

การศึกษากระบวนการนาโนฟิลเตรชัน  
เพื่อนำน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมกลับมาใช้ใหม่



นายสนธยา สรหงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4018-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF NANOFILTRATION PROCESS FOR  
WATER REUSE OF TEXTILE DYEING EFFLUENT

Mr. Sontaya Sorahong

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 974-17-4018-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาระบบการนาโนฟิลเตรชั่นเพื่อนำน้ำทิ้งจากโรงงาน  
ฟอกย้อมกลับมาใช้ใหม่

โดย

นายสนธยา สรหงษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

นายแสวง เกิดประทุม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

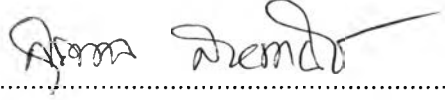
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง ไฉ่ห้วงศ์วัฒน์)

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

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา (ร่วม)  
(นายแสวง เกิดประทุม)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

สนธยา สรหงษ์ : การศึกษากระบวนการนาโนฟิลเตรชันเพื่อนำน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมกลับมา  
ใช้ใหม่. (A Study of Nanofiltration Process for Reuse of Textile Dyeing Effluent) อ. ที่  
ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล, อ. ที่ปรึกษา (ร่วม) : นายแสวง เกิดประ  
ทุม, 247 หน้า, ISBN 974-17-4018-2.

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาและหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการเดินระบบนาโน  
ฟิลเตรชัน เพื่อนำน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต ปัจจัยที่พิจารณา  
ได้แก่ (1) ความดันที่ 3, 4, 5, 6 และ 7 บาร์ (2) ความเร็วสัมผัสผิวหน้าเมมเบรน (Crossflow Velocity, ที่  
0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 เมตรต่อวินาที (3) อัตราการผลิตน้ำสะอาด (% Recovery) ที่ร้อยละ 20, 30, 40,  
50 และ 60 และ (4) วิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยระบบไมโครฟิลเตอร์และการเติมกรด การทดลองแบ่งเป็น 2  
ขนาด คือ (1) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดกับชุดทดลองขนาดห้องปฏิบัติการในห้องปฏิบัติการ และ (2)  
นำสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดไปเดินระบบระยะยาวกับชุดทดลองขนาดทดสอบที่โรงงานฟอกย้อม

จากการทดลองพบว่า อัตราการผลิตน้ำสะอาดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความดันในการเดินระบบ และค่า  
ความเร็วสัมผัสผิวหน้าเมมเบรน (Crossflow Velocity) ในขณะที่การเพิ่มอัตราการผลิตน้ำสะอาด (%  
Recovery) ที่สูงกว่าร้อยละ 50 ส่งผลให้น้ำสะอาดที่ผลิตได้และประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งเจือปนลดลง  
ซึ่งพบว่าการใช้ระบบไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบบำบัดขั้นต้น ช่วยให้อัตราการผลิตน้ำสะอาดที่สูงกว่าการใช้  
เติมกรดเป็นระบบบำบัดเบื้องต้น และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินระบบอยู่ที่ ความดัน 6 บาร์  
ความเร็วสัมผัสผิวหน้าเมมเบรน 0.5 เมตรต่อวินาที อัตราการผลิตน้ำสะอาดที่ร้อยละ 40 และใช้วิธีการ  
บำบัดเบื้องต้นด้วยระบบไมโครฟิลเตอร์ ในการเดินระบบระยะยาวพบว่าอัตราการผลิตน้ำสะอาดค่อนข้าง  
คงที่ตลอดการทดลอง 424 ชั่วโมง ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดความนำไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 90 - 99  
ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายอยู่ที่ร้อยละ 80 - 100 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง และ  
แคลเซียมทั้งหมด ประสิทธิภาพการกำจัดความเป็นต่างอยู่ที่ร้อยละ 80 - 95 ประสิทธิภาพการกำจัดคลอ  
ไรด์อยู่ที่ร้อยละ 82 - 97 และสามารถกำจัดสีและความขุ่นได้ร้อยละ 98 - 100 โดยที่ประสิทธิภาพของ  
ระบบสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการละลาย-การแพร่ ซึ่งคุณภาพน้ำที่ผลิตได้นั้นสูงเพียงพอที่จะนำ  
กลับมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อมได้ โดยที่ราคาต้นทุนในการนำกลับน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมด้วย  
ระบบนาโนฟิลเตรชัน อยู่ที่ 13 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา (ร่วม).....

