

การบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน  
ร่วมกับกระบวนการออสโมซิสผันกลับเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่



นายนรา รัตนพันธ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF TEXTILE INDUSTRY EFFLUENT BY COMBINATION OF ULTRAFILTRATION  
AND REVERSE OSMOSIS FOR WATER REUSE



Mr. Nara Rattanaphan

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอัลตราฟิล-  
เตรชั่นร่วมกับกระบวนการออสโมซิสผันกลับเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

โดย

นายนรา รัตนพันธ์

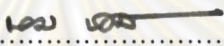
สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

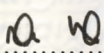
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุชา ขาวเชียร)

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

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีนัย เตชะเสน)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. สมหมาย นัทรแสงอุทัย)

นรา รัตนพันธ์ : การบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับกระบวนการออสโมซิสผกกลับเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่. (TREATMENT OF TEXTILE INDUSTRY EFFLUENT BY COMBINATION OF ULTRAFILTRATION AND REVERSE OSMOSIS FOR WATER REUSE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 178 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยและหาสภาวะที่เหมาะสมในบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับออสโมซิสผกกลับ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 ทำการแปรค่าความดันเข้าระบบอัลตราฟิลเตรชัน 3 ค่า ได้แก่ 0.10, 0.15 และ 0.20 MPa ตามลำดับ ขั้นตอนที่ 2 ทำการแปรค่า %Recovery ของระบบออสโมซิสผกกลับ 3 ค่า ได้แก่ ร้อยละ 60, 70 และ 80 ตามลำดับ ขั้นตอนที่ 3 นำสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดไปเดินระบบระยะยาว

จากการทดลองพบว่า สำหรับระบบอัลตราฟิลเตรชันที่เป็นระบบกรองแบบ dead-end เมื่อเพิ่มความดันให้กับระบบสูงขึ้น อัตราการผลิตน้ำสะอาดก็จะเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสูงด้วย สำหรับระบบออสโมซิสผกกลับ เมื่อค่า %Recovery เพิ่มขึ้นอัตราการผลิตน้ำสะอาดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ค่า %Recovery สูงมาก คือที่ %Recovery เท่ากับ 80% ประสิทธิภาพการกำจัดจะมีค่าลดลง เนื่องจาก น้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นสูงขึ้น มีผลทำให้อนุภาคต่างๆ สามารถหลุดผ่านเมมเบรนไปได้บางส่วน ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดลดลง และจากการที่ค่า %Recovery สูงขึ้นมาก ยังทำให้ระบบเกิดการอุดตันเร็วขึ้นด้วย สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดของระบบของแต่ละพารามิเตอร์มีดังนี้ ร้อยละการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 99.1 ร้อยละการกำจัดการนำไฟฟ้าเท่ากับ 91.4 ร้อยละการกำจัดความกระด้างเท่ากับ 96.8 ร้อยละการกำจัดสภาพค่างเท่ากับ 83.6 ร้อยละการกำจัดคลอไรด์เท่ากับ 85.2 และร้อยละการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 83.3 และประสิทธิภาพของระบบสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการละลาย-แพร่

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต.....๒๗.....รัตนพันธ์.....

ลายมือชื่อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

## 4970378721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ULTRAFILTRATION / REVERSE OSMOSIS / TEXTILE EFFLUENT

NARA RATTANAPHAN: TREATMENT OF TEXTILE INDUSTRY EFFLUENT BY COMBINATION OF ULTRAFILTRATION AND REVERSE OSMOSIS FOR WATER REUSE. THESIS ADVISOR : ASSOC PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 178 pp.

The research was aimed to evaluate a reuse of textile dyeing effluent by using combination of ultrafiltration and reverse osmosis process. Three sets of experiment were performed. Step 1, Pressure of ultrafiltration was varied from 0.10, 0.15 and 0.20 MPa. Step 2, %Recovery of reverse osmosis was varied from 60, 70 and 80. Step 3, Long-term was studied base on the optimum conditions gained from Step 1 and 2.

For dead-end ultrafiltration, the result showed that the higher pressure were performed, the higher fluxes were obtained and increasing of efficiency. For reverse osmosis, the result showed that the higher % recovery were performed, the higher were obtained. But, the %recovery was higher than 80 revealed the less efficiencies of the system. The highest efficiency percentage of turbidity removal, conductivity removal, hardness removal, alkalinity removal, chloride removal and COD removal were 99.1, 91.4, 96.8, 83.6, 85.2 and 83.3 respectively. The system efficiency would be explained by solute – diffusion model.

Department: Environmental Engineering Student's Signature.....*๒๕๓๗ ชวัลิต*  
Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature.....*Chawalit Rattanaphan*  
Academic Year: 2009



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลือของ รศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรม  
สกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ รศ.ดร. สุธา ขาวเขียว ประธานกรรมการ ดร.สมหมาย  
นัทรแสงอุทัย กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ศศ.ดร. ศรัณย์ เตชะเสน กรรมการ สำหรับ  
คำแนะนำต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วง และขอขอบคุณเพื่อนนิสิตทุกคนที่ให้ความ  
ช่วยเหลือและแนะนำการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณกรมโรงงานอุตสาหกรรมสำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำ  
วิทยานิพนธ์ และ บริษัท พัฒนาผ้าไทย จำกัด สำหรับสถานที่และห้องปฏิบัติการในการวิเคราะห์  
ผลการวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจ  
จนสำเร็จการศึกษา



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	4
2.2 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process).....	23
2.3 กระบวนการออสโมซิสผันกลับเมมเบรน (Reverse osmosis Membrane Process)..	36
2.4 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration Membrane Process).....	42
2.5 การอุดตันเมมเบรนและการทำความสะอาด.....	52
2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	56
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	61
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	61
3.2 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลอง.....	62
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	63
3.4 การเก็บน้ำและการวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง.....	64
3.5 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าดำเนินระบบ .....	65
3.6 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย.....	67
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	68
4.1 ลักษณะน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง.....	68
4.2 ผลของการเดินระบบ UF เป็นระบบบำบัดขั้นต้นของระบบ RO.....	69

## สารบัญ (ต่อ)

## หน้า

4.2.1 ผลของความดันต่อการผลิตน้ำสะอาด.....	69
4.2.2 ผลของความดันต่อค่าพีเอช.....	70
4.2.3 ผลของความดันต่ออุณหภูมิ.....	71
4.2.4 ผลของความดันต่อความขุ่น.....	71
4.2.5 ผลของความดันต่อการนำไฟฟ้า.....	72
4.2.6 ผลของความดันต่อความกระด้าง.....	73
4.2.7 ผลของความดันต่อสภาพต่าง.....	74
4.2.8 ผลของความดันต่อคลอไรด์.....	75
4.2.9 ผลของความดันต่อซีโอดี.....	76
4.3 ผลของ %Recovery ของระบบ RO ต่อประสิทธิภาพของระบบ.....	77
4.3.1 ผลของ %Recovery ต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด.....	77
4.3.2 ผลของ %Recovery ต่อพีเอช.....	79
4.3.3 ผลของ %Recovery ต่ออุณหภูมิ.....	80
4.3.4 ผลของ %Recovery ต่อความขุ่น.....	80
4.3.5 ผลของ %Recovery ต่อการนำไฟฟ้า.....	83
4.3.6 ผลของ %Recovery ต่อความกระด้าง.....	84
4.3.7 ผลของ %Recovery ต่อสภาพต่าง.....	85
4.3.8 ผลของ %Recovery ต่อคลอไรด์.....	86
4.3.9 ผลของ %Recovery ต่อซีโอดี.....	87
4.4 ประสิทธิภาพของระบบ RO เมื่อเดินระบบระยะยาว.....	88
4.4.1 ผลต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด.....	88
4.4.2 ผลต่อพีเอช.....	89
4.4.3 ผลต่ออุณหภูมิ.....	89
4.4.4 ผลต่อความขุ่น.....	90
4.4.5 ผลต่อการนำไฟฟ้า.....	91
4.4.6 ผลต่อความกระด้าง.....	94
4.4.7 ผลต่อสภาพต่าง.....	97
4.4.8 ผลต่อคลอไรด์.....	99



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.9 ผลต่อซีไอดี.....	101
4.4.10 ผลต่อลี.....	103
4.5 เปรียบเทียบผลจากการทดลองกับการคำนวณจากสมการความสัมพันธ์.....	103
4.6 คุณภาพน้ำของทั้งระบบ.....	106
4.7 การวิเคราะห์ด้านค่าใช้จ่ายและการลงทุนในการดำเนินระบบ.....	108
4.7.1 เงินลงทุนเริ่มต้น.....	108
4.7.2 ต้นทุนด้านการดำเนินงาน.....	109
4.7.3 ต้นทุนต่อหน่วยการผลิตของระบบออสโมซิสผันกลับ.....	111
4.8 ความเป็นไปได้ในการนำน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมกลับมาใช้ใหม่ ด้วยกระบวนการออสโมซิสผันกลับ.....	112
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	113
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	113
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	114
รายการอ้างอิง.....	115
ภาคผนวก.....	119
ภาคผนวก ก บันทึกผลการทดลอง.....	120
ภาคผนวก ข อัตราการผลิตน้ำสะอาดของการทดลองแต่ละชุด.....	134
ภาคผนวก ค การคำนวณร้อยละการกำจัด.....	140
ภาคผนวก ง การคำนวณหาค่า $K_s$ .....	145
ภาคผนวก จ มาตรฐานน้ำทิ้งที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	166
ภาคผนวก ฉ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	169
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	178

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการพ่นกับเส้นใยของสีย้อมชนิดต่างๆ.....	21
ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด.....	23
ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของโพลีเมอร์ที่ใช้ทำเมมเบรน.....	28
ตารางที่ 2.4 การนำเมมเบรนไปใช้ประโยชน์.....	35
ตารางที่ 2.5 ประเภทของสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดเมมเบรน.....	56
ตารางที่ 3.1 ชุดการทดลอง.....	63
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเมมเบรน.....	64
ตารางที่ 3.3 ความถี่ในการเก็บน้ำตัวอย่าง.....	65
ตารางที่ 3.4 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ.....	65
ตารางที่ 3.5 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย.....	67
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของน้ำทิ้งที่เข้าระบบ.....	68
ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของเงินทุนเบื้องต้นของระบบออสโมซิสผันกลับ.....	109
ตารางที่ 4.3 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน.....	110
ตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี.....	110
ตารางที่ 4.5 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษา.....	111
ตารางที่ 4.6 สรุปต้นทุนในการใช้ระบบนาโนฟิลเตรชันบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม.....	111
ตารางที่ 4.7 สรุปคุณภาพน้ำที่บำบัดได้จากการใช้ระบบออสโมซิสผันกลับ.....	112

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการฟอกย้อม.....	5
รูปที่ 2.2 ตัวอย่าง โครงสร้างของสีเอซิด (acid dye).....	13
รูปที่ 2.3 ตัวอย่าง โครงสร้างของสีไคเร็กท์ (direct dye).....	14
รูปที่ 2.4 ตัวอย่าง โครงสร้างของสีเบสิก (basic or cationic dye).....	14
รูปที่ 2.5 ตัวอย่าง โครงสร้างของสีคิสมเพอร์ส (disperse dye).....	15
รูปที่ 2.6 ตัวอย่าง โครงสร้างของสีรีแอกทีฟ (reactive dye).....	16
รูปที่ 2.7 ตัวอย่าง โครงสร้างของสีเว็ท (vat dye).....	16
รูปที่ 2.8 ตัวอย่าง โครงสร้างของสีมอร์ดันท์ หรือ โครม (mordant or chrome dye).....	17
รูปที่ 2.9 ตัวอย่าง โครงสร้างของสีซัลเฟอร์ (sulfer dye).....	18
รูปที่ 2.10 Module with Hollow Fiber Membrane.....	23
รูปที่ 2.11 การทำงานของกระบวนการเมมเบรน.....	24
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบการกรองน้ำผ่านแผ่นกรองธรรมดา กับแผ่นเมมเบรน.....	25
รูปที่ 2.13 การแบ่งประเภทของเมมเบรนตามโครงสร้างของเมมเบรน.....	26
รูปที่ 2.14 การแบ่งชนิดระบบการกรอง.....	30
รูปที่ 2.15 ลักษณะ โมดูลแบบแผ่น (Plate and Frame Module).....	32
รูปที่ 2.16 ลักษณะ โมดูลแบบท่อ (Tubular Module).....	33
รูปที่ 2.17 ลักษณะ โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module).....	33
รูปที่ 2.18 ลักษณะ โมดูลแบบม้วน (Spiral Wound Module).....	34
รูปที่ 2.19 การไหลของน้ำ ( $J_w$ ) เมื่อมีแรงดันมากกระทำ.....	36
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	61
รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบระบบอัลตราฟิลเตรชัน.....	63
รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบระบบออสโมซิสผันกลับ.....	64
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลาของการทดลองที่ 1.....	69
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์เฉลี่ยกับความดันของการทดลองที่ 1.....	70
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1.....	70
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1.....	71
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1.....	72
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้ากับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1.....	73
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างกับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1.....	74

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต่างกับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1.....	75
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างคลอไรด์กับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1.....	76
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอไซด์กับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1.....	77
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำสะอาดกับเวลาของการทดลองที่ 2.....	78
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำสะอาดเฉลี่ยกับ %Recovery ของการทดลองที่ 2.....	78
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลาของการทดลองที่ 2.....	79
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเฉลี่ยกับ %Recovery ของการทดลองที่ 2.....	80
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการทดลองที่ 2.....	81
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยกับ %Recovery ของการทดลองที่ 2.....	81
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับเวลาของการทดลองที่ 2.....	82
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Recovery กับความขุ่นเฉลี่ยและร้อยละกำจัด ของการทดลองที่ 2.....	82
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Recovery กับการนำไฟฟ้าเฉลี่ยและร้อยละกำจัด ของการทดลองที่ 2.....	83
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Recovery กับความกระด้างเฉลี่ยและร้อยละกำจัดของ การทดลองที่ 2.....	85
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Recovery กับสภาพต่างเฉลี่ยและร้อยละกำจัดของ การทดลองที่ 2.....	86
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Recovery กับคลอไรด์เฉลี่ยและร้อยละกำจัดของ การทดลองที่ 2.....	87
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Recovery กับซีโอไซด์เฉลี่ยและร้อยละกำจัดของ การทดลองที่ 2.....	87
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลาของการทดลองที่ 3.....	88
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลาของการทดลองที่ 3.....	89
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการทดลองที่ 3.....	90
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับเวลาของการทดลองที่ 3.....	90
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละกำจัดความขุ่นของการทดลองที่ 3	91

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้ากับเวลาของการทดลองที่ 3.....	91
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละกำจัดการนำไฟฟ้าของ การทดลองที่ 3.....	92
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบ.....	92
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างกับเวลาของการทดลองที่ 3.....	95
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละกำจัดการความกระด้างของ การทดลองที่ 3.....	95
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกระด้างในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบ.....	96
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต่างกับเวลาของการทดลองที่ 3.....	97
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละการกำจัดสภาพต่างของ การทดลองที่ 3.....	98
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต่างในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบ.....	98
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างคลอไรด์กับเวลาของการทดลองที่ 3.....	100
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละการกำจัดคลอไรด์ของ การทดลองที่ 3.....	100
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลอไรด์ในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบ.....	101
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอไซด์กับเวลาของการทดลองที่ 3.....	102
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละการกำจัดซีโอไซด์ของ การทดลองที่ 3.....	102
รูปที่ 4.43 สีของน้ำเข้าระบบ น้ำสะอาดและน้ำเข้มข้นของการทดลองที่ 3.....	103
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกระด้างในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบจาก การทดลองและการคำนวณสมการ.....	104
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต่างในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบจากการ ทดลองและการคำนวณสมการ.....	104
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลอไรด์ในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบจากการ ทดลองและการคำนวณสมการ.....	105
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบจากการ ทดลองและการคำนวณสมการ.....	105



## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.48 ค่าความชุ่มของน้ำเข้ระบบและน้ำสะอาดของแต่ละระบบ.....	106
รูปที่ 4.49 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเข้ระบบและน้ำสะอาดของแต่ละระบบ.....	106
รูปที่ 4.50 ค่าความกระด้างของน้ำเข้ระบบและน้ำสะอาดของแต่ละระบบ.....	107
รูปที่ 4.51 ค่าสภาพค่างของน้ำเข้ระบบและน้ำสะอาดของแต่ละระบบ.....	107
รูปที่ 4.52 ค่าคลอไรด์ของน้ำเข้ระบบและน้ำสะอาดของแต่ละระบบ.....	107
รูปที่ 4.53 ค่าซีโอดีของน้ำเข้ระบบและน้ำสะอาดของแต่ละระบบ.....	108



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

อุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทยจัดเป็นอุตสาหกรรมที่ใหญ่และมีความสำคัญต่อประเทศ มีการจ้างงานและทำรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นจำนวนมาก กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ตั้งแต่เส้นใยถึงเครื่องนุ่งห่ม โรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในอุตสาหกรรมสิ่งทอนี้ต่างมีส่วนในการก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหามลพิษทางน้ำ ซึ่งน้ำเสียส่วนที่มีปัญหาที่สุดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอคือ น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม ซึ่งน้ำเสียจากกระบวนการนี้เกิดจากสีย้อมที่ใช้ไปไม่หมดในกระบวนการย้อมผ้าหรือผ้า ทั้งนี้เป็นลักษณะโดยทั่วไปของกระบวนการย้อมผ้าที่ไม่สามารถใช้สีย้อมให้หมดในน้ำได้ ไม่ว่าจะอย่างไรก็ตาม จำต้องมีสีย้อมเหลืออยู่ในน้ำย้อมเสมอ นอกจากนี้ยังมีสารเคมีต่างๆที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมอีกด้วย ซึ่งสีและสารเคมีเหล่านี้เมื่อถูกระบายทิ้งออกมาพร้อมกับน้ำเสียของโรงงานจะทำให้เกิดการปนเปื้อนกับแหล่งน้ำภายนอกมาก ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันมีหลายกระบวนการที่ยอมรับกันว่าสามารถกำจัดสีในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมได้ ได้แก่ การใช้กระบวนการทางฟิสิกส์-เคมี กระบวนการทางชีวภาพ หรือใช้ทั้งสองกระบวนการร่วมกัน เช่น การใช้กระบวนการทางชีวภาพ (กระบวนการแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์) แล้วตามด้วยกระบวนการทางเคมี (กระบวนการตกตะกอนทางเคมี การออกซิเดชันด้วยสารเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น) โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีแตกต่างกันไปในแต่ละวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสีย้อมที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย อย่างไรก็ตาม แต่ละกระบวนการก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ เช่น การกำจัดสีโดยใช้กระบวนการทางฟิสิกส์-เคมี ที่นอกจากจะไม่สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้วยังเพิ่มปริมาณสลัดจ์ที่ต้องกำจัดอีกด้วย ส่วนกระบวนการทางชีวภาพก็ยังไม่สามารถลดสีลงได้จนเป็นที่น่าพอใจ โดยเฉพาะน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงหรือมีโครงสร้างสียางชนิดที่แบคทีเรียไม่สามารถลดสีลงได้ จึงทำให้น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมบางชนิดยังไม่สามารถถูกบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กระบวนการเมมเบรนจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาขึ้น และสามารถกำจัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าที่บำบัดแบบอื่นๆจะกำจัดได้ เช่น กระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพการ

กำจัดสีและความขุ่นได้ 98%-100% (สนธยา สรหงษ์, 2546) กระบวนการออสโมซิสผันกลับสามารถกำจัดสีได้เท่ากับ 100% (สุวิทย์ กิตติภูมิชัย, 2543) เป็นต้น จะเห็นได้ว่ากระบวนการเมมเบรนมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆ แต่เนื่องจากกระบวนการเมมเบรนทำงานภายใต้แรงดันและมีผนังของเมมเบรนเป็นตัวกรองสิ่งเจือปนออกจากน้ำ ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงและเกิดการอุดตันของเมมเบรนขึ้น มีผลทำให้ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูงขึ้น ทำให้กระบวนการเมมเบรนไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้บำบัดน้ำเสีย

ดังนั้น งานวิจัยนี้ศึกษาความเหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับกระบวนการออสโมซิสผันกลับเพื่อเป็นทางเลือกในการกำจัดสีและสารปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำเสียจากและหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการดังกล่าว เพื่อให้มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด ลดการอุดตันของเมมเบรนและศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำน้ำที่ได้จากกระบวนการเมมเบรนกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาสภาวะการเดินระบบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบอัลตราฟิลเตรชันและระบบออสโมซิสผันกลับ ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต

1.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเมมเบรนในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและกระบวนการออสโมซิสผันกลับ

1.2.3 ศึกษาโมเดลคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการทำงานของระบบเมมเบรน

1.2.4 ศึกษาความเหมาะสมด้านการลงทุนและการใช้จ่ายในการเดินระบบ ในการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้น้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Activated Sludge) จากโรงงานตัวอย่าง

1.3.2 ทำการทดลองโดยใช้ชุดขนาดทดสอบ (Pilot Scale) ที่โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอตัวอย่าง

1.3.3 ทำการทดลองหาปัจจัยที่ใช้ในการเดินระบบที่เหมาะสม ดังนี้

1.) ความดันในการเดินระบบ UF

2.) % recovery ระบบ RO

1.3.4 ทดลองเดินระบบในระยะยาว (ประมาณ 400 ชม.) เพื่อศึกษาการอุดตันของ ระบบ UF และ RO

1.3.5 การศึกษาโมเดล Solution diffusion model สำหรับระบบ RO เพื่ออธิบายการทำงานของระบบ

1.3.6 วิเคราะห์การทำงานของระบบที่มีผลต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด และคุณภาพน้ำที่ได้ ได้แก่ อุณหภูมิ ซีโอดี พีเอช ความนำไฟฟ้า ความขุ่น สภาพต่าง ความกระด้าง แคลเซียม และคลอไรด์

1.3.7 วิเคราะห์ปัจจัยด้านการลงทุนและค่าการดำเนินการระบบ มีสมมุติฐานดังนี้ คือ ระบบสามารถบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานได้ในอัตรา 3,500 m<sup>3</sup>/d ระบบทำงานวันละ 24 ชม. ทำงานปีละ 300 วัน ระบบมีอายุการทำงาน 15 ปีและเมมเบรนมีอายุทำงาน 3 ปี



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อุตสาหกรรมสิ่งทอ

##### 2.1.1 กระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ปรับเปลี่ยนเส้นใย โดยใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมและอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง ดังนั้นกระบวนการฟอกย้อมจึงเป็นกระบวนการที่ใช้ น้ำมากและมีการใช้สารเคมีที่หลากหลาย เป็นกระบวนการที่สร้างของเสียในปริมาณมาก กระบวนการที่สำคัญ 3 กระบวนการ ได้แก่

##### 2.1.1.1 การเตรียมผ้า

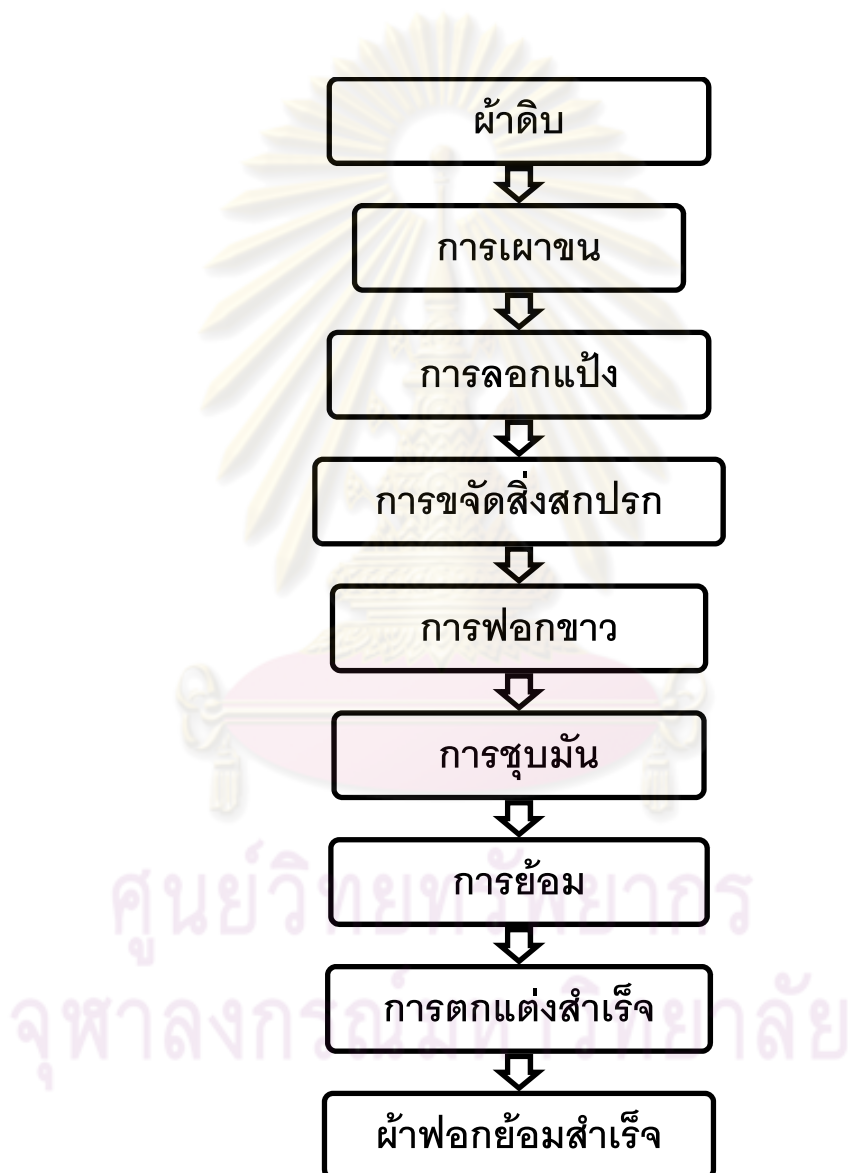
กระบวนการเตรียมผ้า นับว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตได้จากการฟอกย้อมและตกแต่งสำเร็จ ทั้งนี้เพราะขั้นตอนนี้เป็นการนำเส้นด้ายหรือผ้าดิบจากโรงปั่นหรือทอ มาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเตรียมเส้นด้ายหรือผ้านั้นให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปย้อมสีหรือแต่งสำเร็จได้อย่างดี จุดมุ่งหมายที่สำคัญของขั้นตอนการเตรียมสิ่งทอมีดังนี้

- 1) เพื่อขจัดสิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย ทำให้เส้นใยมีความสะอาดและมีการดูดติดสีย้อมและสารเคมีต่างๆ อย่างสม่ำเสมอ สิ่งสกปรกที่เจือปนในเส้นใยเช่น พวกสารหล่อลื่นที่มีการเติมลงในขั้นตอนการปั่นใยสังเคราะห์ แป้งที่ใช้ลงเส้นด้ายยีนที่ใช้ในการทอผ้า เป็นต้น
- 2) เพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี อันจะทำให้กระบวนการพิมพ์ และการตกแต่งสำเร็จอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถประหยัดเวลาและสารเคมีที่ใช้ลงได้
- 3) เพื่อช่วยให้การย้อม พิมพ์ หรือการตกแต่งสำเร็จ ในขั้นตอนต่อไปบังเกิดผลตามที่ต้องการอย่างเต็มที่ ยกตัวอย่างเช่น ในการทำผ้าขาวซึ่งต้องมีการตกแต่งขาวนั้น เพื่อให้ได้ผ้าที่มีความขาวสูงสุด ในขั้นตอนการเตรียมผ้าควรได้รับสารฟอกขาวมาอย่างดี หรือการต้องการผ้าที่มีความเงามันเป็น



พิเศษก็ควรมีการเผาขนผ้าและผ่านการตกแต่งสำเร็จเพื่อให้เกิดความเงามัน  
สูงสุด

- 4) เพื่อให้เส้นใยมีการดูดติดสีและสารเคมีได้มากขึ้น เช่น วิธีการชุบมัน ใน  
กรณีของผ้าฝ้าย เป็นต้น
- 5) เพื่อให้เส้นใยมีความคงรูป ไม่เสียรูปไปในระหว่างขั้นตอนการตกแต่ง  
อื่นๆ ในภายหลัง กรณีนี้มักจะมีกับพวกใยสังเคราะห์



รูปที่ 2.1 กระบวนการฟอกย้อม

ที่มา : คู่มือการจัดการสิ่งแวดลอมโรงงานฟอกย้อม กรมโรงงานอุตสาหกรรม

สำหรับกระบวนการในการเตรียมสิ่งทอแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญดังนี้ คือ

#### 2.1.1.1.1 การเผาขน (Singeing)

ในเส้นด้ายที่ปั่นจากใยสั้นที่เรียกว่าเส้นด้ายสปันนั้น มักจะมีปลายใยโผล่ขึ้นมาเหนือพื้นผิวของเส้นด้ายเป็นจำนวนมาก และเมื่อเส้นด้ายนั้นถูกนำไปทอเป็นผืนผ้า ปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมาเหนือผิวเส้นด้ายก็จะมามากขึ้น สืบเนื่องจากการเสียดสีที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอ ปลายเส้นใยที่โผล่ผิวเส้นด้ายนี้ มีผลทำให้พื้นผิวผ้าดูไม่เรียบ เป็นการทำลายความเงาของผ้า จึงมีการคิดวิธีการกำจัดปลายเส้นใยด้วยความร้อนเผาทำลาย กระบวนการนี้จึงเรียกว่า การเผาขน

#### 2.1.1.1.2 การลอกแป้ง (Desizing)

การลอกแป้งเป็นกระบวนการที่มีความจำเป็นสำหรับการทอผ้า เนื่องจากในการทอผ้าจะต้องมีการลงแป้งเส้นด้ายด้วยขึ้น เพื่อให้การทอดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อนำผ้าที่ทอเสร็จแล้วไปทำการฟอกย้อม แป้งที่เคลือบอยู่บนเส้นด้ายจะมีผลต่อคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใย ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องมีการขจัดออกไป ขั้นตอนการลอกแป้งมีความสำคัญพอสรุปได้ดังนี้ คือ

- 1.) การลอกแป้งทำให้ผ้ามีคุณสมบัติในการเปียกน้ำได้ดีและสม่ำเสมอ อันจะช่วยทำให้การตกแต่งผ้าในขั้นตอนต่อไป เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ
- 2.) ทำให้ผ้ามีคุณสมบัติในการดูดติดสีและสารเคมีอย่างสม่ำเสมอทั้งผืน
- 3.) ทำให้ผ้ามีความนุ่มต่อการสัมผัส ไม่หยาบและแข็งกระด้าง

การกำจัดแป้งสามารถทำได้ 4 วิธีดังนี้

- 1.) การหมัก (rot steeping) กรรมวิธีประกอบไปด้วยการจุ่มผ้าให้เปียกแล้วหมักไว้ในอุณหภูมิห้องปล่อยให้แบคทีเรียในน้ำและอากาศย่อยสลาย ต้องใช้เวลาประมาณ 30 ชั่วโมง
- 2.) การใช้กรด (acid steeping) วิธีนี้ใช้กรดทำปฏิกิริยากับแป้ง ความแรงของกรด ความเข้มข้นและอุณหภูมิเป็นตัวแปรในการทำปฏิกิริยาของกรด กรดสามารถย่อยสลายเส้นใยได้โดยเฉพาะเส้นใยฝ้าย ดังนั้น ต้องระวังเรื่องการทำลายเส้นใย
- 3.) การใช้เอนไซม์ (enzymatic desizing) เอนไซม์เป็นสารชีวเคมีที่มีความเฉพาะเจาะจงสูง ดังนั้นการทำปฏิกิริยากับสารจะเกิดกับสารเฉพาะอย่างเท่านั้น

4.) การกำจัดแป้งด้วยสารออกซิไดซิง สารออกซิไดซิงได้แก่ สารประกอบเปอร์ซัลเฟต หรือเปอร์ออกไซด์ เช่น โซเดียมเปอร์ซัลเฟต โปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นต้น ข้อดีของการใช้สารกลุ่มนี้คือ จะได้ผ้าขาวกว่าวิธีอื่น เนื่องจากสารกลุ่มนี้เกิดการฟอกขาว (bleach) นอกจากการกำจัดแป้งด้วย ส่วนข้อเสีย คือ ทำลายเส้นใยถ้าหากใช้ในปริมาณมากเกินไป

#### 2.1.1.1.3 การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring)

การขจัดสิ่งสกปรก หมายถึง การกำจัดไขมันและสารปนเปื้อนต่างๆ เช่น สารประกอบพวกเกลือ ทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับวัสดุสิ่งทอทุกประเภท เนื่องจากเส้นใยทุกชนิดมักจะต้องมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ด้วยเสมอ จำเป็นต้องกำจัดออกไปเพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี และสามารถดูดติดสีได้อย่างสม่ำเสมอ ธรรมชาติของสิ่งสกปรกของเส้นใยแต่ละชนิดมีวิธีการที่ไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสิ่งสกปรก โดยปกติเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกมากกว่าเส้นใยสังเคราะห์เพราะฉะนั้น จึงต้องใช้กรรมวิธีที่รุนแรงกว่า ยกตัวอย่างเช่น ใยฝ้ายโดยเฉลี่ยจะมีสิ่งสกปรกเจือปนจากธรรมชาติ 10% ของน้ำหนักเส้นใยทั้งหมด สิ่งสกปรกประกอบไปด้วย สารขี้ผึ้ง สารพวกเปคติน โปรตีน พวกเศษไม้ และเศษเมล็ดฝ้าย เป็นต้น การขจัดสิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใยต้องใช้วิธีการต้มฝ้ายในสารละลายโซดาไฟ สิ่งเจือปนจึงถูกทำลายและละลายน้ำหลุดออกมา การตรวจสอบประสิทธิภาพสามารถทำได้โดยการตรวจคุณสมบัติในด้านการดูดซึมน้ำของผ้า การตรวจดูความขาว และการวิเคราะห์น้ำหนักที่ลดลงไป เป็นต้น สำหรับการขจัดสิ่งสกปรกเจือปนจากพวกใยสังเคราะห์ ทำได้ง่ายกว่าฝ้าย

#### 2.1.1.1.4 การฟอกขาว

การฟอกขาว (Bleaching) หมายถึง การกำจัดสารมีสีในธรรมชาติที่ติดมากับวัสดุสิ่งทอ โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น ขั้นตอนการฟอกขาวนี้ เป็นขั้นตอนที่จำเป็นโดยเฉพาะกับผ้าที่จะนำไปทำเป็นผ้าขาว และสำหรับผ้าที่จะถูกนำไปย้อมสีอ่อนเพื่อให้ได้สีที่สดใส และไม่ผิดไปจากสีที่ใช้ สำหรับผ้าที่จะนำไปย้อมสีเข้มไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนนี้ ในกรณีใยสังเคราะห์ก็เช่นกัน สารฟอกขาวที่มีความสำคัญและใช้กันมาก ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) สารประกอบไฮโปคลอไรท์ ( $NaClO$ ) และสารประกอบคลอไรท์

#### 2.1.1.1.5 การชุบมัน (Mercerization)

เป็นกระบวนการที่นอกจากจะทำให้ความสามารถการดูดซึมน้ำและสี ย้อมดีขึ้นแล้ว ยังมีความเงามันและความแข็งแรงมากขึ้นด้วย สามารถทำกับผ้าฝ้ายและผ้าจากใย

ผสมได้ด้วย ประเภทของการชุบมัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การชุบมันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือคอสติกโซดา และการชุบมันด้วยแอมโมเนียเหลว

### 2.1.1.2 การย้อมสี (Textile Dyeing)

วัสดุสิ่งทอส่วนใหญ่จะต้องมีการนำไปให้สีก่อนการใช้งาน ด้วยวิธีการย้อม (Dyeing) จะให้สีพื้น ผ่าผืนหรือเส้นด้ายที่มีสีลักษณะแตกต่างกันไป หลักการย้อมสี คือ การใช้วิธีการที่เหมาะสมให้สารประกอบเคมีที่ละลายเป็นสารละลายหรือกระจายอยู่ในสารละลาย (Dispersion) ทำให้เกิดสีบนวัสดุที่ต้องการย้อม (Substrates) เช่น เส้นใย ผ้า ผ้าย เป็นต้น แล้วทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมอย่างถาวร การเกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมไม่เพียงแต่เกิดบนผิวหน้าเท่านั้น แต่จะสามารถซึมให้เกิดสีตลอด (Uniformly) บนผิวรอบภาคตัดขวางของวัสดุที่จะย้อมด้วย

ขั้นตอนการย้อม มีวิธีการดังนี้ คือ ผ้าดิบที่ผ่านการเตรียมและทำความสะอาดแล้วจะนำไปย้อมให้สีติดบนเส้นใยของผ้าด้วยเครื่องย้อม (Dyeing machine) กลไกของการดูดซึมสีย้อมและเกาะติดแน่นบนเส้นใยของผ้าจะมีความซับซ้อนมาก แต่โดยทั่วไปแล้ว สีย้อมจะต้องทำให้อยู่ในรูปของสารละลาย แล้วให้มีการดูดซึมสารละลายสีย้อมโดยเส้นใยในอ่างย้อม (Dye Bath) แรงที่ทำให้เกิดการดูดซึมและเกาะติดบนเส้นใยของโมเลกุลของสีย้อมอาจเกิดเป็นแรงทางเคมี เช่น แรงโคเวเลนต์ แรงไอออนิก หรือแรงคู่ทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ ดังนั้น ปัจจัยทางด้านระยะเวลาในการย้อม อุณหภูมิ pH และสารเคมีช่วยย้อมต่างๆ จะมีผลต่อประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอของสีย้อมที่จะติดอยู่บนเส้นใย ในทางปฏิบัติจึงจำเป็นต้องให้สารละลายของสีเคลือบหุ้มตลอดทั้งผิวหน้าของวัสดุที่จะย้อม ซึ่งก็เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องย้อมทุกชนิด และเพื่อให้การย้อมใช้เวลาน้อยลง การเพิ่มอัตราการแพร่กระจาย (Diffusion) ของโมเลกุลของสีไปยังเส้นใยสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายที่ย้อม ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมจะมีผลทำให้การแพร่กระจายของสีย้อมบนผิวหน้าเส้นใยมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

กรรมวิธีการย้อมผ้าสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งที่เป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ผู้ย้อมสามารถเลือกใช้วิธีการย้อมที่เหมาะสมกับสภาพโรงงานและความต้องการเฉพาะกรณีได้ กรรมวิธีการย้อมสามารถแบ่งออกได้ 3 วิธี ดังนี้

- 1.) การย้อมแบบดูดซึม (Exhaust Method) การย้อมวิธีนี้วัสดุที่ย้อมจะถูกแช่หรือหมუნอยู่ในอ่างย้อม จนกระทั่งการย้อมเสร็จสมบูรณ์

2.) การย้อมด้วยวิธีกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous Method) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Pad-Batch Dyeing ประกอบด้วยขั้นตอนการอัดน้ำสีและล้าง การม้วนเก็บไว้ และการซัก

3.) การย้อมด้วยวิธีต่อเนื่อง (Continuous Method) ในวิธีนี้ผ้าจะเคลื่อนที่ไปตามการย้อมต่างๆอย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการหยุดแช่อยู่ที่จุดใด กรรมวิธีโดยทั่วไปประกอบด้วย การอัดสีกับล้าง การอบแห้ง การผนีกสีโดยใช้ไอน้ำหรือความร้อน และการซัก

### 2.1.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing)

การตกแต่งสำเร็จเป็นกระบวนการหนึ่งในการตกแต่งสิ่งทอ ซึ่งมักกระทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายต่อจากการเตรียมและการให้สีสิ่งทอ เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์ สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท ได้แก่

#### 2.1.1.3.1 การจำแนกตามกรรมวิธีการตกแต่ง

1.) การตกแต่งด้วยวิธีทางเชิงกล (mechanical Finishing) เป็นการตกแต่งโดยใช้เครื่องจักรในการผลิตทำให้สิ่งทอมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เช่น การตกแต่งเพื่อควบคุมการหดตัวของผ้าด้วยเครื่อง Stenter ชนิดเข็ม เป็นต้น

2.) การตกแต่งสำเร็จด้วยสารเคมี (Chemical Finishing) เป็นการตกแต่งสำเร็จด้วยสารเคมี สารเคมีที่ใช้มีทั้งที่เป็นธรรมชาติ เช่น แป้ง หรือสารสังเคราะห์ เช่น โพลีเอทิลีนพีวีเอ เป็นต้น

#### 2.1.1.3.2 จำแนกตามวัตถุประสงค์ของการตกแต่ง

1.) ประโยชน์การใช้งาน เช่น การตกแต่งผ้าให้แข็งมีความจำเป็นในกรณีผ้าบางชนิดนุ่มและลื่นมากจนอุปสรรคต่อการตัดเย็บ การตกแต่งผ้าให้นุ่ม นิยมใช้ทำเสื้อผ้านเด็ก

2.) การตกแต่งผ้าที่ใช้ที่เน้นเรื่องของการบำรุงรักษาให้ใช้ได้ดี และสวยงามตลอดเวลา เช่น กรณีของผ้าตกแต่ง ซึ่งต้องตกแต่งผ้าให้มีคุณสมบัติกันน้ำ เป็นต้น

3.) การตกแต่งที่เน้นในเรื่องของความปลอดภัยของการใช้ผ้าเป็นหลัก เช่น การตกแต่งเพื่อไม่ให้ติดไฟง่าย การตกแต่งเพื่อกันแบคทีเรียและเชื้อรา เป็นต้น

4.) การตกแต่งเพื่อให้เกิดความสวยงามหรือเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผ้า ซึ่งเป็นการตกแต่งเชิงกลส่วนมาก เช่น ตกแต่งผ้าให้มีความมันเงา เป็นต้น



## 2.1.2 สีย้อม (Dye)

### 2.1.2.1 ลักษณะทั่วไปของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สำคัญสำหรับการฟอกย้อม โดยจะทำหน้าที่ให้สีติดไปกับผ้าหรือผ้าที่นำมาย้อม โดยคุณสมบัติของสีที่จะติดผ้าชนิดต่าง ๆ นั้น ต้องติดคงทน ทนต่อแดด น้ำ สบู่ และน้ำยาซักแห้ง ดังนั้นเมื่อสีย้อมไม่ติดไปกับเนื้อผ้า ก็จะปนเปื้อนไปกับน้ำทิ้ง ซึ่งจะกลายเป็นน้ำเสียที่บำบัดยาก เพราะมีโครงสร้างที่ซับซ้อน

การเกิดสีของสีย้อมจะเกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมนี้เรียกว่า โครโมเจน (chromogen) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและส่วนที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการละลายและลักษณะที่เกี่ยวกับการย้อมเรียกว่า ออกโซโครม (auxochromes) เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โครโมเจนเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยอะโรมาติก ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่ทำให้เกิดสีเรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophores) โครโมฟอร์ทำให้เกิดสีได้โดยการเปลี่ยนแปลงช่วงการดูดกลืนแสงให้อยู่ในช่วงสเปกตรัม (พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400 – 700 นาโนเมตร) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่มคือ

- กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group)
- กลุ่มไนโตร (Nitro Group)
- กลุ่มอะโซ (Azo Group)
- กลุ่มเอทิลีน (Ethylene Group)
- กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group)
- กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen Group)
- กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur Group)

สีย้อมมีมากมายหลายชนิด การนำสีย้อมมาใช้ย้อมให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ต้องมีอำนาจมากกว่าอำนาจรวมตัวกันของสีกับน้ำ การเกิดสถานะนี้เมื่อสีโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดบอนด์ (bond) ยึดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) , แรงแวนเดอร์วาล (Van der Waals' force) , แรงไอออน (ionic force) และ พันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กำลังแรงเหล่านี้มักไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อม กับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดี

ที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ การเกิดสีของสีย้อม สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้ เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอม ประเภทหนึ่งภายใน โมเลกุลของสีย้อม

ความเป็นพิษของสีย้อมและมลพิษของสีย้อมโดยทั่วไป สีย้อมเป็นสารที่จัดได้ว่ามีความเป็นพิษต่ำ โดยไม่พบว่ามีอัตราการตาย หรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานใน โรงงานฟอกย้อมสูงกว่าบุคคลอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทางคือทางจุกโดยการสูดดม ทางผิวหนังโดยการสัมผัส และทางระบบทางเดินอาหาร โดยปนเข้าไปกับอาหารการกิน แต่ก็เป็นที่ทราบกันดีว่าสารวัตถุเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ สีย้อม มีจำนวนไม่น้อยที่มีความเป็นพิษสูงมาก และมีหลายตัวเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น 2-naphthylamine และ benzidine

ผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม หรือสมบัติด้านมลพิษของสีย้อมนั้น พบว่าสีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่ความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้ง ปัจจุบันมิได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้ง เนื่องจาก สีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้น แม้มีสีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่ รังเกียจของผู้พบเห็นได้ จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม

ปัญหาที่เกิดจากสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ
2. สีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง
3. ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช
4. การผลิตออกซิเจนลดลง เนื่องจากผลกระทบจากข้อ 3 ซึ่งส่งผลต่อสัตว์

น้ำ

5. ความเป็นพิษของตัวสีย้อม บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง
6. ทั้งหมดข้างต้นส่งผลให้สภาพของแหล่งน้ำไม่เหมาะต่อการดำรงชีวิต

ของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

#### 2.1.2.2 สารช่วยย้อม

สารช่วยย้อม คือ สารเคมีที่ใส่ลงไปในกระบวนการย้อมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดติดสีได้มากขึ้น ทำให้สีที่ติดเส้นเส้นใยมีความคงทนและสม่ำเสมอ สารช่วยย้อมแบ่งออกเป็น 7 ประเภท คือ

- 1.) กรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอน เมื่อใช้สีย้อมแอซิด

2.) ต่าง ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูลูโลสด้วยสีย้อมอะโซอิก สีย้อมแวกซ์และสีย้อมกำมะถัน

3.) เกลือใช้ในการย้อมด้วยสีแอซิก และการย้อมเส้นใยเซลลูลูโลสทุกชนิด

4.) สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ ใช้กับสีแวกซ์ ดิสเพอร์สและสีแอซิกบางชนิด

