลแบบเส้นใยกลวง.....	27
รูปที่ 2.13	ภาพตัดโมดูลแบบเส้นใยกลวง.....	27
รูปที่ 2.14	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต กับโอโซนและคลอรีน.....	33
รูปที่ 2.15	ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค ของรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	34
รูปที่ 3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลอง.....	41
รูปที่ 3.2	แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง.....	43
รูปที่ 4.1	ค่าพีเอชของน้ำดิบ กับระยะเวลาที่เดินระบบ.....	50
รูปที่ 4.2	ความขุ่นของน้ำดิบ กับระยะเวลาที่เดินระบบ.....	51
รูปที่ 4.3	(ก) ความเข้มข้นของแคลเซียม แมกนีเซียม และไนเตรตในน้ำดิบ กับระยะเวลาที่เดินระบบ.....	51
รูปที่ 4.3	(ข) ความเข้มข้น สังกะสี และ เหล็ก ในน้ำดิบ กับระยะเวลาที่เดินระบบ.....	52
รูปที่ 4.4	ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดของน้ำที่ออกจากถังพัก กับเวลาที่เดินระบบ.....	52
รูปที่ 4.5	ส่วนประกอบของระบบบำบัดเบื้องต้น.....	55
รูปที่ 4.6	ค่าพีเอชเฉลี่ยในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7	ค่าพีเอชในน้ำ กับระยะเวลาในการเดินระบบ.....	56
รูปที่ 4.8	ค่าความขุ่นเฉลี่ยในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....	57
รูปที่ 4.9	ค่าความขุ่นในน้ำกับระยะเวลาในการเดินระบบ.....	58
รูปที่ 4.10	ร้อยละการกำจัดความขุ่น กับระยะเวลาที่เดินระบบ.....	58
รูปที่ 4.11	ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดเฉลี่ยในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการบำบัดเบื้องต้น.....	59
รูปที่ 4.12	ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำกับระยะเวลาในการเดินระบบ.....	60
รูปที่ 4.13	(ก) และ (ข) แสดงปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของไอออน แคลเซียม แมกนีเซียม.....	61
	เหล็ก สังกะสี และไนเตรต ในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการบำบัดเบื้องต้น.....	61
รูปที่ 4.14	ผลของการบำบัดเบื้องต้นที่มีต่อการกำจัดค่ายูวี 254.....	62
รูปที่ 4.15	ค่ายูวี 254ในน้ำกับระยะเวลาในการเดินระบบ.....	63
รูปที่ 4.16	ร้อยละในการกำจัดค่ายูวี 254กับระยะเวลาที่เดินระบบ.....	63
รูปที่ 4.17	อัตราการผลิตน้ำสะอาดของกระบวนการกรองแบบนาโนต่อระยะเวลา ในการเดินระบบที่ Recovery 50 %.....	65
รูปที่ 4.18	อัตราการผลิตน้ำสะอาดของกระบวนการกรองแบบนาโนต่อระยะเวลา ในการเดินระบบที่ Recovery 60 %.....	65
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตน้ำสะอาดต่ออัตราการผลิตผลิตน้ำสะอาดสูงสุด ของกระบวนการกรองแบบนาโน ที่ Recovery 50 % และ 60 % กับระยะเวลาในการเดินระบบ.....	67
รูปที่ 4.20	อัตราการผลิตน้ำสะอาดของกระบวนการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส ต่อระยะเวลาในการเดินระบบที่ Recovery 50 %.....	68
รูปที่ 4.21	อัตราการผลิตน้ำสะอาดของกระบวนการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส ต่อระยะเวลาในการเดินระบบที่ Recovery 60 %.....	69
รูปที่ 4.22	ความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตน้ำสะอาดต่ออัตราการผลิตผลิตน้ำสะอาดสูงสุด ของกระบวนการกรองแบบรีเวอร์สออสโมซิส ที่ Recovery 50 % และ 60 % กับระยะเวลาในการเดินระบบ.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.23 ผลของการใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน และ % Recovery ที่แตกต่างกัน ต่อระยะเวลาเดินระบบก่อนหยุดเดินระบบเมื่ออัตราการผลิตน้ำ ลดลงร้อยละ 40 ของอัตราการผลิตเมื่อเริ่มเดินระบบ.....72

รูปที่ 4.24 ผลของการใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน และ % Recovery ที่แตกต่างกัน ต่อปริมาณน้ำที่ผลิตได้ก่อนหยุดเดินระบบเมื่ออัตราการผลิตน้ำ ลดลงร้อยละ 40 ของอัตราการผลิตเมื่อเริ่มเดินระบบ.....72

รูปที่ 4.25 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ กับระยะเวลาที่เดินระบบการกรองแบบนาโน.....73