##4370535321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : NANOFILTRATION/FOULING/TEXTILE DYING EFFLUENT

SONTAYA SORAHONG : A STUDY OF NANOFILTRATION PROCESS FOR REUSE OF TEXTILE DYEING EFFLUENT. THESIS ADVISOR ASST. PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, PH.D., THESIS CO-ADVISOR MR. SAWAENG GERDPRATUM, 247 PP. ISBN 974-17-4018-2.

The research was aimed to evaluate a reuse of textile dyeing effluent using a nanofiltration process. The parameters determined were (i) an operating pressure at 3, 4, 5, 6, and 7 bar; (ii) a crossflow velocity at 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, and 0.7 m/s; (iii) a percentage of recovery at 20, 30, 40, 50, and 60; and (iv) a variation of pretreatment by microfiltration and acidification. The experiments were classified into two phases. Firstly, a test cell in a laboratory was conducted Secondly, a pilot scale at the textile dyeing plant was studied based on the optimum conditions gained from the former experiments.

The results showed that the higher pressure and crossflow velocity were performed, the higher fluxes were obtained. By contrast, the percentage of recovery, those higher than fifty, revealed the less fluxes and efficiencies of the system. However, such performance was enhanced by a pretreatment using microfiltration. The optimum conditions found in this study were 6 bar, 0.5 m/s, 40 % recovery, and pretreatment with microfiltration.

The permeate flux for long run operation throughout 424 hours was almost constant. The efficiency percentages of conductivity removal, total solid removal, total hardness and calcium removal, total alkalinity removal, turbidity and color removal, and chloride removal were 90 – 99, 80 – 100, 80 – 95, 98 – 100, and 82 – 97 respectively. The system efficiency would be explained by solute – diffusion model. Finally, an evaluation cost of nanofiltration for reuse of textile dyeing effluent was 13 baht per cubic meter.

Department Environmental Engineering  
Field of study Environmental Engineering  
Academic year 2003

Student's signature.....  
Advisor's signature.....  
Co-Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล ที่ได้กรุณาช่วยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความรู้ต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนกระทั่งสำเร็จลุล่วง และต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ แสง เกิดประทุม อย่างมากที่กรุณาช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ในทุก ๆ ด้าน ทั้งด้านเครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ และการเสียสละเวลาคำปรึกษาต่าง ๆ ถ้าขาดท่านทั้งสองนี้งานวิจัยนี้คงไม่สามารถสำเร็จลงได้ และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งได้ให้ทุนส่วนหนึ่งสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ฝ่ายวิศวกรรม ของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ทุก ๆ ท่าน ที่ช่วยเหลือในหลาย ๆ ด้านขณะที่ทำการวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ในโรงงานที่ช่วยเหลือในการประกอบชุดเครื่องมือสำหรับใช้ในการวิจัย รวมทั้งแม่บ้านทุก ๆ คนในตึกที่คอยให้ความช่วยเหลือเมื่อต้องการทุกครั้ง

ขอขอบคุณบริษัท TTL อุตสาหกรรมจำกัด (มหาชน) ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลอง รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่โรงงาน ที่ให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทดลองที่โรงงาน