5.) สารนำ (carrier) ใช้เมื่อย้อมขนสัตว์และใยสังเคราะห์บางชนิด

6.) สารละลายอินทรีย์ ใช้เมื่อย้อมขนสัตว์และใยสังเคราะห์บางชนิด

7.) สารรีดิวซ์ ใช้สำหรับรีดิวซ์ตัวสีบางชนิดเพื่อประโยชน์ในการดูดซึมเข้าไปใน

เส้นใย

สารช่วยย้อมแต่ละประเภทนี้ยังแบ่งออกเป็นสารเคมีชนิดต่างๆมากมาย ดังนั้น สีย้อมแต่ละชนิดย่อมมีสารช่วยย้อมแตกต่างกันไป เป็นผลให้น้ำเสียจากกระบวนการย้อมแตกต่างกันไปด้วย (นริษฎา กวีนั้นทวงศ์, 2541)

#### 2.1.2.3 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมที่ใช้ในโรงงานทอผ้ามีมากมายหลายชนิดตามชนิดของเส้นใยหรือผ้าที่จะนำมาย้อม สีย้อมอาจจำแนกออกได้หลายประเภทตามลักษณะทางกายภาพ โดยแบ่งออกได้เป็นสารสีที่ละลายน้ำได้และสารสีที่ไม่ละลายน้ำหรือจำแนกตามส่วนประกอบทางเคมี ซึ่งวิธีนี้ยุ่งยากเพราะต้องอาศัยความรู้ทางด้านเคมีและสูตรโครงสร้างของสีด้วย วิธีจำแนกสีที่ได้รับความนิยมและเข้าใจง่ายได้แก่ การจำแนกสีตามการนำไปใช้งาน ซึ่งแบ่งสีย้อมทั้งหมดออกเป็น 11 ประเภท (นริษฎา กวีนั้นทวงศ์, 2541)

- สีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse dye)

- สีย้อมแอซิก (Acid dye)

- สีย้อมอะโซอิก (Azoic dye)

- สีย้อมเบสิก (Basic dye)

- สีย้อมไดเรกต์ (Direct dye)

- สีย้อมมอดานท์ (Modant dye)

- สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur dye)

- สีย้อมแวกซ์ (Vat dye)

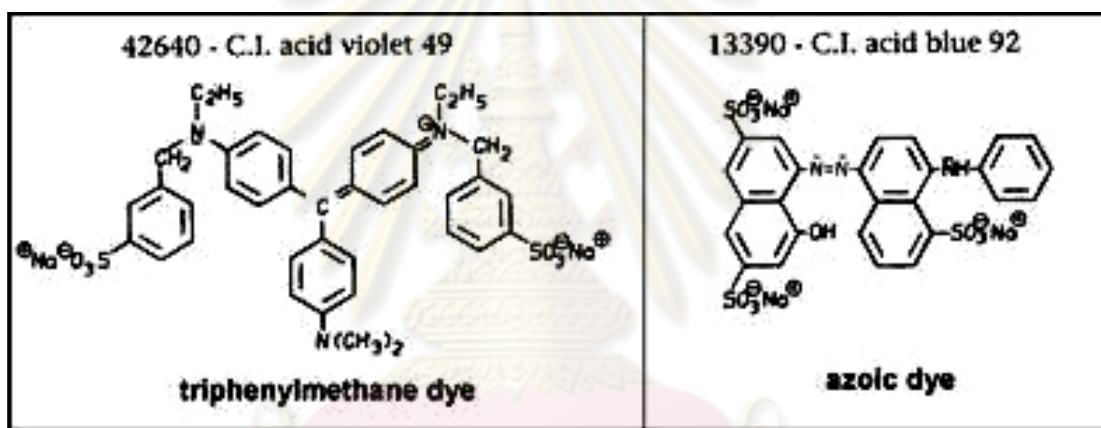
- สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dye)

- สีย้อมโลหะ (Metallic Dye)

- สีย้อมโอเนียม (Onium dye)

#### 2.1.2.4 ชนิดของสีย้อมที่สำคัญ

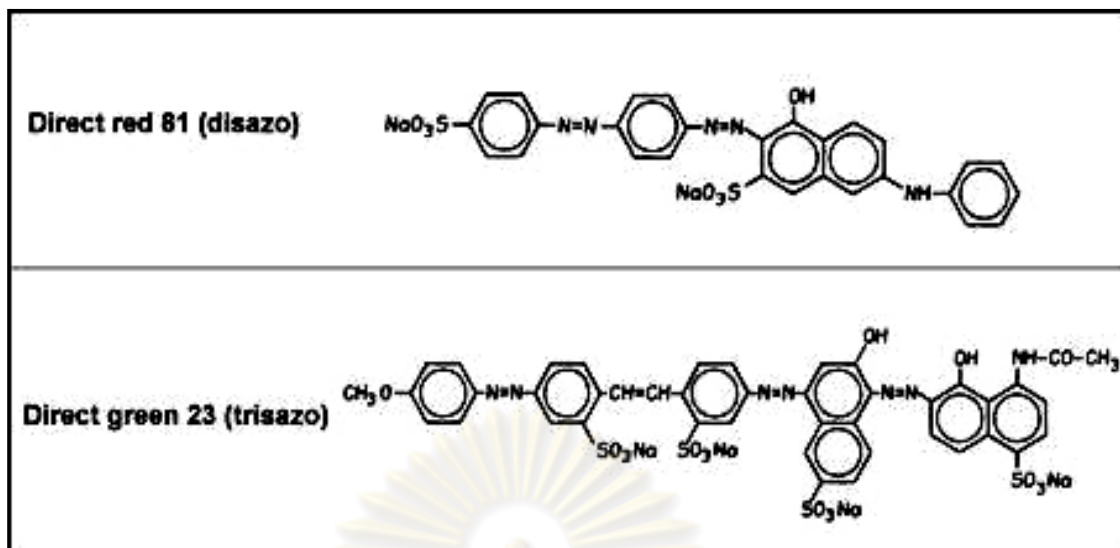
1.) สีเอซิด (Acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ไยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ ตัวอย่างโครงสร้างของสีเอซิด (acid dye) แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างของสีเอซิด (acid dye)

ที่มา : [http://aida.ineris.fr/bref/bref\\_text/bref\\_text/index.htm](http://aida.ineris.fr/bref/bref_text/bref_text/index.htm)

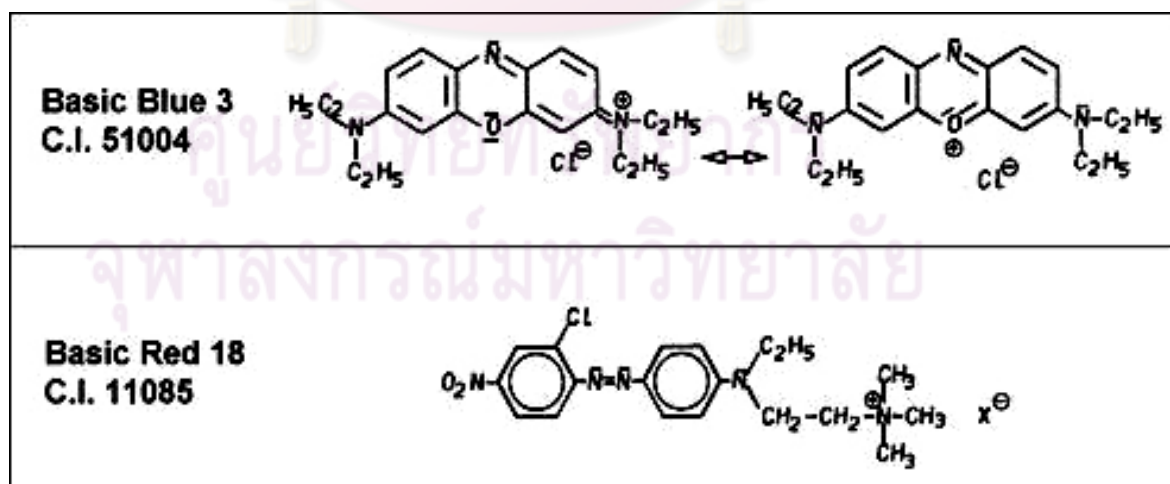
2.) สีไคเร็กต์ (Direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบ อะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิกที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง ตัวอย่างโครงสร้างของสีไคเร็กต์ (direct dye) แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างโครงสร้างของสีไดเร็กต์ (direct dye)

ที่มา : [http://aida.ineris.fr/bref/bref\\_text/breftext/index.htm](http://aida.ineris.fr/bref/bref_text/breftext/index.htm)

3.) สีเบสิก (Basic or cationic dye) สีข้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ข้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ข้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ข้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง ตัวอย่างโครงสร้างของสีเบสิก (basic or cationic dye) แสดงดังรูปที่ 2.4

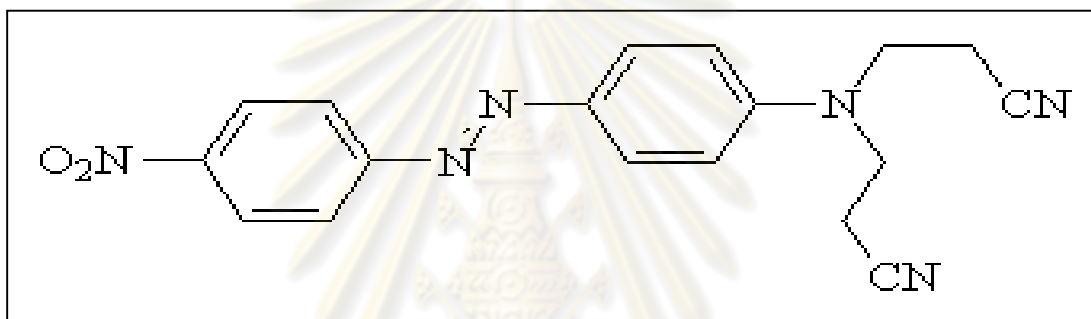


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างโครงสร้างของสีเบสิก (basic or cationic dye)

ที่มา : [http://aida.ineris.fr/bref/bref\\_text/breftext/index.htm](http://aida.ineris.fr/bref/bref_text/breftext/index.htm)



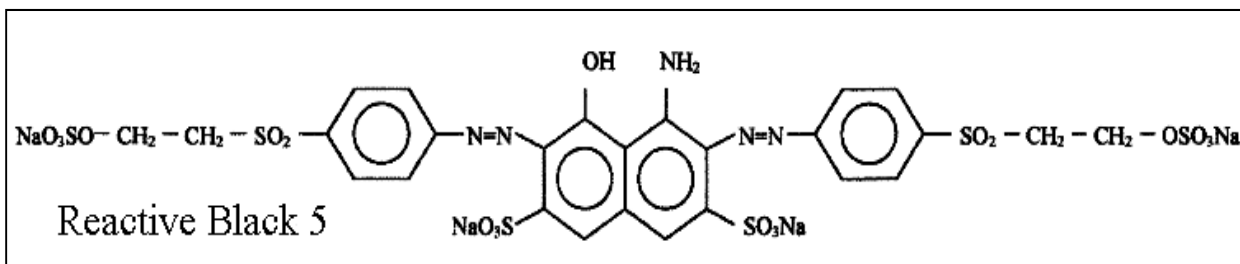
4.) สีดิสเพอร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (azo dyes) และสีย้อมแอมมิโน แอนทราควิโนน (amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (ethanolamine;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน ตัวอย่างโครงสร้างของสีดิสเพอร์ส (disperse dye) แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวอย่าง โครงสร้างของสีดิสเพอร์ส (disperse dye)

ที่มา : [http://aida.ineris.fr/bref/bref\\_text/bref\\_text/index.htm](http://aida.ineris.fr/bref/bref_text/bref_text/index.htm)

5.) สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ของเซลลูลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง  $70-75^\circ\text{C}$  และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ ตัวอย่าง โครงสร้างของสีรีแอกทีฟ (reactive dye) แสดงดังรูปที่ 2.6

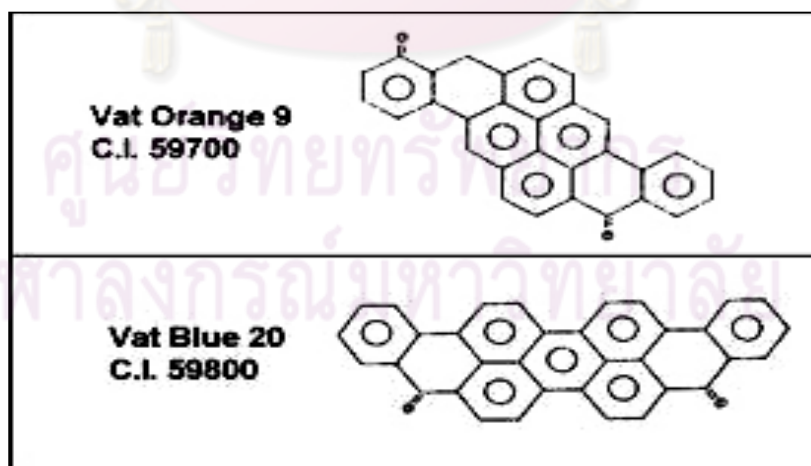


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างโครงสร้างของสีรีแอคทีฟ (reactive dye)

ที่มา : [http://aida.ineris.fr/bref/bref\\_text/breftext/index.htm](http://aida.ineris.fr/bref/bref_text/breftext/index.htm)

6.) สีอะโซอิก (Azoic dye) สีเชื่อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องเชื่อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วเชื่อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโปเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้เชื่อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูลูโลส ไนลอนหรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

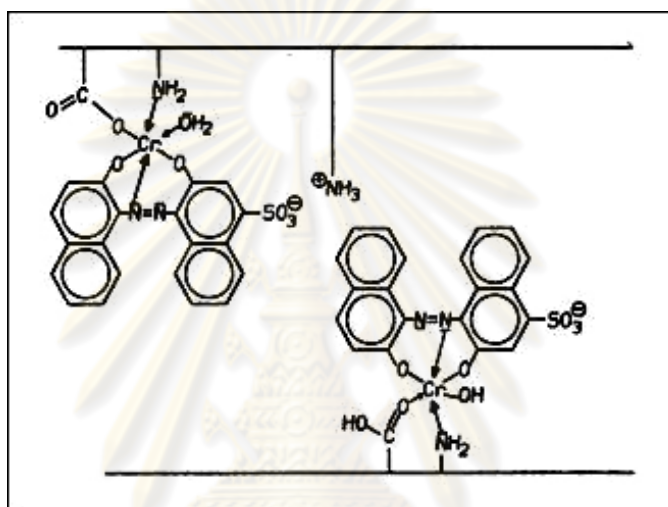
7.) สีแว็ต (Vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้ สีแว็ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดซ์เป็น สีแว็ต สีเชื่อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (antraquinoid) ตัวอย่างโครงสร้างของสีแว็ต (vat dye) แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่าง โครงสร้างของสีแว็ต (vat dye)

ที่มา : [http://aida.ineris.fr/bref/bref\\_text/breftext/index.htm](http://aida.ineris.fr/bref/bref_text/breftext/index.htm)

8.) สีมอร์แดนท์ หรือ โครม (Mordant or chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้ คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดิบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจาก สีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี ตัวอย่างโครงสร้างของสีมอร์แดนท์ หรือ โครม (mordant or chrome dye) แสดงดังรูปที่ 2.8

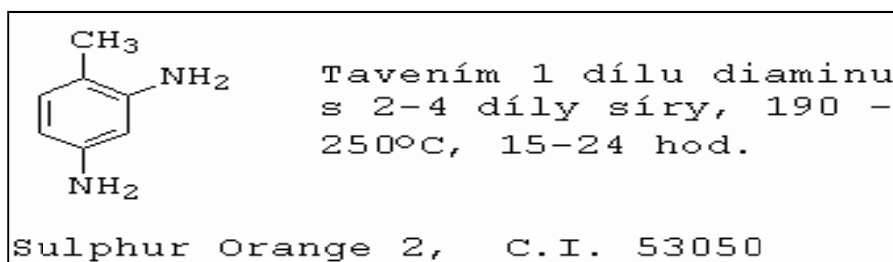


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างโครงสร้างของสีมอร์แดนท์ หรือ โครม (mordant or chrome dye)

ที่มา : [http://aida.ineris.fr/bref/bref\\_text/breftext/index.htm](http://aida.ineris.fr/bref/bref_text/breftext/index.htm)

9.) สีออกซิเดชัน (Oxidation dye) เป็นสีที่มีละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

10.) สีซัลเฟอร์ (Sulfer dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้า สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก ตัวอย่างโครงสร้างของสีซัลเฟอร์ (sulfer dye) แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างโครงสร้างของสีซัลเฟอร์ (sulfur dye)

ที่มา : [http://aida.ineris.fr/bref/bref\\_text/breftext/index.htm](http://aida.ineris.fr/bref/bref_text/breftext/index.htm)

### 2.1.3. น้ำเสียจากระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อให้ผ้าและเส้นด้ายมีสีที่สวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม และให้ความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ ซึ่งกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีและสีย้อมเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใย กระบวนการเหล่านี้มักอาศัยน้ำเป็นตัวกลางเกือบทุกขั้นตอน อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก นอกจากนี้ในน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการฟอกย้อมแล้วจะมีสารเคมีปนเปื้อนอยู่ เนื่องจากการใช้สารเคมีต่างๆในกระบวนการผลิต เช่น สารทำความสะอาด สีย้อม สารช่วยย้อม ซึ่งสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมแต่ละแห่งหรือแม้แต่การฟอกย้อมประเภทเดียวกันแต่ต่างกันที่ขั้นตอน ก็จะมี ความแตกต่างของลักษณะน้ำเสียอย่างเห็นได้ชัด ขึ้นอยู่ประเภทของการผลิต การเลือกใช้สารเคมี เป็นต้น

ประเภทของโรงงานฟอกย้อมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ได้แก่

- 1.) กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย
- 2.) กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ
- 3.) กระบวนการฟอกย้อมผ้าถัก

แต่ละกระบวนการมีขั้นตอนการใช้วัตถุดิบ สารเคมี และสีย้อมต่างกัน ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงมีความแตกต่างกัน ดังนี้

#### 2.1.3.1 กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย

ในกระบวนการฟอกย้อมเส้นด้ายนี้ เส้นด้ายจะถูกนำไปจัดสิ่งสกปรกเจือปน (scouring) ด้วยความร้อน โดยมีสารเคมีที่ใช้ได้แก่ สารเคมีที่เป็นด่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) โซเดียมคาร์บอเนต (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) สารช่วยจัดสิ่งสกปรก (scouring agent) และสารช่วยเปียก (wetting

agent) ซึ่งทำให้น้ำเสียที่ออกมาจากขั้นตอนนี้มีค่า บีโอดี ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids, SS) ค่าของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS) สภาพต่าง และอุณหภูมิสูง จากนั้นเส้นด้ายที่ถูกขจัดสิ่งสกปรกออกจะถูกนำไปฟอกขาว (bleaching) ซึ่งมีการใช้สารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) หรือ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) หรือ โซเดียมคลอไรต์ ( $NaClO_2$ ) รวมทั้งกรดและด่าง น้ำเสียที่ออกมาจากขั้นตอนนี้มีค่า บีโอดี, ทีเอสและสภาพต่างสูง ขั้นตอนการย้อม (dyeing) จะมีการใช้สารเคมีจำพวกสีย้อม สารเคมีช่วยย้อม และกรดและด่าง โดยมีการใช้ความร้อนช่วยในกระบวนการทำให้น้ำเสียที่ออกมามีอุณหภูมิสูง และมีค่า บีโอดี และทีเอสสูง รวมทั้งน้ำมีสีเข้ม หลังจากนั้นก่อนที่ได้ด้ายย้อมสำเร็จจะต้องมีการนำด้ายไปล้างด้วยน้ำสบู่ก่อน (soaping) โดยจะมีการใช้สารสบู่ (soaping agent) ทำให้น้ำเสียที่ออกมามีค่า บีโอดีต่ำ แต่มีการปนเปื้อนของน้ำสบู่

### 2.1.3.2 กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ

กระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบมีขั้นตอนคล้ายกับการฟอกย้อมเส้นด้าย ต่างกันที่ก่อนการฟอกย้อมผ้าดิบต้องมีการลอกแป้ง (desizing) ออกจากผ้าดิบก่อน และต้องมีการนำผ้าที่ผ่านการฟอกขาวแล้วไปชุบมัน (mercerization) ก่อนนำไปย้อม หลังจากผ่านการย้อมแล้วต้องมีการตกแต่งสำเร็จ (finishing) โดยในขั้นตอนการลอกแป้งจะมีการใช้สารเคมี ได้แก่ เอนไซม์หรือกรดซัลฟูริกหรือสารออกซิไดซ์ซึ่ง รวมทั้งสารช่วยเปียกและอาศัยความร้อน ดังนั้นน้ำเสียที่ออกมาจะมีค่า บีโอดี ทีเอส รวมทั้งมีอุณหภูมิสูง สำหรับขั้นตอนการชุบมันซึ่งมีการใช้โซดาไฟ จะทำให้น้ำทิ้งที่ออกมามีค่า บีโอดี, ทีเอสและสภาพต่างสูง ขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จมีการใช้สารตกแต่ง เช่น เรซิน สารกันน้ำ ฯลฯ โดยใช้ความร้อนร่วมด้วย จึงทำให้น้ำเสียที่ออกมามีอุณหภูมิสูงค่าบีโอดีสูง และมีสภาพกรด-ด่างเป็นกลางหรือ พีเอชประมาณ 7

### 2.1.3.3 กระบวนการฟอกย้อมผ้าถัก

กระบวนการฟอกย้อมผ้าถักมีขั้นตอนการฟอกย้อมเช่นเดียวกับการฟอกย้อมผ้าดิบ แต่ไม่มีขั้นตอนการลอกแป้ง ซึ่งลักษณะของน้ำเสียในแต่ละขั้นตอนจะเหมือนกับน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ อย่างไรก็ตามลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้น นอกจากจะมีสาเหตุมาจากสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการต่างๆ แล้ว ยังอาจมีการปนเปื้อนของน้ำมันและไขมันที่ปะปนมากับเส้นใย เศษเส้นใย และเศษผ้าได้อีกด้วย



แหล่งที่มาของน้ำเสียนอกจากจะเกิดขึ้นจากน้ำใช้ในการกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีน้ำเสียที่เกิดจากน้ำหล่อเย็น น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ฯลฯ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1.) น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม ไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนการเตรียมผ้าหรือเส้นใยก่อนย้อม ขั้นตอนการฟอกย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ ซึ่งน้ำใช้ในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต นอกจากนี้น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตประเภทใหญ่ๆ คือ

- น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อมหรือการพิมพ์ คือ กระบวนการต้มแปรง กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการฟอกขาว กระบวนการชุบมัน กระบวนการย้อมสี/การตกแต่งพิเศษ และกระบวนการพิมพ์ผ้า ซึ่งมีปริมาณน้ำเสียไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนค่อนข้างสูง

- น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม ซึ่งมีปริมาณมาก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยรวมแล้วต่ำกว่าน้ำเสียในประเภทแรก

2.) น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ มักจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการและเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนแก่สารละลายย้อมโดยตรง ก็จะเป็นการเพิ่มปริมาตรของสารละลายย้อม และจะถูกรวมเป็นน้ำเสียในที่สุด

3.) น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น มีบ่อยครั้งที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายย้อมลงในเวลาอันสั้น ซึ่งจะทำให้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำหล่อเย็นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

4.) น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน ซึ่งในบางกรณีอาจเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมาด้วย เช่น น้ำล้างถังเตรียมย้อม เป็นต้น

5.) น้ำเสียจากแหล่งอื่น เช่น น้ำใช้ของคนงาน น้ำจากโรงอาหารและห้องน้ำ เป็นต้น

ประเภทของสิ่งเจือปนในน้ำเสีย

สารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ตัวอย่างของสารอินทรีย์ เช่น ค่างและกรดอนินทรีย์ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต ( $2\text{Na}_2\text{OSiO}_2$ ) โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) โซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) และสารฟอกขาวธรรมชาติ ส่วนสารอินทรีย์นั้นมีใช้อย่าง

กว้างขวาง ซึ่งประกอบด้วย กรดอินทรีย์ เช่น กรดฟอร์มิก (HCOOH) กรดอะซิติก (CH<sub>3</sub>COOH) กรดไขมัน พวกลดสบู่ แปะง สารอินทรีย์ที่ไ้แทนแปะง ผงซักฟอก สารที่ทำให้เกิดความอ่อนนุ่ม สีย้อม สารนำพา และสารเคมีอื่นๆ เช่น สารกันน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ เป็นต้น

สารเคมีบางตัวอาจมีค่าบีโอดีสูง ซึ่งในขณะที่เดียวกันสารเคมีอื่นๆ ที่มีค่าบีโอดีต่ำและมีคุณสมบัติคล้ายกันก็สามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้ จึงนิยมสารเคมีที่มีค่าบีโอดีต่ำ เช่น การใช้ Carboxylmethyl Cellulose แทนแปะง ซึ่งมีประโยชน์และไม่มีอันตราย หรือหาทางขจัดออกไปได้ง่ายโดยวิธีการทางเคมีหรือทางฟิสิกส์ เมื่อนำน้ำไปผ่านกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ ซึ่งแต่ละขั้นตอนนี้ จะมีการใช้สารเคมีหลายชนิดและปริมาณต่างๆกัน หลังจากนั้นน้ำใช้ผ่านเข้าไปในกระบวนการผลิตแล้วก็จะกลายเป็นน้ำเสียซึ่งจะต้องนำไปปรับปรุงให้มีคุณภาพที่เหมาะสมก่อนที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อมนั้นมีสิ่งสกปรกเจืออยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งอาจจะจำแนกเป็นประเภทที่สำคัญๆ ได้ดังนี้

1.) สีย้อม ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงค้างอยู่ในสารละลายสีย้อม และจะถูกปล่อยออกมา กับน้ำเสียนั้นที่สุด ปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทสีย้อมที่ใช้ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการผนึกกับเส้นใยของสีย้อมชนิดต่างๆ

ชนิดสีย้อม	ความสามารถในการผนึกของสีกับเส้นใย	สีในน้ำเสีย
Direct dye	70-90%	5-30%
Sulfer dye	60-70%	30-40%
Vat dye	80-95%	5-20%
Azoic dye	90-95%	5-10%
Reactive dye	50-80%	20-50%
Acid dye	80-93%	7-20%
Metal complex dye	95-98%	2-5%
Basic dye	97-98%	2-3%
Disperse dye	80-92%	8-20%

ที่มา : คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม กรมโรงงานอุตสาหกรรม

2.) สารเคมีที่ใช้ช่วยในกระบวนการย้อม รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ แบ่งออกได้ 3 กลุ่ม ดังนี้ สารช่วยย้อม (Auxiliaries Chemical) ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก สารช่วยเปียกและสารที่ช่วยในการย้อมสีให้สม่ำเสมอ สารเคมีพื้นฐาน (Basic Chemical) ได้แก่ กรด ด่าง บัฟเฟอร์ เป็นต้น สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ เป็นต้น

3.) สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมล้วนแต่มีสิ่งสกปรกเจือปนมาบ้างเล็กน้อย โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาจากกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติซึ่งมีปริมาณค่อนข้างมากด้วย เช่น เส้นใยและมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาจากธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้าถึงร้อยละ 10 สิ่งเจือปนมีทั้งที่เป็นสารจีฟี่น ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ นอกจากนี้ ในกระบวนการผลิตก็ยังมีสารเคมีต่างๆ ลงในเส้นใยด้วย เช่น สารหล่อลื่น และแป้งที่ใช้ในการลงแป้งเส้นด้ายยืน เป็นต้น

4.) เศษเส้นใย ในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมีองค์ประกอบอันหนึ่งที่จะหลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ เส้นใยที่หลุดออกมา เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็อาจจะทำให้เกิดปัญหาอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้ ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ยังมีสารโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ที่อาจหลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนในน้ำเสียด้วย

5.) สิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ นอกจากสิ่งสกปรกเจือปนต่างๆ ที่กล่าวข้างต้นแล้ว น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมยังอาจมีสิ่งสกปรกเจือปนชนิดอื่นๆ อีก เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปื้อนบนผ้า ซึ่งมักจะเป็นสารประกอบพวก Chlorinated Benzene พวกสารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่องเหล่านี้ เป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวอาจมีผลกระทบต่อลักษณะสมบัติน้ำเสียในภายหลัง ดังตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด

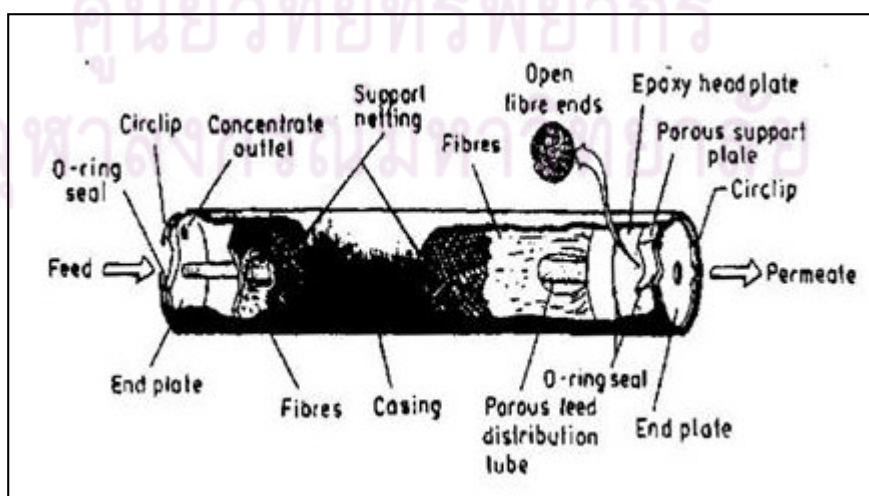
ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด

ผลิตภัณฑ์ที่ย้อม	ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด					จำนวนข้อมูล
	pH	BOD mg/l	COD mg/l	SS mg/l	สี Pt Co	
ฟอกย้อมด้ายทัก	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าทัก	9.0	110	370	50	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1,200	140	670	41
ฟอกย้อมด้ายและผ้า หรืออื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

ที่มา : คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม กรมโรงงานอุตสาหกรรม

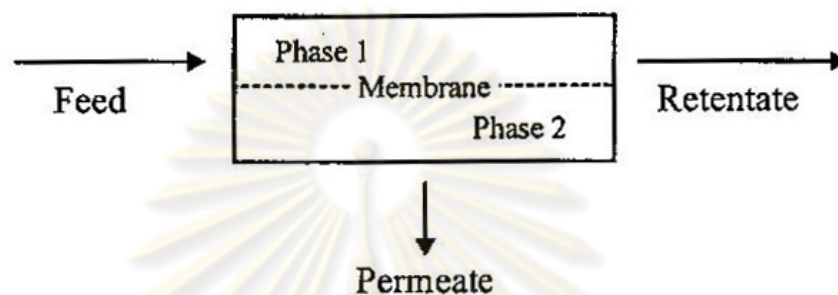
## 2.2 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process)

เมมเบรน คือ แผ่นฟิล์มบางๆ ของสารอินทรีย์สังเคราะห์หรือสารอนินทรีย์ ที่จะทำให้เกิดการแยกตัวอย่างละเอียดของอนุภาคในของไหล ซึ่งของไหลในที่นี้ คือ ก๊าซและของเหลว เมมเบรนมีได้หลายรูปร่าง เช่น แผ่นเรียบ หลอดซึ่งมีหลายขนาด และ Hollow fiber ซึ่งที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในน้อยกว่าสิบเท่าของมิลลิเมตร โดยทั่วไปแล้ว เมมเบรนที่ทำจากสารอินทรีย์จะมีความต้านทานต่อความดันและสารเคมี โดยเฉพาะการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน แต่มีความยุ่งยากและราคาแพงกว่า เมมเบรนที่ทำจากสารอนินทรีย์จะมีความยืดหยุ่นดีกว่า และสามารถใส่ไว้ในระบบที่มีเนื้อที่จำกัด ซึ่งจะได้พื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก ส่วนประกอบต่างๆ ของเมมเบรนแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 Module with Hollow Fiber Membrane (Rautanbach และ Albrecht, 1989)

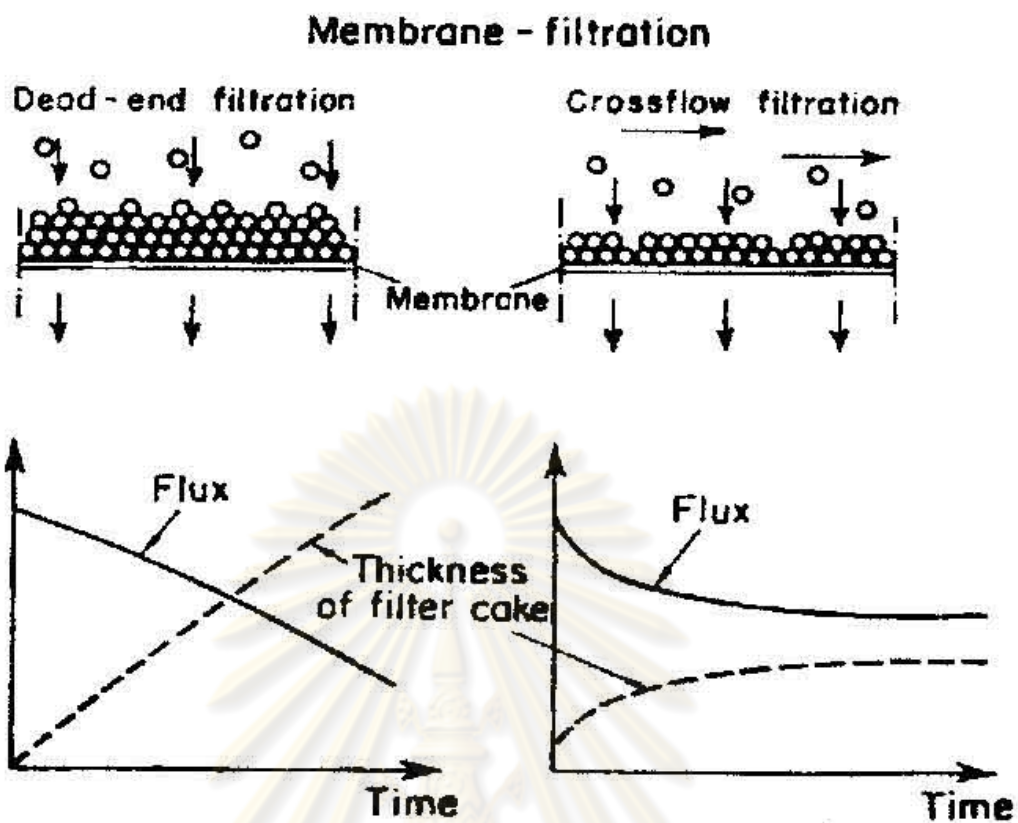
กระบวนการเมมเบรน (Membrane process) เป็นกระบวนการที่ใช้แผ่นเมมเบรนเพื่อแยกสาร หรือเพิ่มความเข้มข้น หรือทำสารให้บริสุทธิ์ขึ้น การทำงานของกระบวนการเมมเบรนแสดงดังรูปที่ 2.11 สำหรับสารละลายหรือก๊าซผสม กระบวนการเมมเบรนถูกค้นพบมานานกว่า 30 ปีแล้ว และมีการพัฒนาขึ้นมาเป็นลำดับ จนปัจจุบันนี้มีการใช้กระบวนการในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยอาจนำไปใช้แทนกระบวนการแยกธรรมดา หรือใช้เสริมในกระบวนการเดิม



รูปที่ 2.11 การทำงานของกระบวนการเมมเบรน (Rearick และคณะ, 1995)

หลักการสำคัญของกระบวนการเมมเบรน คือ จะต้องมีความเข้มข้นที่ทำให้สารละลายไหลผ่านแผ่นเมมเบรนและเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้น หรือผลต่างของความดัน การกรองโดยใช้แผ่นเมมเบรนนี้มีข้อแตกต่างจากการกรองธรรมดา รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบการกรองน้ำผ่านแผ่นเมมเบรนกับแผ่นกรองธรรมดา จะเห็นว่าทิศทางการไหลของน้ำแตกต่างกัน ทำให้การกรองแบบธรรมดามีการอุดตันของอนุภาคเร็วกว่ากรองผ่านเมมเบรน แผ่นเมมเบรนที่ใช้งานอยู่ทั้งหมดกล่าวได้ว่าเป็นแผ่นเมมเบรนที่มีการสังเคราะห์หรือผลิตขึ้น (Synthetic membranes) หรือมาจากธรรมชาติ แผ่นเมมเบรนเป็นฟิล์มที่เป็นของแข็ง และอาจเป็นของเหลว ลักษณะที่สำคัญที่สุดของแผ่นเมมเบรนคือ มีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมี หรือทางกายภาพ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากการมีความตึงเครียดระหว่างแผ่นเมมเบรนกับสารนั้นๆ หรือจากขนาดของรูพรุน หรือจากการมีประจุของแผ่นเมมเบรน เป็นต้น





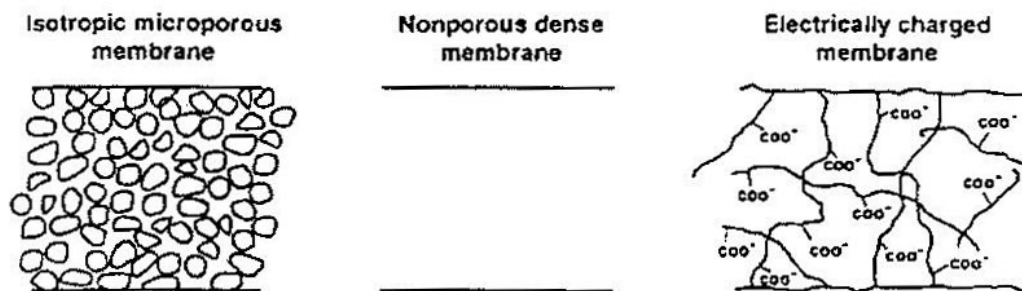
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบการกรองน้ำผ่านแผ่นกรองธรรมดา กับแผ่นเมมเบรน (Rearick และคณะ, 1995)

### 2.2.1 ประเภทของเมมเบรน

ปัจจุบันได้มีการผลิตเมมเบรนขึ้นมาหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะโครงสร้างของเมมเบรน โดยเราสามารถแบ่งประเภทของเมมเบรนได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Isotropic membranes



## Anisotropic membranes



รูปที่ 2.13 การแบ่งประเภทของเมมเบรนตามโครงสร้างของเมมเบรน (Baker, 2000)

### 2.2.1.1 Isotropic Membranes

เป็นเมมเบรนที่มีส่วนประกอบโครงสร้างสม่ำเสมอ สามารถแบ่งได้อีก 3 ประเภท ได้แก่

1.) Microporous Membranes เมมเบรนประเภทนี้จะมีรูพรุนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น แยกสารโดยอาศัยการกรองติดค้างเช่นเดียวกับการกรองด้วยทราย แต่รูพรุนมีขนาดเล็กกว่าถึงกรองทรายมาก คือ จะอยู่ที่ 0.01 – 10 ไมครอน กลไกหลักในการทำงาน คือ การกรองดักสารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของตัวเมมเบรน เมมเบรนชนิดนี้ ได้แก่ ไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน

2.) Nonporous Dense Membranes เป็นเมมเบรนที่เนื้อแน่น ไม่มีรูพรุน แยกสารด้วยการแพร่ผ่าน กลไกหลักคือ จะอาศัยความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนของสารละลาย 2 ชนิด ที่อยู่แต่ละด้านของเมมเบรน เมมเบรนประเภทนี้จะมีความแน่นสูง ได้แก่ กระบวนการออสโมซิสผักลับ เมมเบรนสำหรับแยกก๊าซ และ pervaporation membrane

3.) Electrically Charge Membranes เมมเบรนประเภทนี้อาจจะมีรูพรุน หรือไม่มีรูพรุนก็ได้ แต่โดยทั่วไปจะมีรูพรุนขนาดเล็กมาก โดยที่ผนังของรูพรุนจะมีไอออนที่มี ประจุลบหรือบวกติดแน่นอยู่ เมมเบรนที่มีประจุบวกติดอยู่เรียกว่า Anion Exchange Membranes เพราะว่าไอออนลบในน้ำจะเข้ามาจับ ส่วนเมมเบรนที่มีประจุลบเรียกว่า Cation Exchange Membrane การแยกสารจะต้องอาศัยความแตกต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อน และขึ้นอยู่กับความ เข้มข้นและชนิดประจุของไอออนที่อยู่ในน้ำเป็นหลัก โดยจะใช้ในการกำจัดไอออนเป็นหลัก เมมเบรนประเภทนี้ได้แก่ อิเล็กโตรไดอะไลซิส

#### 2.2.1.2 Anisotropic Membranes

อัตราการถ่ายเทมวลสารต่างๆ ผ่านเมมเบรนนั้น จะแปรผกผันกับความหนาแน่น ของเยื่อแผ่นเมมเบรน สำหรับการกรองน้ำเพื่อให้ได้น้ำที่ผลิตมีปริมาณมากพอสมควรนั้น ความ หนาแน่นของชั้นเมมเบรนที่มีประสิทธิภาพไม่ควรเกิน 20 ไมครอน การพัฒนาระบบผลิต การ ประกอบเมมเบรนนั้นต่างๆ เข้าด้วยกันช่วยให้สามารถบรรลุเป้าหมายในการนำมาใช้งานจริงได้ มากขึ้น โดยใช้เทคนิคของโครงสร้างแบบ Anisotropic ซึ่งวางแผ่นฟิล์มเมมเบรนขนาดที่บางมาก บนแผ่นฟิล์มรองรับ ซึ่งมีรูพรุนและความหนาแน่นมากกว่า ซึ่งเรียกว่า เยื่อบางประกอบ (Thin Film Composite, TFC) ซึ่งแผ่นฟิล์มทั้งสองชั้นทำมาจากวัสดุโพลีเมอร์คนละชนิดกัน โพลีเมอร์แต่ละ ชนิดที่ใช้ผลิตเมมเบรนแสดงดังตารางที่ 2.3 ประโยชน์ที่ได้จากเมมเบรนประเภทนี้คือ ได้อัตราการ กรองน้ำสูงขึ้น ซึ่งในเชิงธุรกิจมักจะผลิตเมมเบรนประเภทนี้

#### 2.2.1.3 Ceramic Metal and liquid Membranes

โดยปกติแล้ววัสดุที่ใช้ผลิตเมมเบรนส่วนใหญ่จะเป็นโพลีเมอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ แต่เร็วๆ นี้ได้มีการผลิตเมมเบรนที่ใช้วัสดุอย่างอื่น เช่น เซรามิก โดยใช้เมมเบรนที่มีรูพรุน เช่น ไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อให้ทนทานต่อสารตัวทำละลาย และมีความเสถียรภาพต่อ ความร้อน โลหะ เช่น พัลลาเดียม สามารถที่จะใช้ผลิตเมมเบรนเนื้อแน่นสำหรับแยกก๊าซไฮโดรเจน เพื่อทำให้บริสุทธิ์ได้ ฟิล์มชั้นของเหลวก็สามารถที่จะนำมาผลิตเป็นเมมเบรนเหลว (Liquid Membranes) ได้เช่นกัน

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของโพลิเมอร์ที่ใช้ทำเมมเบรน (สนชยา, 2545)

คุณสมบัติ	โพลิเมอร์			
	Celulose Acetate	Polysulfone	Aromatic Polyamide	Polyacrylonitile
MWCO	1,000 – 50,000	5,000 – 50,000	1,000 – 50,000	30,000 – 100,000
pH	3.5 – 7	0 – 14	2 – 12	2 – 12
อุณหภูมิ (°C)	35	100	80	50
ความทนทานต่อ คลอรีน	ดี	ดี	ด้อย	ปานกลาง
ความทนทานต่อ สารละลาย	ด้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
รูปแบบของเมม เบรน	แผ่น, ท่อ	แผ่น, ท่อ, แคปิลลารี	แผ่น, ท่อ, แคปิลลารี	แผ่น, ท่อ, แคปิลลารี

## 2.2.2 ชนิดของเมมเบรน

### 2.2.2.1 ไมโครฟิลเตรชัน

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อแยกอนุภาคขนาดไมครอน หรือเล็กกว่าไมครอน เมมเบรนแบบนี้ สามารถกักอนุภาคแขวนลอยและจุลชีพได้ แต่ยอมให้สารละลายและน้ำผ่านกระบวนการตกตะกอนผ่านได้ มีขนาดช่องว่าง (Pore size) ประมาณ 0.03 – 10 ไมครอน ค่า MWCO มากกว่า 100,000 ดาลตัน ใช้ความดันต่ำประมาณ 100 – 400 KPa (15 – 60 psi)

### 2.2.2.2 อัลตราฟิลเตรชัน

อัลตราฟิลเตรชัน โดยทั่วไปใช้ในการแยกของแข็งแขวนลอยในระดับไมครอน และสารอนุภาคละเอียด เช่น แบคทีเรีย และคอลลอยด์ ซึ่งแสดงตามน้ำหนักโมเลกุล ในระดับต่ำกว่าไมครอน ตัวถูกละลายที่มีโมเลกุลสูง และ ไวรัส ตามลำดับ ในกรณีอื่นๆ สารที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนบนผิวหน้าของเมมเบรน จะถูกกักจับได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่า ผลการเลือกเฟ้น (Sieving effect) และปัจจัยเชิงกลของการแยกสารด้วยอัลตราฟิลเตรชัน

### 2.2.2.3 ออสโมซิสผันกลับ

ออสโมซิสผันกลับสามารถขจัดเกลือละลาย และแยกเกลือออกจากน้ำเกลือ ในกรณีนี้ การกระทำระหว่างชั้นเมมเบรน กับตัวทำละลายและตัวถูกละลายเป็นปัจจัยเชิงกลในการควบคุมการแยกสาร

#### 2.2.2.4 นาโนฟิลเตรชัน

นาโนฟิลเตรชันจะอยู่ในช่วงระหว่าง อัลตราฟิลเตรชัน และออสโมซิสผันกลับ นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนแต่เดิมถูกเรียกว่า ออสโมซิสผันกลับแบบหลวม หรือออสโมซิสผันกลับ ความดันต่ำ นาโนฟิลเตรชันได้พัฒนาขึ้นเพื่อแยกสารในช่วงมวลโมเลกุลต่ำกว่า 300 ถึง สารที่ใช้แรงดันในการแยกต่ำกว่าแรงดันของออสโมซิสผันกลับทั่วไปด้วยเหตุนี้อัตราในการกำจัดสารจึงต่ำกว่าระบบออสโมซิสผันกลับ (Yamamoto, 2000 อ้างโดย Osamu, 2001)