รูปที่ 4.26 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ กับระยะเวลาที่เดินระบบการกรอง แบบรีเวอร์สออสโมซิส.....74

รูปที่ 4.27 ค่าพีเอชเฉลี่ยในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....76

รูปที่ 4.28 ค่าพีเอชในน้ำ กับระยะเวลาในการเดินระบบนาโนที่ Recovery 50 %.....77

รูปที่ 4.29 ค่าพีเอชในน้ำ กับระยะเวลาในการเดินระบบนาโนที่ Recovery 60 %.....77

รูปที่ 4.30 ค่าพีเอชเฉลี่ยในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....78

รูปที่ 4.31 ค่าพีเอชในน้ำ กับระยะเวลาในการเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่ Recovery50%.....79

รูปที่ 4.32 ค่าพีเอชในน้ำ กับระยะเวลาในการเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่ Recovery60%.....79

รูปที่ 4.33 ค่าความขุ่นเฉลี่ยในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....80

รูปที่ 4.34 ค่าความขุ่น กับระยะเวลาในการเดินระบบนาโนที่ Recovery 50 %.....81

รูปที่ 4.35 ค่าความขุ่น กับระยะเวลาในการเดินระบบนาโนที่ Recovery 60 %.....81

รูปที่ 4.36 ร้อยละการกำจัดความขุ่นเฉลี่ยของการเดินระบบนาโนที่ Recovery50%และ60%..82

รูปที่ 4.37 ค่าความขุ่นเฉลี่ยในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....83

รูปที่ 4.38 ค่าความขุ่น กับระยะเวลาในการเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่ Recovery50%.....83

รูปที่ 4.39 ค่าความขุ่น กับระยะเวลาในการเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่ Recovery60%.....84

รูปที่ 4.40 ร้อยละการกำจัดความขุ่นเฉลี่ยของเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิส ที่ Recovery 50 % และ 60%.....84

รูปที่ 4.41 ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....86

รูปที่ 4.42 ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด กับระยะเวลาในการเดินระบบนาโน ที่ Recovery 50 %.....87

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.43	ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด กับระยะเวลาในการเดินระบบนาโน ที่ Recovery 60 %.....	87
รูปที่ 4.44	ร้อยละการกำจัดปริมาณแบคทีเรียเฉลี่ยของการเดินระบบนาโน ที่ Recovery 50 % และ 60 %.....	88
รูปที่ 4.45	ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....	89
รูปที่ 4.46	ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดกับระยะเวลาในการเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิส ที่ Recovery 50 %.....	90
รูปที่ 4.47	ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด กับระยะเวลาในการเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิส ที่ Recovery 60 %.....	90
รูปที่ 4.48	ร้อยละการกำจัดแบคทีเรียเฉลี่ยของการเดินระบบ รีเวอร์สออสโมซิสที่ Recovery 50 % และ 60 %.....	91
รูปที่ 4.49	(ก) ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของไอออน แคลเซียม แมกนีเซียม และไนเตรต ในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....	92
รูปที่ 4.49	(ข) ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของไอออน เหล็ก และสังกะสี ในน้ำ หลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....	93
รูปที่ 4.50	(ก) และ (ข) ค่าความเข้มข้นของไอออน แคลเซียม และแมกนีเซียม กับระยะเวลาในการเดินระบบกรองแบบนาโนที่ Recovery 50 %.....	94
รูปที่ 4.50	(ค) - (จ) ค่าความเข้มข้นของไอออน เหล็ก สังกะสี และไนเตรต กับระยะเวลาในการเดินระบบกรองแบบนาโนที่ Recovery 50 %.....	95
รูปที่ 4.51	(ก) - (ค) ค่าความเข้มข้นของไอออน แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก กับระยะเวลาในการเดินระบบกรองแบบนาโนที่ Recovery 60 %.....	96
รูปที่ 4.51	(ง) และ (จ) ค่าความเข้มข้นของ สังกะสี และไนเตรต กับระยะเวลาในการเดินระบบกรองแบบนาโนที่ Recovery 60 %.....	97
รูปที่ 4.52	ร้อยละการกำจัดไอออนเฉลี่ยของการเดินระบบกรองแบบนาโน ที่ Recovery 50 % และ 60 %.....	98
รูปที่ 4.53	(ก) และ (ข) ความเข้มข้นเฉลี่ยของไอออน แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก สังกะสี และไนเตรต ในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....	99

สารบัญญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.54	(ก) และ (ข) ค่าความเข้มข้นของไอออน แคลเซียม และแมกนีเซียม กับระยะเวลาในการเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่ Recovery 50 %.....	100
รูปที่ 4.54	(ค) - (จ) ค่าความเข้มข้นของไอออน เหล็ก สังกะสี และไนเตรต กับระยะเวลาในการเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่ Recovery 50 %.....	101
รูปที่ 4.55	(ก) - (ค) ค่าความเข้มข้นของไอออน แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก กับระยะเวลาในการเดินระบบ รีเวอร์สออสโมซิสที่ Recovery 60 %.....	102
รูปที่ 4.55	(ง) และ (จ) ค่าความเข้มข้นของไอออน สังกะสี และไนเตรต กับระยะเวลาในการเดินระบบ รีเวอร์สออสโมซิสที่ Recovery 60 %.....	103
รูปที่ 4.56	ร้อยละการกำจัดไอออนเฉลี่ยของการเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่ Recovery 50 % และ 60 %.....	104
รูปที่ 4.57	ปริมาณการกำจัดไอออนในน้ำต่อวันของระบบเมมเบรน.....	106
รูปที่ 4.58	ปริมาณการกำจัดไอออนในน้ำต่อวัน-แรงดัน ของระบบเมมเบรน.....	116
รูปที่ 4.59	ค่ายูวี 254 เฉลี่ยในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....	107
รูปที่ 4.60	ค่ายูวี 254 กับระยะเวลาในการเดินระบบที่ Recovery 50 %.....	108
รูปที่ 4.61	ค่ายูวี 254 กับระยะเวลาในการเดินระบบที่ Recovery 60 %.....	108
รูปที่ 4.62	ร้อยละการกำจัดค่ายูวี 254 เฉลี่ยการเดินระบบนาโน ที่ Recovery 50 % และ 60 %.....	109
รูปที่ 4.63	ค่ายูวี 254 เฉลี่ยในน้ำหลังผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....	110
รูปที่ 4.64	ค่ายูวี 254 กับระยะเวลาในการเดินระบบรีเวอร์ออสโมซิสที่ Recovery 50 %.....	110
รูปที่ 4.65	ค่ายูวี 254 กับระยะเวลาในการเดินระบบรีเวอร์ออสโมซิสที่ Recovery 60 %.....	111
รูปที่ 4.66	ร้อยละการกำจัดค่ายูวี 254 เฉลี่ยการเดินระบบรีเวอร์ออสโมซิส ที่ Recovery 50 % และ 60 %.....	112
รูปที่ 4.67	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายูวี 254 กับสารไตรฮาโลมีเทน.....	113
รูปที่ 4.68	ปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่ายูวี 254 หลังจากผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....	115
รูปที่ 4.69	ปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำกับระยะเวลาในการเดินระบบนาโน ที่ Recovery 50 %.....	115

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.70 ปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำกับระยะเวลาในการเดินระบบนาโน
ที่ Recovery 60 %.....116

รูปที่ 4.71 ร้อยละการกำจัดสารไตรฮาโลมีเทนเฉลี่ยของการเดินระบบนาโน
ที่ Recovery 50 % และ 60 %.....117

รูปที่ 4.72 ปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับค่ายูวี 254
หลังจากผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....117

รูปที่ 4.73 ปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำกับระยะเวลาในการเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิส
ที่ Recovery 50 %.....118

รูปที่ 4.74 ปริมาณสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำกับระยะเวลาในการเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิส
ที่ Recovery 60 %.....119

รูปที่ 4.75 ร้อยละการกำจัดสารไตรฮาโลมีเทนเฉลี่ยของการเดินระบบรีเวอร์สออสโมซิส
ที่ Recovery 50 % และ 60 %.....120

รูปที่ 4.76 ความสัมพันธ์แคลเซียมในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบกรองแบบนาโน.....123

รูปที่ 4.77 ความสัมพันธ์แมกนีเซียมในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบกรองแบบนาโน.....123

รูปที่ 4.78 ความสัมพันธ์เหล็กในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบกรองแบบนาโน.....123

รูปที่ 4.79 ความสัมพันธ์สังกะสีในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบกรองแบบนาโน.....124

รูปที่ 4.80 ความสัมพันธ์ไนเตรตในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบกรองแบบนาโน.....124

รูปที่ 4.81 ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำหลังจากผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....125

รูปที่ 4.82 ร้อยละการกำจัดปริมาณแบคทีเรียเฉลี่ยของการเดินระบบนาโนทั้งระบบ
ที่ Recovery 50 % และ 60 %.....126

รูปที่ 4.83 ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำหลังจากผ่านขั้นตอนระบบการผลิตต่างๆตามลำดับ.....127

รูปที่ 4.84 ร้อยละการกำจัดปริมาณแบคทีเรียเฉลี่ยของการเดินระบบ
รีเวอร์สออสโมซิสทั้งระบบที่ Recovery 50 % และ 60 %.....128