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอด และที่สำคัญที่สุดคือครอบครัวอันเป็นที่รักทั้งพ่อและแม่ที่คอยให้กำลังใจตลอดเวลา และอุปการะจนกระทั่งเติบโตและได้ร่ำเรียนจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร .....	5
2.1 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process).....	5
2.1.1 ประเภทของเมมเบรน.....	5
2.1.2 การใช้งานของเมมเบรนแต่ละชนิด.....	8
2.1.3 โมดูลชนิดต่าง ๆ ของเมมเบรน.....	10
2.1.4 หลักการของออสโมซิสผันกลับ .....	14
2.2 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน .....	17
2.2.1 ประวัติความเป็นมาของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน .....	17
2.2.2 คุณสมบัติของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน .....	18
2.2.3 กลไกการทำงานของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน .....	19
2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน.....	23
2.3 อุตสาหกรรมฟอกย้อม .....	37
2.3.1 กระบวนการฟอกย้อม .....	37
2.3.2 สีย้อม .....	41
2.3.3 น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม.....	46
2.4 เทคโนโลยีเมมเบรนกับอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	50
2.5 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย .....	53
3.1 แผนการทดลอง.....	53
3.1.1 การทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยชุด Test Cell.....	54
3.1.2 การทดลองที่โรงงานตัวอย่างด้วยชุดขนาดทดสอบ (Pilot Scale).....	54
3.2 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	55
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	56
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง .....	57
3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์.....	63
3.6 ระยะเวลาการวิจัย .....	66
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	67
4.1 ลักษณะของน้ำทิ้งที่เข้าระบบ .....	67
4.2 ผลการทดลองของการทดลองด้วยชุด Test Cell ในห้องปฏิบัติการ .....	75
4.2.1 ผลของความดันต่อประสิทธิภาพของระบบ .....	75
4.2.1.1 ผลของความดันต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด .....	76
4.2.1.2 ผลของความดันต่อค่าพีเอช .....	77
4.2.1.3 ผลของความดันต่อค่าความนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลาย.....	77
4.2.1.4 ผลของความดันต่อความขุ่น.....	79
4.2.1.5 ผลของความดันต่อสีในหน่วย SU และ ADMI .....	80
4.2.1.6 ผลของความดันต่อคลอไรด์ .....	82
4.2.1.7 ผลของความดันต่อสภาพต่างทั้งหมด .....	83
4.2.1.8 ผลของความดันต่อแคลเซียมและความกระด้างทั้งหมด .....	84
4.2.1.9 ผลของความดันต่อค่าดัชนีแลงเกียร์ของน้ำเข้มข้น.....	86
4.2.2 ผลของ Crossflow Velocity ต่อการเกิด Concentration Polarization.....	87
4.2.2.1 ผลของ Crossflow Velocity ต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด .....	87
4.2.2.2 ผลของ Crossflow Velocity ต่อค่าพีเอช .....	90
4.2.2.3 ผลของ Crossflow Velocity ต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย.....	90
4.2.2.4 ผลของ Crossflow Velocity ต่อความขุ่น .....	92
4.2.2.5 ผลของ Crossflow Velocity ต่อสีในหน่วย SU และ ADMI .....	93



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2.6 ผลของ Crossflow Velocity ต่อคลอไรด์.....	94
4.2.2.7 ผลของ Crossflow Velocity ต่อสภาพต่างทั้งหมด.....	95
4.2.2.8 ผลของ Crossflow Velocity ต่อแคลเซียมและความกระด้าง.....	95
4.2.2.9 ผลของ Crossflow Velocity ต่อค่าดัชนีแลงเกลียร์ของน้ำเข้มข้น.....	98
4.2.3 ผลของการควบคุมค่า % Recovery ต่อประสิทธิภาพของระบบ.....	99
4.2.3.1 ผลของค่า % Recovery ต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด.....	100
4.2.3.2 ผลของค่า % Recovery ต่อค่าพีเอช.....	102
4.2.3.3 ผลของค่า % Recovery ต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย.....	102
4.2.3.4 ผลของค่า % Recovery ต่อความขุ่น.....	104
4.2.3.5 ผลของค่า % Recovery ต่อสีในหน่วย SU และ ADMI.....	105
4.2.3.6 ผลของค่า % Recovery ต่อคลอไรด์.....	105
4.2.3.7 ผลของค่า % Recovery ต่อสภาพต่างทั้งหมด.....	107
4.2.3.8 ผลของค่า % Recovery ต่อแคลเซียมและความกระด้างทั้งหมด.....	107
4.2.3.9 ผลของค่า % Recovery ต่อค่าดัชนีแลงเกลียร์ของน้ำเข้มข้น.....	110
4.2.4 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อประสิทธิภาพของระบบ.....	111
4.2.4.1 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด.....	114
4.2.4.2 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อค่าพีเอช.....	115
4.2.4.3 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย.....	115
4.2.4.4 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อความขุ่น.....	116
4.2.4.5 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อสีในหน่วย SU และ ADMI.....	117
4.2.4.6 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อคลอไรด์.....	118
4.2.4.7 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อสภาพต่างทั้งหมด.....	119
4.2.4.8 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อความกระด้างทั้งหมดและแคลเซียม.....	120
4.2.4.9 ผลของการเพิ่มระบบ Pretreatment ต่อค่าดัชนีแลงเกลียร์ของน้ำเข้มข้น.....	122
4.3 ผลการทดลองของการทดลองด้วยชุด Pilot Scale ณ โรงงานตัวอย่าง.....	124
4.3.1 อัตราการผลิตน้ำสะอาด.....	124
4.3.2 ผลของค่าพีเอช.....	125
4.3.3 ผลของค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย.....	125
4.3.4 ผลของค่าความขุ่น.....	127