#### 2.2.3 กระบวนการแยกสารของเมมเบรน

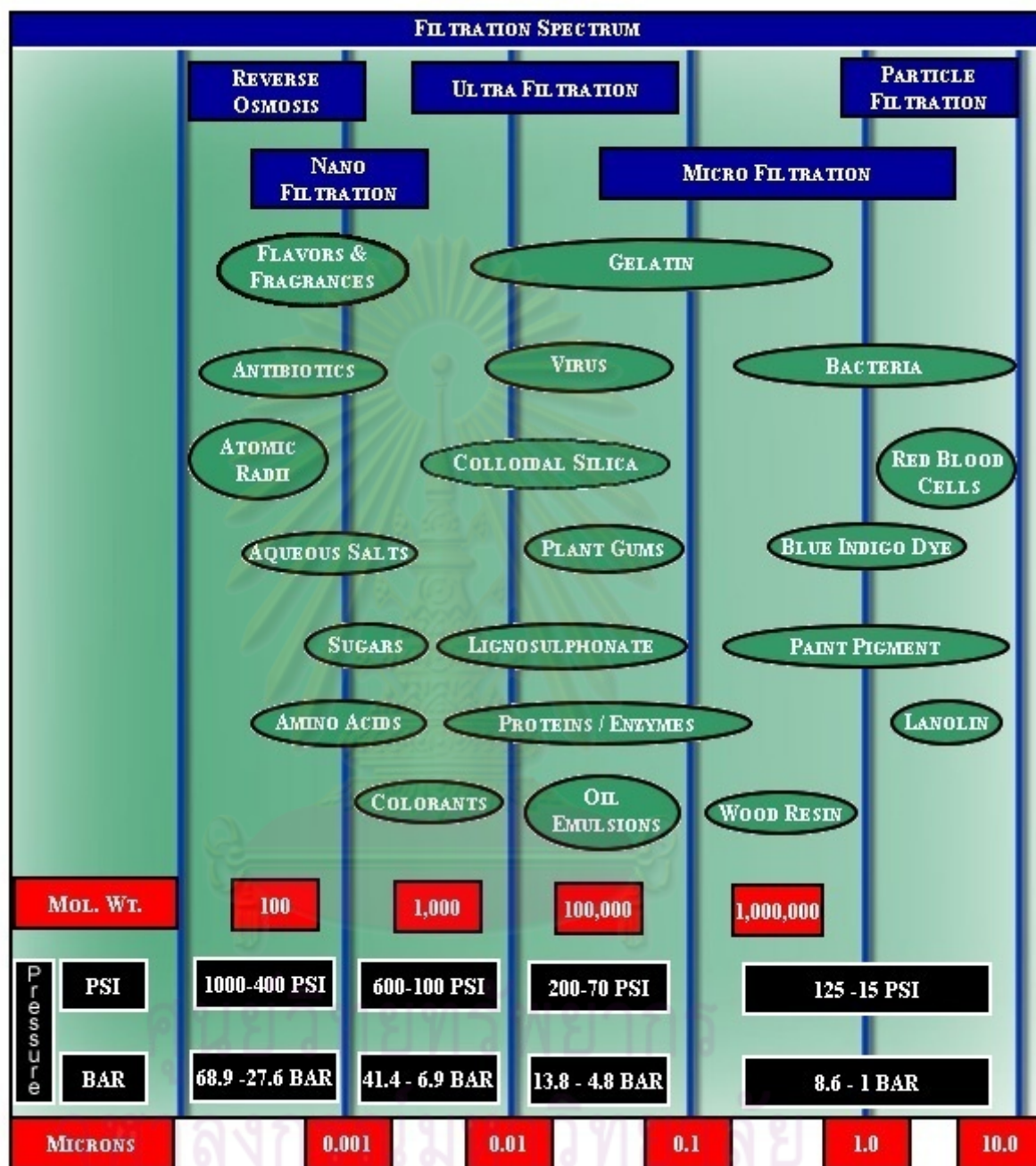
ความสามารถในการแยกสารขึ้นอยู่กับขนาดช่องว่าง (pore size) หรือ การคัดสรรด้วยน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight Cut-off) ของเมมเบรน โดยอาศัยกลไก 2 ชนิด คือ การกรองติดค้าง (Sieve Effect) และการแพร่ผ่าน (Diffusion Effect) ซึ่งสามารถนำมาใช้เพิ่มความเข้มข้นหรือทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น หลักการสำคัญของกระบวนการเมมเบรน ก็คือ จะต้องมีความเข้มข้นที่ทำให้สารละลายไหลผ่านและเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้น ผลต่างของความดัน แผ่นเยื่อเมมเบรนที่ใช้งานในปัจจุบันจะสังเคราะห์ขึ้นจากสารโพลีเมอร์และสารประกอบอื่นๆ เช่น เซลลูลูโลสอะซิเตต เซลลูลูโลสไนเตรท โพลีเอไมด์ เป็นต้น และในปัจจุบันได้มีการนำกระบวนการเมมเบรนเข้ามาใช้ในงานอุตสาหกรรมมากมาย รวมทั้งในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

หลักการพื้นฐานในระบบการแยกความแตกต่าง ขึ้นอยู่กับขนาดของเมมเบรน และขนาดของอนุภาคที่จะถูกแยก การแบ่งประเภทจะขึ้นอยู่กับขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคที่สามารถแยกได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14

ไมโครฟิลเตรชัน ใช้สำหรับแยกอนุภาคที่ขนาดอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 – 10  $\mu\text{m}$ . ที่ความดัน 1 บาร์ อนุภาคแขวนลอยจะถูกกั้นด้วยผิวหนังของเมมเบรน ในขณะที่น้ำสามารถผ่านเข้าไปในโครงข่ายรูพรุนโดยการพา ปัจจัยหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพของไมโครฟิลเตรชันลดลง คือ การอุดตันภายในรูพรุน คอลลอยด์สามารถสะสมตัวอยู่บนผิวหนังของเมมเบรนระหว่างรู ในบางเวลา



อนุภาคของคอลลอยด์จะปิดกั้นรูพรุนได้อย่างสมบูรณ์ จะลดความสามารถในการกรอง การล้างย้อน (Backwashing) เป็นเทคนิคหนึ่งในการแก้ปัญหา



รูปที่ 2.14 การแบ่งชนิดระบบการกรอง

ที่มา : <http://www.geafiltration.com>

ในทางกลับกัน อัลตราฟิลเตรชั่น และนาโนฟิลเตรชั่น จะแยกตามขนาดเล็ที่สุดของน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุที่สามารถกั้นได้ด้วยเมมเบรน อัลตราฟิลเตรชั่น เมมเบรนโดยทั่วไปจะทำขึ้นจากแผ่นฟิล์มที่กั้นสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 1,000 - 80,000 กลไกในการเคลื่อนผ่านอัลตรา

ฟิลเตรชัน จะกั้นและดูดซับผ่านเมมเบรน สารละลายของสารโมเลกุลใหญ่มีแรงดันออสโมติกน้อยมาก ดังนั้น อัลตราฟิลเตรชัน ไม่ต้องการใช้แรงดันสูงเพื่อจะเก็บวัสดุที่ซึมผ่าน

นาโนฟิลเตรชัน คุณสมบัติในการแยกสารอยู่ระหว่างออสโมซิสผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน คือน้ำหนักโมเลกุลที่แยกได้ (MWCO) ในช่วง 100 – 200 daltons ในช่วงแรงดันที่ 6 – 20 บาร์ กระบวนการแยกสารรวม 2 กลไก คือการลอดผ่าน และไฟฟ้าสถิตย์ เมมเบรนประกอบด้วย โพลีเมอร์ที่มีรูพรุนและสามารถกั้นสารประกอบได้ที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 นาโนเมตร ในขณะเดียวกันเนื่องจากมีชั้นประจุลบสำหรับนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนทั่วไป การกำจัดเกลือสามารถกระทำได้ด้วยแรงผลักของไฟฟ้าสถิตย์ MWCO แสดงลักษณะของเมมเบรน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกประการ คือ ความขรุขระซึ่งจะบ่งชี้ความสามารถในการกำจัดอนุภาคของสารประกอบ เพราะปัจจัยเช่นรูปร่างโมเลกุลและขี้ จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยก

ออสโมซิสผันกลับใช้สำหรับทำน้ำบริสุทธิ์สำหรับใช้ในครัวเรือนและอุตสาหกรรม ที่แรงดัน 20 – 80 บาร์ แผ่นออสโมซิสผันกลับบางและซึมผ่านไม่ได้ มีรูพรุนขนาด 3 – 1000 °A ให้น้ำสามารถผ่านได้ด้วยการแพร่และกำจัดตัวถูกละลายอื่นๆ

#### 2.2.4 โมดูลชนิดต่างๆ

อุปกรณ์ในกระบวนการแยกสาร คือ โมดูล (Modules) หรือแผ่นกรอง (Cartridges) การใช้เมมเบรนต้องคำนึงหลักสำคัญ 2 ประการ คือ

1.) เลือกใช้ให้ถูกต้องตามระดับของเมมเบรน

2.) โมดูลต้องออกแบบให้กะทัดรัด สามารถบรรจุแผ่นเมมเบรนได้มากที่สุด  
เหตุผลประการหนึ่งก็คือ จะมีพื้นที่ผิวสำหรับแลกเปลี่ยนต่อปริมาตรมากที่สุด

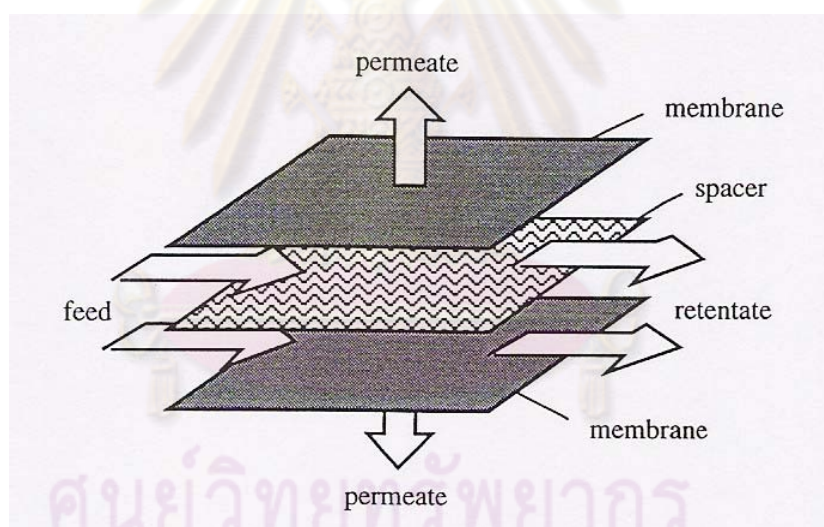
จากเหตุผล 2 ประการนี้จะนำไปสู่การลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำต่อปริมาตร แต่จะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานในการแยกสาร เนื่องจากความเร็วหมุนเวียนสูง มีพื้นที่หน้าตัดเล็กทำให้มีการสูญเสียเสดมากขึ้น ซึ่งจะต้องหาจุดที่คุ้มค่าที่สุด แต่โมดูลที่ใช้ต้องคำนึงถึงความต้องการอื่นๆ อีก เช่น ง่ายต่อการทำความสะอาด ง่ายต่อการซ่อมแซมและเปลี่ยน

โมดูลในท้องตลาดแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 4 ประเภท คือ แบบแผ่น (Plate type) แบบท่อ (Tubular) แบบม้วน (Spiral wound) แบบเส้นใยกลวง (Hollow fibres) เมมเบรนใช้งานส่วนใหญ่ในการทำน้ำให้บริสุทธิ์ แต่ในสาขาอื่น เมมเบรนถูกใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง ระบบชีวภาพ การคั้น

สภาพโลหะหนัก ลดน้ำในตัวทำละลาย และการคืนสภาพของสี การเจริญเติบโตของการใช้เมมเบรนตอบสนองทั้งด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม กระบวนการเมมเบรนไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีรุนแรง สามารถใช้ได้ ในอุณหภูมิห้อง ตั้งแต่ น้ำใสจนถึงน้ำที่มีการปนเปื้อน และใช้พื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพ จากที่กล่าวมาจึงทำให้เมมเบรนมีความน่าสนใจทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์ ในการนำเมมเบรนไปใช้จริง จำเป็นต้องมีการบรรจุแผ่นเมมเบรนในวัสดุรองรับที่เรียกว่า โมดูลให้สะดวกในการนำไปใช้ได้ง่าย ซึ่งโมดูลที่ใช้กันในปัจจุบันพบอยู่ 4 ลักษณะ ได้แก่

#### 2.2.4.1 แบบแผ่น (Plate and Frame Module)

เทคนิคนี้เป็นการจัดแผ่นเมมเบรนที่ง่ายที่สุด โมดูลที่ใช้จะมีลักษณะทำงานคล้าย Filter press ดังรูปที่ 2.15 แผ่นเมมเบรนวางอยู่บนแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน (Porous Plate) หรือ แผ่นรองรับที่มีร่องให้น้ำไหลออกได้ เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางซ้อนกัน และสลับกัน น้ำถูกบังคับให้ซึมผ่านเมมเบรนและแผ่นรองรับ แล้วจึงไหลออกจากโมดูล

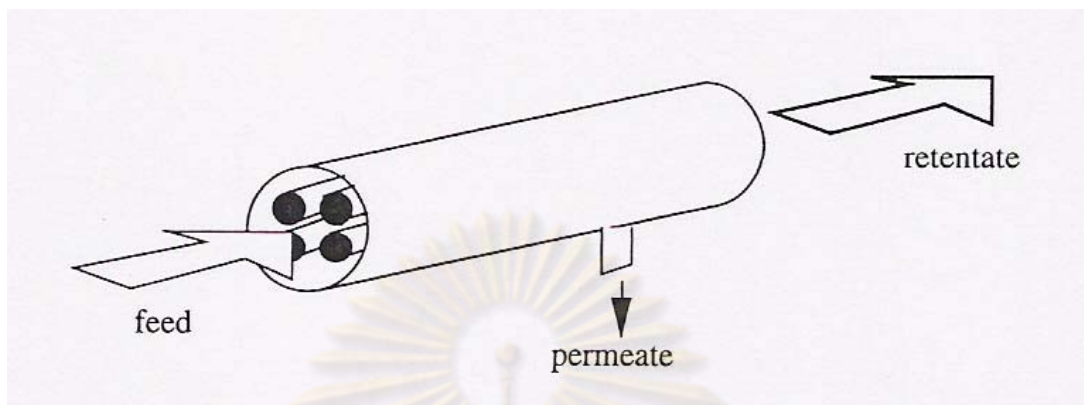


รูปที่ 2.15 ลักษณะ โมดูลแบบแผ่น (Plate and Frame Module) (Mulder, 1997)

#### 2.2.4.2 แบบท่อ (Tubular Module)

วิธีนี้เป็นการม้วนแผ่นเมมเบรน ให้เป็นหลอดหรือท่อขนาดเล็ก และยึดติดไว้ภายในท่ออีกอันหนึ่งที่ทำด้วยสแตนเลส หรือไฟเบอร์กลาส ดังรูปที่ 2.16 และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับแผ่นเมมเบรน มิให้ฉีกขาดในระหว่างการใช้งาน และใช้เป็นทางออกของน้ำสะอาดอีกด้วย น้ำดิบจะถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อด้วยความดัน แรงดันของน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำ

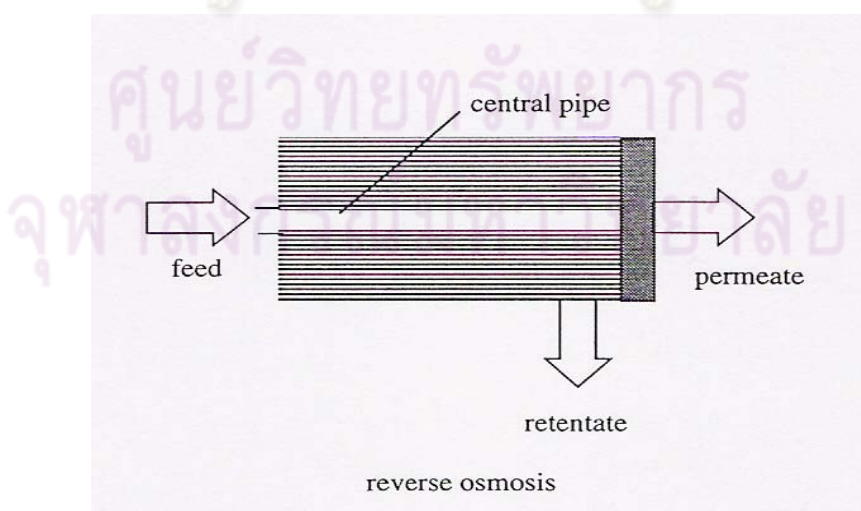
สามารถซึมผ่านเมมเบรนและท่อรองรับออกไปสู่ภายนอก เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถทำความสะอาดได้ง่าย จึงนิยมใช้ในกรณีที่มีการอุดตันเกิดขึ้นเร็ว (Applegate, 1984 อ้างใน Mulder, 1997)



รูปที่ 2.16 ลักษณะ โมดูลแบบท่อ (Tubular Module) (Mulder, 1997)

#### 2.2.4.3 แบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module)

เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงจะมีผิวที่คล้ายฟองน้ำล้อมรอบผิวชั้นใน (ซึ่งมีความหนาเพียง 0.1 ไมครอน) ทำโดยการนำเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมามัดรวมกันเป็นมัดๆ และงอพับเป็นรูปเกือกม้า หรือตัวยู ปลายทั้งสองข้างของเส้นใยทั้งมัด ถูกตรึงติดอยู่กับด้านใดด้านหนึ่ง เมมเบรนชนิดนี้เหมาะสำหรับน้ำดิบที่มีความสกปรก หรือของแข็งเจือปนสูง เพราะว่ามีช่องว่างขนาดใหญ่ ทำให้มีโอกาสอุดตันได้น้อยและยังสามารถจัดรูปแบบการวางโมดูลได้หลายลักษณะและป้อนน้ำเข้าได้หลายลักษณะ ดังรูปที่ 2.17

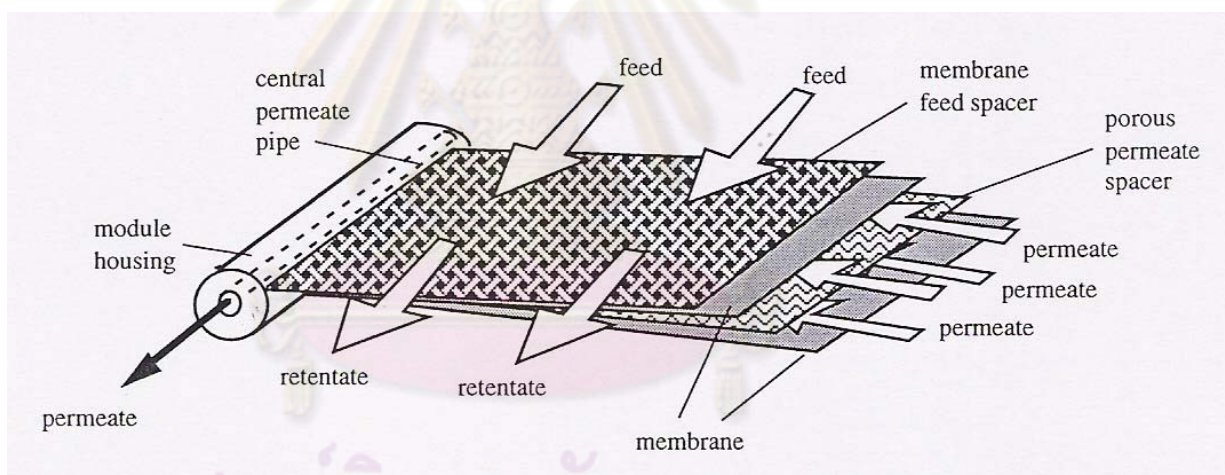


รูปที่ 2.17 ลักษณะ โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module) (Mulder, 1997)



#### 2.2.4.4 แบบม้วน (Spiral Wound Module)

โมดูลแบบนี้ประกอบด้วยเมมเบรนสองแผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่ตรงกลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นแบนและแผ่นวัสดุทั้งสามรอบท่อเจาะรูดังรูปที่ 2.18 โดยมีแผ่นตะแกรงทำด้วย Polypropylene กลุ่มปิดด้านนอก ขอบของแผ่นเมมเบรนทั้งสามด้านถูกยึดไว้ด้วยกาวพิเศษ ขอบที่เหลือปล่อยให้เปิดตามปกติและจึงติดกับท่อเจาะรู ลักษณะเช่นนี้ ทำให้ถูกน้ำบังคับให้ไหลไปยังท่อเจาะรูเสมอ การม้วนเมมเบรน แผ่นรองรับและตะแกรงพลาสติก ทำให้ได้โมดูลรูปทรงกระบอกที่สามารถบรรจุลงในท่อทรงกระบอกธรรมดาได้ โมดูลแบบนี้อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 5, 10, 20 หรือ 30 เซนติเมตร และมีความยาวต่างๆ กัน แต่มักไม่เกิน 1 เมตร น้ำดิบจะถูกบังคับให้ไหลในแนวแกนของโมดูล เข้าไปตามแผ่นตะแกรง และจะถูกแรงดันอัดให้น้ำซึมผ่านเมมเบรนตามแนวรัศมีลงไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งจะส่งน้ำบริสุทธิ์ไปยังท่อเจาะรูเพื่อนำน้ำออกจากโมดูลต่อไป



รูปที่ 2.18 ลักษณะ โมดูลแบบม้วน (Spiral Wound Module) (Mulder, 1997)

#### 2.2.5 การนำกระบวนการเมมเบรนไปใช้งาน

การใช้งานของเมมเบรนสำหรับงานต่างๆ ในญี่ปุ่นแสดงไว้ในตารางที่ 2.4 จากตารางกระบวนการไมโครฟิลเตรชันสามารถนำไปใช้เป็นกระบวนการเบื้องต้นสำหรับการบำบัดน้ำใต้ดินและน้ำทะเลเพื่อผลิตน้ำประปา ก่อนเข้ากระบวนการออสโมซิสผันกลับ และนำไปใช้ในการแบ่งในกระบวนการเอเอสสำหรับบำบัดน้ำเสียจากบ้านเรือนและอุตสาหกรรม กระบวนการอัลตรา



ฟิลเตรชันสามารถบำบัดน้ำใต้ดินเพื่อผลิตน้ำประปาและบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการออสโมซิสผันกลับสามารถทำน้ำใต้ดินและน้ำทะเลให้บริสุทธิ์เพื่อผลิตน้ำประปา และสามารถบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

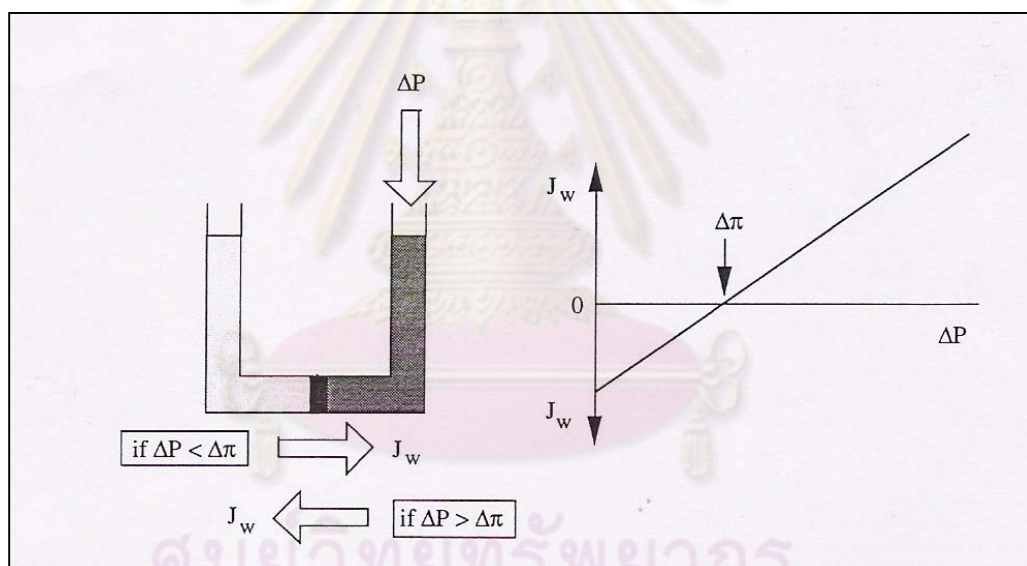
ตารางที่ 2.4 การนำเมมเบรนไปใช้ประโยชน์ (Osamu, 2001)

Membrane \ Water	Groundwater	Sea water	Industrial	Domestic
	Surface water	Brackish water	wastewater	wastewater
Microfiltration (MF)	Industrial water treatment Tap water treatment Pretreatment for RO	Pretreatment for RO	Membrane separation activated sludge	Membrane separation activated sludge Wastewater treatment and reclamation for re-use
Ultrafiltration (UF)	Industrial water treatment Tap water treatment			Wastewater treatment and reclamation for re-use
Reverse Osmosis (RO)	Pure water clarification Tap water treatment	Desalination for tap water/industrial water	Treated wastewater reclamation	

MF และ UF สำหรับการบำบัดของเสียจากมนุษย์จะใช้ร่วมกับการ โคแอกูเลชัน การตกตะกอน และระบบเอเอส

### 2.3 กระบวนการออสโมซิสผันกลับเมมเบรน (Reverse osmosis Membrane Process)

ขบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) นิยมใช้เมื่อสารละลายมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น สารละลายเกลือ หรือสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำตาลกลูโคส และซูโครส ซึ่งสารพวกนี้สามารถแยกออกจากสารละลายได้ แต่เนื่องจากแรงต้านทานจากเยื่อกรองมีสูง ดังนั้นจึงต้องมีการให้เพิ่มแรงดันเข้า นอกจากนี้แรงดันที่ให้อาจสูงกว่าแรงดันออสโมติกอีกด้วย จากภาพที่ 2.19 แสดงการแยกน้ำออกจากสารละลายเกลือ ถ้าต้องการให้น้ำแยกออกจากสารละลายเกลือ ต้องเพิ่มแรงดันให้สูงกว่าแรงดันออสโมติก น้ำจะไหลไปรวมกับสารละลายเกลือ ถ้าเพิ่มแรงดันน้อยกว่าแรงดันออสโมติก ( $\Delta P < \Delta \pi$ ) เมื่อเพิ่มแรงมากกว่าแรงดันออสโมติก น้ำจะไหลออกมาจากสารละลายเกลือ ( $\Delta P > \Delta \pi$ ) การไหลของน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.19 การไหลของน้ำ ( $J_w$ ) เมื่อมีแรงดันมากกว่า (Mulder, 1997)

เมื่อ เกลือไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้

$$J_w = A(\Delta P - \Delta \pi) \quad (2.1)$$

จาก  $\sigma = \Delta \pi$

เมื่อ  $\sigma$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

เมื่อ  $R = 100\%$  แล้ว  $\sigma < 1$

$$J_w = A(\Delta P - \sigma \Delta \pi) \quad (2.2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำ A เป็นค่าคงที่สำหรับเยื่อกรอง

$$A = \frac{D_w c_w V_w}{RT \Delta x} \quad (2.3)$$

ค่า A อยู่ในช่วง  $3 \times 10^{-3} - 6 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$  สำหรับกระบวนการออสโมซิสผันกลับ  
ฟลักซ์ของสารละลายสามารถหาได้จาก

$$J_s = B \Delta c_s \quad (2.4)$$

เมื่อ  $B$  = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของสารละลาย

$\Delta c_s$  = ค่าความแตกต่างของความเข้มข้นสารละลาย 2 ข้างของเยื่อกรอง

$$\text{โดย } \Delta c_s = c_f + c_p$$

$$\text{และ } B = \frac{D_s K_s}{\Delta x}$$

จากสมการ 3.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นค่าฟลักซ์ของน้ำก็เพิ่มขึ้นด้วย และจากสมการ 3.4 เห็นได้ว่าฟลักซ์ของสารละลายไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันที่แตกต่างแต่ขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลาย

การเลือกเยื่อกรองเมื่อให้ค่าความเข้มข้นของสารละลายมา หาได้จากสัมประสิทธิ์ R

$$R = \frac{c_f - c_p}{c_f} = 1 - \frac{c_p}{c_f} \quad (2.5)$$

ดังนั้น เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น ค่า  $R$  ก็เพิ่มขึ้นด้วย เพราะความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการกรองลดลง ในกรณีที่ค่า  $R_{\max}$  ทำให้  $\Delta P \rightarrow \infty$  และ  $c_p = J_s/J_w$  รวมในสมการที่ 3.1, 3.3 และสมการหาค่า  $\Delta C_s$  จะได้

$$R = \frac{A(\Delta P - \Delta \pi)}{A(\Delta P - \Delta \pi) + B} \quad (2.6)$$

รูปแบบโมเดลที่ใช้ศึกษากระบวนการออสโมซิสผันกลับ มีดังนี้

### 2.3.1 Solution diffusion model (Zhao และคณะ, 2005)

เป็นโมเดลแรกที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับระบบที่มี Recovery สูง คือ Linear homogenous solution diffusion model (HSDM) ซึ่งพัฒนาจาก 6 สมการสำคัญคือ สมการที่ 2.7-2.12 ที่พิจารณาสมมูลมวลรอบๆ หน่วยเมมเบรน แรงดันขับของตัวละลายและ Concentration gradient driven solute mass และ recovery สมการ HSDM แสดงดังสมการที่ 2.12 สัมประสิทธิ์ถ่ายเทมวล ( $K_s$ ) ทั้งหมดในโมเดลนี้ ซึ่งรวมถึงความสามารถในการแพร่ของตัวละลายและความหนาของเมมเบรนด้วย

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

$$J_i = K_s \Delta C = \frac{Q_p C_p}{A} \quad (2.8)$$

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (2.9)$$

$$Q_f = Q_c + Q_p \quad (2.10)$$

$$Q_f C_f = Q_c C_c + Q_p C_p \quad (2.11)$$

$$C_p = \frac{C_f K_s}{K_w(\Delta P - \Delta\pi)\left(\frac{2-2R}{2-R}\right) + K_s} \quad (2.12)$$

ซึ่ง	$F_w$	= water flux through the membrane (L/t)
	$K_w$	= solvent mass transfer coefficient ( $L^2 t/M$ )
	$\Delta P$	= pressure gradient (L)
	$\Delta\pi$	= osmotic pressure difference (L)
	$Q_p$	= permeate stream flow ( $L^3/t$ )
	$J_i$	= solute flux ( $M/L^2 t$ )
	$K_s$	= solute mass transfer coefficient (L/t)
	$\Delta C$	= concentration gradient ( $M/L^3$ )
	$C_p$	= permeate concentration
	$R$	= recovery (fraction)
	$Q_f$	= feed stream flow ( $L^3/t$ )
	$Q_c$	= concentrate stream flow ( $L^3/t$ )
	$A$	= membrane area ( $m^2$ )

โมเดลถ่ายเทมวลที่พัฒนาเฉพาะมีการรวมการปรับปรุง Non-linear ของความดันและความเข้มข้นที่แตกต่างระหว่างและผ่านเมมเบรน เช่นเดียวกับผลรวมของ recovery และการรวม Film theory ในโมเดลทำนายความเข้มข้นของน้ำสะอาดที่ผลิตได้

Film theory model สามารถใช้อธิบายการถ่ายเทมวลผ่านเมมเบรนโดยใช้ฟิล์มบนด้านน้ำเข้าและด้านน้ำ permeate ของเมมเบรน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของตัวละลายมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำเข้า ซึ่งเรียกว่า Concentration polarization ซึ่ง HSDM ในสถานะคงที่และปรับปรุงด้วย film theory (HSDM-FT) แสดงดังสมการที่ 2.13

$$C_p = \frac{C_f K_s e^{F_w/k_b}}{K_w(\Delta P - \Delta\pi)\left(\frac{2-2R}{2-R}\right) + K_s e^{F_w/k_b}} \quad (2.13)$$



ค่า Solute mass transfer coefficient ถูกสมมุติเป็นค่าคงที่ทั้งในสมการ HSDM สมการที่ 2.12 และ HSDM-FT สมการที่ 2.13 อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปในสมการเชิงเส้นและใน film theory models ค่า Solute mass transfer coefficient ถูกสมมุติเป็นค่าคงที่และไม่เปลี่ยนค่าระหว่างการอินทิเกรต

การประมาณค่าเชิงเส้นของข้อมูลความเข้มข้นที่ไม่ใช่สมการเชิงเส้นของ กระแสน้ำเข้าเมมเบรนนั้น จะรวมกับค่าคลาดเคลื่อนที่รู้ค่าไปในสมการ HSDM และ HSDM-FT ต่อมา Mulford และคณะ (1999) ได้พัฒนา Integrated HSDM (IHSDM) โดยพัฒนาการอินทิเกรต และรวมกับสมการดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งเป็นการสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกระแสเข้า ไปใน สมการ HSDM และ HSDM-FT ซึ่งสมการ IHSDM และ IHSDM-FT แสดงดังสมการที่ 2.14 และ 2.15

$$C_p = \frac{K_S C_f}{-RF_w} \ln \left( 1 - \frac{RF_w}{F_w + K_S} \right) \quad (2.14)$$

$$C_p = \frac{K_S C_f}{-RF_w e^{F_w/k_b}} \ln \left( 1 - \frac{RF_w}{F_w + K_S e^{F_w/k_b}} \right) \quad (2.15)$$

HSDM และ HSDM-FT ไม่ได้ชดเชยสำหรับการแปรผันในความดัน แรงดันออสโมติก หรือฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรน ปัจจุบันมีการพัฒนา Incremental diffusion model (IDM) และ Integrated osmotic pressure model (IOPM) ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในฟลักซ์ ความดันและ แรงดันออสโมติกที่ผ่านเมมเบรน โมเดลที่มีและไม่มีกรรวม Film theory แสดงดังสมการที่ 2.12- 2.15 IDM และ IOPM แสดงดังสมการที่ 2.16 และ 2.17 ส่วนสมการ IDM-FT และ IOPM-FT แสดงดังสมการที่ 2.18 และ 2.19

$$C_p = \frac{C_{f0}}{R} \left[ 1 - (1 - R)^{K_S/(F_w + K_S)} \right] \quad (2.16)$$

$$C_p = \frac{C_f}{R} \left\{ 1 - \left[ \left( \frac{\Delta P - \Delta \pi_{out}}{\Delta P - \Delta \pi_{in}} \right) (1 - R) \right]^{K_S/(K_w \Delta P + K_S)} \right\} \quad (2.17)$$

$$C_p = \frac{C_{f0}}{R} \left[ 1 - (1 - R) \frac{F_w(1 - e^{F_w/k_b}) + K_s}{F_w + K_s} \right] \quad (2.18)$$

$$C_p = \frac{C_f}{R} \left\{ 1 - \left( \frac{\Delta P - \Delta \pi_{out}}{\Delta P - \Delta \pi_{in}} \right)^{K_s / (K_w \Delta P + K_s)} \times (1 - R) \frac{1 - (e^{F_w/k_b} K_w \Delta P) / K_w \Delta P + K_s}{K_w \Delta P + K_s} \right\} \quad (2.19)$$

ซึ่ง  $C_{f0}$  = feed stream solute concentration at membrane inlet (M/L<sup>3</sup>)

$\Delta C_f$  = feed solute concentration (M/L<sup>3</sup>)

$k_b$  = back diffusion mass transfer coefficient from the surface to the bulk

$P_{in}$  = static pressure at inlet (L)

$P_{out}$  = static pressure at outlet (L)

$P_p$  = static pressure in permeate stream (L)

$r$  = recycle rate (fraction)

$\Delta \pi_{in}$  = bulk osmotic pressure difference at membrane inlet (L)

$\Delta \pi_{out}$  = bulk osmotic pressure difference at membrane outlet (L)

### 2.3.2 Modified solution diffusion model (Zhao และคณะ, 2005)

NF และ RO เมมเบรนสามารถกำจัดยาฆ่าแมลงในการศึกษาภาคสนามได้ (Taylor และคณะ, 1998) ความเข้มข้นของยาฆ่าแมลงในน้ำ permeate เป็นตัวควบคุมการแพร่แต่ความคลาดเคลื่อนสำหรับการทำนายยาฆ่าแมลงโดยใช้ HSDM model ซึ่งมีความสัมพันธ์อย่างมีระบบกับกับฟลักซ์และ recovery การทำนายของยาฆ่าแมลงในน้ำ permeate ได้มีการปรับปรุงด้วยการปรับเปลี่ยน  $K_s$  ซึ่งก็คือ Hybrid model ที่  $K_s$  ได้ปรับเปลี่ยนโดยใช้ความสัมพันธ์ของฟลักซ์และ recovery โมเดลนี้ใช้ Solution diffusion model เป็นพื้นฐาน ซึ่งรวมปัจจัยที่มีผลกับ  $K_s$  ซึ่งมีสมการมากมายที่สามารถพัฒนาในวิธีการนี้

Hybrid model ที่ดีต้องมีความต้องการเฉพาะเจาะจงถึงแม้ว่ามันจะเป็นผลจากการทดลองบางส่วนหรือทั้งหมด Hybrid model นั้นควรมีความไวต่อปัจจัยที่เปลี่ยนค่า  $K_s$  เช่นเดียวกับค่า ฟลักซ์และ recovery hybrid model ที่ดีนั้นควรมีความหมายในเชิงฟิสิกส์สำหรับช่วงของปัจจัย

อิสระซึ่งเป็นปกติสำหรับการเดินระบบทั่วไป แต่อาจจะนอกเหนือออกไปจากช่วงข้อมูลเดิม โมเดลแบบใกล้เคียงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นได้ถูกนำมาใช้เพิ่มความแน่ใจต่อการรวมกันของโมเดลสำหรับการแยกสมการโมเดล สมการของ Hybrid model ใหม่จะอยู่บนพื้นฐานของ Solution diffusion model และถ่วงตัวแปรของฟลักซ์ recovery และ net driving force ที่เป็นการเดินระบบเมมเบรนทั่วไป

Hybrid model สำหรับ  $K_s$  แสดงในสมการที่ 2.20 ซึ่งโมเดล  $K_s$  ได้ถูกพัฒนาจาก IDM ด้วยการ trial and error และให้ความสำคัญกับผลของฟลักซ์มากกว่า recovery ในค่า  $K_s$  ซึ่งโมเดลนี้อยู่บนพื้นฐานการแพร่และมีสัมประสิทธิ์ของโมเดลเพียงตัวเดียวที่ไม่รู้ค่าและมีเลขชี้กำลังตัวเดียวที่ไม่รู้ค่า สมการที่ 2.20 สามารถแทนค่าไปในโมเดลใดๆก็ได้ซึ่งให้ประโยชน์กับสัมประสิทธิ์ถ่ายเทมวลของสารละลายเพื่อทำนายความเข้มข้นของสารละลายในน้ำ permeate ในการควบคุมการแพร่ในกระบวนการเมมเบรน เพื่อหลีกเลี่ยงการทำนายของโมเดลที่ไม่สมเหตุสมผล การให้เหตุผลโมเดลจะต้องตรวจสอบโดยขยายขอบเขตออกไป เช่น  $K_s > 0$  ที่ 0 และ 90% recovery และ  $\text{flux} > 0$

$$K_s = \frac{F_w^A \ln(1-BR)}{\ln(1-R) - \ln(1-BR)} \quad (2.20)$$

ซึ่ง  $A > 0, B < 1$

#### 2.4 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน (Ultrafiltration Membrane Process)

อัลตราฟิลเตรชันเป็นกระบวนการแยกสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน เอ็นไซม์ และแป้ง ออกจากน้ำและโมเลกุลเล็กอื่นๆ ตัวอย่างสารละลายที่อาจแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นได้ โดยกระบวนการนี้ ได้แก่ นํ้านม นํ้าผลไม้ สารละลายเอ็นไซม์ สารปฏิชีวนะ ในการดำเนินงานใช้ความดันในการป้อนสารละลายผ่านแผ่นเมมเบรนในช่วง 2-10 บรรยากาศ แผ่นเมมเบรนที่ใช้เป็นแผ่นเมมเบรนไม่สมมาตรที่มีชั้นผิวหนา 0.1-2  $\mu\text{m}$  มีขนาดรูพรุน 10-500  $\text{\AA}$  หรือเทียบเท่า MWCO 500-300,000

ในอัลตราฟิลเตรชัน ฟลักซ์และค่าการกักกันเป็นค่าที่แสดงสมรรถนะของกระบวนการ เช่นเดียวกับออสโมซิสผันกลับ สมการของฟลักซ์เขียนอยู่ในรูปของแรงขับเคลื่อนและต้านทานต่อการไหลเป็นดังนี้

$$J_v = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{\mu_v R_t} \quad (2.21)$$

$J_v$  = ฟลักซ์ของสารละลายผ่านแผ่นเมมเบรน ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )

$\Delta P$  = ผลต่างของความดันที่ให้กับสารละลาย (Pa)

$\Delta \pi$  = ผลต่างของความดันออสโมซิสของสารละลาย (Pa)

$\mu_v$  = ความหนืดของสารละลายผ่านแผ่นเมมเบรน (Pa.s)

$R_t$  = ความต้านทานรวมต่อการไหลผ่าน ( $\text{m}^{-1}$ )

สำหรับสารละลายของสารโมเลกุลใหญ่ ค่า  $\Delta P \gg \Delta \pi$  จึงอาจตัดเทอม  $\Delta \pi$  ที่ สมการลดรูปเป็น

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu_v R_t} \quad (2.22)$$

สำหรับกลไกที่แผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันสามารถกักกันตัวถูกละลายได้ เป็นกลไกคัดขนาด (Molecular sieving) โดยอาจมีปฏิกิริยาต่อกันระหว่างตัวถูกละลายและแผ่นเมมเบรนได้ เพราะสารละลายที่ต้องแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นโดยอัลตราฟิลเตรชันส่วนมากมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนคือประกอบด้วยตัวถูกละลายที่มีขนาดต่างกันไปในปริมาณที่ต่างกันด้วย

#### Transmembrane Pressure

ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน อัตราน้ำ Permeate จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการไหลในโมดูลเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน อาจจะสามารถคิดว่า มีการลดลงภายใน โมดูลเมมเบรนแบบท่อ (tubular) (หรือ hollow-fiber) โดยอธิบายได้ด้วยสมการ Hagen-Poiseuille

$$\frac{dp(z)}{dz} = -\frac{8\mu Q_i}{N\pi r_m^4} = -\frac{8\mu u_i}{r_m^2} \quad (2.23)$$

ซึ่ง  $Q_i$  คือ อัตราการไหลของน้ำเข้า,  $u_i$  คือ ความเร็วน้ำเข้า,  $\mu$  คือ ความหนืดของสารละลายน้ำเข้า,  $r_m$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรนแบบท่อ และ  $N$  คือจำนวนท่อในโมดูลรวมสมการที่ 3.23 กับการใช้สภาวะ  $p = p_i$  ที่  $z = 0$  สามารถทราบการกระจายตัวของแรงดันโดย

$$p(z) = p_i - \frac{mQ_i z}{L} = p_i - \frac{nu_i z}{L} \quad (3.24)$$

ซึ่ง  $L$  คือ ความยาวของเมมเบรน และ

$$m = \frac{8\mu L}{N\pi r_m^4}$$

$$n = \frac{8\mu L}{r_m^4}$$

Local transmembrane ได้จากความแตกต่างระหว่างความดันด้านท่อและด้านผิว

$$\Delta p(z) = p(z) - p_p = \Delta p_i - \frac{mQ_i z}{L} = \Delta p_i - \frac{nu_i z}{L} \quad (2.25)$$

ซึ่ง  $\Delta p = p_i - p_p$

ความหมายของ Transmembrane pressure,  $\Delta P$  ได้จากสมการถัดไป

$$\Delta P = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta p(z) dz \quad (2.26)$$

แทนที่สมการที่ 2.25 ได้เป็น

$$\Delta P = \Delta p_i - \frac{mQ_i}{2} = \Delta p_i - \frac{nu_i}{2} \quad (2.27)$$



รูปแบบโมเดลที่ใช้ศึกษากระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน มีดังนี้

#### 2.4.1 Osmotic-Pressure Model (OP Model) (Cheng และคณะ, 2001)

Kedem และ Katchalsky (1961) ได้ให้นิยามสำหรับฟลักซ์ของน้ำ permeate ( $J_v$ ) ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ไว้ดังนี้

$$J_v = L_p(\Delta P - \sigma \cdot \Delta\pi) \quad (2.28)$$

เมื่อ  $\sigma$  และ  $\Delta\pi$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความแตกต่างของความดันระหว่างเมมเบรนตามลำดับ ถ้าสารละลายที่ไม่ต้องการมีค่าสูงเพียงพอ  $\sigma$  อาจจะมีค่าเป็นหนึ่งหน่วยและความแตกต่างของความดันระหว่างเมมเบรน  $\Delta\pi$  สามารถหาได้จากความเข้มข้นที่ผิวเมมเบรน  $C_m$  คือ

$$\Delta\pi = \pi(c_m) - \pi(c_p) \cong \pi(c_m) \quad (2.29)$$

ซึ่งความเข้มข้นของน้ำ Permeate,  $C_m$  มีค่าเกือบเป็นศูนย์ จากสมการที่ 2.28 ค่าความดันประสิทธิผลจะมีค่าลดลงแต่ค่าแรงดันออสโมติกของน้ำเกือบก็มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นเอียงในฟลักซ์ของน้ำ permeate ความดันออสโมติกของโมกุลของสารละลายสามารถหาได้จาก

$$\pi(c) = A_1c + A_2c^2 + A_3c^3 \quad (2.30)$$

ซึ่ง  $A_1, A_2$  และ  $A_3$  เป็นสมบัติเฉพาะของโมเลกุลของสารละลาย จากสมการที่ 2.29 และ 2.30 ดังนั้น สมการที่ 2.28 สามารถเขียนใหม่เป็น

$$J_v = L_p[\Delta P - (A_1c + A_2c^2 + A_3c^3)] \quad (2.31)$$

ในเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน สารละลายที่ไม่ต้องการจะรวมตัวที่ผิวหน้าเมมเบรนและรวมเป็นชั้น Concentration polarization ที่สภาวะสมดุล ปริมาณของสารละลายจะถ่ายเทให้

เท่าๆกันโดยตัวละลายไปยังเมมเบรนซึ่งจะมีการแพร่กลับ ตามที่ยอมรับโดยทั่วกันว่า ความสมดุลของวัสดุของสารละลายภายในชั้น Concentration boundary ได้เป็น

$$\frac{c_m}{c_b} = \exp \frac{J_v}{k} \quad (2.32)$$

ซึ่ง  $C_b$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำเก็บกัก และ  $k$  คือ สัมประสิทธิ์ถ่ายเทมวล ในระบบอัลตราฟิลเตรชัน ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำเก็บกัก  $C_b$  อาจพิจารณาให้เท่ากับความเข้มข้นในน้ำเข้า  $C_i$  ดังนั้น  $L_p$  และ  $k$  เป็นตัวที่รู้ค่า ค่า  $J_v$  และ  $C_m$  สามารถคำนวณจากการแก้สมการที่ 2.31 และ 2.32

ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทมวล  $k$  ในชั้น Concentration polarization สามารถคำนวณจากสมการ Leveque ถ้าการไหลในโมดูลเป็นแบบลามินาร์ (laminar)

$$k = 1.64 \left[ \frac{u_i D^2}{2r_m L} \right]^{1/3} \quad (2.33)$$

ซึ่ง  $D$  คือ ความสามารถในการแพร่ของตัวละลายในตัวทำละลาย

2.4.2 Modified Boundary-Layer Resistance Model (MBR Model) (Cheng และคณะ, 2001)

ขอบเขตของชั้นในอัลตราฟิลเตรชันจะอยู่ในสภาวะคงที่ สารละลายโพลีเมอร์ที่มีความเข้มข้นผ่านไปได้ซึ่งตัวทำละลายก็ซึมได้ Wijmans และคณะ (1985) ได้เสนอ Conventional boundary-layer resistance model (BR model) สำหรับการคำนวณฟลักซ์ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ดังนี้

$$J_v = \frac{1}{\mu_w} \frac{\Delta P}{R_m + R_{bl}} \quad (2.34)$$

ซึ่ง  $R_{bl}$  คือ ความต้านทานของของเหลวของชั้นของความเข้มข้น โมเดลที่ได้รับ การปรับปรุงนี้พิจารณาผลกระทบทั้งของความดันออสโมติกและความต้านทานของชั้นบนพลาซมา ซึ่งได้เสนอไว้ดังนี้

$$J_v = \frac{1}{\mu_w} \frac{\Delta P - \Delta \pi(c_m)}{R_m + R_{bl}} \quad (2.35)$$

ความต้านทานของชั้นความเข้มข้นสามารถอธิบายได้ด้วย

$$R_{bl} = \int_0^\delta \frac{1}{L_{bl}(y)} dy \quad (2.36)$$

ซึ่ง  $L_{bl}$  คือ ความสามารถในการซึมผ่านของตัวละลายผ่านชั้นความเข้มข้นและ  $\delta$  คือ ความหนาของชั้นความเข้มข้น ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถการซึมได้ของตัวทำละลายและการตกตะกอนของตัวละลายในชั้นความเข้มข้นสามารถอธิบายด้วย

$$L_{bl}(y) = \frac{\mu_w s}{(1 - V_s/V_w)c} \quad (2.37)$$

ซึ่ง  $s$  คือ สัมประสิทธิ์การตกตะกอนของอนุภาคของตัวละลาย,  $V_s$  และ  $V_w$  เป็น ปริมาณบางส่วนของตัวละลายและตัวทำละลายตามลำดับ ความเข้มข้นจะขึ้นกับสัมประสิทธิ์การ ตกตะกอน สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\frac{1}{s} = \frac{1}{s_0} (1 + K_1 c + K_2 c^2) \quad (2.38)$$

สัมประสิทธิ์  $K_1$  และ  $K_2$  เป็นค่าคงที่สำหรับแต่ละอนุภาคตัวละลาย

ความเข้มข้นของตัวละลายในชั้นของความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันของระยะทางจากผิว เมมเบรน สมดุลมวลของตัวละลายในชั้นของความเข้มข้นหาได้จาก

$$J_v c = D \frac{dc}{dy} \quad (2.39)$$

หรือ

$$c = c_i \exp \frac{J_v y}{D} \quad (2.40)$$

แทนค่า สมการที่ 2.37, 2.38 และ 2.40 ในสมการที่ 2.36 ค่าหนึ่งที่ได้มาจากความต้านทานของชั้นความเข้มข้น คือ

$$R_{bl} = \frac{(1 - \frac{v_s}{v_w})D}{\mu_w s_0 J_v} \left[ (c_m - c_i) + \frac{K_1}{2} (c_m^2 - c_i^2) + \frac{K_2}{3} (c_m^3 - c_i^3) \right] \quad (2.41)$$

เพราะฉะนั้น การทำนายค่าฟลักซ์สามารถหาได้จาก Boundary-Layer Resistance Model สมการที่ 2.34 หรือ Modified Boundary-Layer Resistance Model สมการที่ 2.32 รวมกับสมการที่ 2.41

#### 2.4.3 Resistance in series model (Choi และคณะ, 2005)

กฎของ Darcy ใช้อธิบายตัวต้านทานการกรองในการขนถ่ายน้ำ permeate ผ่านรูพรุนของเมมเบรน ซึ่งอธิบายด้วยสมการที่ 2.22 ในขณะที่โมเดลต่างๆ อธิบายการลดลงของฟลักซ์ในน้ำ permeate โมเดล Resistance in series จะใช้สำหรับแบ่งรายละเอียดเหตุผลทั้งหมดสำหรับการลดลงของฟลักซ์ในน้ำ permeate ซึ่งอธิบายด้วยสมการที่ 2.42

$$R_t = R_m + R_{ad} + R_{cp} + R_f \quad (2.42)$$

ซึ่ง  $R_t$  = ค่าความต้านทานรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้น

$R_m$  = ความต้านทานเฉพาะของเมมเบรน

$R_{ad}$  = ความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับ

$R_{cp}$  = ความต้านทานที่เกิดจาก concentration polarization

$R_f$  = ความต้านทานที่เกิดจากการอุดตัน

โดยส่วนใหญ่ลักษณะของรู, ขนาดและความหนาของเมมเบรน ซึ่งจะถูกพิจารณาในระหว่างกระบวนการผลิต ตัวต้านทานการกรองโดยการดูดซับ  $R_{ad}$  เป็นค่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้แต่เป็นค่าความต้านทานการกรองที่มีค่าน้อย อย่างไรก็ตาม  $R_{ad}$  จะไม่ขึ้นกับค่าฟลักซ์ ซึ่งค่าฟลักซ์ที่

ลดลงนั้นเกิดจาก concentration polarization  $R_{cp}$  ซึ่งบ่อยครั้งจะผสมไปกับการลดลงของฟลักซ์ที่มีความสัมพันธ์กับการอุดตันที่แท้จริง  $R_f$  ซึ่ง  $R_{cp}$  มีการกำหนดว่า เป็นค่าต้านทานที่สามารถกลับคืนสู่สภาพปกติได้โดยการชำระล้างเมมเบรน (Rinsing) ซึ่งสารละลายที่เข้าไปจะถูกแทนที่ด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (DI water) ที่สถานะเดียวกัน การกลับคืนสู่สภาพปกติในฟลักซ์โดยการชำระล้าง (Rinsing) อาจจะอธิบายโดยการควบคุมไม่ได้ของชั้น Boundary layer การเพิ่มขึ้นของ back-diffusion ของรักษาไว้ของวัสดุและการลดลงในความดันออสโมติก ดังนั้น  $R_{ad}$  และ  $R_{cp}$  จะหลีกเลี่ยงไม่ได้ เว้นแต่น้ำเข้าจะเป็นน้ำบริสุทธิ์

ในจำนวนความต้านทานการกรองที่หลากหลาย  $R_f$  มีความสำคัญมากที่สุดเพราะสามารถทำให้ลดลงโดยเทคนิคที่เหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์จริง จากความแข็งแรงของการเกาะติดของตัวอุดตันในพื้นที่ผิวเมมเบรน  $R_f$  แบ่งได้เป็นการอุดตันที่กลับคืนได้ (reversible) และกลับคืนไม่ได้ (irreversible) การอุดตันที่กลับคืนได้ (reversible fouling)  $R_{rf}$  เกิดจากตัวอุดตันที่ยึดติดไม่แน่นที่ถูกกำจัดโดยการ flushing เมมเบรนด้วยน้ำ DI ซึ่งแรงเฉือนที่แข็งแรงสัมพันธ์กับความเร็วการไหลแบบ cross-flow ในระบบการไหลแบบ near-turbulent (เช่น 4.5 m/s) ที่สามารถทำความสะอาดการอุดตันที่ผิวเมมเบรน ดังนั้น การอุดตันที่กลับคืนไม่ได้ (irreversible) เกิดจากตัวอุดตันที่ยึดติดอย่างแข็งแรงที่ยังคงอยู่หลังจากการ flushing (เช่น pore blocking, strong cake, gel และ biofilm) ดังสมการที่ 2.43

$$R_f = R_{rf} + R_{if} \quad (2.43)$$

การก่อตัวของชั้นอุดตันเหล่านี้อธิบายเป็นกรณีเฉพาะของ concentration polarization ความเข้มข้นของอนุภาคในพื้นที่ผิวของเมมเบรนได้ไปถึงค่าสูงสุดหลังช่วงเวลาสั้นๆ เนื่องจากฟลักซ์เริ่มต้นที่ค่าสูงและชั้นของ gel และ cake layers เริ่มมีการก่อตัวขึ้น จากผลที่ได้จึงสมมุติเป็น 3 ชั้น คือ concentration polarization layer, reversible fouling layer และ irreversible fouling layer เกิดขึ้นพร้อมกันบนผิวหน้าของเมมเบรน จากการกรองที่ต่อเนื่องจึงคาดได้ว่าภายในชั้นของการอุดตันใกล้ผิวเมมเบรนจะน้อยลงและแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นมากขึ้นยิ่งกว่านั้น ในกลไกเดียวกันชั้นการอุดตันที่กลับคืนได้เริ่มต้นจะหนาแน่นและเกาะติดกับผิวเมมเบรนซึ่งหมายถึงความต้านทานที่สูงกว่าแรงเฉือน สุดท้ายแล้วชั้นการอุดตันที่กลับคืนได้ก็จะกลายเป็นชั้นการอุดตันที่กลับคืนไม่ได้



#### 2.4.4 The shear-induced diffusion model (Vincent Vela และคณะ, 2007)

Shear-induced diffusion model (Davis และคณะ, 1992) สามารถใช้อธิบายการลดลงของฟลักซ์กับเวลาระหว่างการเกิด cake formation ในกรณีกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันที่มีการไหลแบบ cross-flow การแพร่แบบ Shear-induced hydrodynamic ของอนุภาคซึ่งเกิดจากแต่ละอนุภาคที่สัมผัสได้ถูกสุมออกจากกระแสการไหลในการไหลแบบเฉือน ในขณะที่อนุภาคเหล่านั้นมีปฏิกิริยาและพังไปกับอนุภาคอื่น โมเดลมีสมมติฐานว่าหลังจากเวลาของอัลตราฟิลเตรชันที่แน่นอน tangential flow ได้ชะเชยการหมุนเวียนของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าเมมเบรนเนื่องจากอัตราการไหลของน้ำ permeate และป้องกันการเกิดชั้น cake ขณะไปถึงขั้น quasi-steady state

ความสมเหตุสมผลของโมเดลนี้ได้ถูกจำกัดโดยข้อสมมุติฐานดังนี้ เวลาที่ต้องการสำหรับชั้น gel ที่ติดอยู่กับเมมเบรนเพื่อเริ่มก่อตัวซึ่งมีน้อยมาก การสะสมของโมเลกุลตัวถูกละลายในชั้น polarization มีน้อยเมื่อเทียบกับชั้น gel และกลไกการอุดตันจะมีเพียงกลไกเดียว คือ การเกิด cake formation และการเติบโตของชั้น cake ได้ถูกควบคุมโดยกลไกของการกรองแบบ feed-forward

ข้อดีของโมเดลนี้ คือ โมเดลสามารถทำนายการลดลงของฟลักซ์เนื่องจากการก่อตัวของชั้น cake และการเติบโตด้วยสมการอย่างง่าย เพราะโมเดลนี้พิจารณาการเติบโตของชั้น cake ได้ถูกควบคุมโดยกลไกของการกรองแบบ feed-forward บ้างครั้งการอุดตันของเมมเบรนไม่ได้เกิดจาก cake formation เพียงอย่างเดียวแต่มีการอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรนด้วย ซึ่งไม่ได้ถูกพิจารณาด้วยโมเดลนี้

การลดลงของฟลักซ์กับเวลา สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.44

$$J_p = \frac{\frac{\Delta P}{\mu \cdot R_m}}{\left[ 1 + 2\beta \frac{D \cdot \left[ C_{gv} - C_{ov} - C_{ov} \cdot \ln\left(\frac{C_g}{C_0}\right) \right]}{t \cdot \left(\frac{\Delta P}{\mu \cdot R_m}\right)^2} \cdot \frac{D h / 2}{\frac{C_g - C_0}{C_0} \cdot \frac{\Delta P}{\mu \cdot R_m}} \right]} \quad (2.44)$$

$\Delta P$	= Transmembrane pressure
$R_m$	= Membrane hydraulic resistance
$\beta$	= the dimensionless resistance of the cake layer
$D$	= The solute diffusivity
$C_{0v}$	= solute concentration in the feed expressed in volume per volume
$C_{gv}$	= solute concentration in the gel layer in volume per volume
$C_0$	= the feed concentration
$C_g$	= gel layer concentration
$t$	= time

ในสมการที่ Dimensionless resistance ของชั้น cake หาได้จากสมการที่ 2.45

$$\beta = \frac{D_h}{2} \times \frac{R_c}{R_m} \quad (2.45)$$

$R_c$	= the specific resistance of the gel layer ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.46
$D_h$	= hydraulic diameter of the membrane

$$R_c = 225 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^4 \cdot a_p^2} \quad (2.46)$$

$$\varepsilon = 1 - C_{gv} \quad (2.47)$$

$\varepsilon$	= cake porosity
$a_p$	= the radius of the solute molecule

นอกจากโมเดลที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีโมเดลอื่นๆอีก เช่น Mugnier และคณะ (2000) ได้เสนอโมเดลที่อยู่บนพื้นฐานกฎของ Darcy สำหรับพิจารณาการไหลผ่านตัวกลางที่มี

รูปทรง ซึ่งโมเดลนี้พิจารณาการไหลผ่าน 2 ตัวกลางที่มีรูพรุน เมมเบรนและชั้นของการอุดตัน โมเดลนี้อธิบายการลดลงของฟลักซ์ดังสมการที่ 2.48

$$J_p = \frac{\Delta p + \frac{\delta}{x}}{\sqrt{\mu^2 \left(R_m + \frac{A}{x}\right)^2 + 2r_f \left(\frac{C_{0v}}{C_{mv} - C_{0v}}\right) \left(\Delta P + \frac{\delta}{x}\right)t}} \quad (2.48)$$

$\Delta P$  = Transmembrane pressure

$R_m$  = Membrane hydraulic resistance

$\mu$  = Dynamic viscosity of the permeate

$A$  = Membrane area

$r_f$  = specific resistance of the fouling layer

$C_{0v}$  = solute concentration in the feed expressed in volume per volume

$C_{mv}$  = concentration near the membrane surface

$t$  = time

$x$  และ  $\delta$  = empirical parameters

สำหรับการหาค่า empirical parameters ในสมการที่ 3.48 สามารถหาได้จากสมการที่ 3.49 ซึ่งสมการนี้เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง pressure drop ใน permeate,  $\Delta P'$  กับ permeate flux,  $J_p$

$$J_p = \frac{1}{\mu \times A} (x \times \Delta P' + \delta) \quad (2.49)$$

## 2.5 การอุดตันเมมเบรนและการทำความสะอาด (Goksen, 2005)

ประสิทธิภาพของเมมเบรนบ่อยครั้งจะเปลี่ยนไปตามเวลาในระหว่างการเดินระบบจริงๆ และสามารถสังเกตประเภทของพฤติกรรมของฟลักซ์กับเวลาได้ เช่น ฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรนลดลง

ตามเวลา ซึ่งเป็นพฤติกรรมหลักที่เกิดจาก concentration polarization และการอุดตัน ซึ่งเกิดจากผลของการเพิ่มขึ้นของการกักเก็บขององค์ประกอบต่างๆ ในชั้นขอบเขตของรอยต่อระหว่างเมมเบรนกับสารละลาย การเกิด concentration polarization เป็นปรากฏการณ์ที่สามารถกลับคืนได้ ในขณะที่การอุดตันที่ไม่สามารถกลับคืนได้นั้น สามารถเกิดได้หลายกลไก คือ การดูดซับ การเกิด pore blocking และ/หรือการก่อตัวของชั้น gel บนเมมเบรน ซึ่ง 2 ปรากฏการณ์นี้จะไม่เป็นอิสระต่อกัน และกันอย่างสมบูรณ์ ตั้งแต่การอุดตันสามารถหาได้จากการเกิด concentration polarization ขอบเขตของการอุดตันจะขึ้นกับประเภทของกระบวนการเมมเบรนที่ใช้และลักษณะน้ำเข้า การลดลงของฟลักซ์ส่วนใหญ่จะเกิดมากในเมมเบรน MF และ UF มีปัจจัยต่างๆมากมายที่มีผลกับการอุดตันในเมมเบรน การอุดตันจะขึ้นกับวัสดุเมมเบรน, bulk concentration, สภาพของสารละลาย (pH, ionic strength) และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเดินระบบ (transmembrane pressure, ความเร็ว cross-flow, อุณหภูมิ) องค์ประกอบของสารละลายที่เป็นสาเหตุของการอุดตัน คือ สารประกอบอินทรีย์ที่สามารถละลายได้, สารแขวนลอยหรือ particulate matter, สารละลายอินทรีย์, สารเคมีที่ทำให้ปฏิกิริยาและจุลชีพต่างๆ เมื่อเกิดการอุดตันขึ้น จะต้องมีการทำความสะอาดเมมเบรนเพื่อทำให้คุณสมบัติของเมมเบรนกลับคืนมา ศีกริของการอุดตันเมมเบรนพิจารณาจากความถี่ที่ทำความสะอาด อายุการใช้งานของเมมเบรนและพื้นที่เมมเบรนที่ต้องการ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อราคา, การออกแบบและการเดินระบบจริง ลำดับต่อไปจะกล่าวถึงมาตรการที่จะนำไปใช้ลดการอุดตันสำหรับการเดินระบบเมมเบรน

- การบำบัดน้ำเข้าเบื้องต้นเพื่อกำจัดหรือเปลี่ยนคุณสมบัติของตัวอุดตันโดยวิธีการ เช่น บำบัดด้วยความร้อน การปรับ pH การฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การตกตะกอนด้วยสารเคมี การกรองเบื้องต้นด้วย MF หรือ UF
- การเลือกเมมเบรนที่ถูกต้องเช่น การใช้เมมเบรนที่ชอบน้ำมากกว่าไม่ชอบน้ำ ซึ่งการอุดตันจะเกิดรุนแรงในเมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำ และ การใช้เมมเบรนที่มีประจุเป็นลบในลักษณะที่สารแขวนลอยในน้ำเข้ามีประจุเป็นลบ
- การเลือกโครงร่างโมดูลที่เหมาะสมและการหาสภาวะการไหลที่เหมาะสม เช่น การใช้เครื่อง turbulent promoters, ultrasonic vibration และ rotating modules
- การทำความสะอาดเมมเบรน

เพื่อทำความเข้าใจการดูดซับเมมเบรนและการทำความสะอาด ต้องทำความเข้าใจการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง ก.) วัสดุที่ดูดซับและเมมเบรน ข.) สารเคมีที่ทำความสะอาดและวัสดุที่ดูดซับ ค.) สารเคมีที่ทำความสะอาดและเมมเบรน และ ง.) วัสดุต่างๆที่ดูดซับ สามารถแสดงให้เห็นว่าไฟฟ้าสถิตย์และความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำระหว่างเมมเบรนและวัสดุที่ดูดซับมีผลกระทบสำคัญยิ่งต่อการดูดซับของเมมเบรน ปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตย์จะเกิดขึ้นในระหว่างกลุ่มฟังก์ชันต่างๆของเมมเบรน วัสดุที่ดูดซับและน้ำตั้งแต่เริ่มแรกจนแยกออกจากกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ pH, ionic strength และความเข้มข้นของ multivalent cation ในสารละลาย ปฏิกิริยาของการชอบและไม่ชอบน้ำคือ ฟังก์ชันของโครงสร้างที่เหมือนกันระหว่างเมมเบรนและวัสดุที่ดูดซับ, ประเภทและความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันทั้งของผิวเมมเบรนและวัสดุที่ดูดซับ และความสามารถการละลายของโมเลกุลของวัสดุที่ดูดซับ

ประจุที่ผิวของตัวกลางเมมเบรนคือ ผลของการเกิด ionization ของหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคที่ยังคงอยู่บนผิวของเมมเบรน (เช่น carboxyl และ amine) เพราะการเกิด ionization ของหมู่ฟังก์ชันจะขึ้นอยู่กับ pH ดังนั้นประจุที่ผิวของอนุภาคเมมเบรนจะขึ้นกับ pH เพียงอย่างเดียว ในช่วง pH โดยทั่วไปของน้ำ เมมเบรนส่วนใหญ่จะมีค่าประจุที่ผิวสุทธิเป็นกลางถึงเป็นลบ ในทำนองเดียวกัน สารแขวนลอย อนุภาคต่างๆและสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำโดยทั่วไปจะบรรจุประจุลบที่ pH ของน้ำธรรมชาติ ดังนั้นมีแนวโน้มที่จะเกิดแรงไฟฟ้าสถิตย์ผลักดันระหว่างเมมเบรนและองค์ประกอบเหล่านี้

สภาวะอื่นๆนอกเหนือจาก pH ที่อาจมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาระหว่างวัสดุที่ดูดซับกับเมมเบรน ยกตัวอย่างเช่น ความแข็งแรงของไอออนของสารละลายสามารถบีบอัดเป็น double electric layer ของสารแขวนลอย ซึ่งสามารถลดแรงผลักเพื่อทำให้เมมเบรนเป็นประจุลบ ตัวอย่างอื่นคือ divalent cations ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นรูป salt bridge ระหว่างเมมเบรนที่มีประจุลบและสารประเภทอื่นที่มีประจุลบในของเหลวโดยการทำให้ประจุให้เป็นกลาง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ที่ความแข็งแรงของไอออนสูงและความเข้มข้นของแคลเซียมสูงจะเพิ่มแนวโน้มการเกิดการดูดซับของเมมเบรน

จากการวิเคราะห์ข้างต้น เมมเบรนและวัสดุที่ดูดซับมีความเป็นไปได้ที่จะบรรจุไปด้วยประจุลบ ดังนั้น แรงผลักที่เกิดจากแรงไฟฟ้าสถิตย์เป็นแรงหลักที่ทำให้เมมเบรนและวัสดุที่ดูดซับแยกออกจากกัน เพราะฉะนั้น การเพิ่มขึ้นของแรงผลักที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดเมมเบรนได้ โดยการเพิ่มความหนาแน่นประจุของวัสดุที่ดูดซับ



ความสมดุลของแรงดึงดูดที่เกิดจากความไม่ชอบน้ำและแรงผลักที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตย์มีความสำคัญที่ต้องพิจารณาถ้าเมมเบรนเริ่มอุดตันและเริ่มสะอาด เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลและอัตราส่วนของมวลต่อประจุของตัวละลาย, ความแข็งแรงของไอออนิกและความเข้มข้นของ divalent cations เพิ่มขึ้น แรงดึงดูดที่เกิดจากความไม่ชอบน้ำมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เพราะความสามารถของการอุดตันของเมมเบรน ในทำนองเดียวกัน การเพิ่มความหนาแน่นประจุและความเป็นขั้วของตัวละลาย และ pH จะเพิ่มแรงผลักที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างเมมเบรนและตัวละลาย ซึ่งทำให้ลดการเกาะติดระหว่างเมมเบรนและวัสดุที่อุดตันและเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาด

การทำความสะอาดเมมเบรนเป็นขั้นตอนสำคัญในการปรับปรุงความสามารถในการซึมผ่านได้และความสามารถในการเลือกผ่านของกระบวนการเมมเบรน กระบวนการทำความสะอาดเมมเบรนจะต้องจัดการสะสม และกลับคืนสู่ความสามารถปกติและคุณสมบัติการแยกสารเฉพาะของระบบ ในตัวเลือกของการทำความสะอาดจะขึ้นกับโครงสร้างของโมดูล ความต้านทานเมมเบรน และธรรมชาติของตัวอุดตัน ซึ่งความต้องการประเภทของสารทำความสะอาดขึ้นกับธรรมชาติของตัวอุดตันและวัสดุเมมเบรน เทคนิคการทำความสะอาดสำหรับการกลับคืนปกติของเมมเบรนสามารถแยกกว้างๆ ได้ 3 ประเภทคือ ทางกายภาพ ทางเคมีและทางกายภาพ-เคมี การทำความสะอาดทางกายภาพจะเป็นกลไกบำบัดที่ขจัดตัวอุดตันออกและกำจัดตัวอุดตันออกจากผิวเมมเบรน การทำความสะอาดด้วยสารเคมีต้องอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อกำจัดตัวอุดตันจากผิวเมมเบรน ซึ่งสารเคมีจะเกิดปฏิกิริยากับสารที่สะสม, สะเก็ด (scale), ผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนและตัวอุดตันอื่นๆ สารเคมีจะต้องปลดปล่อยและละลายตัวอุดตัน, เก็บตัวอุดตันในการแพร่และการละลาย, หลีกเลียงการเกิดการอุดตันใหม่และไม่มีผลกระทบต่อเมมเบรน (Madaeni and Mansourpanah, 2004)

ประเภทของตัวอุดตันแต่ละชนิดจะต้องการประเภทของสารเคมีที่ไว้เชื่อถือได้ มีจำนวนของสารเคมีจำนวนมากที่หาได้สำหรับการจัดการสะสม ในตารางที่ 2.5 แสดงประเภทหลักๆ ของสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรน ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกสารทำความสะอาด คือ มีความสามารถในการทำความสะอาด ใช้งานได้ง่ายซึ่งหมายถึงสามารถแขวนลอยและปล่อยทิ้งได้, มีความเสถียรในระหว่างการใช้งาน, ราคาถูกและปลอดภัยด้วย

ตารางที่ 2.5 ประเภทของสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดเมมเบรน (Madaeni and Mansourpanah, 2004)

ประเภท	การนำไปใช้งาน	สารเคมีตัวอย่าง
Caustic	Hydrolysis , Solubilization	NaOH
Oxidants, Disinfectants	Oxidants, Disinfectants	NaOCl, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , peroxyacetic acid
Acids	Solubilization	Citric acid, Nitric acid
Chelating Agents	Chelating	Citric acid, EDTA
Surfactants	Emulsifying, Dispersion, Surface condition	Surfactants, Detergents

## 2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา

นริยญา กวีนั้นทวงศ์ (2541) ศึกษาการนำกระบวนการ PAC-UF มาประยุกต์ใช้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียเสียย้อม ศึกษาผลของความดันในการกรองน้ำ ตั้งแต่ 2.0-3.5 บาร์ และศึกษาผลของพีเอชของน้ำเสียในช่วง 3-10 ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียเสียย้อม

- ผลการทดลองพบว่า ณ ที่ความดัน 2 บาร์ กระบวนการเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียเสียย้อมดีที่สุด และเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียเสียย้อมลดลงเล็กน้อย
- ผลของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและทีโอซีของน้ำเสียเสียย้อม โดยกระบวนการเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน มีค่ามากกว่า 80% และกำจัดความเข้มข้นได้หมด ณ ที่ความดัน 2 บาร์ ได้อัตราการกรองน้ำมีค่าในช่วง 40-70 l/m<sup>2</sup>-h ที่ความดันในการดำเนินระบบในช่วง 2.0-3.5 บาร์ ผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำเสียตั้งแต่ 3-10 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและทีโอซีของทุกสปีโดยเฉลี่ยมากกว่า 80% และยังคงกำจัดความเข้มข้นได้หมด นั่นคือเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันสามารถใช้งานกับน้ำเสียเสียย้อมในช่วงพีเอชที่กว้าง

ศุวิทย์ กิตติภูมิชัย (2543) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ ด้วยกระบวนการออสโมซิสผันกลับ โดยการศึกษาผลของความดันของน้ำเข้า อัตราการเวียนกลับน้ำเข้มข้น และอัตราส่วนผลิตเพอมีเอทต่อประสิทธิภาพการกำจัดพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยแบ่งการทดลองได้ 3 ขั้นตอน ซึ่ง

- ขั้นตอนที่ 1 แปรค่าความดันเข้าระบบ 4 ค่า ได้แก่ 250, 500, 750 และ 1,000 psi
- ขั้นตอนที่ 2 การแปรค่าอัตราการเวียนน้ำเข้มข้น 4 ค่า ได้แก่ 0, 25, 50 และ 75%
- ขั้นตอนที่ 3 แปรผันอัตราส่วนการผลิตเพอมีเอท 4 ค่า ได้แก่ 5, 10, 15 และ 20%

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความดันน้ำเข้า เพิ่มอัตราเวียนกลับน้ำเข้มข้น และเพิ่มอัตราส่วนผลิตเพอมีเอทมีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดตัวถูกละลายต่างๆ ลดลง เมื่อเพิ่มค่าอัตราเวียนกลับน้ำเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าของแข็งละลายในเพอมีเอทเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผลิตเพอมีเอททำให้มีค่าของแข็งละลายในเพอมีเอทและมีค่าคลอไรด์เพิ่มขึ้น และทุกชุดการทดลองสามารถกำจัดสีได้เท่ากับ 100%

สนธยา สรหงษ์ (2546) ศึกษาและหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการเดินระบบนาโนฟิลเตรชัน เพื่อนำน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต ปัจจัยที่พิจารณาได้แก่ (1) ความดันที่ 3, 4, 5, 6 และ 7 บาร์ (2) ความเร็วสัมผัสผิวหน้าเมมเบรน (cross-flow velocity) ที่ 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 m/s (3) อัตราการผลิตน้ำสะอาด (% recovery) ที่ร้อยละ 20, 30, 40, 50 และ 60 และ (4) วิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยระบบไมโครฟิลเตอร์และการเติมกรด การทดลองแบ่งเป็น 2 ขนาด คือ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดกับชุดทดลองขนาดห้องปฏิบัติการในห้องปฏิบัติการ และนำสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดไปเดินระบบระยะยาว กับชุดทดลองขนาดทดสอบที่โรงงานฟอกย้อม

จากการทดลองพบว่า อัตราการผลิตน้ำสะอาดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความดันในการเดินระบบ และค่าความเร็วสัมผัสผิวหน้าเมมเบรน (cross-flow velocity) ในขณะที่การเพิ่มอัตราการผลิตน้ำสะอาด (% recovery) ที่สูงกว่า 50% ส่งผลให้น้ำสะอาดที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งเจือปนลดลง ซึ่งพบว่าการใช้ระบบไมโครฟิลเตอร์เป็นระบบบำบัดขั้นต้น ช่วยให้อัตราการผลิตน้ำสะอาดที่สูงกว่าการใช้เติมกรดเป็นระบบบำบัดเบื้องต้น และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินระบบอยู่ที่ ความดัน 6 บาร์ ความเร็วสัมผัสผิวหน้าเมมเบรน 0.5 เมตรต่อวินาที อัตราการผลิตน้ำสะอาดที่ 40% และใช้วิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยระบบไมโครฟิลเตอร์ ในการเดินระบบระยะ

ยาวพบว่า อัตราการผลิตน้ำสะอาดค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง 424 ชั่วโมง ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดความนำไฟฟ้าอยู่ที่ 90%-99% ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายอยู่ที่ 80%-100% ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและแคลเซียมทั้งหมด ประสิทธิภาพการกำจัดความเป็นด่างอยู่ที่ 80%-95% ประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์อยู่ที่ 82%-97% และสามารถกำจัดสีและความขุ่นได้ 98%-100% โดยที่ประสิทธิภาพของระบบสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการละลาย-การแพร่ ซึ่งคุณภาพน้ำที่ผลิตได้นั้นสูงเพียงพอที่จะนำกลับมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อมได้

Marcucci และคณะ (2003) ได้ศึกษาเพื่อพิจารณาเมมเบรนที่เหมาะสมที่ผลิตน้ำ permeate สำหรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยได้เลือก 2 วิธีสำหรับน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่ง 2 วิธี คือ กระบวนการ UF+RO และ MF+NF ซึ่งมีการทดลองหาประสิทธิภาพของระบบทั้ง 2 วิธีโดยน้ำจะผ่านการกรองทรายก่อนเข้าระบบ ผลการทดลองในระบบ UF+RO นั้น พบว่า การกรองทรายและระบบ UF สามารถลดความขุ่นได้ ซึ่งสามารถช่วยลดการเกิดการอุดตันที่เมมเบรน RO ระบบการกรองทรายและระบบ UF สามารถกำจัด COD ได้บางส่วน (น้อยกว่า 30%) และกำจัดสีได้น้อยมาก (5%) น้ำ permeate จากระบบ RO มีคุณภาพดี คือสามารถกำจัด COD ได้ 95% และจากการทดสอบการฟอกย้อมโดยใช้น้ำที่ผ่านระบบ UF+RO ให้ผลที่ดีกว่าน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต และผลการทดลอง ในระบบ MF+NF การกรองทรายและระบบ MF สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ 99% และกำจัดความขุ่นได้ 80% แต่กำจัด COD ได้ 36% และกำจัดสีได้ 13% เมมเบรน NF สามารถกำจัด COD ได้ทั้งหมด และจากการทดสอบการฟอกย้อมโดยใช้น้ำ permeate จากระบบ NF ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แม้คุณภาพน้ำจะแยกว่าระบบ RO ในรูปของเกลือและคลอไรด์ สุดท้าย น้ำ permeate จากทั้ง 2 ระบบสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตสำหรับกระบวนการฟอกย้อม

Bes-Pia และคณะ (2002) ได้ทดสอบระบบ UF เทียบกับระบบ NF โดยใช้น้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนด้วยสารเคมีสำหรับนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการพิมพ์ผ้าและกระบวนการฟอกย้อม การตกตะกอนด้วยสารเคมีสามารถกำจัด COD ได้ 50% เมมเบรน UF ซึ่งมี MWCO ในช่วง 5,000 ถึง 100,000 ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD แต่ในทางกลับกัน เมมเบรน UF สามารถให้น้ำ permeate ที่ไม่มีสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งเหมาะสมกับการนำกลับมาใช้ใหม่ในโรงงานฟอกย้อม

ในงานอดิเรกเดียวกัน Sostar-Turk และคณะ (2005) ได้ทดสอบระบบ UF เทียบกับระบบ RO สำหรับน้ำเสียซึ่งมีการปนเปื้อนของสี reactive จากกระบวนการพิมพ์ผ้าเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเมมเบรน UF สามารถกำจัด COD ได้ 42% และกำจัดสีได้ 30-37% และเมื่อนำน้ำ permeate จากระบบ UF ผ่านระบบ RO ซึ่งมีเมมเบรนเซรามิกขนาด 0.1  $\mu\text{m}$  กรองน้ำเข้าขั้นต้นก่อนเข้าระบบ RO จะได้รับการกำจัด COD และสีเพิ่มขึ้นเป็น 94% และ 99% ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการล้างของกระบวนการพิมพ์ได้

Suksaroj และคณะ (2005) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยใช้กระบวนการเคมี-ฟิสิกส์ร่วมกับนาโนฟิลเตรชันและ/หรือออสโมซิสผันกลับเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งเมื่อกรองแบบ dead-end ด้วยไมโครฟิลเตรชัน, อัลตราฟิลเตรชัน, นาโนฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับ พบว่าการบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการเคมี-ฟิสิกส์มีความสำคัญต่อจำกัดการอุดตันของเมมเบรน และศึกษาสาร coagulant 2 ชนิด (organic polyelectrolyte และ ferric chloride) เปรียบเทียบกันโดยการใช้ jar-test โดยใช้ความเข้มข้นที่แตกต่างกันที่ pH 6.8 และ NF และ/หรือ RO ได้ศึกษาที่ความดันแตกต่างกัน ผลที่ได้คือ NF ให้อัตราการไหลสูงสุด คือ  $90 \text{ L.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  ที่ความดัน 15 บาร์ นอกจากนี้ คุณภาพน้ำที่ได้ยังใกล้เคียงกับคุณภาพน้ำที่ได้จาก RO ความสามารถในการนำไฟฟ้า การดูดซับแสงที่ 490 nm และค่า DOC ของน้ำ permeate ของ NF มีค่าน้อยกว่า  $390 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 0 และ  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ของ C ตามลำดับ และ % ของอัตราการผลิตเพิ่มขึ้นตามความดัน

Choi และคณะ (2005) ได้สร้างวิธีการทดลองขึ้นมาใหม่ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็ว cross flow ในการก่อตัวของชั้นอุดตันระหว่างการใช้นาโนฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันกรองสารแขวนลอยชีวภาพ บนพื้นฐานของ Resistance in series model ได้พิจารณาตัวต้านทานการกรองที่เกิดจาก adsorption, concentration polarization และการอุดตันที่กลับคืนได้และกลับคืนไม่ได้ เปรียบเทียบตัวต้านทานการกรองโดยใช้ความสัมพันธ์ของมวล, ความหนาและความหนาแน่นของชั้นอุดตันที่สอดคล้องกัน นอกจากนั้นยังได้ตรวจวัดผลของชั้นอุดตันในคุณภาพน้ำ permeate ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าฟลักซ์ permeate เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับการเพิ่มขึ้นของความเร็ว cross-flow และที่ความเร็ว cross-flow สูงๆ จะมีประสิทธิภาพในการลดการอุดตันของเมมเบรน MF มากกว่าเมมเบรน UF การก่อตัวของชั้นการอุดตันที่สามารถกลับคืนได้นั้น สามารถป้องกันได้โดยใช้ความเร็ว



cross-flow ที่ 3.0 m/s สำหรับเมมเบรน MF และที่ 2.0 m/s สำหรับเมมเบรน UF ความสำคัญของตัวต้านทานการกรองที่สามารถกลับคืนได้และกลับคืนไม่ได้สอดคล้องกับมวลและความหนาของชั้นอุดตันของแต่ละตัวต้านทานในทุกกรณี

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อม สามารถกำจัดค่าซีไอดีและสีได้เกือบ 100% ซึ่งน้ำสะอาดที่ผลิตได้จากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับสามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Marcucci, 2003) และน้ำสะอาดที่ผลิตได้จากกระบวนการออสโมซิสผันกลับมีคุณภาพสูงกว่ากระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ส่วนกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันสามารถกำจัดค่าซีไอดีและสีได้บางส่วน ซึ่งน้ำสะอาดที่ผลิตได้จากทั้งสองกระบวนการนี้ไม่สามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่สำคัญของการใช้กระบวนการเมมเบรนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด คือ การอุดตัน (fouling) ซึ่งวิธีการลดการอุดตันของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและออสโมซิสผันกลับสามารถทำได้ เช่น การใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันร่วมกับนาโนฟิลเตรชัน (สนธยา, 2546) การใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับออสโมซิสผันกลับ (Marcucci, 2003) เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับออสโมซิสผันกลับ และได้้นำโมเดลคณิตศาสตร์มาใช้ในการศึกษาการเกิดการอุดตันของเมมเบรน (Choi และคณะ, 2005) เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์หาวิธีการลดการอุดตันต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

##### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยการทดลองทั้งหมดทำที่ห้องปฏิบัติการ โรงงานสิ่งทอ และชุดการทดลองทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.1 มีดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.1.1 ชุดการทดลองที่ 1 ศึกษาความดันน้ำเข้า ของระบบ UF

3.1.2 ชุดการทดลองที่ 2 ศึกษา % recovery ของระบบ RO ที่เหมาะสมในการเดินระบบ UF+RO ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.1

3.1.3 ชุดการทดลองที่ 3 ศึกษาการเดินของระบบ UF และ RO ในระยะยาว (ประมาณ 400 ชม.) โดยใช้ปัจจัยต่างๆที่ได้จากชุดทดลองที่ 1 และ 2 มาใช้ในการควบคุมการเดินระบบ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.1

3.1.4 การศึกษาโมเดล Solution diffusion model สำหรับระบบ RO โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองที่ 2 มาศึกษา

### 3.2 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ตัวแปรคงที่ ได้แก่

1. พื้นที่ผิวเมมเบรน
2. ขนาดเมมเบรน
3. ความดันในการเดินระบบ RO
4. ความดันการล้างเมมเบรน
5. สารเคมีที่ใช้ล้างเมมเบรน

3.2.2 ตัวแปรอิสระ ได้แก่

1. ความดันน้ำเข้าระบบ UF ได้แก่ 0.10, 0.15 และ 0.20 MPa
2. % recovery ของระบบ RO ได้แก่ 60%, 70% และ 80 %

3.2.3 ตัวแปรตาม ได้แก่

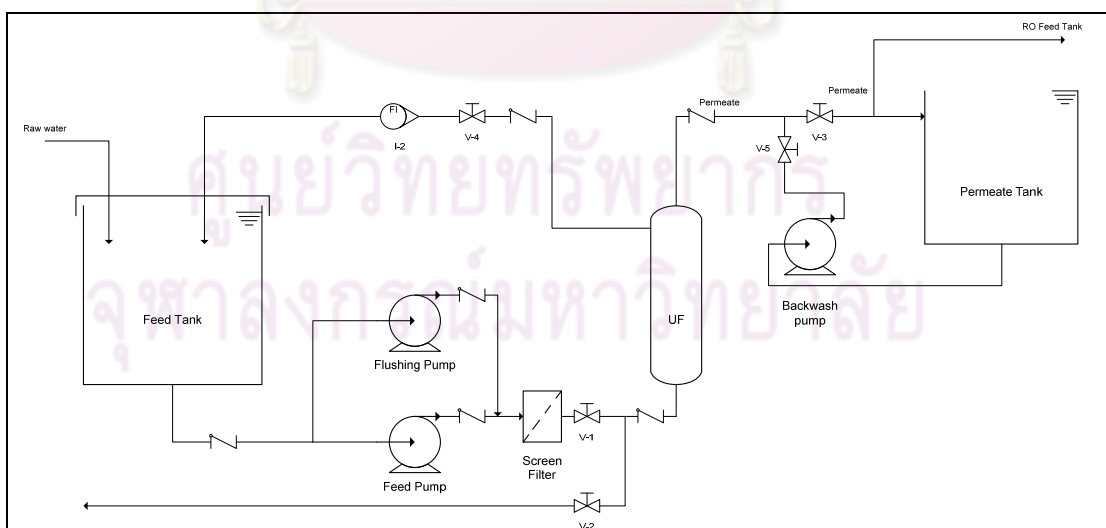
อัตราการกรองน้ำต่อพื้นที่ ฟิเอช ความนำไฟฟ้า ความขุ่น สภาพต่าง ความกระด้าง คลอไรด์ ซีโอดี

ตารางที่ 3.1 ชุดการทดลอง

การทดลอง	ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งเจือปน	
	UF	RO
	ความดันน้ำเข้า (MPa)	Recovery (%)
การทดลองที่ 1 หาความดันน้ำเข้าระบบ UF ที่เหมาะสม	P1 = 0.10	-
	P2 = 0.15	
	P3 = 0.20	
การทดลองที่ 2 หา %Recovery ของระบบ RO ที่เหมาะสมในการเดินระบบ UF+RO	จากการทดลองที่ 1	R1 = 60
		R2 = 70
		R3 = 80
การทดลองที่ 3 การศึกษาการอุดตันของระบบ UF และ RO ในระยะยาว	จากการทดลองที่ 1	จากการทดลองที่ 2

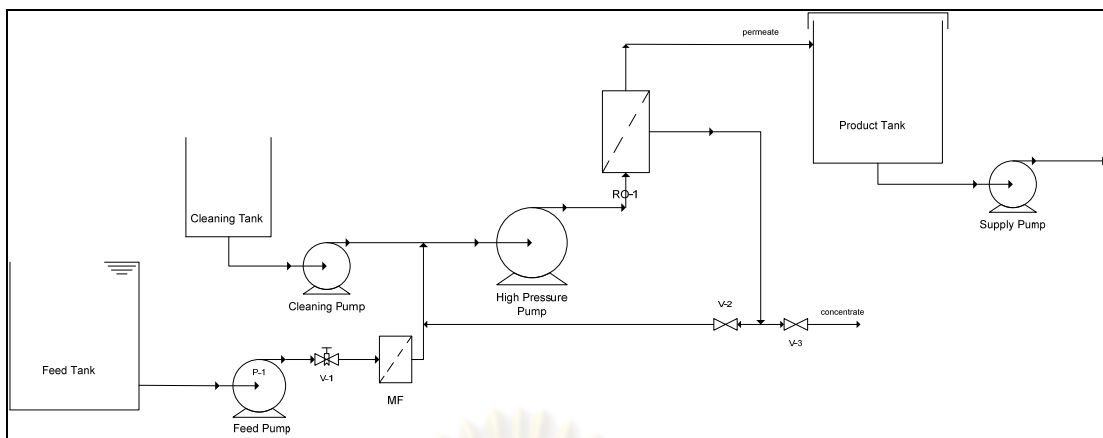
### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยเป็นชุดขนาดทดลอง (pilot scale) และคุณสมบัติของเมมเบรน UF แล RO ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบระบบอัลตราฟิลเตรชัน

หมายเหตุ ระบบอัลตราฟิลเตรชันเดินระบบแบบ Dead-End



รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบระบบออสโมซิสผันกลับ

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเมมเบรน

คุณสมบัติ	UF	RO
Manufacturer	Hydranautics	Filmtec
Model	HYDRAcap 40-LD	LE-4040
Type	Capillary (Inside-out)	Spiral wound
Raw material	Polyethersulfone	Polyamide
Pore size or MWCO	150 kDa	-
Outer pore size	1.3 mm	-
Effective filtration area	30 m <sup>2</sup>	7.2 m <sup>2</sup>
Operating pH Range	4-10	2-11
Maximum Operating Temp	104 °C	113 °C
Maximum Operating Pressure	41 bar	5 bar
Maximum Feed Flow Rate	3.6 m <sup>3</sup> /h	4 m <sup>3</sup> /h

### 3.4 การเก็บน้ำและการวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

น้ำดิบที่ใช้ในการทดลองจะใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพในบ่อสุดท้ายก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ซึ่งการเก็บน้ำตัวอย่างในการดำเนินการทดลองนี้ จะเก็บน้ำตัวอย่างทั้งหมด 4 จุด จุดละ 1 ตัวอย่าง คือ 1.น้ำก่อนเข้าระบบ 2.น้ำ permeate จากระบบ UF 3.น้ำเข้มข้นจากระบบ RO 4.น้ำ permeate จากระบบ RO ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 น้ำตัวอย่างที่เก็บ



มา ความถี่ในการเก็บน้ำตัวอย่างในแต่ละการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3 แล้วนำน้ำตัวอย่างมาวิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ความถี่ในการเก็บน้ำตัวอย่าง

ความถี่ในการเก็บน้ำตัวอย่าง	การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ		การเดินระบบระยะยาว
	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	
อัตราการไหล	ทุกๆ 2 ชม.	ทุกๆ 2 ชม.	ทุกๆ 8 ชม.
เก็บน้ำตัวอย่าง	ทุกๆ 2 ชม.	ทุกๆ 2 ชม.	ทุกๆ 8 ชม.

ตารางที่ 3.4 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์
pH	pH meter
อุณหภูมิ	Thermometer
ซีโอดี	Titrimetric Method
ความขุ่น	Turbidity Meter
ความกระด้าง	การไตเตรตด้วย EDTA
สภาพด่าง	การไตเตรตด้วยกรดซัลฟิวริก
สภาพการนำไฟฟ้า	Conductivity Meter
คลอไรด์	การไตเตรตด้วย $\text{AgNO}_3$

### 3.5 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าดำเนินระบบ

การวิเคราะห์ด้านค่าใช้จ่ายและการลงทุนในงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าใช้จ่ายในส่วนต่างๆ ได้แก่

- ค่าใช้จ่ายส่วนการลงทุน ได้แก่ ค่าก่อสร้างอาคาร ค่าเหมมเบรน ค่าโครงสร้างและอุปกรณ์ประกอบเหมมเบรนและระบบเก็บน้ำที่ผลิตได้

- ค่าใช้จ่ายในส่วนการดำเนินระบบ ได้แก่ ค่าพลังงาน ค่าสารเคมี ค่าเมมเบรนและค่าซ่อมบำรุง

โดยการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำด้วยระบบอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับระบบออสโมซิสผันกลับมีสมมุติฐานดังนี้

- ระบบสามารถบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานได้ในอัตรา 3,500 m<sup>3</sup>/d
- ระบบทำงานวันละ 24 ชม. และทำงานปีละ 300 วัน
- ระบบมีอายุการทำงาน 15 ปี
- เมมเบรนมีอายุทำงาน 3 ปี



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.6 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย

ระยะเวลาดำเนินงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย

แผนการวิจัย	ปี พ.ศ.2550					ปี พ.ศ.2551							
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	
1. เตรียมข้อมูลพื้นฐานและเอกสารที่เกี่ยวข้อง	←→												
2. กำหนดขอบเขต วัตถุประสงค์และออกแบบการทดลอง		←→											
3. สอบโครงร่างวิทยานิพนธ์						←→							
4. เตรียมชุดอุปกรณ์การทดลอง						←→							
5. ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการเดินระบบ UF และ RO								←→					
6. ศึกษาการเกิดการอุดตันของระบบ UF และ RO								←→					
7. ศึกษาโมเดลของระบบ UF และ RO										←→			
8. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล									←→				
9. วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าเดินระบบ											←→		

ศูนย์วิทยพัชการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลอง ได้ทำการทดลองที่โรงงานฟอกย้อมแห่งหนึ่งที่ จ.สมุทรปราการ ซึ่งใช้น้ำเสียจากระบวนการฟอกย้อมของโรงงานทั้งหมดที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานซึ่งเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพ แล้วถูกกักไว้ในบ่อพักก่อนปล่อยทิ้งลงสู่ทะเล ซึ่งน้ำทิ้งส่วนหนึ่งทางโรงงานได้นำกลับมาใช้ใหม่ด้วย คุณสมบัติของน้ำทิ้งของโรงงานนี้โดยรวม ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่ยังมีปริมาณสีมากพอสมควร เมื่อมองด้วยตาเปล่า ซึ่งโรงงานแห่งนี้ ในกระบวนการย้อมส่วนใหญ่ใช้สีชนิด สีเอซิด (Acid dye) และ สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) เป็นส่วนใหญ่ ตามคำสั่งการผลิตของลูกค้า ซึ่งคุณสมบัติของน้ำทิ้งที่เข้าระบบ ในการทดลองที่ 1, 2 และ 3 แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของน้ำทิ้งที่เข้าระบบ

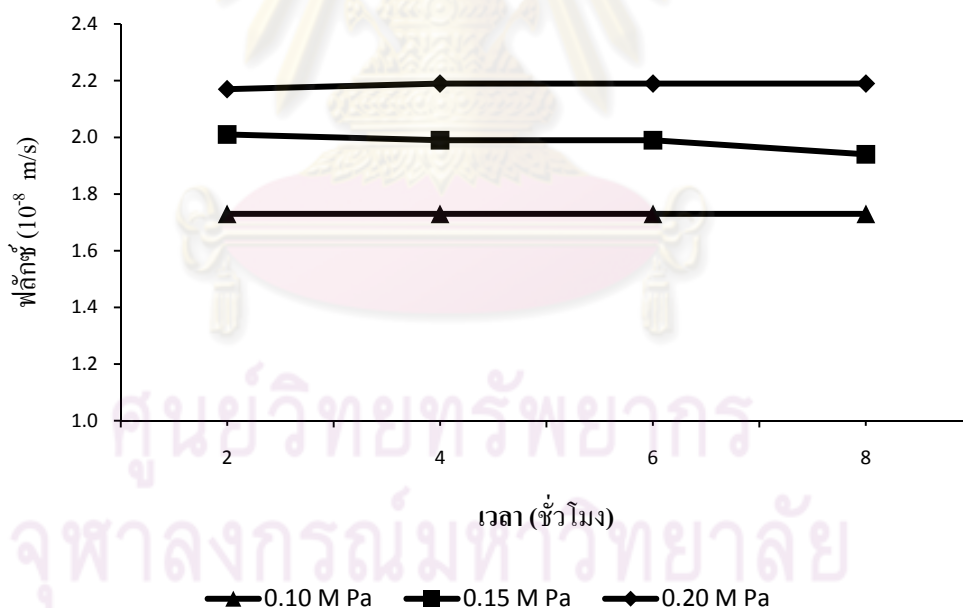
คุณสมบัติ	หน่วย	การทดลองที่ 1		การทดลองที่ 2		การทดลองที่ 3	
		ช่วงค่า	เฉลี่ย	ช่วงค่า	เฉลี่ย	ช่วงค่า	เฉลี่ย
พีเอช	-	7.22-8.28	7.84	8.11-8.42	8.31	7.56-8.51	8.0
อุณหภูมิ	°C	29.4-32.5	30.9	29.5-31.5	30.6	29.0-33.5	31.3
ความขุ่น	NTU	17.45-21.03	18.66	2.09-2.78	2.32	12.03-22.34	15.4
การนำไฟฟ้า	µs	3,710-4,240	4,042	2,650-3,850	3,448	1,000-3,220	1,506
ความกระด้าง	mg/l CaCO <sub>3</sub>	135-143	140	124-168	144	48-146	70.5
สภาพด่าง	mg/l CaCO <sub>3</sub>	316-374	351	250-354	316	92-290	132.2
คลอไรด์	mg/l Cl <sup>-</sup>	474-490	482	270-480	387	346-114	165.3
ซีโอดี	mg/l	413-493	464	440-507	470	373-160	262.4

#### 4.2 ผลของการเดินระบบ UF เป็นระบบบำบัดขั้นต้นของระบบ RO

การทดลองที่ 1 เป็นการควบคุมความดันน้ำเข้าระบบ UF ที่ 0.10 MPa, 0.15 MPa และ 0.20 MPa ตามลำดับ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งค่าความดันที่ใช้ นั้น อยู่ในช่วงความดันที่เมมเบรนที่ใช้รองรับได้ โดยแต่ละค่าความดันจะเดินระบบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 2 ชั่วโมง ผลที่ได้ดังนี้

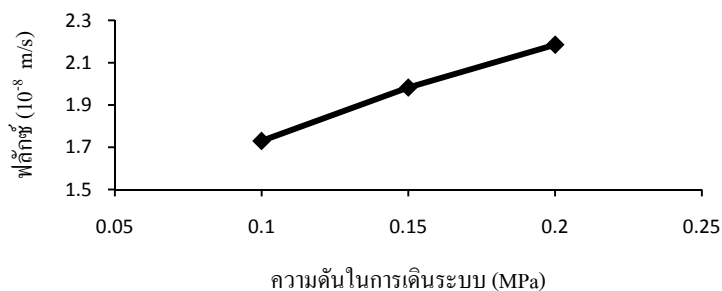
##### 4.2.1 ผลของความดันต่อการผลิตน้ำสะอาด

การทดลองพบว่า ในเวลา 8 ชั่วโมง การผลิตน้ำสะอาดของทุกค่าความดันมีค่าค่อนข้างคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ดังรูปที่ 4.1 เมื่อค่าความดันในการเดินระบบเพิ่มขึ้น การผลิตน้ำสะอาดจะลดลง เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะเกิด Concentration Polarization ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งอัตราการผลิตน้ำสะอาดเฉลี่ยที่ ความดันมีค่า 0.10 MPa, 0.15 MPa และ 0.20 MPa เท่ากับ  $1.73 \times 10^{-8}$  m/s,  $1.98 \times 10^{-8}$  m/s และ  $2.19 \times 10^{-8}$  m/s ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลาของการทดลองที่ 1

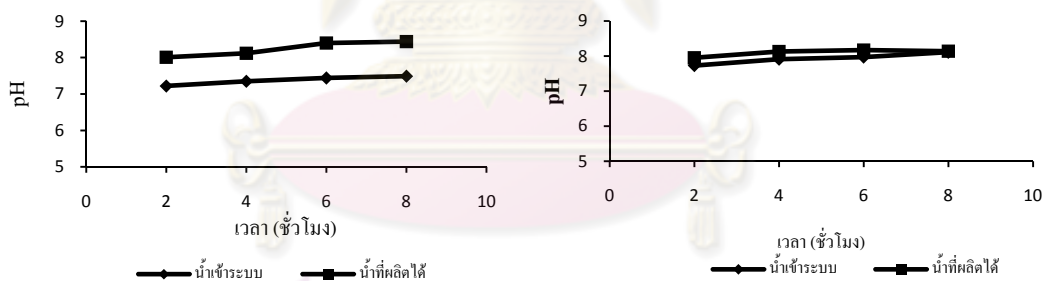




รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์เฉลี่ยกับความดันของการทดลองที่ 1

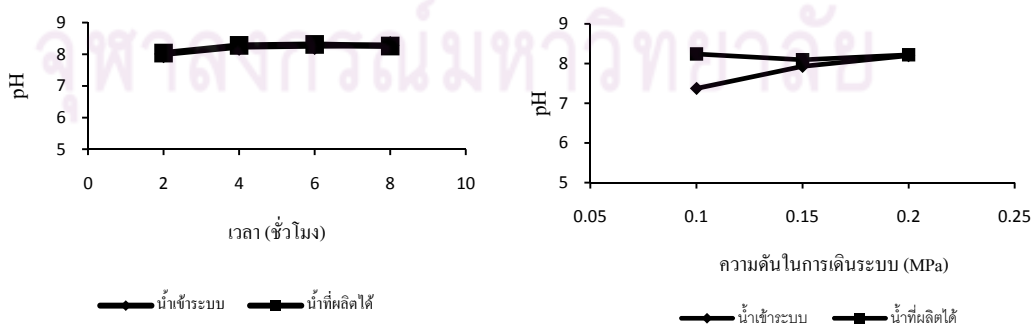
#### 4.2.2 ผลของความดันต่อค่าพีเอช

จากการทดลองพบว่า ความดันในการเดินระบบมีผลต่อค่าพีเอช คือ ที่ความดันเท่ากับ 0.10 MPa พีเอชของน้ำที่ผลิตได้มีค่าสูงกว่าพีเอชของน้ำเข้าระบบ แสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) และที่ความดันเท่ากับ 0.15 และ 0.20 MPa พีเอชของน้ำที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกับพีเอชของน้ำเข้าระบบ แสดงดังรูปที่ 4.3 (ข) และ (ค) และค่าพีเอชเฉลี่ยของแต่ละความดันมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.3 (ง) เนื่องจากระบบ UF สารประกอบคาร์บอนสามารถผ่านเมมเบรน UF ได้ จึงไม่มีผลต่อค่าพีเอชในน้ำที่ผลิตได้



(ก) P = 0.10 MPa

(ข) P = 0.15 MPa



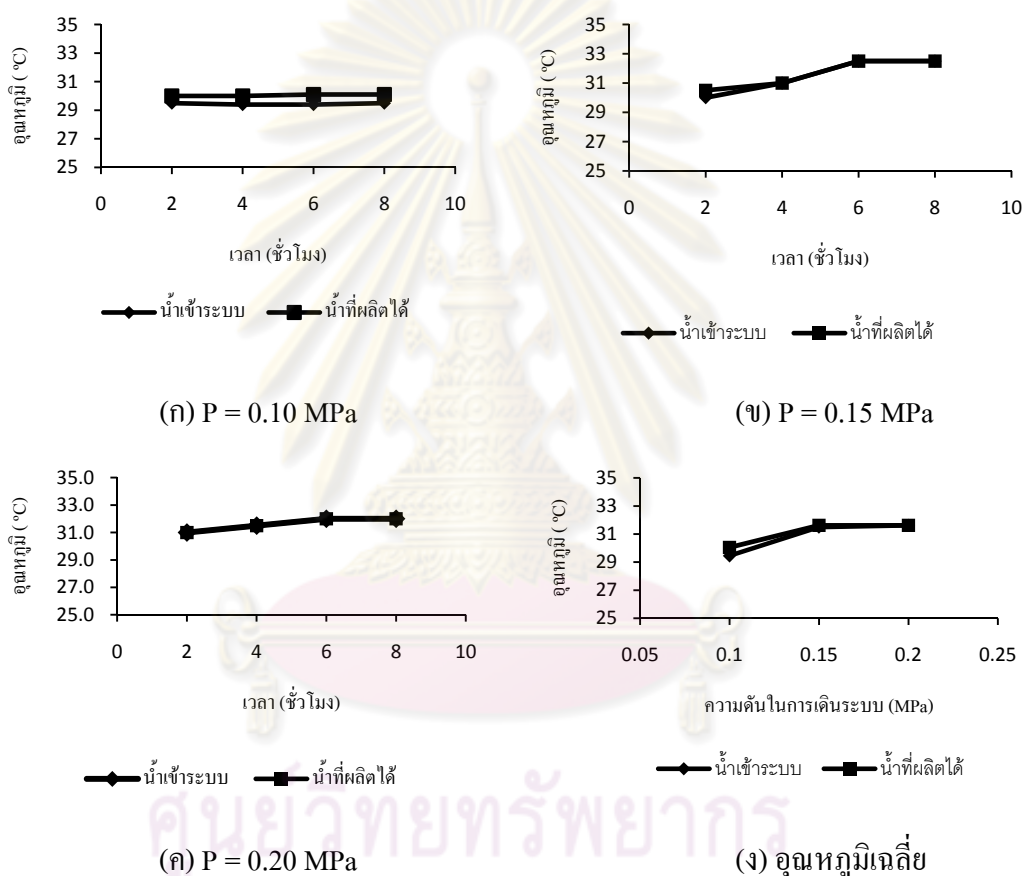
(ค) P = 0.20 MPa

(ง) พีเอชเฉลี่ย

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1

#### 4.2.3 ผลของความดันต่ออุณหภูมิ

จากการทดลองพบว่า ความดันในการเดินระบบมีผลต่ออุณหภูมิ คือ ที่ความดันเท่ากับ 0.10 MPa อุณหภูมิ ของน้ำที่ผลิตได้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิ ของน้ำเข้าระบบ แสดงดังรูปที่ 4.4 (ก) และที่ความดันเท่ากับ 0.15 และ 0.20 MPa อุณหภูมิ ของน้ำที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ ของน้ำเข้าระบบ แสดงดังรูปที่ 4.4 (ข) และ (ค) และอุณหภูมิ เฉลี่ยของแต่ละความดันมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.4 (ง) เนื่องจากพลังงานที่ให้แก่ระบบ UF มีค่าน้อยมากทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

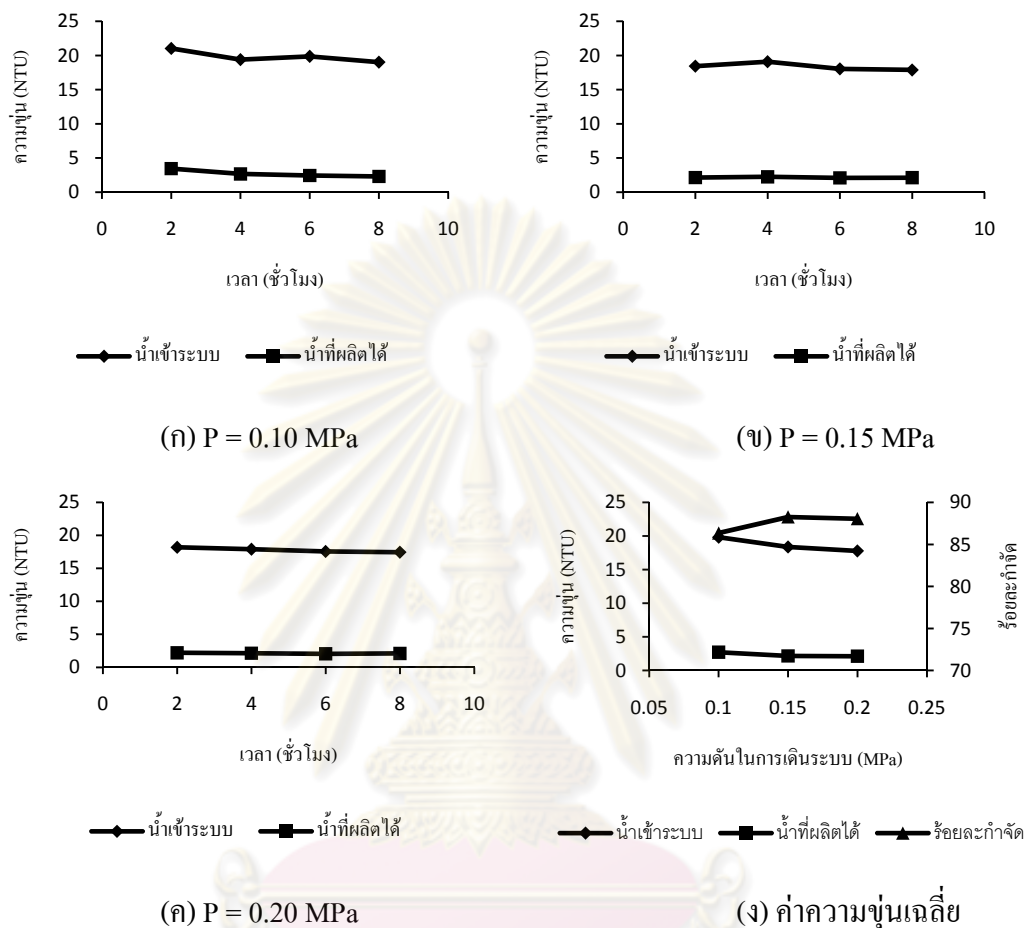


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1

#### 4.2.4 ผลของความดันต่อความขุ่น

จากการทดลองพบว่า ในระยะเวลา 8 ชั่วโมงของทุกค่าความดันสามารถกำจัดความขุ่นได้ใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.5 (ก), (ข) และ (ง) ความขุ่นเฉลี่ยของน้ำที่ผลิตได้ที่ความดันเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 MPa มีค่าเท่ากับ 2.72, 2.16 และ 2.12 NTU ตามลำดับ และมีร้อยละการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 86.4, 88.3 และ 88.1 ตามลำดับ เนื่องจากสารแขวนลอยไม่สามารถผ่านรูพรุนของ UF

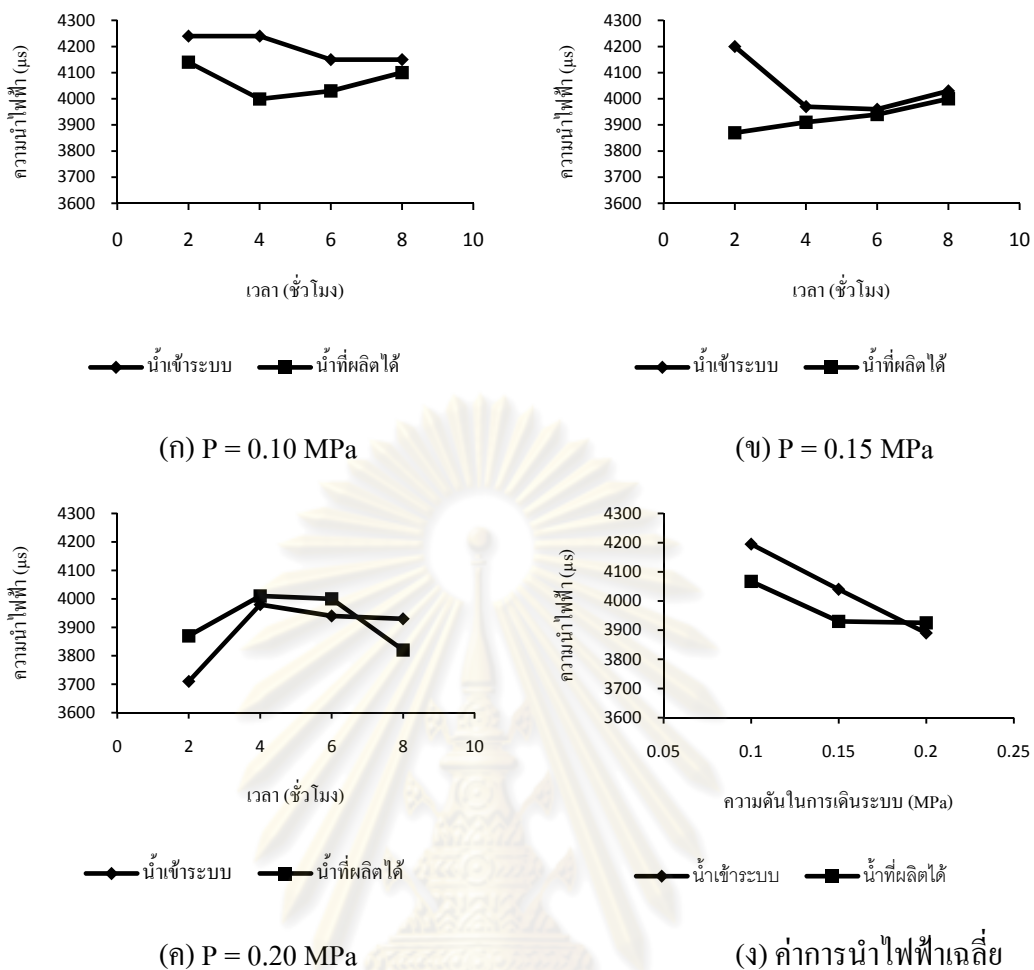
ได้ จึงทำให้ระบบมีประสิทธิภาพกำจัดความขุ่นสูง ซึ่งร้อยละกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในการเดินระบบเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.5 (ง)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1

#### 4.2.5 ผลของความดันต่อการนำไฟฟ้า

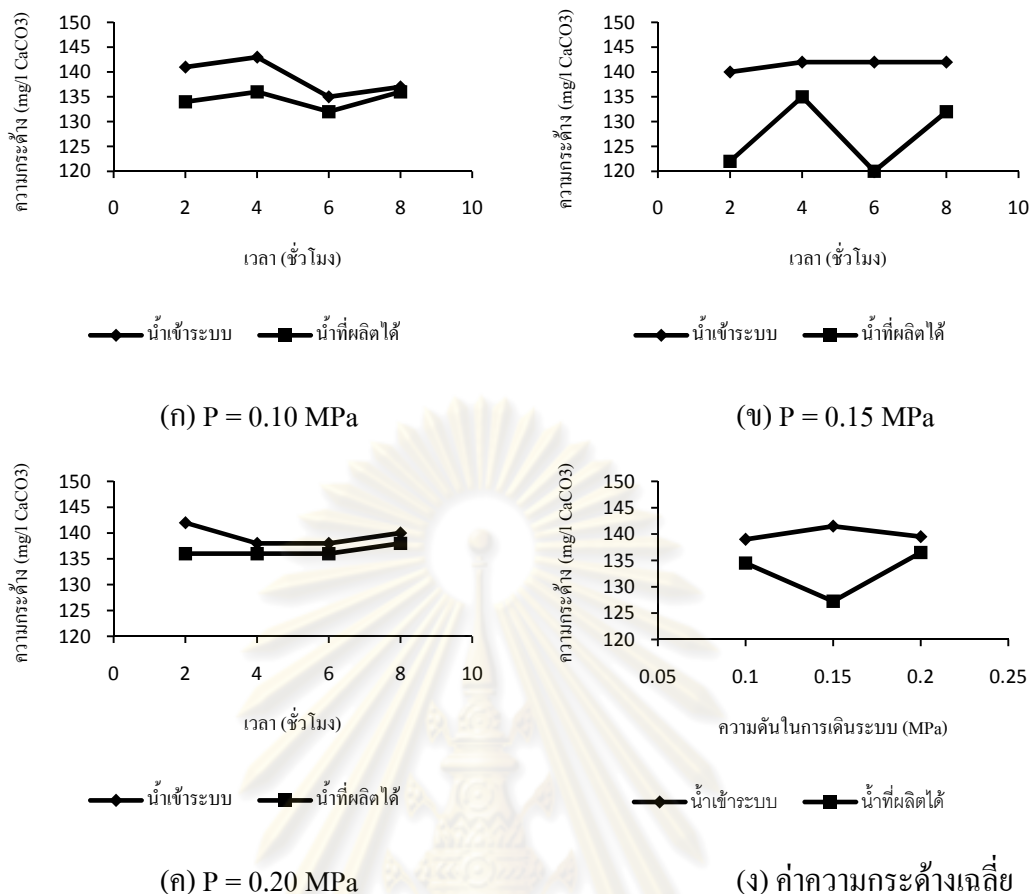
จากการทดลองพบว่า ในระยะเวลา 8 ชั่วโมง ในทุกค่าความดัน ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำสะอาดและน้ำที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.6 (ก), (ข) และ (ค) และเมื่อความดันในการเดินระบบเพิ่มขึ้น จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดการนำไฟฟ้า เนื่องจากการนำไฟฟ้าแสดงถึงค่าของแข็งละลายน้ำได้ ซึ่งของแข็งละลายน้ำได้นั้นสามารถผ่านรูพรุนของ UF ได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดการนำไฟฟ้ามีค่าน้อยมาก แสดงดังรูปที่ 4.6 (ง) จะเห็นได้ว่า ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของน้ำสะอาดและน้ำเข้าระบบมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้ากับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1

#### 4.2.6 ผลของความดันต่อความกระด้าง

จากการทดลองพบว่า ในระยะเวลา 8 ชั่วโมง ในทุกค่าความดัน ค่าความกระด้างของน้ำสะอาดและน้ำที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.7 (ก), (ข) และ (ค) และเมื่อความดันในการเดินระบบเพิ่มขึ้น จะไม่ผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง แสดงดังรูปที่ 4.7 (ง) จะเห็นได้ว่า ค่าความกระด้างเฉลี่ยของน้ำสะอาดและน้ำเข้าระบบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเนื่องจากอิออนที่เป็นสาเหตุของความกระด้างเป็นอิออนประเภทที่มีประจุ +2 เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม เป็นต้น ซึ่งสารประกอบอิออนเหล่านี้มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรน จึงสามารถผ่านเมมเบรนได้



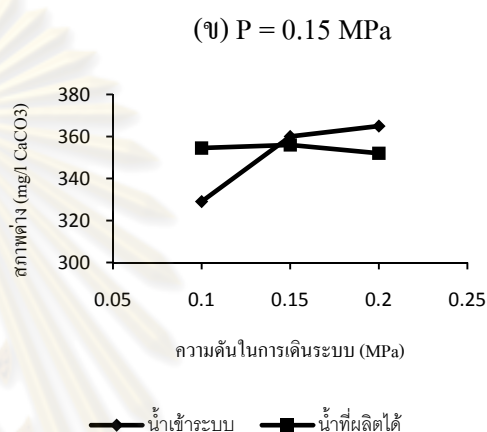
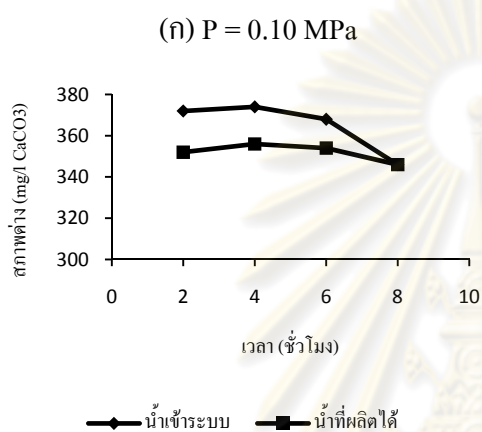
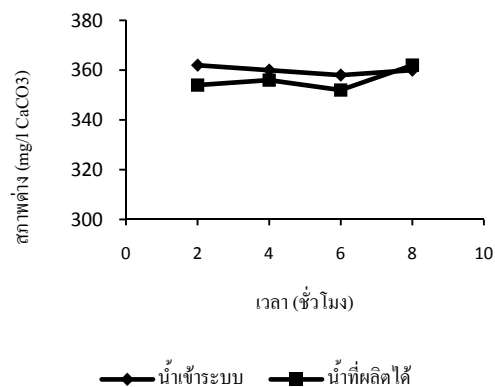
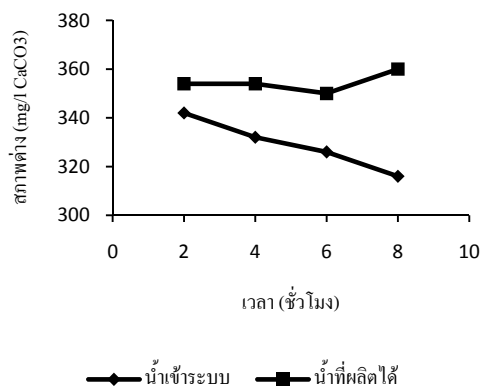
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างกับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1

#### 4.2.7 ผลของความดันต่อสภาพต่าง

จากการทดลองพบว่า ในระยะเวลา 8 ชั่วโมง ในทุกค่าความดัน ค่าสภาพต่างของน้ำสะอาด และน้ำที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.8 (ก), (ข) และ (ค) และเมื่อความดันในการเดินระบบเพิ่มขึ้น จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสภาพต่าง แสดงดังรูปที่ 4.8 (ง) จะเห็นได้ว่า ค่าสภาพต่างเฉลี่ยของน้ำสะอาดและน้ำเข้าระบบมีค่าใกล้เคียงกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





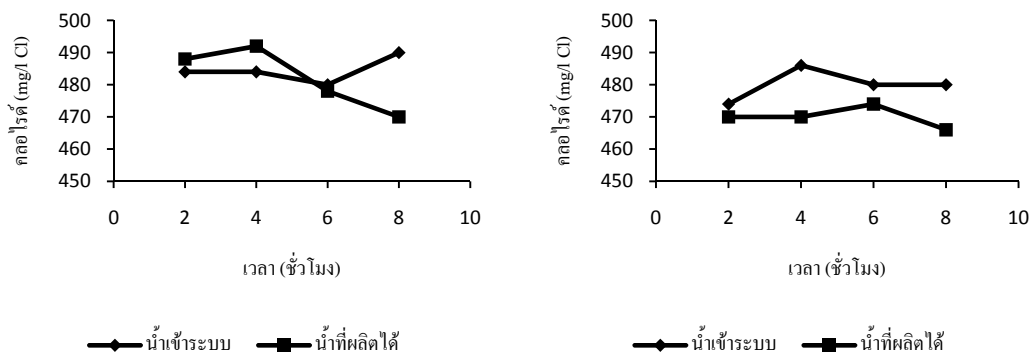
(ค) P = 0.20 MPa

(ง) ค่าสภาพต่างเฉลี่ย

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต่างกับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1

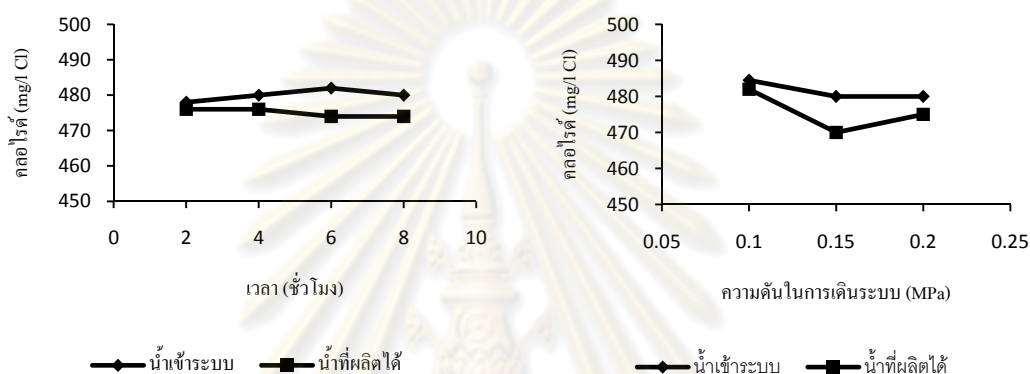
#### 4.2.8 ผลของความดันต่อคลอไรด์

จากการทดลองพบว่า ในระยะเวลา 8 ชั่วโมง ในทุกค่าความดัน ค่าคลอไรด์ของน้ำสะอาดและน้ำที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.9 (ก), (ข) และ (ค) และเมื่อความดันในการเดินระบบเพิ่มขึ้น จะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์น้อยมาก แสดงดังรูปที่ 4.9 (ง) จะเห็นได้ว่าค่าคลอไรด์เฉลี่ยของน้ำสะอาดและน้ำเข้าระบบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากสารประกอบคลอไรด์ของโลหะต่างๆ มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรน จึงสามารถผ่านเมมเบรนได้



(ก) P = 0.10 MPa

(ข) P = 0.15 MPa



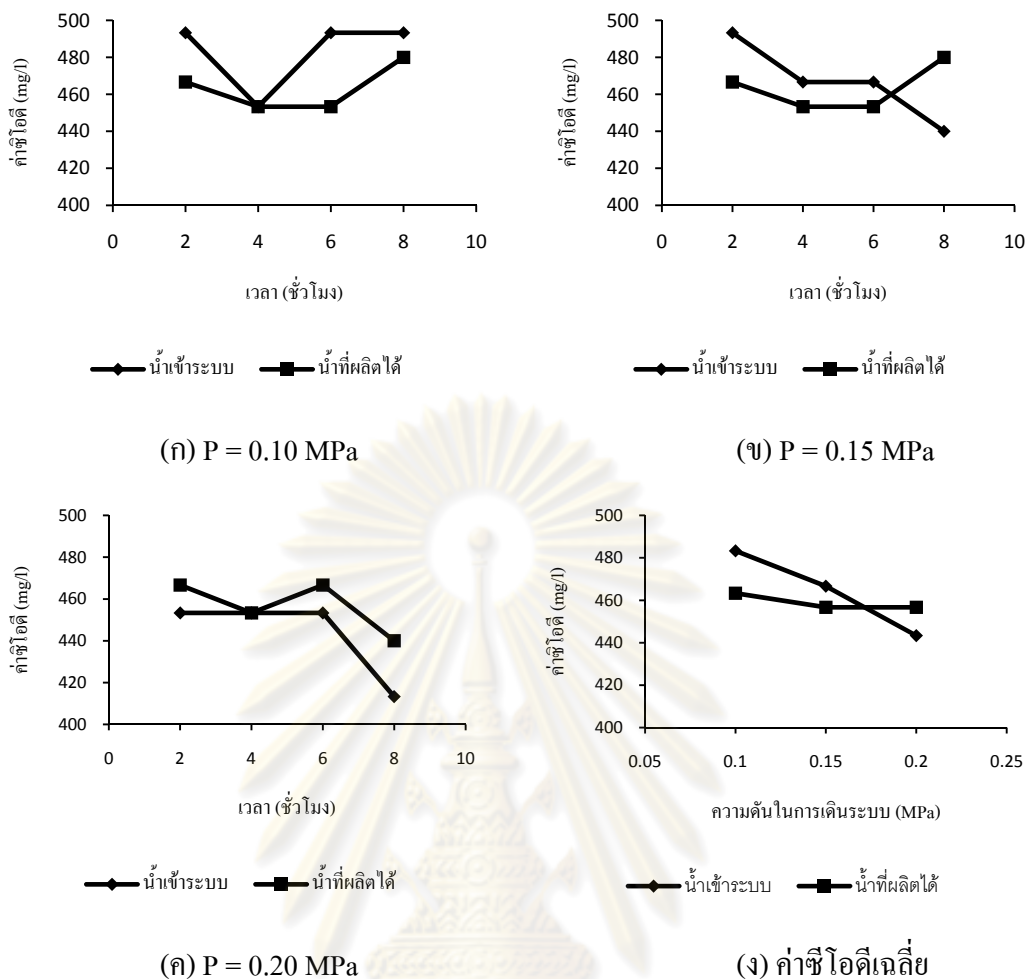
(ค) P = 0.20 MPa

(ง) ค่าคลอไรด์เฉลี่ย

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างคลอไรด์กับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1

#### 4.2.9 ผลของความดันต่อซีโอดี

จากการทดลองพบว่า ในระยะเวลา 8 ชั่วโมง ในทุกค่าความดัน ค่าซีโอดีของน้ำเข้าระบบ และน้ำที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.10 (ก), (ข) และ (ค) และเมื่อความดันในการเดินระบบเพิ่มขึ้น จะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีน้อยมาก แสดงดังรูปที่ 4.10 (ง) จะเห็นว่า ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำสะอาดและน้ำเข้าระบบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าซีโอดีแสดงถึงความเข้มข้นของสี แต่สีมีโมเลกุลขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรน จึงสามารถผ่านเมมเบรนได้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างซีไอดีกับเวลาและความดันของการทดลองที่ 1

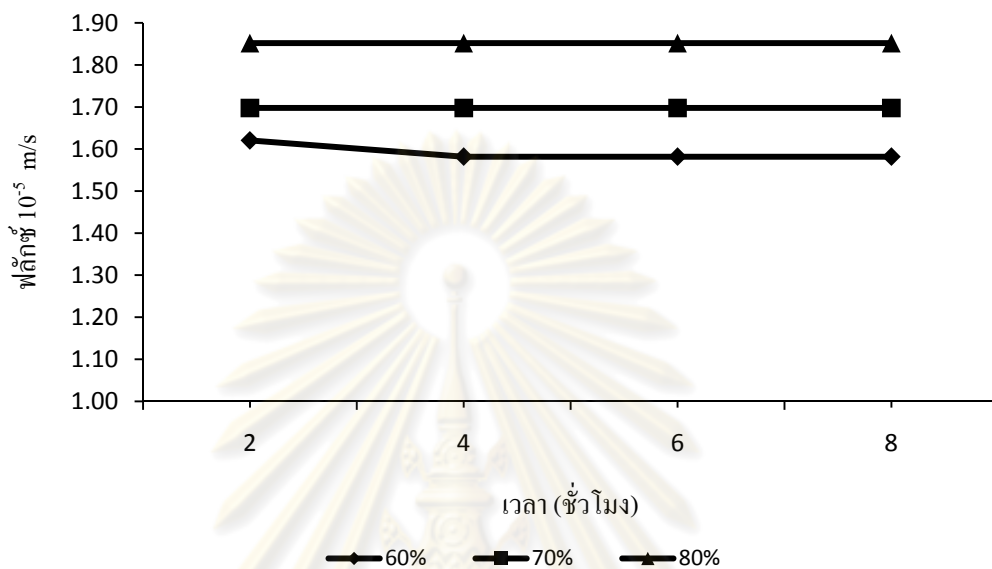
#### 4.3 ผลของ %Recovery ของระบบ RO ต่อประสิทธิภาพของระบบ

ในการทดลองที่ 2 เป็นการควบคุมสัดส่วนการผลิตน้ำสะอาดต่อน้ำเข้าระบบ หรือ % Recovery ที่ 60%, 70% และ 80% ตามลำดับ โดยใช้น้ำที่ผ่านระบบ UF ที่มีความดันในการเดินระบบคงที่เท่ากับ 0.20 MPa ตลอดการทดลอง เนื่องจากที่ความดันนี้ ค่าความขุ่นที่ได้มีค่าต่ำที่สุด และมีอัตราการไหลของน้ำที่ผลิตได้สูงสุด โดยแต่ละการทดลองจะเดินระบบนาน 8 ชั่วโมง และเก็บน้ำตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง

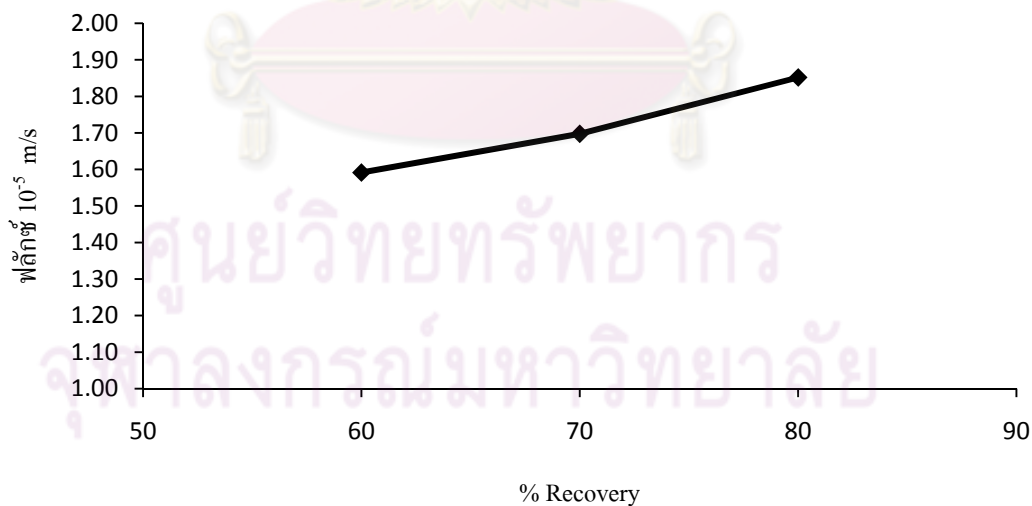
##### 4.3.1 ผลของ %Recovery ต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด

จากการทดลองพบว่า ในระยะเวลา 8 ชั่วโมง ในทุกค่า %Recovery อัตราการผลิตน้ำสะอาดค่อนข้างคงที่ แสดงดังรูปที่ 4.11 เมื่อค่า %Recovery เพิ่มขึ้นอัตราการผลิตน้ำสะอาดจะมีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้ค่า %Recovery สูงมาก เมมเบรนจะเกิดการอุดตันเร็วขึ้น จากรูปที่ 4.12 ที่ %Recovery เท่ากับ 60%, 70% และ 80% อัตราการผลิตน้ำสะอาดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ  $1.59 \times 10^{-5}$ ,  $1.70 \times 10^{-5}$  และ  $1.85 \times 10^{-5}$  m/s ตามลำดับ



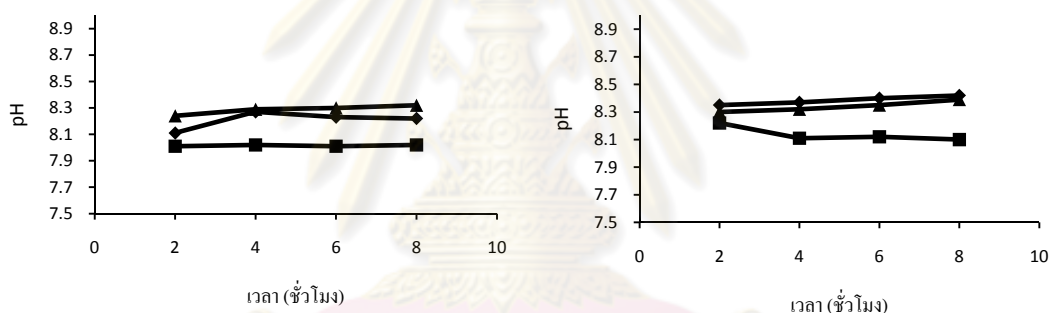
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำสะอาดกับเวลาของการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำสะอาดเฉลี่ยกับ %Recovery ของการทดลองที่ 2

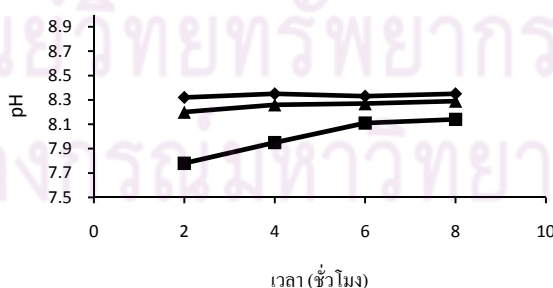
#### 4.3.2 ผลของ %Recovery ต่อพีเอช

จากการทดลองพบว่า ทุกค่า %Recovery ค่าพีเอชของน้ำที่ผลิต (per) ได้จะมีค่าลดลงน้อยกว่าค่าพีเอชของน้ำเข้าระบบ (feed) แต่น้อยกว่าค่าพีเอชของน้ำเข้มข้น (conc) ในทุกการทดลอง ค่าพีเอชของน้ำเข้มข้น มีค่าใกล้เคียงกับน้ำเข้าระบบ อาจมีค่าสูงบ้างในบางการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.13 (ก), (ข) และ (ง) ที่ %Recovery มีค่าเท่ากับ 60%, 70% และ 80% พีเอชของน้ำเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 8.21, 8.39 และ 8.34 ตามลำดับ พีเอชของน้ำที่ผลิตได้เฉลี่ย 8.02, 8.14 และ 8.00 ตามลำดับ พีเอชของน้ำเข้มข้นเท่ากับ 8.29, 8.34 และ 8.26 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งค่าพีเอชเฉลี่ยของน้ำที่ผลิตได้และน้ำเข้มข้นมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อ %Recovery เพิ่มขึ้น เหตุผลที่ทำให้ค่าพีเอชในน้ำเข้มข้นมีค่าสูงขึ้น คือ เนื่องจากในน้ำเข้มข้นจะมีปริมาณสารประกอบพวกคาร์บอนेट ซึ่งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้พีเอชมีค่าสูงขึ้น และในน้ำสะอาดมีพีเอชลดลง เนื่องจาก  $\text{CO}_2$  ในอากาศละลายลงในน้ำจนกลายเป็น  $\text{H}_2\text{CO}_3$  จึงทำให้พีเอชลดลง