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.5 ผลของค่าสีในหน่วย SU และ ADMI .....	129
4.3.6 ผลของค่าคลอไรด์.....	131
4.3.7 ผลของค่าสภาพต่างทั้งหมด .....	132
4.3.7 ผลของค่าความกระด้างทั้งหมดและแคลเซียม .....	133
4.3.9 ผลของค่าดัชนีแลงเกียร์ (Langier Saturation Index) .....	135
4.3.10 สมการแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าระบบ.....	136
4.4 การวิเคราะห์ด้านค่าใช้จ่ายและการลงทุนในการดำเนินระบบ.....	144
4.4.1 เงินลงทุนเริ่มต้น.....	144
4.4.2 ต้นทุนด้านการดำเนินงาน .....	144
4.4.2.1 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน.....	146
4.4.2.2 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี .....	146
4.4.2.3 ค่าแรงงาน .....	147
4.4.2.3 ค่าใช้จ่ายเรื่องการเปลี่ยนเมมเบรน .....	148
4.4.2.4 ค่าใช้จ่ายในเรื่องการเปลี่ยนไส้กรองไมโครฟิลเตอร์.....	148
4.4.2.5 ค่าซ่อมบำรุงรักษา.....	148
4.4.3 ต้นทุนต่อหน่วยการผลิตของระบบนาโนฟิลเตรชัน.....	149
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไป .....	154
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	154
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไป .....	156
รายการอ้างอิง.....	157
ภาคผนวก .....	166
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำในส่วนต่าง ๆ ของแต่ละการทดลอง.....	167
ภาคผนวก ข อัตราการผลิตน้ำสะอาดของการทดลองแต่ละชุด .....	204
ภาคผนวก ค แสดงการหาค่า $K_s$ .....	212
ภาคผนวก ง แสดงการคำนวณต้นทุนรายปี .....	243
ภาคผนวก จ มาตรฐานน้ำทิ้งที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมฟอกย้อม .....	246
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	247

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์ .....	1
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของโพลีเมอร์ที่ใช้ทำเมมเบรน .....	8
ตารางที่ 3.1ก การทดลองในห้องปฏิบัติการชุดที่ 1.1 .....	61
ตารางที่ 3.1ข การทดลองในห้องปฏิบัติการชุดที่ 1.2 .....	61
ตารางที่ 3.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการชุดที่ 2 .....	61
ตารางที่ 3.3 การทดลองในห้องปฏิบัติการชุดที่ 3 .....	62
ตารางที่ 3.4 การเก็บตัวอย่าง .....	64
ตารางที่ 3.5 วิธีวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ .....	65
ตารางที่ 3.6 ระยะเวลาและขั้นตอนการวิจัย .....	66
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของน้ำทิ้งที่เก็บมาจากโรงงานเพื่อใช้ในการทดลอง .....	67
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของสารแต่ละชนิดในน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าสู่ระบบนาโนฟิลเตรชัน .....	137
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของเงินลงทุนเบื้องต้นของระบบนาโนฟิลเตรชัน .....	145
ตารางที่ 4.4 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน .....	146
ตารางที่ 4.5 ค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี .....	147
ตารางที่ 4.6 ค่าใช้จ่ายในด้านค่าแรงงาน .....	147
ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษา .....	148
ตารางที่ 4.8 สรุปต้นทุนในการใช้ระบบนาโนฟิลเตรชันบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม .....	149
ตารางที่ 4.9 สรุปคุณภาพน้ำที่บำบัดได้จากการใช้ระบบนาโนฟิลเตรชัน .....	150
ตารางที่ 4.10 คุณภาพน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการฟอกย้อม .....	150