(ก) Recovery = 60%

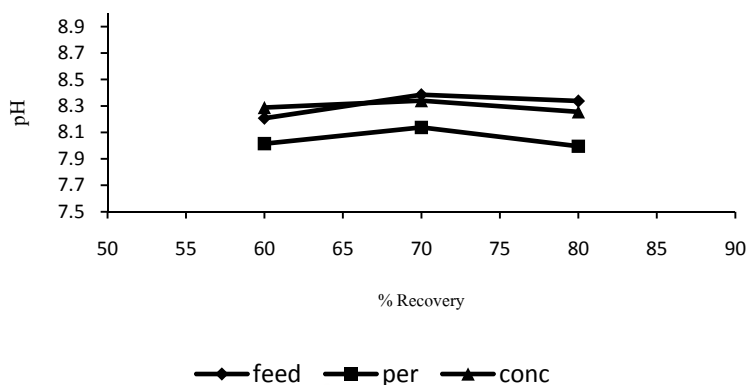
(ข) Recovery = 70%



(ค) Recover = 80%

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลาของการทดลองที่ 2





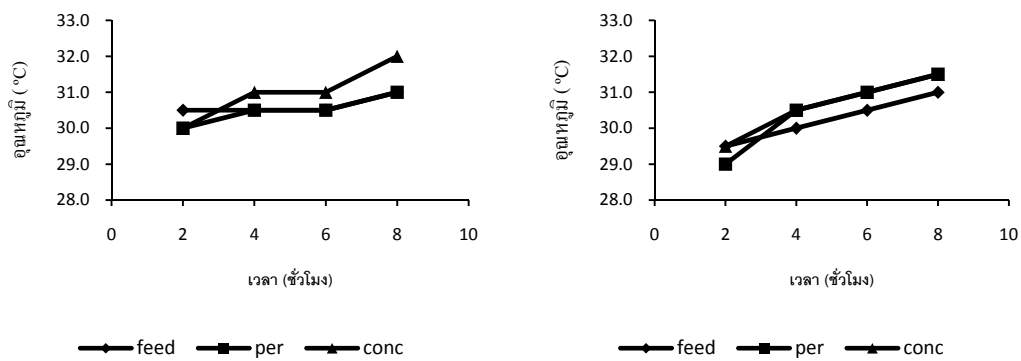
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเฉลี่ยกับ %Recovery ของการทดลองที่ 2

#### 4.3.3 ผลของ %Recovery ต่ออุณหภูมิ

จากการทดลองพบว่า ในทุกค่า %Recovery อุณหภูมิของน้ำที่ผลิตได้และน้ำเข้มข้นมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำเข้าระบบเล็กน้อยในทุกการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.15 (ก), (ข) และ (ง) เนื่องจาก น้ำที่ผ่านระบบออสโมซิสผันกลับได้ไหลผ่านเมมเบรนด้วยแรงดันภายนอกเครื่องสูบน้ำ ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นการให้พลังงานจลน์แก่น้ำที่เข้าระบบ ทำให้พลังงานส่วนหนึ่งได้เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ทำให้น้ำที่ผ่านเมมเบรนมีอุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย และค่า %Recovery ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.16

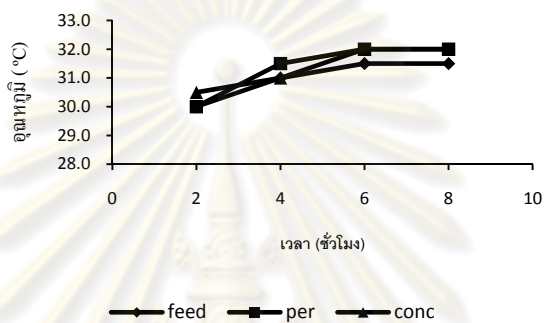
#### 4.3.4 ผลของ %Recovery ต่อความขุ่น

จากการทดลองพบว่า เนื่องจากน้ำที่เข้าระบบได้ถูกบำบัดขั้นต้นด้วยระบบ UF ทำให้น้ำเข้าระบบ RO มีค่าความขุ่นน้อย ทำให้ในทุกค่า %Recovery ค่าความขุ่นของน้ำที่ผลิตได้มีค่าน้อยมากหรือแทบจะไม่มีเลย ในทุกการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.17 (ก), (ข) และ (ง) ระบบมีประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่นสูงในทุกการทดลอง โดยที่ %Recovery มีค่าเท่ากับ 60%, 70% และ 80% มีร้อยละการกำจัดความขุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 98.3, 98.2 และ 98.2 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.18 กลไกการกำจัดความขุ่นนั้น อาศัยการกรองบนผิวเมมเบรน และจากรูปที่ 4.18 ร้อยละการกำจัดมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อ %Recovery เพิ่มขึ้น และค่าความขุ่นในน้ำสะอาดอาจมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ %Recovery สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการสะสมของอนุภาคความขุ่นบนผิวเมมเบรนมากขึ้นเมื่อเวลาในการเดินระบบผ่านไประยะหนึ่ง นำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กหลุดรอดไปในน้ำสะอาดที่ผลิตได้



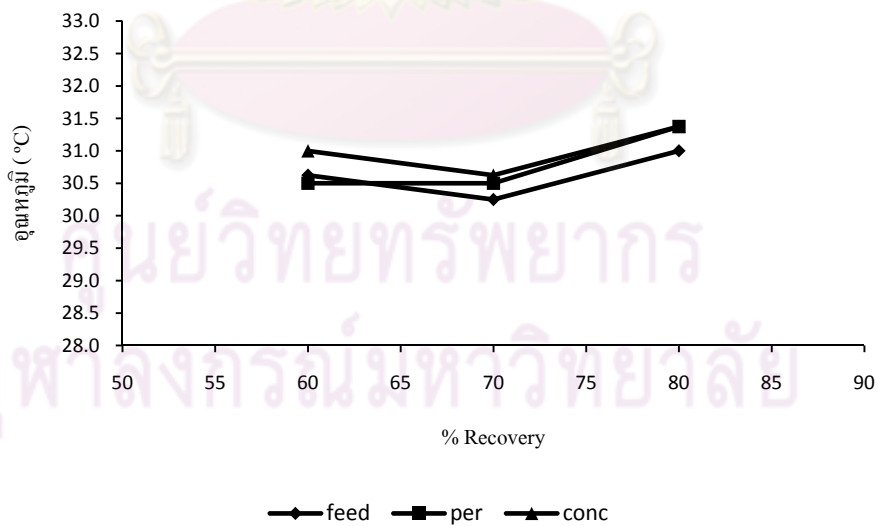
(ก) Recovery = 60%

(ข) Recovery = 70%

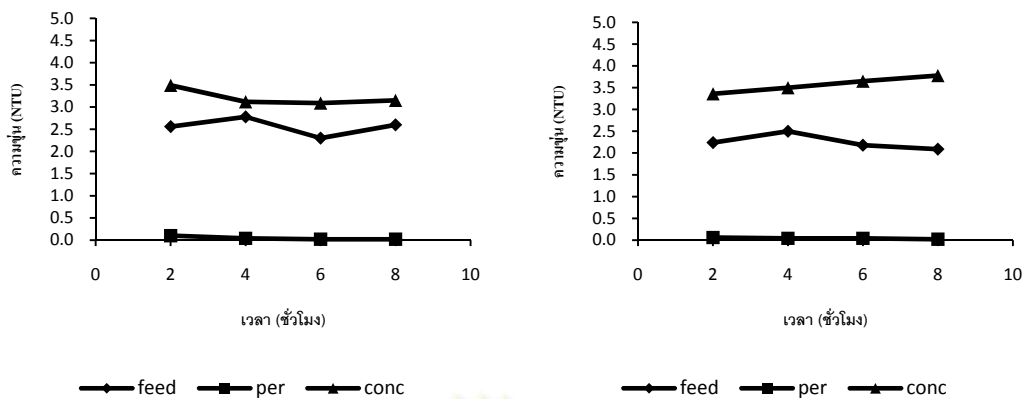


(ค) Recover = 80%

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการทดลองที่ 2

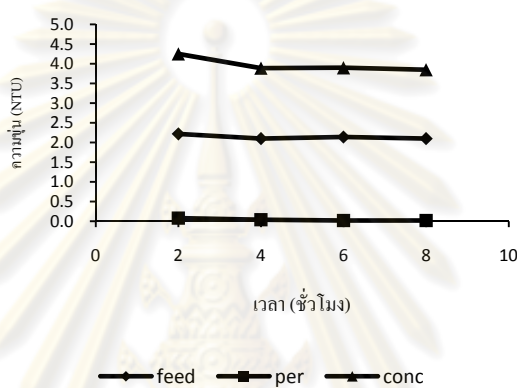


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยกับ %Recovery ของการทดลองที่ 2



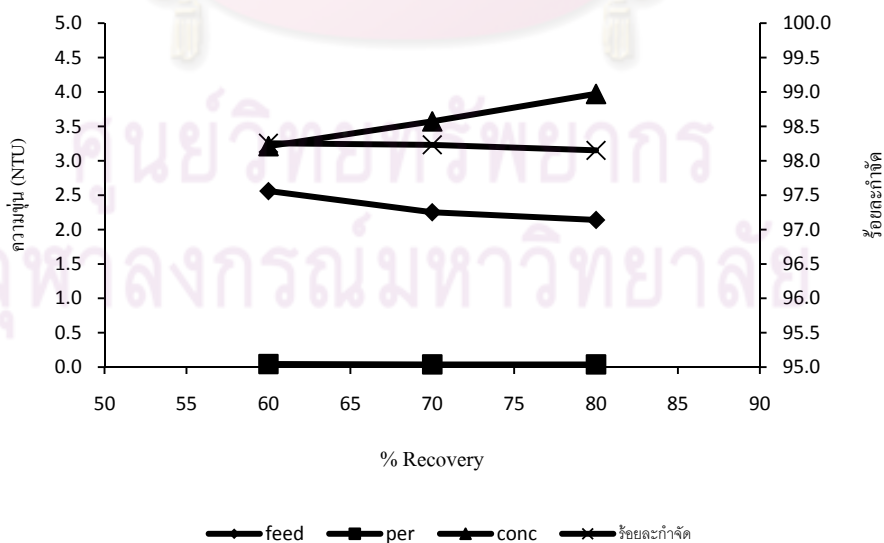
(ก) Recovery = 60%

(ข) Recovery = 70%



(ค) Recover = 80%

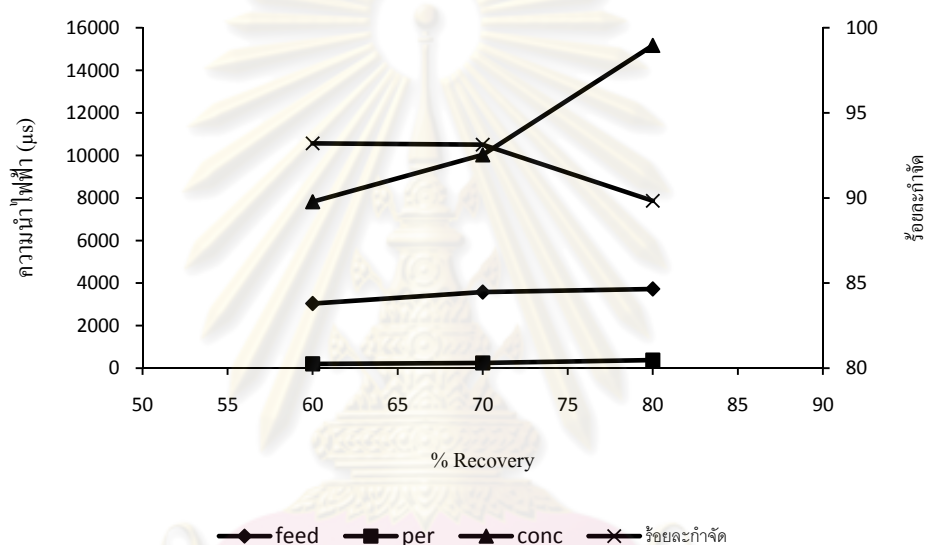
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับเวลาของการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Recovery กับความขุ่นเฉลี่ยและร้อยละกำจัดของการทดลองที่ 2

#### 4.3.5 ผลของ %Recovery ต่อการนำไฟฟ้า

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าของระบบมีค่าสูง โดยที่ %Recovery มีค่าเท่ากับ 60%, 70% และ 80% มีร้อยละการกำจัดการนำไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 93.2, 93.1 และ 89.8 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.19 และเมื่อ %Recovery เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของการกำจัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อ %Recovery ในการเดินระบบเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสารละลายต่างๆ ในน้ำเข้าระบบสูงขึ้นด้วย ทำให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้น แต่แรงดันการเดินระบบคงที่ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการอุดตันเร็วขึ้นด้วย



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Recovery กับการนำไฟฟ้าเฉลี่ยและร้อยละกำจัดของการทดลองที่ 2

ซึ่งกลไกการกำจัดค่าความนำไฟฟ้า อาศัยกลไกการแพร่และประจุไฟฟ้าระหว่างผิวเมมเบรนกับอออนเป็นกลไกหลัก สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำจัดกับ %Recovery ได้จากสมการที่ 2.12

$$C_p = \frac{C_f K_s}{K_w (\Delta P - \Delta \pi) \left( \frac{2-2R}{2-R} \right) + K_s} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 จะได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของการกำจัดกับ %Recovery ดังสมการที่ 4.1

$$\text{ร้อยละของการกำจัด} = \left[ 1 - \frac{K_s}{K_s + \left( \frac{2-2R}{2-R} \right) \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.1)$$

$$\text{โดยที่ } F_w = K_w (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A}$$

$$R = \% \text{Recovery}$$

$$K_s = \text{solute mass transfer coefficient (L/t)}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 4.1 นำไปคำนวณหาค่า  $K_s$  ซึ่งแสดงในภาคผนวก ง ตารางที่ ง-4 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของการกำจัดการนำไฟฟ้ากับ %Recovery ดังสมการที่ 4.2

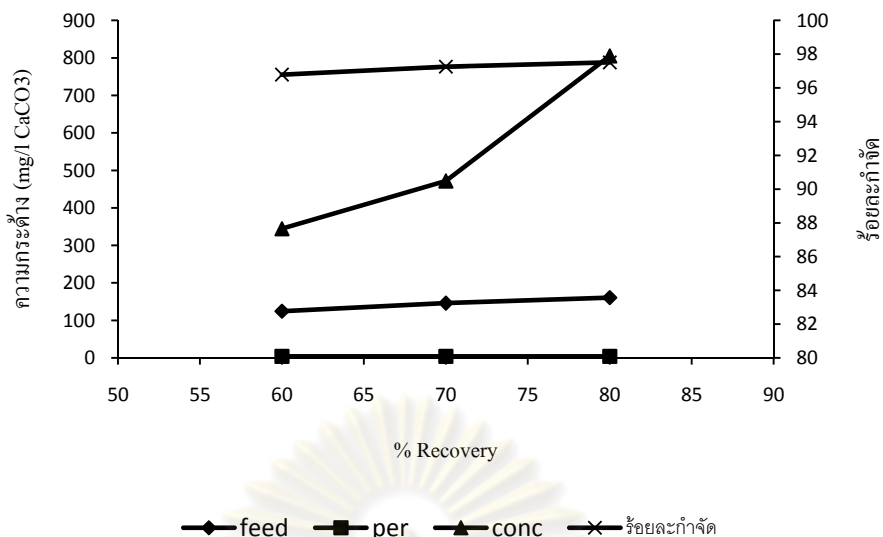
$$\text{ร้อยละของการกำจัดการนำไฟฟ้า} = \left[ 1 - \frac{0.13878 \times 10^{-5}}{0.13878 \times 10^{-5} + \left( \frac{2-2R}{2-R} \right) \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.2)$$

#### 4.3.6 ผลของ %Recovery ต่อความกระด้าง

จากการทดลองพบว่า ที่ %Recovery มีค่าเท่ากับ 60%, 70% และ 80% มีร้อยละการกำจัดความกระด้างเฉลี่ยเท่ากับ 96.7, 97.3 และ 97.5 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.20 และเมื่อ %Recovery เพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบยังคงสูงและเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่ค่าความกระด้างของน้ำเข้มข้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำเข้าระบบมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากอิออนที่เป็นสาเหตุของความกระด้างเป็นอิออนประเภทที่มีประจุ +2 เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม เป็นต้น ซึ่งสารประกอบอิออนเหล่านี้มีโมเลกุลขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้

ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดความกระด้างกับค่า %Recovery สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.1 เมื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ จากภาคผนวก ง ตารางที่ ง-1 แทนค่า ได้เป็นสมการที่ 4.3

$$\text{ร้อยละของการกำจัดความกระด้าง} = \left[ 1 - \frac{0.04672 \times 10^{-5}}{0.04672 \times 10^{-5} + \left( \frac{2-2R}{2-R} \right) \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Recovery กับความกระด้างเฉลี่ยและร้อยละกำจัดของการทดลองที่ 2

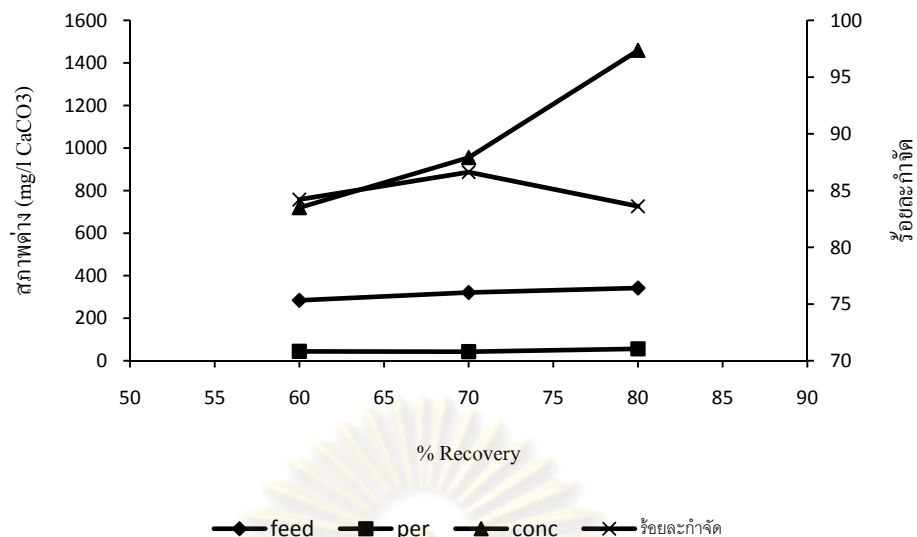
#### 4.3.7 ผลของ %Recovery ต่อสภาพต่าง

จากการทดลองพบว่า ที่ %Recovery มีค่าเท่ากับ 60%, 70% และ 80% มีร้อยละการกำจัดสภาพต่างเฉลี่ยเท่ากับ 84.2, 86.6 และ 83.6 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.21 เมื่อ %Recovery มีค่าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อ %Recovery ค่าสูงขึ้นมาประสิทธิภาพการกำจัดของระบบมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อ %Recovery สูงมากๆ ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าระบบสูงขึ้นทำให้มีแนวโน้มเกิด Concentration Polarization สูงด้วย ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบมีแนวโน้มลดลงด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสภาพต่างกับค่า %Recovery สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.1 เมื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ จากภาคผนวก ง ตารางที่ ง-2 แทนค่า ได้เป็นสมการที่ 4.4

$$\text{ร้อยละของการกำจัดความกระด้าง} = \left[ 1 - \frac{0.28815 \times 10^{-5}}{0.28815 \times 10^{-5} + \left( \frac{2-2R}{2-R} \right) \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.4)$$





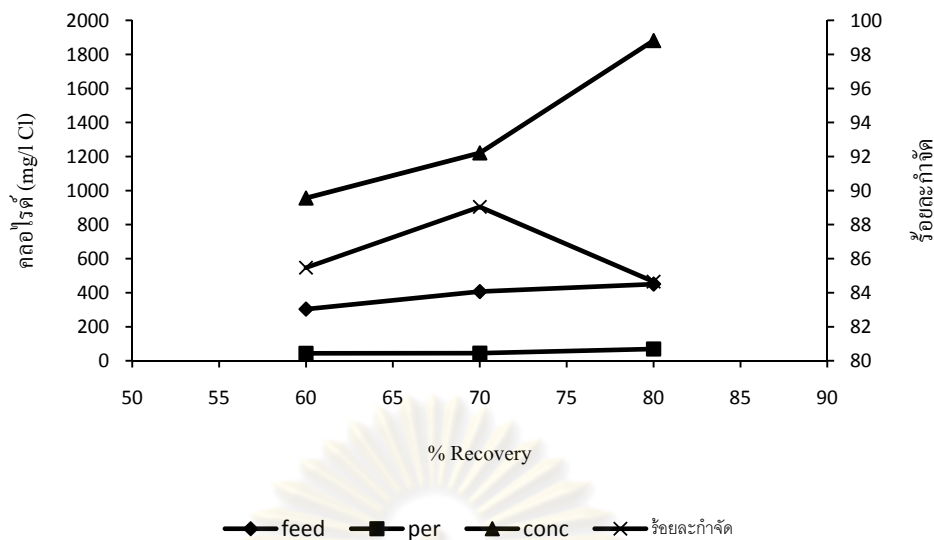
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Recovery กับสภาพต่างเฉลี่ยและร้อยละกำจัดของการทดลอง  
ที่ 2

#### 4.3.8 ผลของ %Recovery ต่อคลอไรด์

จากการทดลองพบว่า ที่ %Recovery มีค่าเท่ากับ 60%, 70% และ 80% มีร้อยละการกำจัดคลอไรด์เฉลี่ยเท่ากับ 85.5, 89.0 และ 84.7 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.22 เมื่อ %Recovery มีค่าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดคลอไรด์ของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อ %Recovery ค่าสูงขึ้นมาก ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อ %Recovery สูงมากๆ ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าระบบสูงขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดคลอไรด์กับค่า %Recovery สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.1 เมื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ จากภาคผนวก ง ตารางที่ ง-3 แทนค่า ได้เป็นสมการที่ 4.5

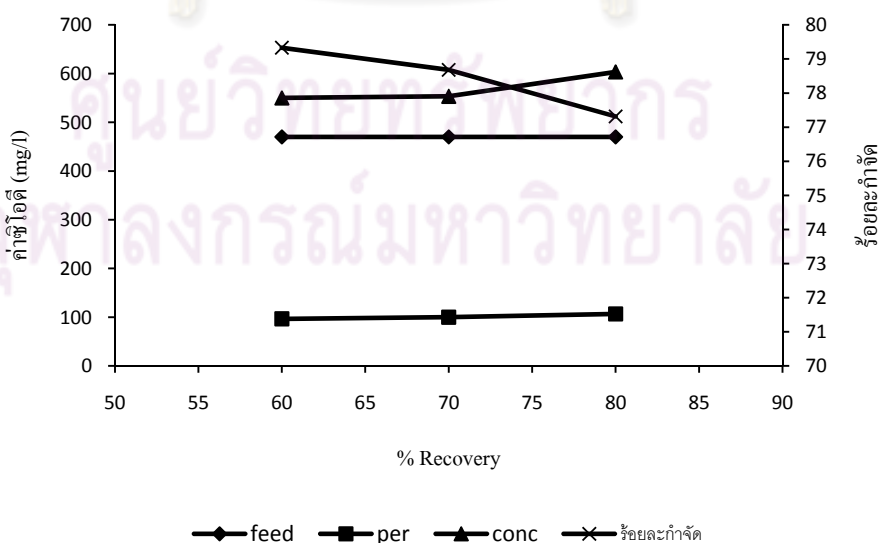
$$\text{ร้อยละของการกำจัดความกระด้าง} = \left[ 1 - \frac{0.25333 \times 10^{-5}}{0.25333 \times 10^{-5} + \left( \frac{2-2R}{2-R} \right) \cdot F_w} \right] \cdot 100 \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Recovery กับคลอไรด์เฉลี่ยและร้อยละกำจัดของการทดลองที่ 2

#### 4.3.9 ผลของ %Recovery ต่อซีโอดี

จากการทดลองพบว่า ที่ %Recovery มีค่าเท่ากับ 60%, 70% และ 80% มีร้อยละการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 79.3, 78.7 และ 77.3 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.23 เมื่อ %Recovery มีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อ %Recovery สูงมากๆ ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าระบบสูงขึ้น แต่ความดันในการเดินระบบคงที่ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบมีแนวโน้มลดลงด้วย



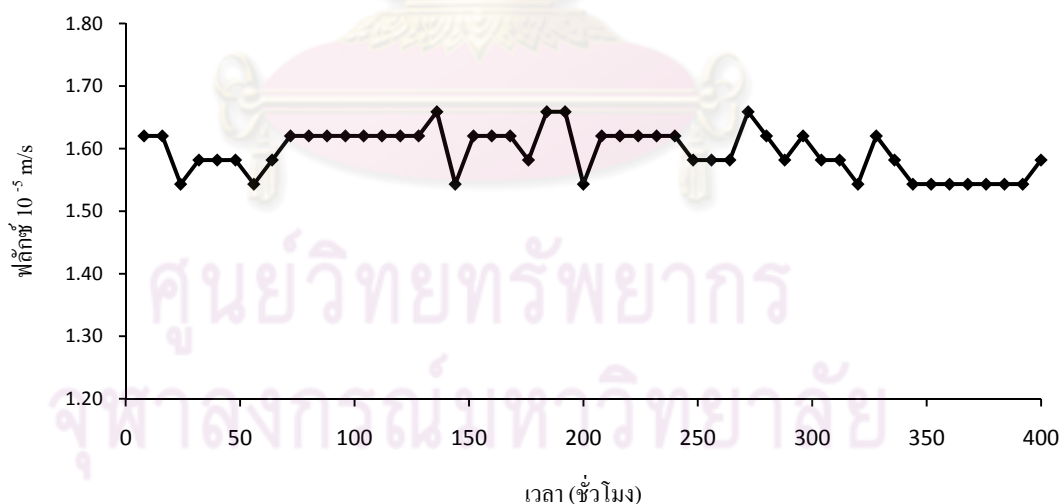
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Recovery กับซีโอดีเฉลี่ยและร้อยละกำจัดของการทดลองที่ 2

#### 4.4 ประสิทธิภาพของระบบ RO เมื่อเดินระบบระยะยาว

หลังจากทำการทดลองการทดลองที่ 1 และ 2 แล้ว เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ อัตราการผลิตน้ำสะอาดและคุณภาพน้ำสะอาดที่ได้ พบว่าค่าความดันในการเดินระบบ UF คือ 0.20 MPa ซึ่งน้ำที่ผลิตได้จากระบบ UF นั้นจะเป็นน้ำเข้าระบบ RO ต่อไป โดยควบคุมความดันคงที่ และ %Recovery ของระบบ RO ที่เหมาะสมคือ 70% เนื่องจากเมื่อ %Recovery สูงขึ้น ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น แต่ที่ %Recovery เท่ากับ 80 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบลดลง และคุณภาพน้ำสะอาดที่ %Recovery เท่ากับ 70 เพียงพอที่จะนำกลับมาใช้ใหม่และมีแนวโน้มการเกิดการอุดตันน้อยกว่าอีกด้วย ผลของการเดินระบบในระยะยาวเป็นดังนี้

##### 4.4.1 ผลต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด

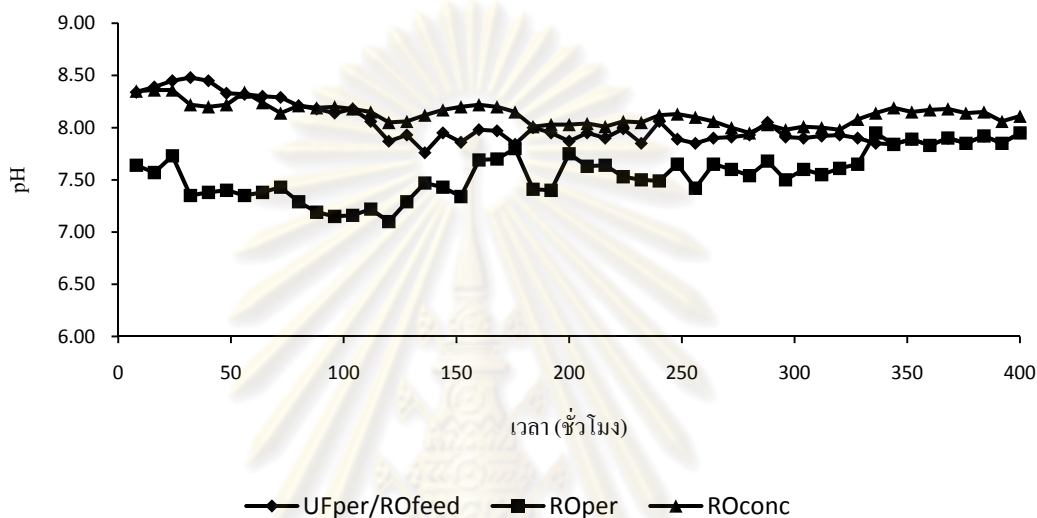
ผลจากการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.24 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำสะอาด (ฟลักซ์) ซึ่งอัตราการผลิตน้ำสะอาดในช่วง 56 ชั่วโมงแรก มีค่าเปลี่ยนแปลงมากไม่คงที่ ซึ่งอาจจะเกิดจากการเกิดฟองอากาศในระบบ และเริ่มคงที่ไปจนถึงชั่วโมงที่ 136 ระบบเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงมากไม่คงที่ จนถึงชั่วโมงที่ 328 อัตราการผลิตน้ำสะอาดเริ่มลดลง



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลาของการทดลองที่ 3

#### 4.4.2 ผลต่อพีเอช

ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.25 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลา ค่าพีเอชของน้ำสะอาดที่ผลิตได้ (ROper) จะมีค่าต่ำกว่าพีเอชของน้ำดิบที่เข้าระบบ (UFper/ROfeed) และน้ำเข้มข้น ในขณะที่พีเอชของน้ำเข้มข้น (ROconc) จะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำที่เข้าระบบ ซึ่งได้อธิบายเหตุผลไว้ในหัวข้อ 4.3.2



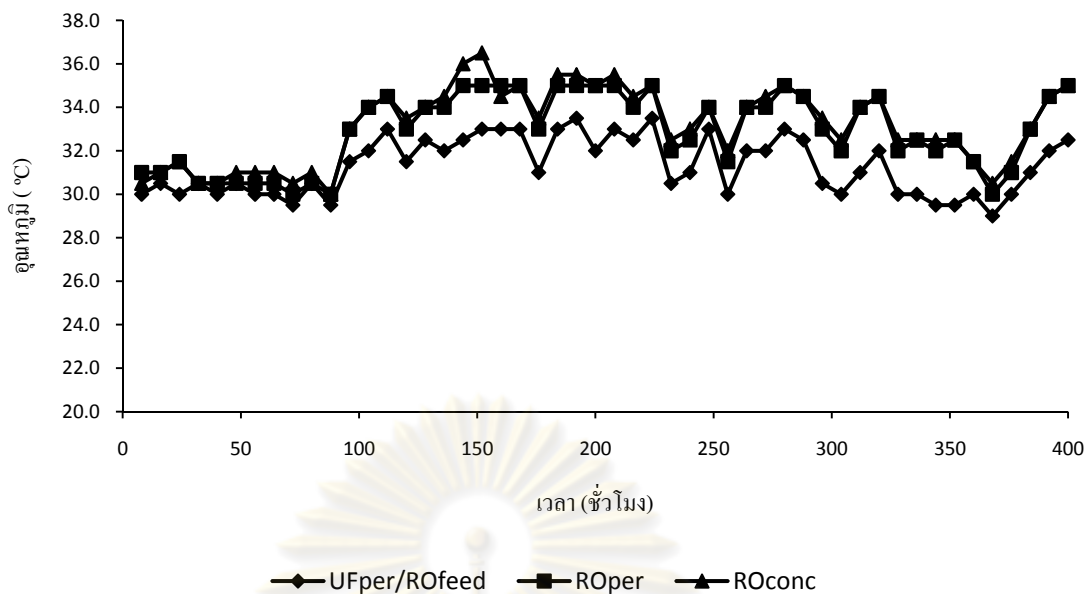
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลาของการทดลองที่ 3

#### 4.4.3 ผลต่ออุณหภูมิ

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.26 แสดงค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดทันทีเมื่อเก็บน้ำตัวอย่าง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา อุณหภูมิของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำดิบที่เข้าระบบแต่จะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำเข้มข้น ซึ่งได้อธิบายเหตุผลไว้ในหัวข้อ

4.3.3

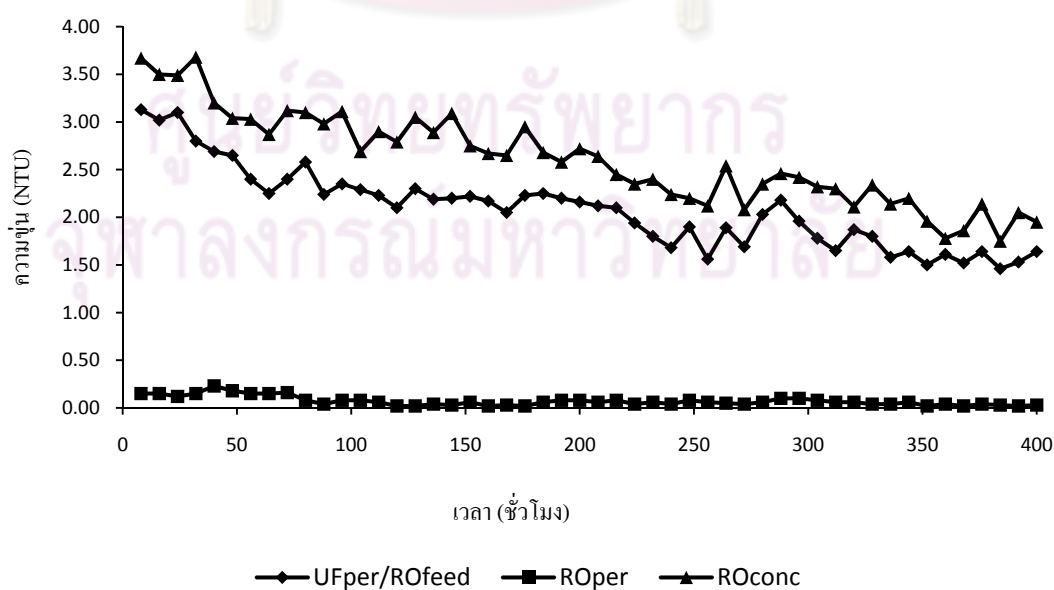
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



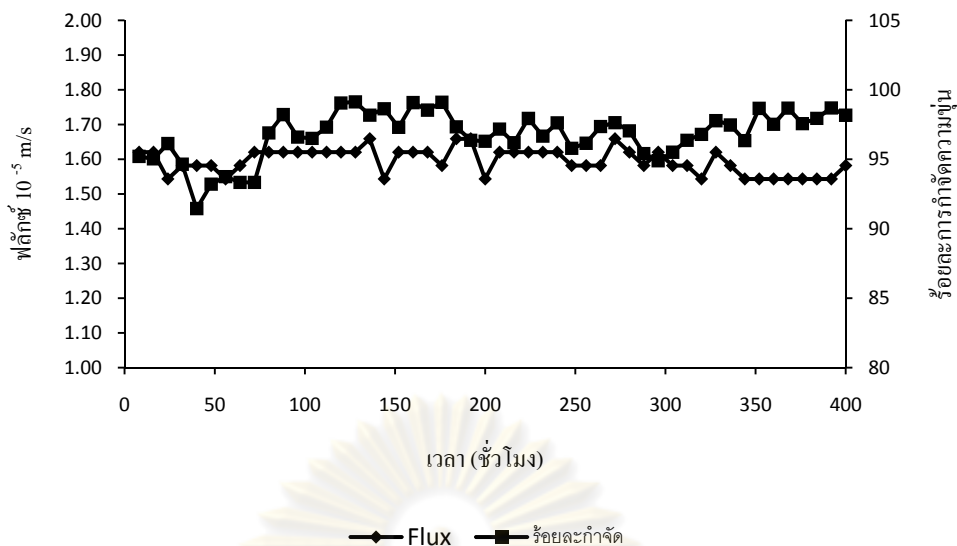
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการทดลองที่ 3

#### 4.4.4 ผลต่อความขุ่น

จากการทดลองพบว่า ตลอดระยะเวลาการเดินระบบ ระบบ RO สามารถกำจัดความขุ่นได้สูงมาก ค่าความขุ่นของน้ำที่ผลิตได้มีค่าน้อยมาก แสดงดังรูปที่ 4.27 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับเวลา และประสิทธิภาพของระบบ RO มีร้อยละการกำจัดความขุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 96.8 แสดงดังรูปที่ 4.28



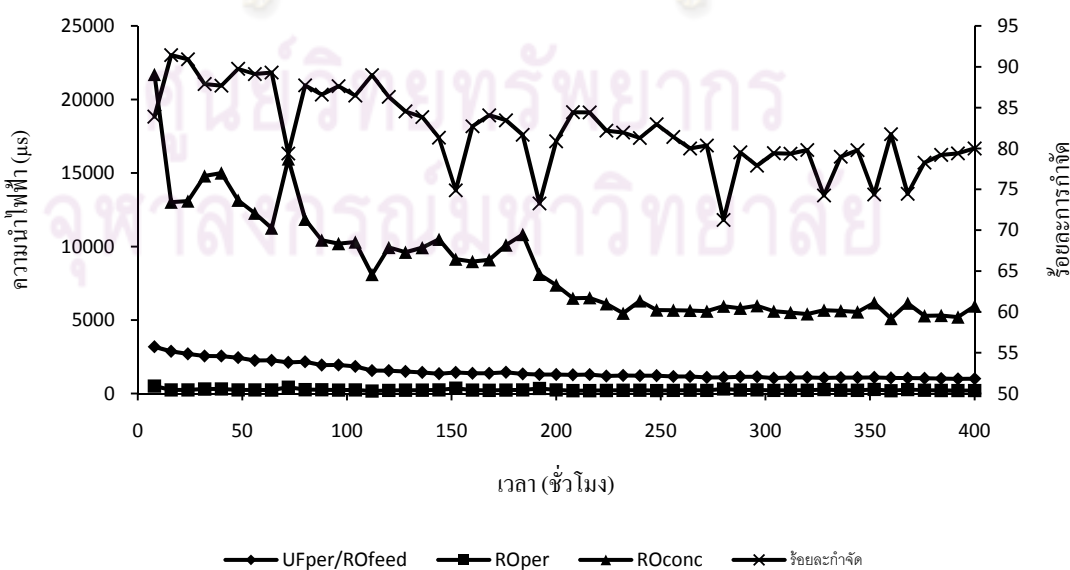
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับเวลาของการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละกำจัดความขุ่นของการทดลองที่ 3

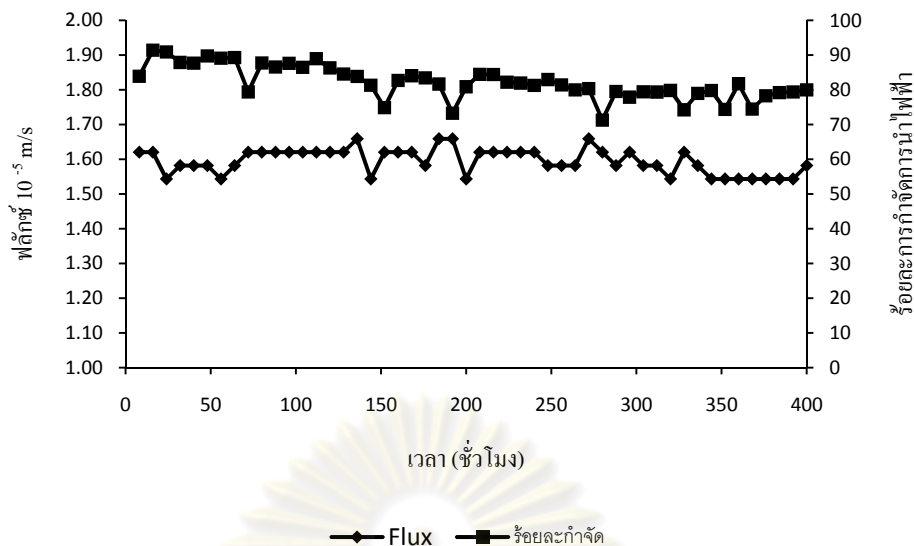
#### 4.4.5 ผลต่อการนำไฟฟ้า

จากการทดลองพบว่า ในช่วงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเข้าระบบมีค่าสูงทำให้ประสิทธิภาพของระบบค่อนข้างสูง แต่ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผลิตได้มีค่าสูงด้วย แต่เมื่อผ่านชั่วโมงที่ 200 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเข้าระบบมีค่าคงที่ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผลิตได้มีค่าคงที่ แสดงดังรูปที่ 4.29 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละกำจัดกรนำไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.30

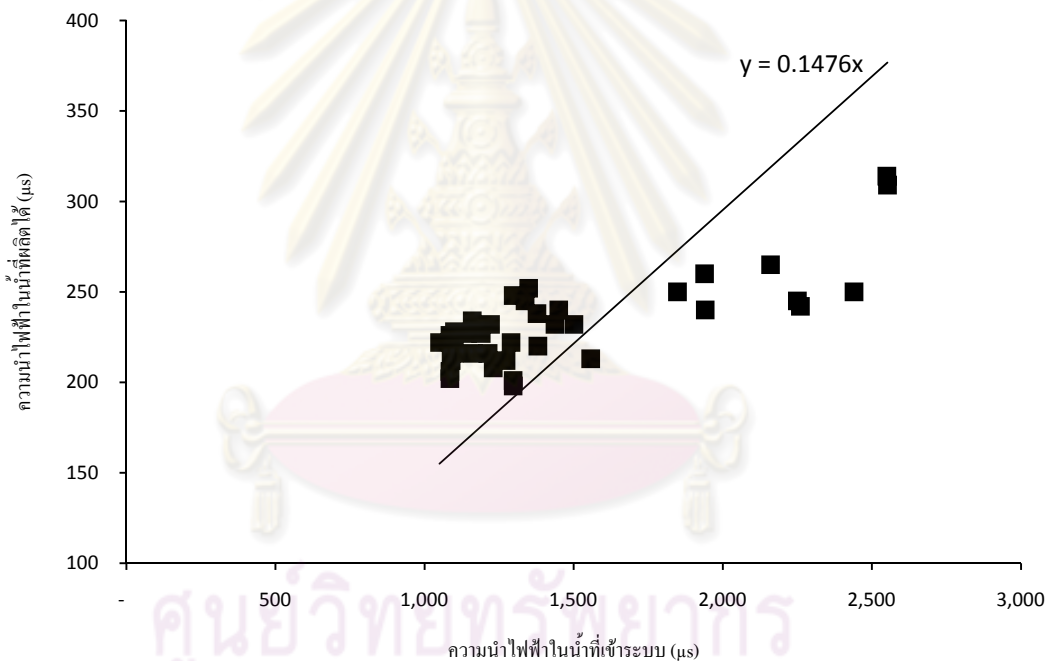


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้ากับเวลาของการทดลองที่ 3





รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบ

กลไกการกำจัดค่าความนำไฟฟ้า อาศัยกลไกการแพร่และประจุไฟฟ้าระหว่างผิวเมมเบรนกับอออนเป็นกลไกหลัก สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการ solution diffusion model ในบทที่ 2 สมการแรก คือ homogenous diffusion model (HSDM) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.12

$$C_p = \frac{C_f K_s}{K_w (\Delta P - \Delta \pi) \left( \frac{2-2R}{2-R} \right) + K_s} \quad (2.12)$$

โดยที่

$$C_p = Z \cdot C_f$$

$$F_w = K_w (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A}$$

ได้เป็นสมการที่

$$Z = \frac{K_s}{F_w \left[ \frac{2-2R}{2-R} \right] + K_s} \quad (4.6)$$

ดังนั้นจะได้ค่า  $K_s$  จากสมการที่ 4.7

$$K_s = Z \cdot F_w \left[ \frac{2-2R}{2-R} \right] \cdot \frac{1}{(1-Z)} \quad (4.7)$$

สมการที่สอง คือ Integrated HSDM (IHSDM) แสดงดังสมการที่ 2.14

$$C_p = \frac{K_s C_f}{-R F_w} \ln \left( 1 - \frac{R F_w}{F_w + K_s} \right) \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.14  $\frac{F_w}{F_w + K_s}$  มีค่าเข้าใกล้ 1 เนื่องจากค่า  $K_s$  โดยทั่วไปมีค่า

น้อยกว่าค่า  $F_w$  มาก ดังนั้น สามารถหาค่า  $K_s$  ได้เป็นสมการที่ 4.9

$$K_s = \frac{Z \cdot F_w \cdot (-R)}{\ln(1-R)} \quad (4.9)$$

สมการที่สาม คือ Incremental diffusion model (IDM) แสดงดังสมการที่ 2.16

$$C_p = \frac{C_{f0}}{R} \left[ 1 - (1-R)^{K_s / (F_w + K_s)} \right] \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.16 แก้สมการหาค่า  $K_s$  ได้ดังสมการที่ 4.10

$$K_s = \left[ \frac{\log(1-ZR)}{\log(1-R)} \right] \cdot \frac{F_w}{1 - \left[ \frac{\log(1-ZR)}{\log(1-R)} \right]} \quad (4.10)$$

ดังนั้นจาก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบ แสดงดังรูปที่ 4.31 จะได้เป็นสมการ 4.11 ซึ่งค่า Z เท่ากับ 0.0434

$$C_p = 0.1476C_f \quad (4.11)$$

จากตารางการคำนวณหาค่า  $K_s$  จากภาคผนวก ง ตารางที่ ง-5 จะได้สมการ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่ผลิตได้กับในน้ำเข้าระบบทั้ง HSDM, IHSDM และ IDM ดังสมการที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

$$C_p = \frac{1.38514 \times 10^{-6} \cdot C_f}{F_w \left[ \frac{2-2R}{2-R} \right] + 1.38514 \times 10^{-6}} \quad (4.12)$$

$$C_p = \frac{1.43097 \times 10^{-6} C_f}{-RF_w} \ln \left( 1 - \frac{RF_w}{F_w + 1.43097 \times 10^{-6}} \right) \quad (4.13)$$