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	2
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของกระบวนการเมมเบรน.....	5
รูปที่ 2.2 การแบ่งประเภทของเมมเบรนตามโครงสร้างของเมมเบรน.....	7
รูปที่ 2.3 ลักษณะการทำงานของเมมเบรนแบบอิลีคโตรไดอะไลซิส.....	10
รูปที่ 2.4 ความสามารถในการกำจัดสารขนาดต่าง ๆ ของเมมเบรนแต่ละชนิด.....	11
รูปที่ 2.5 Plate and Frame Module.....	11
รูปที่ 2.6 Tubular Module.....	12
รูปที่ 2.7 (ก) Hollow Fiber Module (ข) Hollow Fiber Membrane.....	12
รูปที่ 2.8 Spiral Wound Module.....	14
รูปที่ 2.9 กระบวนการ Osmosis และ Reverse Osmosis.....	15
รูปที่ 2.10 รูปขยายของ Thin Film Composite Membrane.....	18
รูปที่ 2.11 Concentration Polarization บนผิวเมมเบรน.....	24
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของฟลักซ์กับระยะเวลาเดินระบบ.....	25
รูปที่ 2.13 ฟลักซ์กับแรงดันที่ใช้สำหรับ NF เมมเบรน (NF70).....	28
รูปที่ 2.14 ผลของแรงดันต่อค่าฟลักซ์สำหรับเมมเบรน.....	28
รูปที่ 2.15 ผลของแรงดันที่ใช้และความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบกับร้อยละการกำจัด.....	29
รูปที่ 2.16 ผลของอุณหภูมิต่อค่าฟลักซ์.....	30
รูปที่ 2.17 ผลของพีเอชกับร้อยละของการกำจัดของกรดอะมิโน โดย NF เมมเบรน.....	31
รูปที่ 2.18 พฤติกรรมของกรดอะมิโนที่จุดต่ำหรือสูงกว่า Isoelectric Point.....	31
รูปที่ 2.19 ผลของพีเอชต่อการลดของฟลักซ์ สำหรับเมมเบรนชนิด NF 40 ในการบำบัด.....	32
รูปที่ 2.20 ผลของสารอื่น ๆ ในน้ำต่อร้อยละของการกำจัด โดย NF เมมเบรน.....	33
รูปที่ 2.21 ผลของสารแขวนลอยต่อค่าฟลักซ์ ในการกำจัดกรดฮิวมิก แรงดันที่ใช้ 20 บาร์.....	34
รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ กับเวลาในการดำเนินระบบ สำหรับ NF เมมเบรน.....	34
รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงของค่า $K_w$ กับเวลาในการดำเนินระบบ.....	35
รูปที่ 2.24 (ก) การกรองแบบทั่วไป และ (ข) Crossflow Filtration.....	36
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลอง.....	53
รูปที่ 3.2 การประกอบชุด Test Cell (บน) การจัดชุดทดลองในห้องปฏิบัติการ (ล่าง).....	58
รูปที่ 3.3 การจัดชุดทดลองที่โรงงานตัวอย่าง.....	60
รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงชุดขนาด Lab Scale.....	62

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงชุดทดลองขนาดทดสอบ (Pilot Scale).....	63
รูปที่ 4.1 ค่า pH ของน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน.....	68
รูปที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิของน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน.....	69
รูปที่ 4.3 ค่าความนำไฟฟ้ากับระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน.....	69
รูปที่ 4.4 ค่าความขุ่นของน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน.....	70
รูปที่ 4.5 สีของน้ำที่เข้าระบบในหน่วย SUตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน.....	70
รูปที่ 4.6 สีของน้ำที่เข้าระบบในหน่วย ADMIตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน.....	71
รูปที่ 4.7 ของแข็งทั้งหมดในน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน.....	71
รูปที่ 4.8 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน.....	72
รูปที่ 4.9 ของแข็งละลายทั้งหมดของน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน.....	72
รูปที่ 4.10 สภาพต่างทั้งหมดของน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน.....	73
รูปที่ 4.11 ความกระด้างทั้งหมดของน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน.....	73
รูปที่ 4.12 แคลเซียมของน้ำที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน.....	74
รูปที่ 4.13 ค่าคลอไรด์ของน้ำดิบที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาของการเดินระบบที่โรงงาน.....	74
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และเวลาในการเดินระบบที่ความดันต่าง ๆ.....	76
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์เฉลี่ยและความดันในการเดินระบบค่าต่าง ๆ.....	76
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของความดันต่อค่าฟลักซ์เฉลี่ยและร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้า.....	79
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของความดันต่อพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลายและความขุ่น.....	80
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของความดันต่อค่าฟลักซ์เฉลี่ยและร้อยละของการกำจัดสี.....	81
รูปที่ 4.19 แสดงสีของน้ำดิบ น้ำสะอาด และน้ำเข้มข้น จากการทดลอง.....	82
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของความดันต่อค่าฟลักซ์เฉลี่ยและร้อยละของการกำจัดคลอไรด์.....	83
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของความดันกับสี คลอไรด์ สภาพต่าง ความกระด้างและแคลเซียม.....	85
รูปที่ 4.22 ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ที่ความดันต่าง ๆ.....	86
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีแลงเกสซีร์ และความดันในการเดินระบบ.....	87
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของฟลักซ์และเวลาการเดินระบบที่ Crossflow Velocity ต่าง ๆ.....	88
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และ Crossflow Velocity ในการเดินระบบ.....	89
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และ Crossflow Velocity ในการเดินระบบ.....	89
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อค่าฟลักซ์เฉลี่ยของน้ำสะอาดและร้อยละ ของการกำจัดความนำไฟฟ้า.....	91

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลายและ ความขุ่นในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบ.....	92
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดสี.....	93
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ต่อค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดและร้อยละ ของการกำจัดคลอไรด์.....	94
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ของ Crossflow Velocity ในการเดินระบบกับสี คลอไรด์ สภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ของน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบ.....	97
รูปที่ 4.32 ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ที่ Crossflow Velocity.....	98
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีแลงเกลียร์ และ Crossflow Velocity ที่ใช้ .....	99
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และเวลาในการเดินระบบที่ % Recovery ต่าง ๆ .....	101
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และ % Recovery ในการเดินระบบ.....	101
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง % Recovery ในการเดินระบบต่อฟลักซ์ของน้ำสะอาด.....	103
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ของ % Recovery ต่อพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลายและความขุ่น .....	104
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ของ % Recovery ต่อค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดสี .....	105
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ของ % Recovery ต่อค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดคลอไรด์ .....	106
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ของ % Recovery ในการเดินระบบกับสี คลอไรด์ สภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ของน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบ.....	109
รูปที่ 4.41 ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ที่ % Recovery.....	110
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีแลงเกลียร์ที่ % Recovery ในการเดินระบบ .....	111
รูปที่ 4.43 เมมเบรนก่อนการทดลอง (บน) และหลังทำการทดลอง โดยไม่มีชุดไมโครฟิลเตอร์ (กลาง) และมีระบบไมโครฟิลเตอร์ (ล่าง).....	113
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์และเวลาในการเดินระบบที่ Pretreatment ต่าง ๆ .....	114
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ของ Pretreatment ต่อค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดและร้อยละของ การกำจัดความนำไฟฟ้า ของการทดลองชุดที่ 3 .....	116
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ของพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลายและ ความขุ่นในน้ำส่วน ต่าง ๆ ของระบบตลอดเวลาการทดลองของระบบที่ใช้ Pretreatment แต่ละชนิด.....	117
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ของ Pretreatment ต่อค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดสี.....	118
รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ของ Pretreatment ต่อค่าฟลักซ์และร้อยละของการกำจัดคลอไรด์.....	119