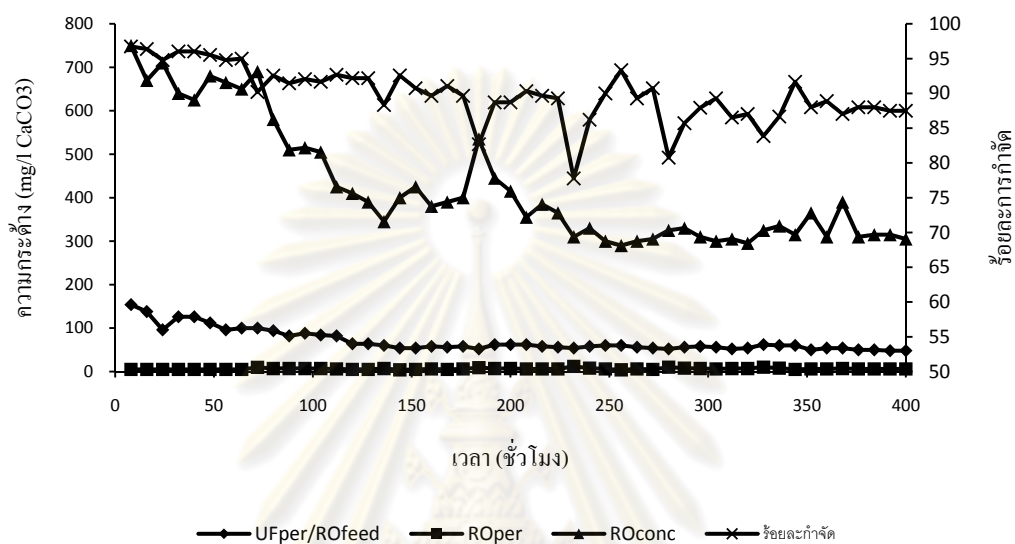
$$C_p = \frac{C_{f_0}}{R} \left[ 1 - (1-R)^{1.66327 \times 10^{-6} / (F_w + 1.66327 \times 10^{-6})} \right] \quad (4.14)$$

#### 4.4.6 ผลต่อความกระด้าง

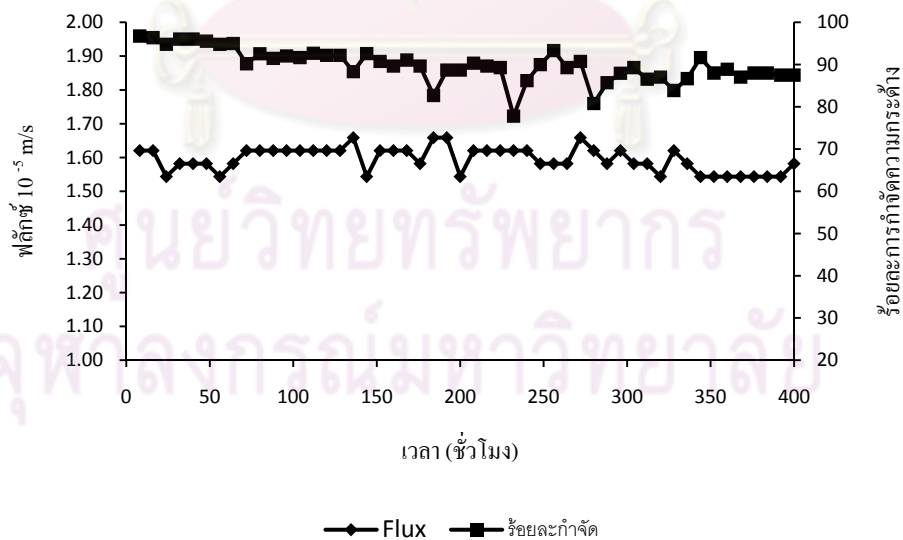
จากการทดลองพบว่า ในช่วงแรกค่าความกระด้างของน้ำเข้าระบบมีค่าสูงทำให้ประสิทธิภาพของระบบ RO สูงไปด้วย และค่าความกระด้างของน้ำที่ผลิตได้มีค่าต่ำมากและค่อนข้างคงที่ ในช่วงต่อมาค่าความกระด้างของน้ำเข้าระบบลดลงจากช่วงแรกแต่เริ่มคงที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ทำให้ประสิทธิภาพของระบบ RO ลดลง และค่าความกระด้างของน้ำที่ผลิตได้ยังมีค่าต่ำและคงที่ แสดงดังรูปที่ 4.32 ค่าร้อยละการกำจัดความกระด้างเฉลี่ยของระบบ RO มีค่าเท่ากับ 89.9 และมีช่วงค่าร้อยละการกำจัดความกระด้างมีค่าในช่วง 77.8 - 96.8 แสดงดังรูปที่ 4.33

จากรูปที่ 4.34 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกระด้างในน้ำที่ผลิตได้จากน้ำที่เข้าระบบ ได้เป็นสมการ 4.15 ซึ่ง Z มีค่าเท่ากับ 0.0549

$$C_p = 0.093C_f \tag{4.15}$$



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างกับเวลาของการทดลองที่ 3



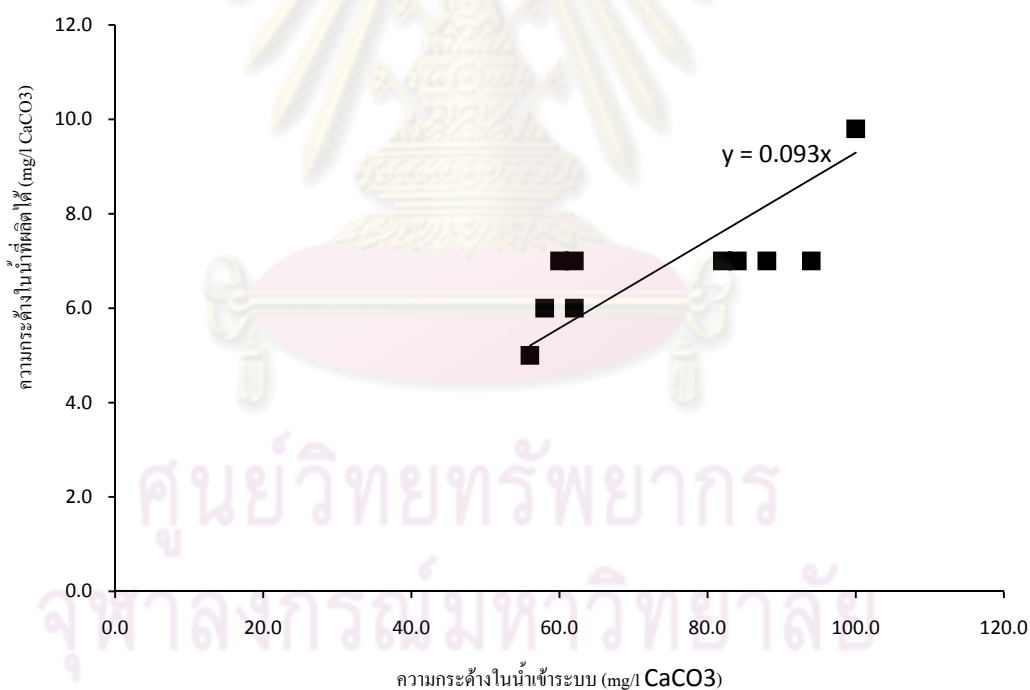
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละกำจัดความกระด้างของการทดลองที่ 3

จากตารางการคำนวณหาค่า  $K_s$  จากภาคผนวก ง ตารางที่ ง-6 ได้สมการ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกระด้างในน้ำที่ผลิตได้กับในน้ำเข้าระบบ เป็นสมการ HSDM, IHSMD และ IDM ดังสมการที่ 4.17, 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ

$$C_p = \frac{0.82021 \times 10^{-6} \cdot C_f}{F_w \left[ \frac{2-2R}{2-R} \right] + 0.82021 \times 10^{-6}} \quad (4.16)$$

$$C_p = \frac{0.90163 \times 10^{-6} \cdot C_f}{-RF_w} \ln \left( 1 - \frac{RF_w}{F_w + 0.90163 \times 10^{-6}} \right) \quad (4.17)$$

$$C_p = \frac{C_{f_0}}{R} \left[ 1 - (1-R)^{0.98841 \times 10^{-6} / (F_w + 0.98841 \times 10^{-6})} \right] \quad (4.18)$$



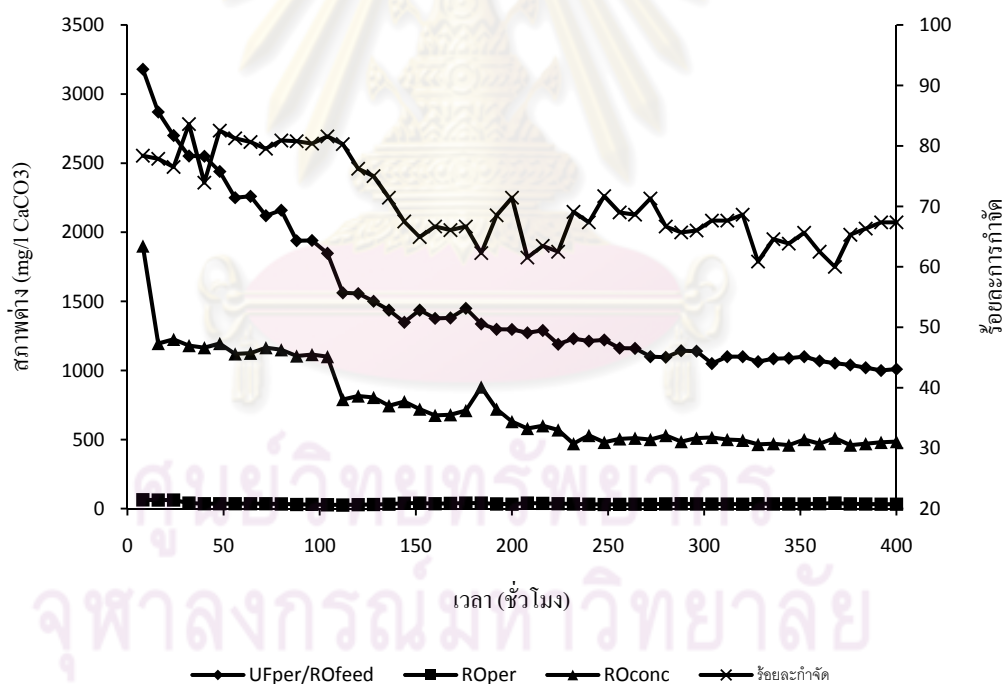
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกระด้างในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบของการทดลอง  
ที่ 3

4.4.7 ผลต่อสภาพต่าง

จากการทดลองพบว่า ในช่วงแรกค่าสภาพต่างของน้ำเข้าระบบมีค่าสูงทำให้ประสิทธิภาพของระบบ RO สูงไปด้วย และค่าสภาพต่างของน้ำที่ผลิตได้มีค่าต่ำมากและค่อนข้างคงที่ ในช่วงต่อมาค่าสภาพต่างของน้ำเข้าระบบลดลงจากช่วงแรกแต่เริ่มคงที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ทำให้ประสิทธิภาพของระบบ RO ลดลง และค่าสภาพต่างของน้ำที่ผลิตได้ยังมีค่าต่ำและคงที่ แสดงดังรูปที่ 4.35 ค่าร้อยละการกำจัดความสภาพต่างเฉลี่ยของระบบ RO มีค่าเท่ากับ 70.5 และมีช่วงค่าร้อยละการกำจัดความสภาพต่างมีค่าในช่วง 60.0 – 83.6 แสดงดังรูปที่ 4.36

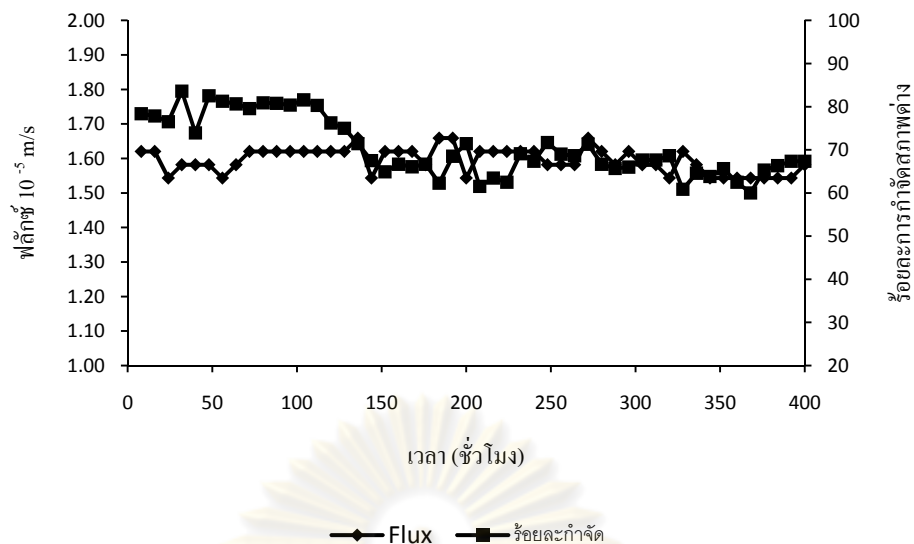
จากรูปที่ 4.37 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต่างในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบ ได้เป็นสมการ 4.19 ซึ่ง Z เท่ากับ 0.1228

$$C_p = 0.2392C_f \tag{4.19}$$



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต่างกับเวลาของการทดลองที่ 3





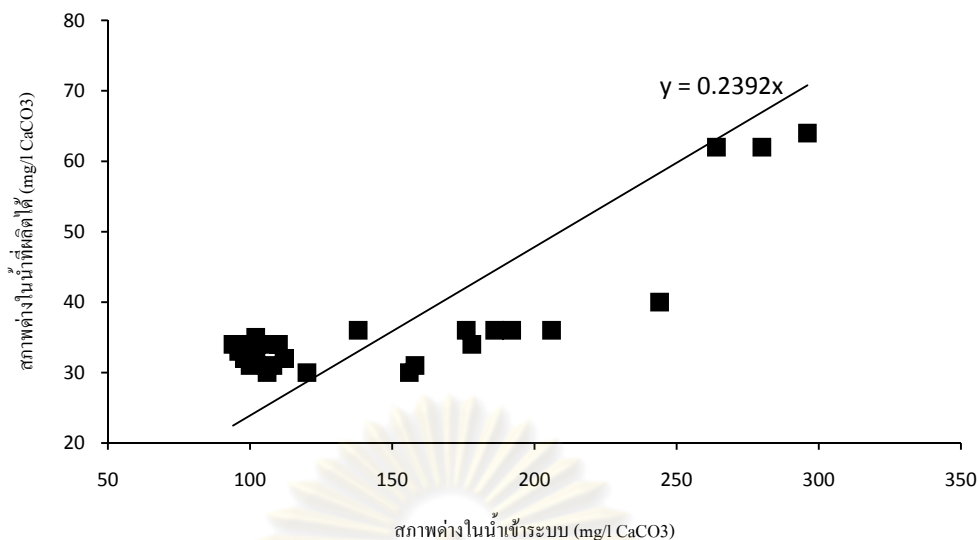
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละการก่จัดสภาพต่างของการทดลองที่ 3

จากตารางการคำนวณหาค่า  $K_s$  จากภาคผนวก ง ตารางที่ ง-7 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต่างในน้ำที่ผลิตได้กับในน้ำเข้าระบบ เป็นสมการ HSDM, IHSDM และ IDM ดังสมการที่ 4.21, 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ

$$C_p = \frac{2.51502 \times 10^{-6} \cdot C_f}{F_w \left[ \frac{2-2R}{2-R} \right] + 2.51502 \times 10^{-6}} \quad (4.20)$$

$$C_p = \frac{2.31903 \times 10^{-6} C_f}{-RF_w} \ln \left( 1 - \frac{RF_w}{F_w + 2.31903 \times 10^{-6}} \right) \quad (4.21)$$

$$C_p = \frac{C_{f_0}}{R} \left[ 1 - (1-R)^{3 \times 10^{-6} / (F_w + 3 \times 10^{-6})} \right] \quad (4.22)$$



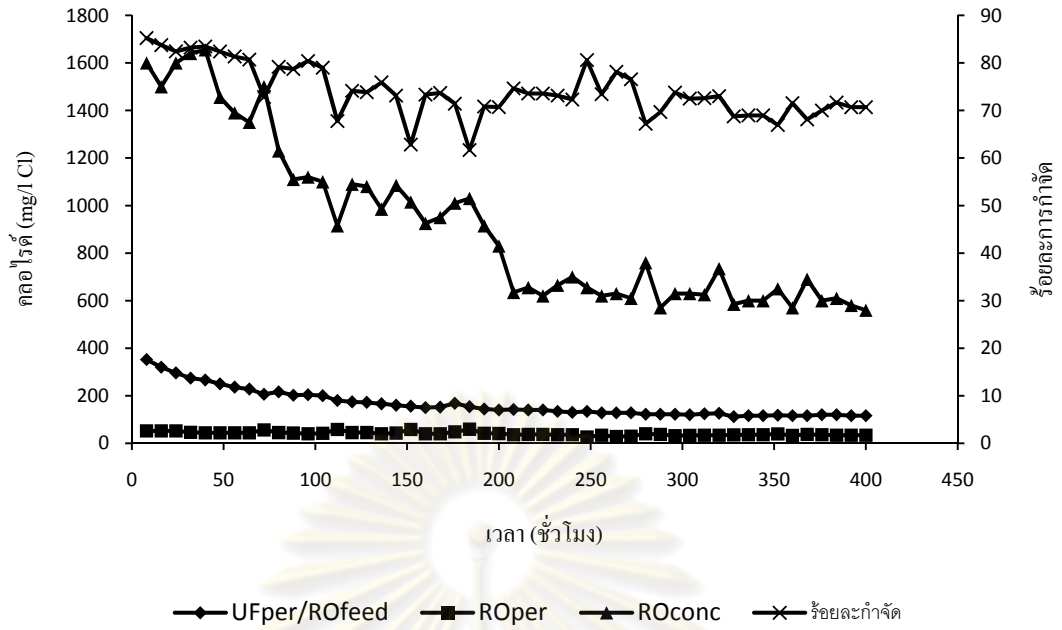
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพค่างน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบ

#### 4.4.8 ผลต่อคลอรีน

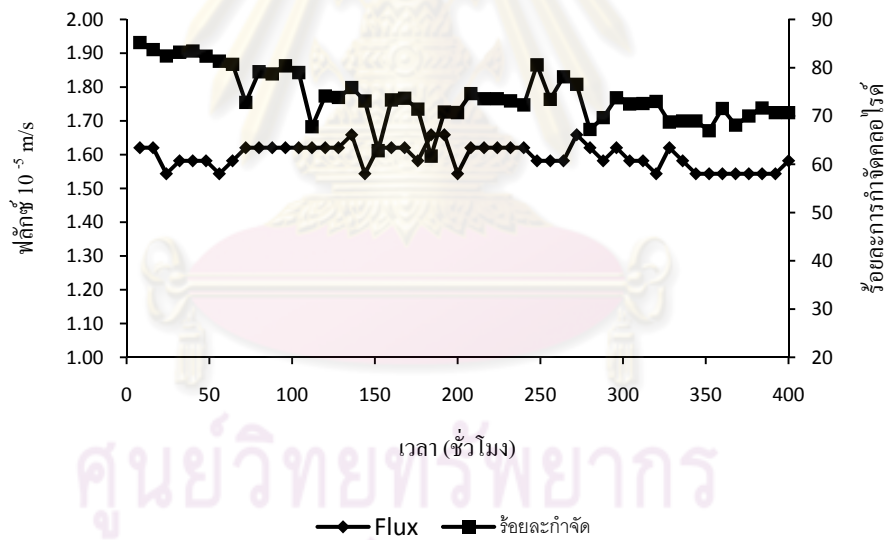
จากการทดลองพบว่า ในช่วงแรกค่าคลอรีนของน้ำเข้าระบบมีค่าสูงทำให้ประสิทธิภาพของระบบ RO สูงไปด้วย และค่าคลอรีนของน้ำที่ผลิตได้มีค่าต่ำมากและค่อนข้างคงที่ ในช่วงต่อมาค่าคลอรีนของน้ำเข้าระบบลดลงจากช่วงแรกแต่เริ่มคงที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ทำให้ประสิทธิภาพของระบบ RO ลดลง และค่าคลอรีนของน้ำที่ผลิตได้ยังมีค่าต่ำและคงที่ แสดงดังรูปที่ 4.38 ค่าร้อยละการกำจัดความคลอรีนเฉลี่ยของระบบ RO มีค่าเท่ากับ 74.1 และมีช่วงค่าร้อยละการกำจัดความคลอรีนมีค่าในช่วง 61.7 – 85.2 แสดงดังรูปที่ 4.39

จากรูปที่ 4.40 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลอรีนในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบ ได้เป็นสมการ 4.23 ซึ่ง Z มีค่าเท่ากับ 0.0771

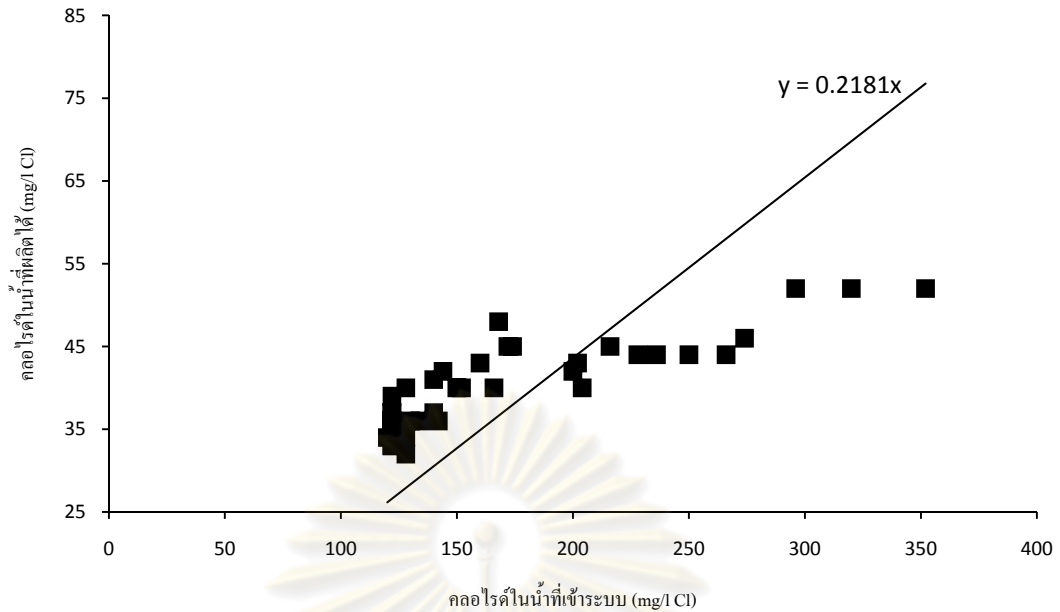
$$C_p = 0.2181C_f \quad (4.23)$$



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างคลอไรด์กับเวลาของการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละการกำจัดคลอไรด์ของการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลอรีนในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบ

จากตารางการคำนวณหาค่า  $K_s$  จากภาคผนวก ง ตารางที่ ง-8 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลอรีนในน้ำที่ผลิตได้กับในน้ำเข้าระบบ HSDM, IHSDM และ IDM ดังสมการที่ 4.25, 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ

$$C_p = \frac{2.2313 \times 10^{-6} \cdot C_f}{F_w \left[ \frac{2-2R}{2-R} \right] + 2.2313 \times 10^{-6}} \quad (4.24)$$

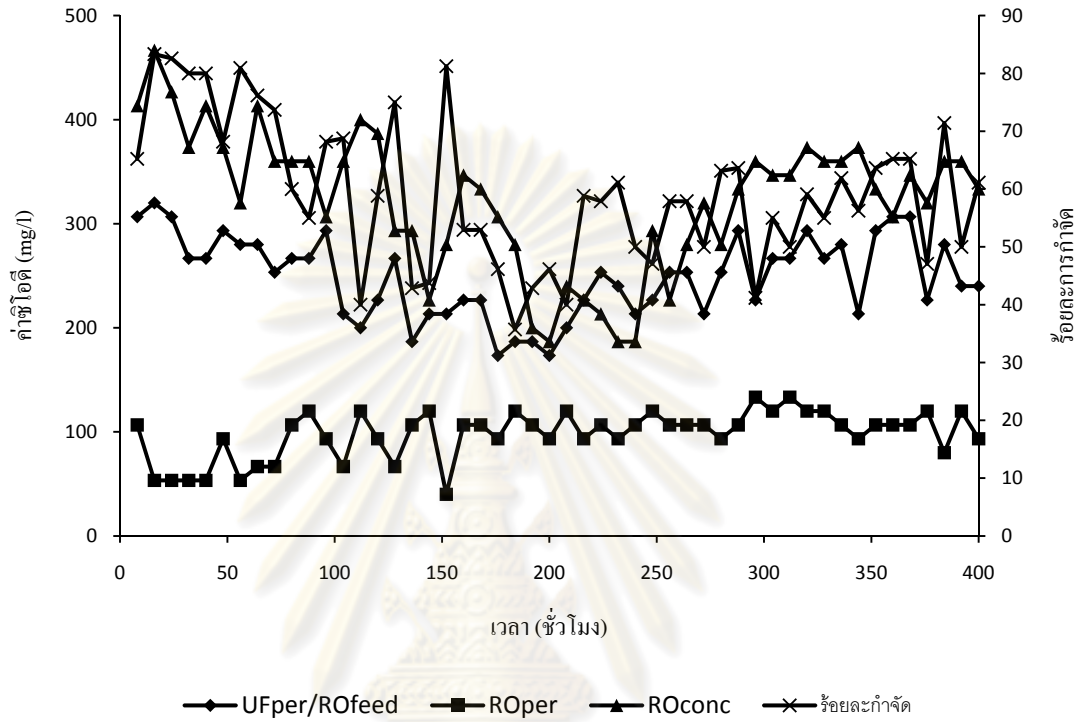
$$C_p = \frac{2.1145 \times 10^{-6} C_f}{-RF_w} \ln \left( 1 - \frac{RF_w}{F_w + 2.1145 \times 10^{-6}} \right) \quad (4.25)$$

$$C_p = \frac{C_{f_0}}{R} \left[ 1 - (1-R)^{2.6665 \times 10^{-6} / (F_w + 2.6665 \times 10^{-6})} \right] \quad (4.26)$$

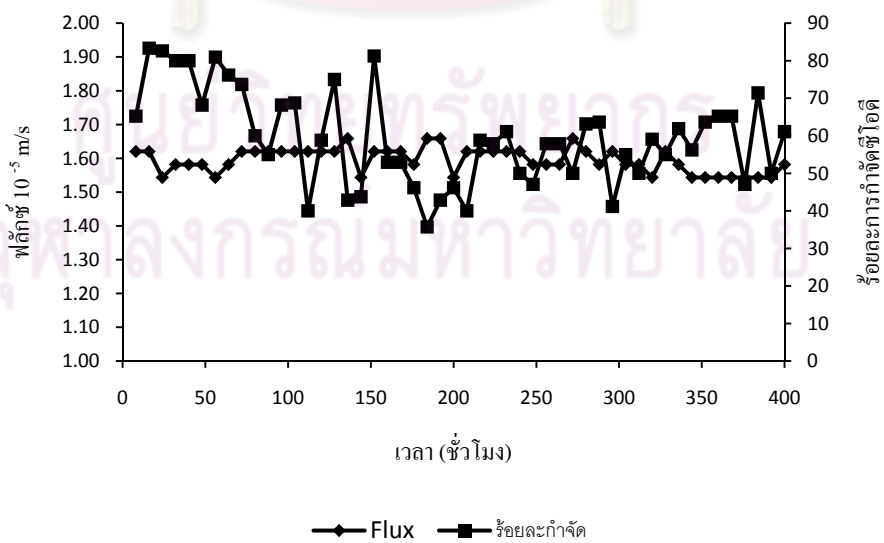
#### 4.4.9 ผลต่อซีโอดี

จากการทดลองพบว่า ในช่วงแรก ค่าซีโอดีในน้ำเข้าระบบมีค่าสูงทำให้ระบบ RO มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงด้วย ในขณะที่ค่าซีโอดีในน้ำที่ผลิตมีค่าต่ำและค่อนข้างคงที่ ในช่วง

ต่อมา ค่าซีโอดีของน้ำเข้าระบบอยู่ในช่วง 200 – 300 mg/l ในขณะที่ค่าซีโอดีในน้ำที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 100 mg/l แสดงดังรูปที่ 4.41 ระบบ RO มีร้อยละการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 59.4 และมีช่วงค่าร้อยละการกำจัดความคลอไรด์มีค่าในช่วง 35.7 – 83.4 แสดงดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีกับเวลาของการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลากับร้อยละการกำจัดซีโอดีของการทดลองที่ 3

#### 4.4.10 ผลต่อสี

จากรูปที่ 4.43 แสดงสีและความขุ่นของน้ำเข้าระบบ น้ำสะอาดและน้ำเข้มข้น ซึ่งน้ำเข้มข้นจะมีสีเข้มกว่าน้ำเข้าระบบมาก และน้ำสะอาดที่ได้ มีลักษณะใสกว่าน้ำเข้าระบบอย่างชัดเจน เนื่องจากอนุภาคของสีนี้ใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรน

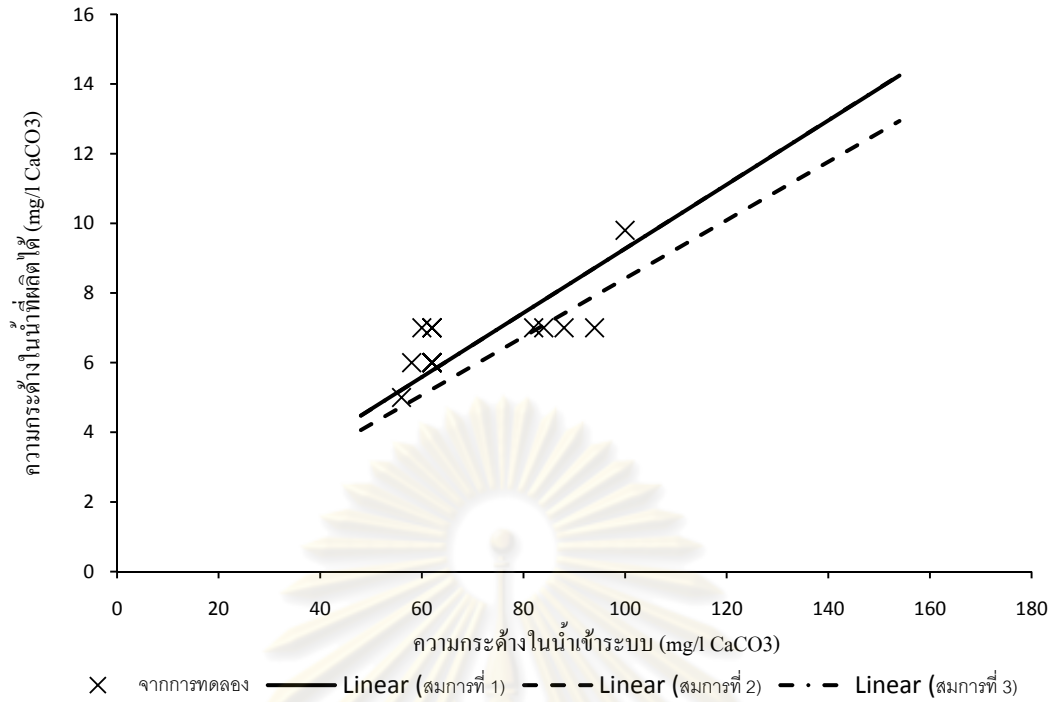


รูปที่ 4.43 สีของน้ำเข้าระบบ น้ำสะอาดและน้ำเข้มข้นของการทดลองที่ 3

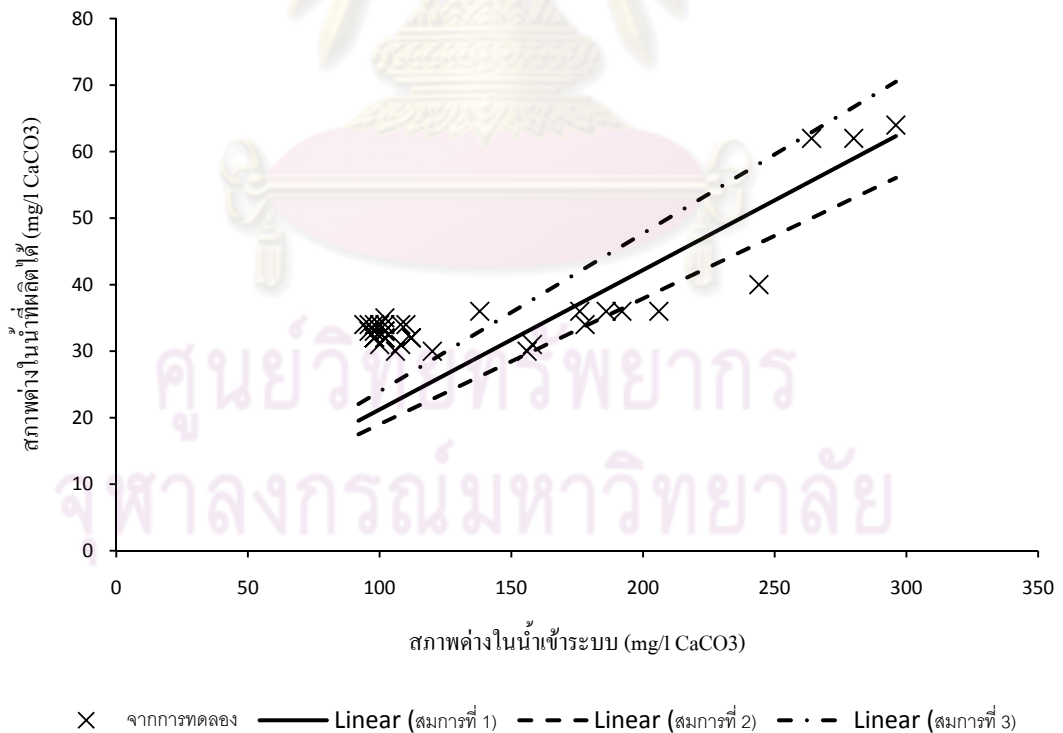
#### 4.5 เปรียบเทียบผลจากการทดลองกับการคำนวณจากสมการความสัมพันธ์

จากการทดลองที่ 3 สามารถหาสมการความสัมพันธ์ของน้ำเข้าระบบกับน้ำสะอาดที่ผลิตได้ของแต่ละพารามิเตอร์ได้ และเมื่อทราบค่าความเข้มข้นของน้ำเข้าระบบ ก็จะสามารถคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายในส่วนของน้ำที่ผลิตได้ ซึ่งแสดงในภาคผนวก ง-9, 10, 11, 12 และ 13 แต่ในส่วนของความขุ่นและสีนั้น จะอาศัยกลไกในการกรองติดผิวในการกำจัดเป็นหลัก เนื่องจากอนุภาคของความขุ่นและสีจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนอยู่แล้ว ดังนั้น สมการ Solution Diffusion ทั้ง 3 สมการ จึงไม่สามารถนำมาใช้อธิบายได้ชัดเจนมากนัก ผลจากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.44 – 4.47 ซึ่งได้แสดงความกระด้าง สภาพต่าง คลอไรด์และการนำไฟฟ้าในน้ำเข้าระบบกับน้ำสะอาดที่ผลิตได้จากการทดลองและการคำนวณจากทั้ง 3 สมการคือ HSDM, IHSMD และ IDM จะเห็นว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าจากทดลอง ดังนั้น สามารถเลือกสมการใดสมการหนึ่งเพื่อทำนายคุณภาพน้ำที่ผลิตได้

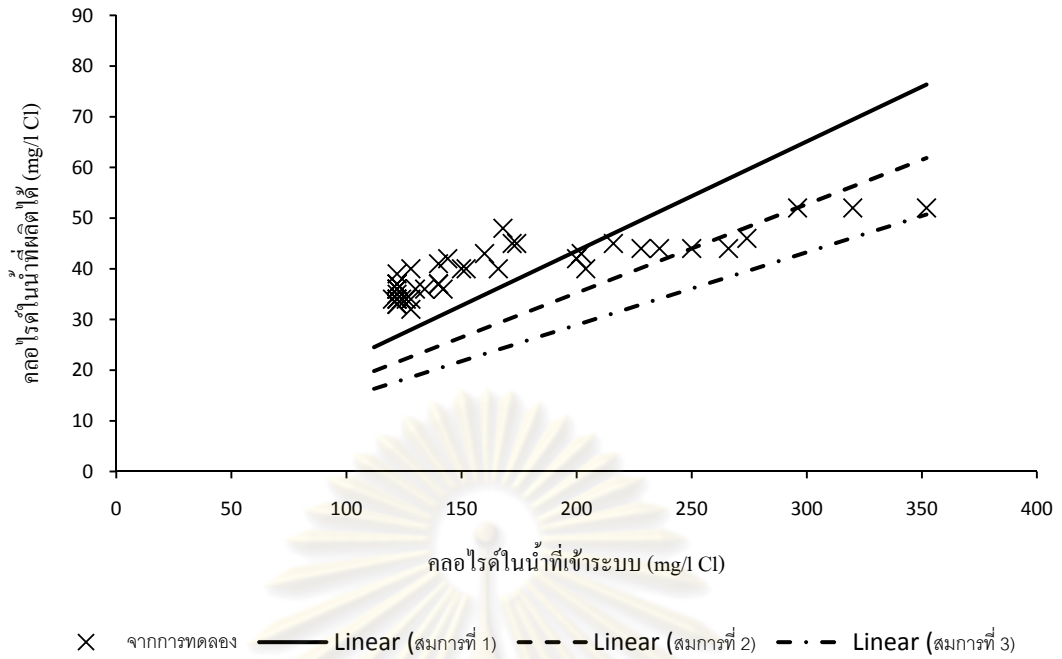




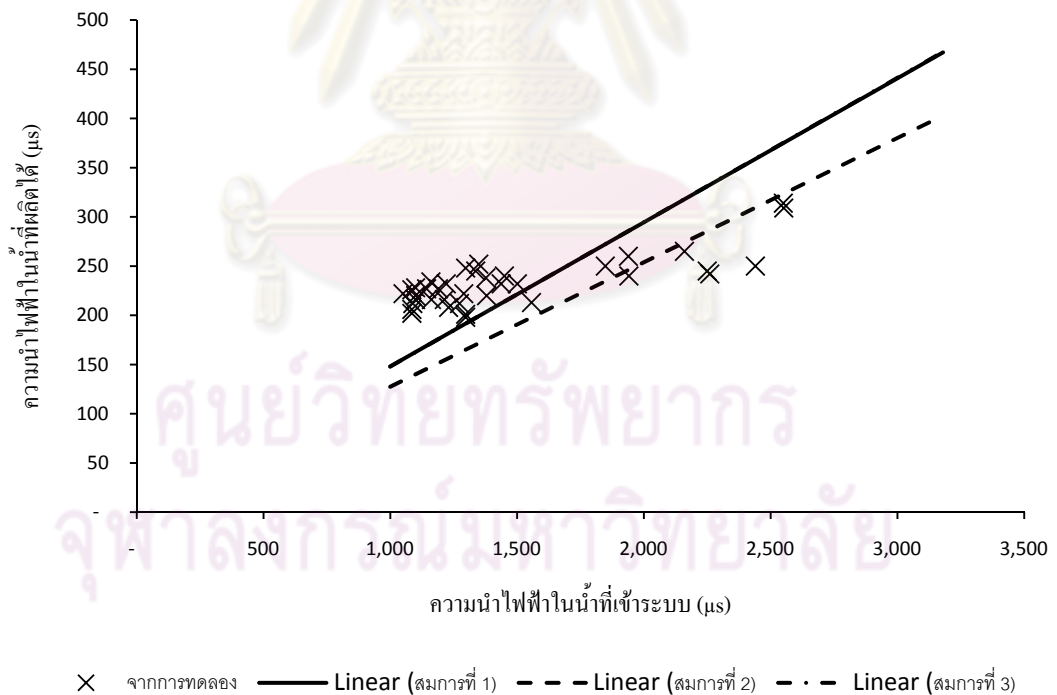
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกระด้างในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบจากการทดลอง และการคำนวณสมการ



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาวะต่างในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบจากการทดลองและการคำนวณสมการ



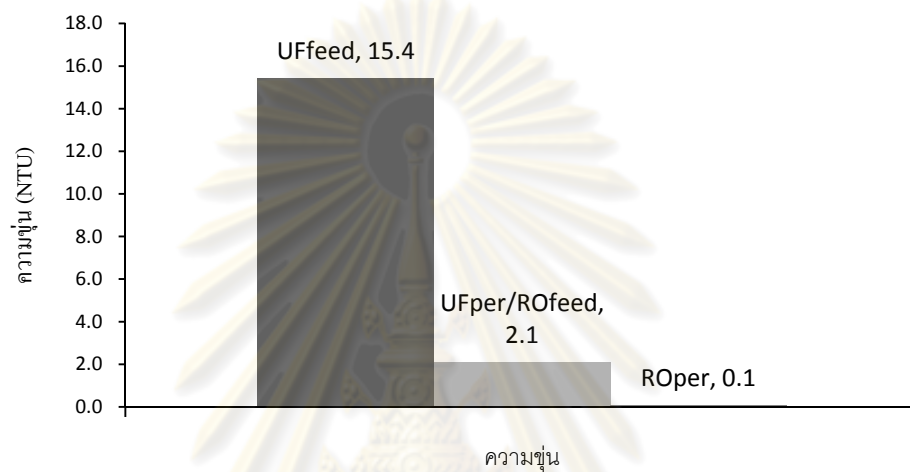
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลอไรด์ในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบจากการทดลองและการคำนวณสมการ



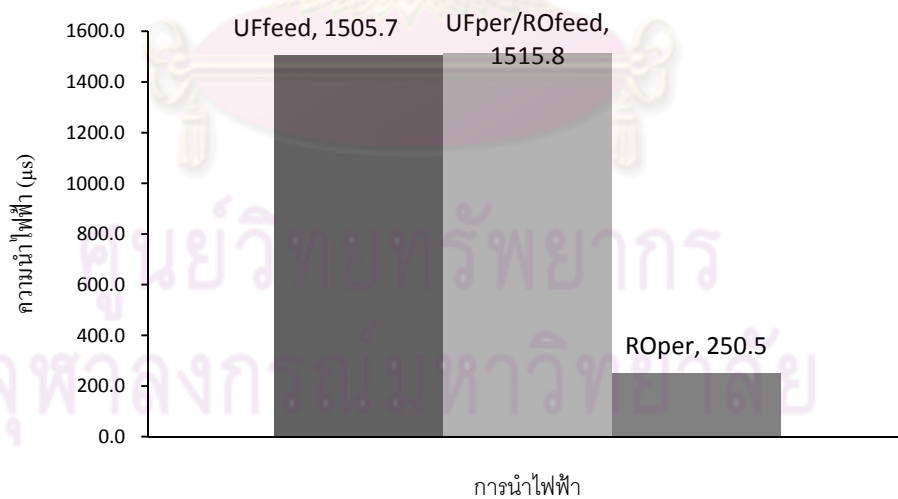
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่ผลิตได้กับน้ำที่เข้าระบบจากการทดลองและการคำนวณสมการ

#### 4.6 คุณภาพน้ำของทั้งระบบ

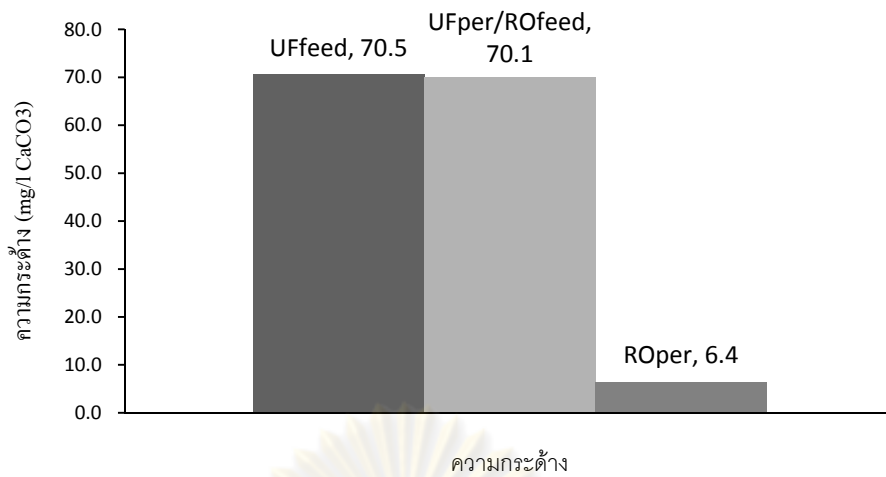
จากการทดลอง น้ำดิบที่เข้าระบบอัลตราฟิเตรชั่น(UFfeed) เมื่อผ่านเมมเบรน จะได้น้ำจากระบบอัลตราฟิเตรชั่น (UFper) ก็เป็นน้ำดิบเข้าระบบออสโมซิสผันกลับ (ROfeed) เมื่อผ่านเมมเบรนแล้วจะได้น้ำสะอาด (ROper) ซึ่งคุณภาพน้ำทั้งระบบสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.48 - 4.53 พบว่าระบบอัลตราฟิเตรชั่นนั้นซึ่งเป็นระบบขั้นต้นของระบบออสโมซิสผันกลับ สามารถกำจัดความขุ่นได้ดีที่สุด และสามารถลดค่าซีโอดีเล็กน้อย ส่วนค่าอื่นๆ นั้น ไม่สามารถกำจัดได้



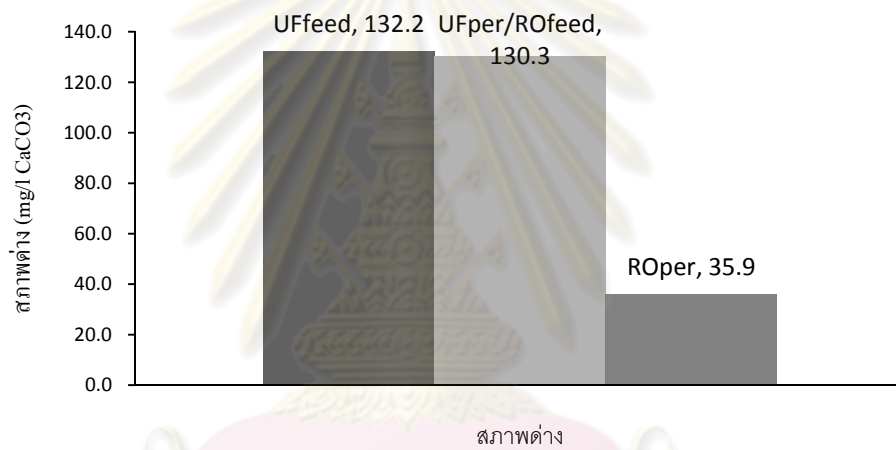
รูปที่ 4.48 ค่าความขุ่นของน้ำเข้าระบบและน้ำสะอาดของแต่ละระบบ