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ของสี คลอไรด์ สภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียมในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบตลอดเวลาการทดลองของระบบที่ใช้ Pretreatment แต่ละชนิด.....	121
รูปที่ 4.50 ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ที่ Pretreatment ต่าง ๆ .....	122
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ของดัชนีแลงเกลียร์กับเวลาการเดินระบบที่ Pretreatment ต่าง ๆ .....	123
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และเวลาในการเดินระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน.....	125
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำสะอาดและร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้าตลอด ระยะเวลาการทดลอง ของชุดการทดลองที่โรงงาน .....	126
รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของชุดการทดลองที่โรงงาน .....	127
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ของความขุ่นและของแข็งแขวนลอยในน้ำที่เข้าระบบของชุดการทดลอง ที่โรงงาน .....	128
รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ของพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลายและ ความขุ่นในน้ำส่วน ต่าง ๆ ของระบบตลอดเวลาการทดลองของระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน.....	129
รูปที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ของฟลักซ์ของน้ำสะอาดและร้อยละของการกำจัดสีตลอดระยะ เวลาการเดินระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน.....	130
รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ฟลักซ์ของน้ำสะอาดและประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ตลอดระยะเวลา การทดลอง ของชุดการทดลองที่โรงงาน .....	132
รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ของสี สภาพต่าง คลอไรด์ ความกระด้าง และแคลเซียมในน้ำส่วนต่าง ๆ ของระบบตลอดเวลาการทดลองของระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน .....	134
รูปที่ 4.61 ร้อยละของการกำจัดสภาพต่าง ความกระด้าง และแคลเซียม ตลอดระยะเวลาการเดิน ระบบที่โรงงาน ของชุดการทดลองที่โรงงาน .....	135
รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีแลงเกลียร์ของน้ำเข้มข้นและเวลาในการเดินระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน .....	136
รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ความนำไฟฟ้าในน้ำที่ผลิตได้และน้ำเข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน...	138
รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ของแข็งละลายในน้ำที่ผลิตได้และน้ำเข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน .	138
รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ความกระด้างในน้ำที่ผลิตได้และน้ำเข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน ...	139
รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์แคลเซียมในน้ำที่ผลิตได้และน้ำเข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน .....	139
รูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์สภาพต่างในน้ำที่ผลิตได้และน้ำเข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน.....	140
รูปที่ 4.68 แสดงความสัมพันธ์คลอไรด์ในน้ำที่ผลิตได้และน้ำเข้าระบบของชุดการทดลองที่โรงงาน ...	140

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.69 ความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดความนำไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าในน้ำที่เข้าระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน.....	141
รูปที่ 4.70 ความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดของแข็งละลายและของแข็งละลายในน้ำที่เข้าระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน .....	141
รูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดความกระด้างและความกระด้างในน้ำที่เข้าระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน.....	142
รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดแคลเซียมและแคลเซียมในน้ำที่เข้าระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน .....	142
รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดสภาพต่างและสภาพต่างในน้ำที่เข้าระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน .....	143
รูปที่ 4.74 ความสัมพันธ์ของร้อยละของการกำจัดคลอไรด์และความนำไฟฟ้าในน้ำที่เข้าระบบ ของชุดการทดลองที่โรงงาน .....	143
รูปที่ 4.75 ปฏิกริยาของการกำจัดสีประเภทอะโซด้วยโอโซน.....	152
รูปที่ 4.76 การเปรียบเทียบระบบบำบัดแบบเติมอากาศและแบบ submerged membrane ตามด้วยระบบนาโนฟิลเตรชัน .....	152