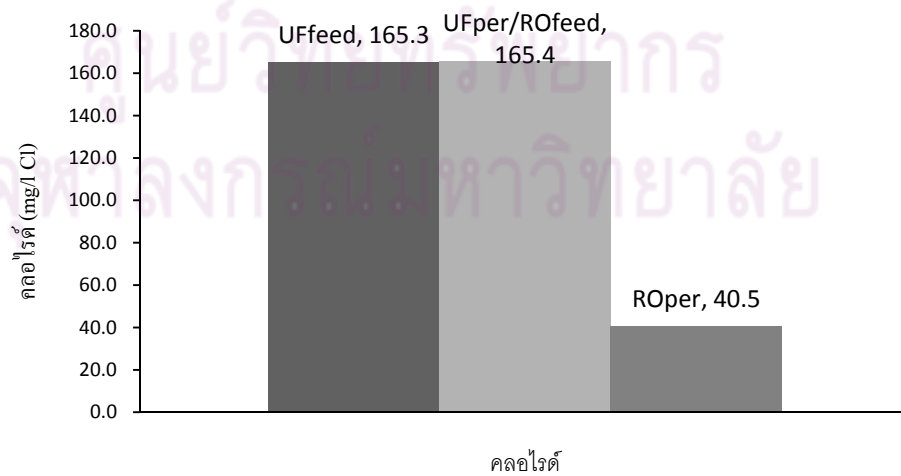
รูปที่ 4.49 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเข้าระบบและน้ำสะอาดของแต่ละระบบ



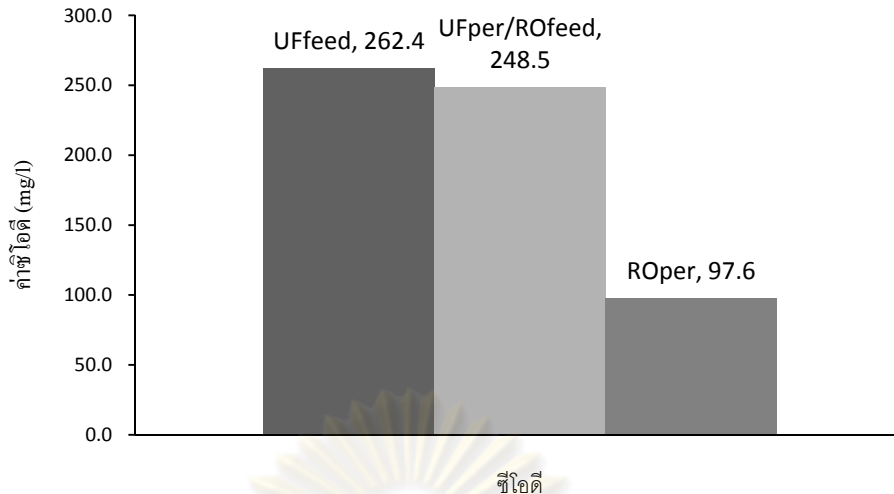
รูปที่ 4.50 ค่าความกระด้างของน้ำเข้าระบบและน้ำสะอาดของแต่ละระบบ



รูปที่ 4.51 ค่าสภาพต่างของน้ำเข้าระบบและน้ำสะอาดของแต่ละระบบ



รูปที่ 4.52 ค่าคลอไรต์ของน้ำเข้าระบบและน้ำสะอาดของแต่ละระบบ



รูปที่ 4.53 ค่าซีโอดีของน้ำเข้าระบบและน้ำสะอาดของแต่ละระบบ

#### 4.7 การวิเคราะห์ด้านค่าใช้จ่ายและการลงทุนในการดำเนินระบบ

สำหรับการวิเคราะห์ด้านค่าใช้จ่ายและการลงทุนในงานวิจัยนี้จะพิจารณาตัวแปรต่างๆ เช่น พื้นที่ ปริมาณน้ำดิบ จากโรงงานตัวอย่างเป็นหลักในการคำนวณ โดยระบบออสโมซิสผันกลับนี้จะรับน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นที่สองมาแล้วเข้าสู่ระบบโดยตรง ในการคำนวณค่าใช้จ่ายจะแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในส่วนต่างๆ ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในส่วนของการลงทุน ค่าใช้จ่ายในส่วนดำเนินการ และค่าใช้จ่ายในส่วนของการบำรุงรักษา

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยระบบออสโมซิสผันกลับมีสมมุติฐาน ดังนี้

- ระบบสามารถรองรับน้ำทิ้งจากโรงงานซึ่งผ่านการบำบัดขั้นที่สองมาแล้ว โดยมีอัตราการบำบัดน้ำทิ้งได้ 3,500 m<sup>3</sup>/d
- การดำเนินการของระบบ จะทำงาน 300 วันต่อปี และทำงานวันละ 24 ชั่วโมง
- อายุการทำงานของระบบเท่ากับ 15 ปี
- อายุการทำงานของเมมเบรนเท่ากับ 3 ปี
- ผลิตน้ำได้ปีละ 735,000 m<sup>3</sup>

##### 4.7.1 เงินลงทุนเริ่มต้น

เงินลงทุนต่อหน่วยของระบบออสโมซิสผันกลับจะขึ้นอยู่กับ ทำเลที่ตั้ง การปรับปรุงสถานที่ขนาดของกำลังการผลิต การปรับปรุงคุณภาพน้ำเบื้องต้น (Degree of Pretreatment) โดยรายละเอียดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งข้อมูลในตารางนี้มาจากการสอบถามจากบริษัทรับเหมาก่อสร้างและบริษัทตัวแทนจำหน่ายอุปกรณ์เมมเบรน

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของเงินทุนเบื้องต้นของระบบออสโมซิสผันกลับ

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
การปรับปรุงพื้นที่และก่อสร้างอาคาร	600,000
- พื้นคอนกรีต พื้นที่ขนาด 30 ตร.ม. - เสาและโครงสร้างหลังคาเป็นเหล็ก ผนังเปิดโล่ง	
ระบบบำบัดขั้นต้น และระบบล้างเมมเบรน	5,000,000
- เมมเบรน UF - เครื่องปั้มน้ำดิบ ปั้มน้ำเข้า UF ปั้มนสารเคมี - ถังเก็บน้ำดิบ ถังเก็บสารเคมี	
โครงสร้างและอุปกรณ์ประกอบของระบบ และเมมเบรน	10,000,000
- เมมเบรน RO - เครื่องปั้มน้ำแรงดันสูง ปั้มลม - ระบบสายไฟฟ้า ท่อน้ำ ท่อลม	
บ่อหรือถังสำหรับเก็บน้ำที่ผลิตได้	200,000
รวม	15,800,000

คิดเป็นเงินลงทุนทั้งหมดสำหรับระบบที่ผลิตน้ำสะอาดได้ 735,000 ลูกบาศก์เมตร เท่ากับ 15,800,000 บาท ให้โครงการมีอายุ 15 ปี และอัตราดอกเบี้ยเท่ากับร้อยละ 7.5 จะคิดเป็นเงินต้นทุนเท่ากับ 2.435 บาท ต่อลูกบาศก์เมตร

#### 4.7.2 ต้นทุนด้านการดำเนินงาน

สำหรับในด้านของต้นทุนการดำเนินการจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

##### 4.7.2.1 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

ค่าใช้จ่ายส่วนนี้นับว่าเป็นส่วนนี้สำคัญส่วนหนึ่งในด้านของต้นทุนการดำเนินการของระบบออสโมซิสผันกลับ ซึ่งการใช้พลังงานจะใช้กับส่วนของปั้มแรงดันสูงที่ใช้กับระบบออสโมซิสผันกลับ และปั้มแรงดันต่ำสำหรับสูบน้ำทิ้งจากระบบบำบัดเข้าสู่ระบบออสโมซิสผันกลับ นอกจากนี้ก็จะเป็นพลังงานในด้านอื่น ได้แก่ ค่าไฟฟ้าสำหรับให้ความสว่าง เป็นต้น รายละเอียดของพลังงานที่ใช้ในระบบระบบออสโมซิสผันกลับ แสดงดังตารางที่ 4.3



ตารางที่ 4.3 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ

รายการ	KW h/m <sup>3</sup>	จำนวนเงิน (บาท)
ปั๊มแรงดันสูง	0.699	2.097
ปั๊มแรงดันต่ำ	0.343	1.029
ปั๊มของชุดบำบัดเบื้องต้น	0.343	1.029
ปั๊มสารเคมี	0.31	0.93
ปั๊มน้ำสะอาด	0.23	0.69
รวม		5.775

หมายเหตุ : คำนวณที่ค่าไฟฟ้า 3 บาทต่อหน่วย

#### 4.7.2.2 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

ในการทำงานของระบบออสโมซิสผันกลับจะต้องมีสารเคมีต่างๆ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ได้แก่ ในส่วนของการล้างทำความสะอาดเมมเบรน การฆ่าหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบนเมมเบรน การเก็บรักษาเมมเบรน สำหรับชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ใช้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำที่จะบำบัด ในด้านการใช้สารเคมีจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การใช้แบบต่อเนื่องและแบบเป็นช่วงเวลา ตารางที่ 4.5 แสดงถึงรายละเอียดสารเคมีที่ใช้กับระบบออสโมซิสผันกลับและราคาต่อหน่วยการผลิต

ตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี

รายการ	ราคา (บาท ต่อ กก.)	อัตราการใช้	จำนวนเงิน (บาท ต่อ ลบ.ม.)
สารเคมีที่ใช้ต่อเนื่อง - HCl	30	7 mg/l	0.30
สารเคมีที่ใช้ล้างเมมเบรน RO - NaOH	30	4 ครั้ง/ปี	0.02
- EDTA	110	4 ครั้ง/ปี	0.05
- ดีเทอเจนท์	120	4 ครั้ง/ปี	0.05
- ฟอรั่มลดีไฮด์	10	1 ครั้ง/ปี	0.001
รวม			0.421

#### 4.7.2.3 ค่าใช้จ่ายเรื่องการเปลี่ยนเมมเบรน

โดยทั่วไปเมมเบรนจะมีอายุใช้งานได้ถึง 3 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำที่เข้าระบบ การใช้งานและการดูแลรักษาทำความสะอาดด้วย โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงทดแทนอยู่ที่ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ต่อเดือน คิดเป็นทุนการเปลี่ยนแปลงทดแทนเมมเบรน 1.022 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

#### 4.7.2.4 ค่าซ่อมบำรุงรักษา

ค่าซ่อมบำรุงรักษาจะขึ้นอยู่กับ อัตราการเปลี่ยนแปลงทดแทนจริง หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของเงินลงทุน ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 4.5

#### 4.7.3 ต้นทุนต่อหน่วยการผลิตของระบบออสโมซิสผันกลับ

จากการคำนวณราคาต้นทุนต่อหน่วยในส่วนต่างๆ ตามหัวข้อ 4.7.2.1 ถึง 4.7.2.4 จะสามารถสรุปต้นทุนทั้งหมดในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยระบบออสโมซิสผันกลับ สำหรับโรงงานฟอกย้อมได้เท่ากับ 10.185 หรือประมาณ 10 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ดังรายละเอียดตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษา

รายการ	จำนวน	จำนวนเงิน (บาท ต่อ ลบ.ม.)
Cartridge Filter	เปลี่ยน 2 ครั้ง/ปี	0.142
ปั๊มและมอเตอร์	6% ของต้นทุน	0.146
การควบคุมและการใช้ไฟฟ้า	5% ของต้นทุน	0.122
ระบบท่อ	5% ของต้นทุน	0.122
รวม		0.532

ตารางที่ 4.6 สรุปต้นทุนในการใช้ระบบออสโมซิสผันกลับบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม

รายการ	จำนวนเงิน (บาท ต่อ ลบ.ม.)	เปอร์เซ็นต์ ของต้นทุนรวม
ต้นทุนเงินลงทุน	2.435	23.9
ต้นทุนด้านพลังงาน	5.775	56.7
ต้นทุนด้านสารเคมี	0.421	4.1
ต้นทุนด้านการเปลี่ยนแปลงเมมเบรน	1.022	10.0
ต้นทุนด้านการซ่อมบำรุงรักษา	0.532	5.2
รวม	10.185	100%

#### 4.8 ความเป็นไปได้ในการนำน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมกลับมาใช้ใหม่ ด้วยระบบออสโมซิสผกกลับ

จากผลการทดลองพบว่า ระบบออสโมซิสผกกลับสามารถที่จะบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองมาแล้วได้อย่างมีประสิทธิภาพ คุณภาพน้ำที่ผลิตได้จึงสูงพอที่จะนำกลับไปใช้กับส่วนต่างๆของกระบวนการผลิต เช่น ในส่วนของการฟอกย้อม การซักล้างทำความสะอาด เป็นต้น สำหรับคุณภาพน้ำสะอาดใช้ในกระบวนการผลิต คุณสมบัติของน้ำที่ใช้กระบวนการฟอกย้อมแสดงดังตารางที่ 4.7

เมื่อศึกษาถึงคุณภาพน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมตามตารางที่ 4.7 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ จะพบว่าคุณภาพน้ำที่ได้จากกระบวนการออสโมซิสผกกลับนั้น สามารถนำไปใช้กับกระบวนการฟอกย้อมได้ จะมีในส่วนของพีเอชที่ต่ำกว่าข้อกำหนดของโรงงานไปเล็กน้อย เนื่องจากน้ำสะอาดที่ผลิตได้มีสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อคาร์บอนเนตสูงจึงทำให้ค่าพีเอชต่ำ แต่ไม่มีผลต่อกระบวนการฟอกย้อมมากนัก เพราะสามารถเพิ่มพีเอชได้ด้วยการใส่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออก นอกจากการนำไปใช้ในกระบวนการฟอกย้อมยังสามารถนำไปใช้ในส่วนของการนำไปซักล้างหลังการฟอกย้อมได้ รวมถึงการนำกลับไปใช้กับอาคารได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามถ้าจะนำกลับมาใช้ในกิจกรรมประจำวันมนุษย์จำเป็นต้องศึกษาพารามิเตอร์อื่นๆ เพิ่มเติม ได้แก่ โคลิฟอร์มแบคทีเรีย และสารโลหะหนัก เป็นต้น

ตารางที่ 4.7 สรุปคุณภาพน้ำที่บำบัดได้จากการใช้ระบบออสโมซิสผกกลับ

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง	ค่าที่ยอมรับได้
pH	-	7.1 – 8.0	7-9
อุณหภูมิ	<sup>0</sup> C	30 – 35	-
ความนำไฟฟ้า	μS	172 – 512	-
ความขุ่น	NTU	0.02 – 0.23	< 5
ความกระด้าง	mg / l CaCO <sub>3</sub>	4 -12	< 70
สภาพด่าง	mg / l CaCO <sub>3</sub>	26 - 64	< 100
คลอไรด์	mg / l Cl	26 - 59	< 250

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

ผลการทดลองการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับออสโมซิสผันกลับ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 สำหรับระบบอัลตราฟิลเตรชันที่เป็นระบบกรองแบบ dead-end เมื่อเพิ่มความดันให้กับระบบสูงขึ้น อัตราการผลิตน้ำสะอาดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน ความดันในการเดินระบบที่เหมาะสม คือ 0.20 MPa และระบบอัลตราฟิลเตรชันนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุด คือ มีร้อยละกำจัดเฉลี่ย เท่ากับ 88.3 ซึ่งสามารถลดปัญหาการอุดตันในระบบออสโมซิสผันกลับได้

5.1.2 สำหรับระบบออสโมซิสผันกลับ เมื่อค่า %Recovery เพิ่มขึ้นอัตราการผลิตน้ำสะอาดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อใช้ค่า %Recovery สูงมาก คือที่ %Recovery เท่ากับ 80% ประสิทธิภาพการกำจัดจะมีค่าลดลง เนื่องจาก น้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นสูงขึ้น มีผลทำให้อนุภาคต่างๆ สามารถหลุดผ่านเมมเบรนไปได้บางส่วน ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดลดลง และจากการที่ค่า %Recovery สูงขึ้นมาก ทำให้ระบบเกิดการอุดตันเร็วขึ้นด้วย ซึ่ง %Recovery ที่เหมาะสมในการเดินระบบ คือ 70% และประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดของระบบของแต่ละพารามิเตอร์มีดังนี้ ร้อยละการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 99.1 ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไฟฟฟ้าเท่ากับ 91.4 ร้อยละการกำจัดความกระด้างเท่ากับ 96.8 ร้อยละการกำจัดสภาพค่างเท่ากับ 83.6 ร้อยละการกำจัดคลอรีนเท่ากับ 85.2 และร้อยละการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 83.3

5.1.3 คุณภาพของน้ำที่ผลิตได้จากกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับออสโมซิสผันกลับ นั้น มีคุณภาพน้ำที่ดี ตลอดการทดลอง ทำให้น้ำที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการฟอกย้อมได้ เช่น ใช้ในกระบวนการซักล้างต่างๆ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องการน้ำที่บริสุทธิ์สูงมาก หรือใช้ในการทำความสะอาดอาคารหรือเครื่องจักรกลต่างๆ เป็น

ตัน สำหรับต้นทุนในการบำบัดน้ำทิ้งนี้มีค่าประมาณ 10 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งถูกกว่าน้ำประปา เมื่อมีการใช้น้ำมากกว่า 200 ลบ.ม./เดือน ราคาดลบ.ม.ละ 15.81 บาท

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ ยังพบข้อที่น่าสนใจอีกหลายประการจากการใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับออสโมซิสผันกลับกับอุตสาหกรรมฟอกย้อม ได้แก่

5.2.1 การศึกษาการนำน้ำที่ผลิตได้จากกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับออสโมซิสผันกลับไปใช้ในส่วนอื่นๆของโรงงานฟอกย้อม เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

5.2.2 การศึกษาการบำบัดน้ำเข้มข้นที่เกิดจากกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับออสโมซิสผันกลับ ซึ่งเป็นของเสียที่ได้จากระบบที่ต้องศึกษาหาแนวทางในการบำบัดที่เหมาะสมต่อไป

5.2.3 การศึกษาการนำกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับออสโมซิสผันกลับไปใช้ในการแยกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นี้เป็นสารละลายที่ใช้มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

5.2.4 การศึกษาการนำกระบวนการเมมเบรนไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยแยกน้ำเสียของแต่ละกระบวนการฟอกย้อมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- นริศญา กวีนันทวงศ์. 2543. การบำบัดน้ำเสียสี่ข้อมด้วยกระบวนการ PAC-UF. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. 2541. กระบวนการด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สนธยา สรหงษ์. 2546. การศึกษากระบวนการนาโนฟิวเตรชันเพื่อนำน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมกลับมาใช้ใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. 2543. คู่มือการจัดการโรงงานฟอกย้อม. สถานที่พิมพ์: กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- สุวิทย์ กิตติภูมิชัย. 2543. การบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอขั้นสูงด้วยกระบวนการออสโมซิสผันกลับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

Baker, R. W. Membrane technology and applications. 2<sup>nd</sup> ed. England: John Wiley & Sons, 2004.

Bes-Pia, A.; Mendoza-Roca, J. A.; Alcaina-Miranda, M. I.; Iborra-Clar, A.; and Iborra-



- Clar, M. I. Reuse of wastewater of the textile industry after its treatment with a combination of physico-chemical treatment and membrane technologies. Desalination 149 (2002): 169-174.
- Cheng, T. W.; Yeh, H. M.; and Wu, J. G. Modified boundary layer resistance model for membrane ultrafiltration. Tampang journal of science and engineering 4 (2001): 111-117.
- Choi, H.; Zhang, K.; Dionysios, D. D.; Oerther, D. B.; and Sorial, G. A. Influence of cross-flow velocity on membrane performance during filtration of biological suspension. Journal of membrane science 248 (2005): 189-199
- Davis, R. H. Modeling of fouling of crossflow microfiltration membranes. Separation and Purification Methods 21 (1992): 75–126.
- Goksen Capar. 2005. Development of a membrane based treatment scheme for water recovery from textile effluents. Doctoral dissertation. Department of Environmental Engineering, Middle East Technical University.
- Kedem, O.; and Katchalsky, A. A physical interpretation of the phenomenological coefficients of membrane permeability. Journal of General Physiology 45 (1961): 143.
- Lee, S.; Kim, J.; and Lee, C. H. Analysis of CaSO<sub>4</sub> scale formation mechanism in various nanofiltration modules. Journal of Membrane Science 163 (1999): 63-74.
- Madaeni, S. S.; and Mansourpanah, Y. Chemical cleaning of reverse osmosis membranes fouled by whey. Desalination 161 (2004): 13-24.

- Marcucci, M.; Ciabatti, I.; Matteucci, A.; and Vernaglione, G. Membrane technologies applied to textile wastewater treatment. Annals New York Academy of Sciences. 984 (2003): 53-64.
- Mugnier, N.; Howell, J. A.; and Ruf, M. Optimization of a back-flush sequence for zeolite microfiltration. Journal of Membrane Science 175 (2000): 149–161.
- Mulder, M. Basic principles of membrane technology. 2<sup>nd</sup> ed. Massachusetts: Kluwer Academic, 1997.
- Osamu, O., Technical transfer textbook for the project on the industrial water technology institute phase 2 : Water and wastewater treatment process. Bangkok: IWTI, Japan International Cooperation Agency, 2001.
- Rautenbach, R.; and Albrecht, R. Membrane process. Chister UK: John Winley and Sons, 1989.
- Rearick, W. A.; Farias, L. T.; and Goettsch, H. B. G. Water and salt reuse in the dyehouse. :Texile Research an Implementation report. Cotton Incorporated, 1995.
- Sostar-Turk, S.; Simonic, M., and Petrinic, I. Wastewater treatment after reactive printing. Dyes and Pigments. 64 (2005): 147-152.
- Suksaroj, C.; Heran, M.; Allegre, C.; and Persin, F. Treatment of textile plant effluent by nanofiltration and/or reverse osmosis for water reuse. Desalination. 178 (2005): 333-341.

Taylor, J. S.; Chen, X. S.; Mulford, L. A.; and Norris, C. D. Flat sheet, bench and plot testing for pesticide removal using reverse osmosis. AWWA Research Foundation (1998).

Taylor, J. S.; Mulford, L. A.; Duranceau, S. J.; and Barrett, W. M. Cost and performance of a membrane pilot plant. Journal of AWWA 81 (11) (1989): 52–60.

Vincent Vela, M. C.; Blanco, S. A.; García, J. L.; Gozávez-Zafrilla, J. M.; and Rodríguez, E. B. Application of a dynamic model for predicting flux decline in crossflow ultrafiltration. Desalination 198 (2006): 303–309.

Vincent Vela, M. C.; Blanco, S. A.; García, J. L.; Gozávez-Zafrilla, J. M.; and Rodríguez, E. B. Utilization of a shear induced diffusion model to predict permeate flux in the crossflow ultrafiltration of macromolecules. Desalination 206 (2007): 61–68.

Wijmans, J. G.; Nakao, S.; Van Den Berg, J. W. A.; Troelstra, F. R.; and Smolders, C. A. Hydrodynamic resistance of concentration polarization boundary layers in ultrafiltration. Journal of membrane science 22 (1985): 117.

Zhao, Y.; Taylor, J. S.; and Chellam, S. Predicting RO/NF water quality by modified solution diffusion model and artificial neural networks. Journal of membrane science 263 (2005): 38–46.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก  
บันทึกผลการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองที่ 1

ตัวแปร	เวลา (ชม.)	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /h)		pH		อุณหภูมิ (°C)		ความกระด้าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )		สภาพต่าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	
		น้ำเข้าระบบ	น้ำที่ผลิตได้	น้ำเข้าระบบ	น้ำที่ผลิตได้	น้ำเข้าระบบ	น้ำที่ผลิตได้	น้ำเข้าระบบ	น้ำที่ผลิตได้	น้ำเข้าระบบ	น้ำที่ผลิตได้
0.10 M Pa	2	1.12	1.12	7.22	8.01	29.50	30.00	141	134.0	342	354
	4	1.12	1.12	7.35	8.12	29.40	30.00	143	136.0	332	354
	6	1.12	1.12	7.44	8.40	29.40	30.10	135	132.0	326	350
	8	1.12	1.12	7.49	8.44	29.50	30.10	137	136.0	316	360
0.15 M Pa	2	1.28	1.28	7.73	7.95	30.0	30.5	140.0	122.0	362	354
	4	1.28	1.28	7.91	8.13	31.0	31.0	142.0	135.0	360	356
	6	1.28	1.28	7.97	8.17	32.5	32.5	142.0	120.0	358	352
	8	1.28	1.28	8.11	8.14	32.5	32.5	142.0	132.0	360	362
0.20 M Pa	2	1.41	1.41	8.01	8.04	31.0	31.0	142.00	136.00	372	352
	4	1.42	1.42	8.24	8.28	31.5	31.5	138.00	136.00	374	356
	6	1.42	1.42	8.27	8.31	32.0	32.0	138.00	136.00	368	354
	8	1.42	1.42	8.28	8.26	32.0	32.0	140.00	138.00	346	346

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองที่ 1 (ต่อ)

ตัวแปร	เวลา (ชม.)	สภาพนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}$ )		คลอไรด์ ( $\text{mg/l Cl}$ )		ความขุ่น (NTU)		ซีโอดี ( $\text{mg/l}$ )	
		น้ำเข้าระบบ	น้ำที่ผลิตได้	น้ำเข้าระบบ	น้ำที่ผลิตได้	น้ำเข้าระบบ	น้ำที่ผลิตได้	น้ำเข้าระบบ	น้ำที่ผลิตได้
0.10 M Pa	2	4240	4140	484	488	21.03	3.45	493	467
	4	4240	3999	484	492	19.40	2.67	453	453
	6	4150	4030	480	478	19.87	2.45	493	453
	8	4150	4100	490	470	19.02	2.30	493	480
0.15 M Pa	2	4200	3870	474	470	18.45	2.15	493	467
	4	3970	3910	486	470	19.10	2.25	467	480
	6	3960	3940	480	474	18.05	2.09	467	453
	8	4030	4000	480	466	17.89	2.13	440	427
0.20 M Pa	2	3710	3870	478	476	18.20	2.20	453	467
	4	3980	4010	480	476	17.90	2.14	453	453
	6	3940	4000	482	474	17.56	2.05	453	467
	8	3930	3820	480	474	17.45	2.10	413	440

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองที่ 2

ตัวแปร	เวลา (ชม.)	อัตราการไหล (l/h)			ความดัน (psi)			pH			อุณหภูมิ (°C)			ความกระด้าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )		
		feed	per	conc	ป้อนน้ำ	เข้า	ออก	feed	per	conc	feed	per	conc	feed	per	conc
60%	2	740.0	420.0	300.0	50.0	140.0	145.0	8.11	8.01	8.24	30.5	30.0	30.0	126.0	4.0	342.0
	4	735.0	410.0	300.0	50.0	140.0	145.0	8.27	8.02	8.29	30.5	30.5	31.0	124.0	4.0	340.0
	6	740.0	410.0	300.0	50.0	140.0	145.0	8.23	8.01	8.30	30.5	30.5	31.0	124.0	4.0	348.0
	8	740.0	410.0	300.0	50.0	140.0	145.0	8.22	0.02	8.32	31.0	31.0	32.0	124.0	4.0	348.0
70%	2	660.0	440.0	200.0	50.0	145.0	150.0	8.35	8.22	8.30	29.5	29.0	29.5	136.0	4.0	428.0
	4	640.0	440.0	200.0	50.0	145.0	150.0	8.37	8.11	8.32	30.0	30.5	30.5	146.0	4.0	466.0
	6	640.0	440.0	200.0	50.0	145.0	150.0	8.40	8.12	8.35	30.5	31.0	31.0	152.0	4.0	498.0
	8	640.0	440.0	200.0	50.0	145.0	150.0	8.42	8.10	8.39	31.0	31.5	31.5	150.0	4.0	495.0
80%	2	610.0	480.0	110.0	52.0	145.0	150.0	8.32	7.78	8.20	30.0	30.0	30.5	168.0	4.0	776.0
	4	600.0	480.0	110.0	52.0	145.0	150.0	8.35	7.95	8.26	31.0	31.5	31.0	162.0	4.0	812.0
	6	600.0	480.0	110.0	55.0	145.0	150.0	8.33	8.11	8.27	31.5	32.0	32.0	158.0	4.0	812.0
	8	600.0	480.0	110.0	55.0	145.0	150.0	8.35	8.14	8.29	31.5	32.0	32.0	155.0	4.0	820.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองที่ 2 (ต่อ)

ตัวแปร	เวลา (ชม.)	สภาพด่าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )			สภาพนำไฟฟ้า (μS)			คลอไรด์ (mg/l Cl)			ความขุ่น (NTU)			ซีโอดี (mg/l)		
		feed	per	conc	feed	per	conc	feed	per	conc	feed	per	conc	feed	per	conc
60%	2	250.0	46.0	740.0	2,650.0	232.0	8,310.0	318.0	42.0	1,040.0	2.56	0.10	3.49	467	93	547
	4	284.0	46.0	700.0	3,120.0	191.9	7,480.0	354.0	44.0	915.0	2.78	0.04	3.12	480	107	547
	6	300.0	42.0	720.0	3,290.0	193.1	7,850.0	272.0	44.0	940.0	2.30	0.02	3.09	493	80	560
	8	302.0	44.0	720.0	3,100.0	198.0	7,650.0	270.0	44.0	930.0	2.60	0.02	3.15	440	107	547
70%	2	316.0	44.0	860.0	3,340.0	248.0	9,150.0	384.0	44.0	1,125.0	2.24	0.06	3.36	467	107	573
	4	312.0	36.0	930.0	3,570.0	237.0	9,860.0	408.0	44.0	1,225.0	2.50	0.04	3.50	480	93	560
	6	332.0	48.0	1,050.0	3,680.0	252.0	10,640.0	420.0	46.0	1,275.0	2.18	0.04	3.65	453	107	533
	8	324.0	44.0	980.0	3,720.0	244.0	10,440.0	414.0	44.0	1,260.0	2.09	0.02	3.78	480	93	547
80%	2	330.0	56.0	1,415.0	3,650.0	400.0	15,250.0	420.0	70.0	1,870.0	2.22	0.08	4.25	467	93	627
	4	340.0	56.0	1,440.0	3,850.0	408.0	15,250.0	480.0	72.0	1,895.0	2.10	0.04	3.89	453	107	600
	6	344.0	56.0	1,470.0	3,650.0	347.0	15,050.0	442.0	68.0	1,850.0	2.14	0.02	3.90	453	107	600
	8	354.0	56.0	1,510.0	3,750.0	360.0	15,120.0	460.0	66.0	1,910.0	2.10	0.02	3.85	507	120	587

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่ 3

เวลา (ชม.)	อุณหภูมิ (C)				pH				การนำไฟฟ้า (µS)				ความกระด้าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
8	30.0	30.0	31.0	30.5	8.23	8.34	7.64	8.35	3,220.0	3,180.0	512.0	21,700.0	146.0	154.0	5.0	750.0
16	30.5	30.5	31.0	31.0	8.40	8.39	7.57	8.36	2,920.0	2,870.0	246.0	13,010.0	136.0	138.0	5.0	670.0
24	30.0	30.0	31.5	31.5	8.44	8.45	7.73	8.36	2,720.0	2,700.0	245.0	13,090.0	126.0	96.0	5.0	710.0
32	30.5	30.5	30.5	30.5	8.45	8.48	7.35	8.22	2,500.0	2,552.0	309.0	14,800.0	126.0	126.0	5.0	640.0
40	30.0	30.0	30.5	30.5	8.40	8.45	7.38	8.20	2,480.0	2,550.0	314.0	15,000.0	124.0	126.0	5.0	625.0
48	30.5	30.5	30.5	31.0	8.51	8.33	7.40	8.22	2,420.0	2,440.0	250.0	13,150.0	106.0	112.0	5.0	680.0
56	30.0	30.0	30.5	31.0	8.28	8.32	7.35	8.34	2,280.0	2,250.0	245.0	12,260.0	104.0	96.0	5.0	665.0
64	30.0	30.0	30.5	31.0	8.25	8.30	7.38	8.24	2,300.0	2,260.0	242.0	11,250.0	102.0	100.0	5.0	650.0
72	29.5	29.5	30.0	30.5	8.20	8.29	7.43	8.14	2,070.0	2,120.0	437.0	15,950.0	94.0	100.0	9.8	690.0
80	30.5	30.5	30.5	31.0	8.20	8.21	7.29	8.21	2,110.0	2,160.0	265.0	11,850.0	92.0	94.0	7.0	580.0
88	29.5	29.5	30.0	30.0	8.17	8.18	7.19	8.19	1,963.0	1,939.0	260.0	10,430.0	92.0	82.0	7.0	510.0
96	31.5	31.5	33.0	33.0	8.15	8.14	7.15	8.20	1,940.0	1,941.0	240.0	10,200.0	92.0	88.0	7.0	515.0
104	32.0	32.0	34.0	34.0	8.20	8.18	7.16	8.18	1,860.0	1,848.0	250.0	10,300.0	88.0	84.0	7.0	505.0
112	32.5	33.0	34.5	34.5	8.01	8.06	7.22	8.15	1,614.0	1,562.0	172.0	8,090.0	84.0	82.0	6.0	425.0
120	31.5	31.5	33.0	33.5	7.69	7.87	7.10	8.05	1,505.0	1,557.0	213.0	9,930.0	72.0	64.0	5.0	410.0
128	32.0	32.5	34.0	34.0	7.90	7.93	7.29	8.06	1,432.0	1,501.0	232.0	9,610.0	74.0	64.0	5.0	390.0
136	32.0	32.0	34.0	34.5	7.56	7.76	7.47	8.12	1,364.0	1,437.0	232.0	9,920.0	62.0	60.0	7.0	345.0

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	อุณหภูมิ (°C)				pH				การนำไฟฟ้า (µS)				ความกระด้าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
144	32.0	32.5	35.0	36.0	8.21	7.95	7.43	8.17	1,467.0	1,349.0	252.0	10,490.0	56.0	54.0	4.0	400.0
152	33.0	33.0	35.0	36.5	7.85	7.86	7.34	8.20	1,397.0	1,437.0	361.0	9,140.0	52.0	54.0	5.0	425.0
160	33.0	33.0	35.0	34.5	8.10	7.98	7.69	8.22	1,347.0	1,377.0	238.0	8,980.0	52.0	58.0	6.0	380.0
168	33.5	33.0	35.0	35.0	8.12	7.97	7.70	8.20	1,330.0	1,380.0	220.0	9,100.0	52.0	56.0	5.0	390.0
176	31.0	31.0	33.0	33.5	8.00	7.84	7.80	8.15	1,467.0	1,450.0	240.0	10,100.0	58.0	58.0	6.0	400.0
184	33.0	33.0	35.0	35.5	7.99	8.00	7.41	8.01	1,294.0	1,337.0	245.0	10,820.0	52.0	52.0	9.0	535.0
192	33.5	33.5	35.0	35.5	8.05	7.95	7.40	8.03	1,292.0	1,298.0	347.0	8,110.0	60.0	62.0	7.0	445.0
200	32.0	32.0	35.0	35.0	7.97	7.87	7.75	8.03	1,290.0	1,297.0	248.0	7,380.0	62.0	62.0	7.0	415.0
208	33.0	33.0	35.0	35.5	8.07	7.95	7.63	8.04	1,270.0	1,273.0	198.0	6,480.0	58.0	62.0	6.0	355.0
216	32.5	32.5	34.0	34.5	8.01	7.90	7.64	8.01	1,310.0	1,290.0	201.0	6,510.0	58.0	58.0	6.0	385.0
224	33.5	33.5	35.0	35.0	8.04	7.99	7.53	8.06	1,210.0	1,190.0	212.0	6,100.0	56.0	56.0	6.0	365.0
232	30.5	30.5	32.0	32.5	7.81	7.85	7.50	8.05	1,166.0	1,230.0	222.0	5,460.0	54.0	54.0	12.0	310.0
240	31.0	31.0	32.5	33.0	8.05	8.06	7.49	8.12	1,197.0	1,213.0	227.0	6,300.0	60.0	58.0	8.0	330.0
248	33.0	33.0	34.0	34.0	8.00	7.89	7.65	8.13	1,199.0	1,221.0	208.0	5,680.0	54.0	60.0	6.0	300.0
256	30.0	30.0	31.5	32.0	7.89	7.85	7.42	8.10	1,151.0	1,162.0	216.0	5,670.0	56.0	60.0	4.0	290.0
264	32.0	32.0	34.0	34.0	8.00	7.90	7.65	8.06	1,132.0	1,160.0	232.0	5,650.0	54.0	56.0	6.0	300.0
272	32.0	32.0	34.0	34.5	8.01	7.91	7.60	8.00	1,120.0	1,100.0	216.0	5,600.0	54.0	54.0	5.0	305.0

ศูนย์วิจัยทรัพยากรน้ำ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	อุณหภูมิ (°C)				pH				การนำไฟฟ้า (µS)				ความกระด้าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
280	33.0	33.0	35.0	35.0	7.91	7.93	7.54	7.95	1,022.0	1,096.0	315.0	5,940.0	50.0	52.0	10.0	325.0
288	32.0	32.5	34.5	34.5	8.03	8.05	7.68	8.03	1,131.0	1,143.0	234.0	5,800.0	56.0	56.0	8.0	330.0
296	30.0	30.5	33.0	33.5	7.81	7.91	7.50	7.98	1,125.0	1,140.0	252.0	5,970.0	60.0	58.0	7.0	310.0
304	30.0	30.0	32.0	32.5	7.82	7.90	7.60	8.01	1,060.0	1,050.0	216.0	5,600.0	54.0	56.0	6.0	300.0
312	31.0	31.0	34.0	34.0	7.90	7.92	7.55	8.00	1,112.0	1,100.0	227.0	5,510.0	50.0	52.0	7.0	305.0
320	32.0	32.0	34.5	34.5	7.91	7.93	7.61	7.98	1,100.0	1,100.0	222.0	5,410.0	56.0	54.0	7.0	295.0
328	30.0	30.0	32.0	32.5	7.52	7.90	7.65	8.08	1,000.0	1,064.0	274.0	5,670.0	64.0	62.0	10.0	325.0
336	30.0	30.0	32.5	32.5	7.55	7.85	7.95	8.14	1,076.0	1,085.0	228.0	5,630.0	58.0	60.0	8.0	335.0
344	29.5	29.5	32.0	32.5	7.70	7.84	7.84	8.19	1,082.0	1,089.0	220.0	5,550.0	58.0	60.0	5.0	315.0
352	29.5	29.5	32.5	32.5	7.50	7.89	7.89	8.15	1,091.0	1,100.0	282.0	6,170.0	52.0	50.0	6.0	365.0
360	30.0	30.0	31.5	31.5	7.79	7.83	7.83	8.17	1,035.0	1,069.0	195.0	5,100.0	50.0	54.0	6.0	310.0
368	29.0	29.0	30.0	30.5	7.84	7.90	7.90	8.18	1,064.0	1,053.0	269.0	6,140.0	54.0	54.0	7.0	390.0
376	30.0	30.0	31.0	31.5	7.83	7.85	7.85	8.14	1,040.0	1,040.0	226.0	5,290.0	48.0	50.0	6.0	310.0
384	31.0	31.0	33.0	33.0	7.90	7.92	7.92	8.15	1,000.0	1,020.0	212.0	5,310.0	50.0	50.0	6.0	315.0
392	32.0	32.0	34.5	34.5	7.79	7.85	7.85	8.06	1,010.0	1,000.0	206.0	5,200.0	50.0	48.0	6.0	315.0
400	32.5	32.5	35.0	35.0	7.82	7.95	7.95	8.11	1,000.0	1,010.0	202.0	5,950.0	48.0	48.0	6.0	305.0

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	สภาพค่าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )				คลอไรด์ (mg/l Cl)				ความขุ่น (NTU)				ซีโอดี (mg/l)			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
8	290.0	296.0	64.0	1,900.0	346.0	352.0	52.0	1,600.0	18.20	3.13	0.15	3.67	373	307	107	413
16	265.0	280.0	62.0	1,195.0	322.0	320.0	52.0	1,500.0	21.00	3.02	0.15	3.50	373	320	53	467
24	256.0	264.0	62.0	1,225.0	304.0	296.0	52.0	1,600.0	20.05	3.10	0.12	3.49	347	307	53	427
32	240.0	244.0	40.0	1,180.0	272.0	274.0	46.0	1,640.0	22.34	2.80	0.15	3.68	307	267	53	373
40	238.0	138.0	36.0	1,165.0	254.0	266.0	44.0	1,655.0	20.29	2.69	0.23	3.20	320	267	53	413
48	244.0	206.0	36.0	1,195.0	246.0	250.0	44.0	1,455.0	18.48	2.65	0.18	3.04	253	293	93	373
56	186.0	192.0	36.0	1,120.0	230.0	236.0	44.0	1,390.0	17.98	2.40	0.15	3.03	240	280	53	320
64	184.0	186.0	36.0	1,125.0	224.0	228.0	44.0	1,350.0	17.40	2.25	0.15	2.87	280	280	67	413
72	176.0	176.0	36.0	1,165.0	209.6	206.0	56.0	1,500.0	18.09	2.40	0.16	3.12	227	253	67	360
80	178.0	178.0	34.0	1,150.0	238.0	216.0	45.0	1,230.0	17.08	2.58	0.08	3.10	280	267	107	360
88	148.0	156.0	30.0	1,105.0	202.0	202.0	43.0	1,110.0	16.04	2.24	0.04	2.98	280	267	120	360
96	152.0	158.0	31.0	1,115.0	206.0	204.0	40.0	1,120.0	17.34	2.35	0.08	3.11	307	293	93	307
104	150.0	152.0	28.0	1,100.0	200.0	200.0	42.0	1,100.0	16.57	2.29	0.08	2.69	293	213	67	360
112	142.0	132.0	26.0	790.0	178.0	180.0	58.0	915.0	17.97	2.23	0.06	2.90	333	200	120	400
120	122.0	122.0	29.0	815.0	180.0	174.0	45.0	1,090.0	16.12	2.10	0.02	2.79	280	227	93	387
128	116.0	120.0	30.0	805.0	166.0	172.0	45.0	1,080.0	13.04	2.30	0.02	3.05	240	267	67	293
136	120.0	112.0	32.0	745.0	162.0	166.0	40.0	985.0	14.67	2.19	0.04	2.89	187	187	107	293

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	สภาพค่าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )				คลอไรด์ (mg/l Cl)				ความขุ่น (NTU)				ซีไอที (mg/l)			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
144	122.0	120.0	39.0	775.0	160.0	160.0	43.0	1,085.0	13.87	2.20	0.03	3.09	160	213	120	227
152	116.0	114.0	40.0	720.0	156.0	156.0	58.0	1,015.0	15.67	2.22	0.06	2.75	200	213	40	280
160	108.0	108.0	36.0	675.0	154.0	150.0	40.0	925.0	17.20	2.17	0.02	2.67	253	227	107	347
168	110.0	112.0	38.0	680.0	156.0	152.0	40.0	950.0	15.09	2.05	0.03	2.65	280	227	107	333
176	120.0	120.0	40.0	710.0	164.0	168.0	48.0	1,010.0	17.45	2.23	0.02	2.95	227	173	93	307
184	114.0	106.0	40.0	880.0	152.0	154.0	59.0	1,030.0	16.45	2.25	0.06	2.68	240	187	120	280
192	106.0	108.0	34.0	720.0	146.0	144.0	42.0	915.0	16.12	2.20	0.08	2.58	240	187	107	200
200	108.0	112.0	32.0	630.0	142.0	140.0	41.0	830.0	15.90	2.16	0.08	2.72	200	173	93	187
208	100.0	104.0	40.0	580.0	142.0	142.0	36.0	635.0	16.07	2.12	0.06	2.64	227	200	120	240
216	102.0	104.0	38.0	600.0	138.0	140.0	37.0	655.0	14.34	2.10	0.08	2.45	280	227	93	227
224	98.0	96.0	36.0	570.0	136.0	140.0	37.0	620.0	15.56	1.94	0.04	2.35	267	253	107	213
232	108.0	110.0	34.0	470.0	134.0	134.0	36.0	665.0	13.21	1.80	0.06	2.40	213	240	93	187
240	102.0	98.0	32.0	530.0	132.0	130.0	36.0	700.0	12.05	1.68	0.04	2.24	253	213	107	187
248	104.0	106.0	30.0	480.0	136.0	134.0	26.0	655.0	15.87	1.90	0.08	2.20	200	227	120	293
256	106.0	100.0	31.0	505.0	126.0	128.0	34.0	620.0	13.68	1.56	0.06	2.12	200	253	107	227
264	102.0	102.0	32.0	510.0	128.0	128.0	28.0	630.0	12.03	1.89	0.05	2.54	267	253	107	280
272	104.0	108.0	31.0	500.0	130.0	128.0	30.0	610.0	13.04	1.69	0.04	2.08	227	213	107	320
280	96.0	102.0	34.0	530.0	114.0	122.0	40.0	760.0	13.56	2.03	0.06	2.35	307	253	93	280

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	สภาพด่าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )				คลอไรด์ (mg/l Cl)				ความขุ่น (NTU)				ซีโอดี (mg/l)			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
280	96.0	102.0	34.0	530.0	114.0	122.0	40.0	760.0	13.56	2.03	0.06	2.35	307	253	93	280
288	102.0	102.0	35.0	485.0	122.0	122.0	37.0	570.0	14.34	2.18	0.10	2.46	307	293	107	333
296	100.0	100.0	34.0	510.0	120.0	122.0	32.0	630.0	13.70	1.96	0.10	2.42	240	227	133	360
304	104.0	102.0	33.0	515.0	122.0	120.0	33.0	630.0	13.00	1.78	0.08	2.32	293	267	120	347
312	100.0	102.0	33.0	500.0	124.0	124.0	34.0	625.0	14.50	1.65	0.06	2.30	253	267	133	347
320	102.0	102.0	32.0	495.0	126.0	126.0	34.0	735.0	15.00	1.87	0.06	2.11	253	293	120	373
328	92.0	92.0	36.0	465.0	118.0	112.0	35.0	585.0	14.60	1.80	0.04	2.34	253	267	120	360
336	96.0	96.0	34.0	470.0	114.0	116.0	36.0	600.0	13.19	1.58	0.04	2.14	320	280	107	360
344	96.0	94.0	34.0	460.0	116.0	116.0	36.0	600.0	14.40	1.64	0.06	2.20	253	213	93	373
352	96.0	96.0	33.0	500.0	116.0	118.0	39.0	650.0	12.78	1.50	0.02	1.96	240	293	107	333
360	96.0	96.0	36.0	470.0	114.0	116.0	33.0	570.0	13.61	1.61	0.04	1.78	267	307	107	307
368	98.0	100.0	40.0	510.0	114.0	116.0	37.0	690.0	13.50	1.52	0.02	1.86	307	307	107	347
376	100.0	98.0	34.0	460.0	120.0	120.0	36.0	600.0	12.40	1.64	0.04	2.14	227	227	120	320
384	100.0	98.0	33.0	470.0	120.0	120.0	34.0	610.0	12.56	1.46	0.03	1.75	267	280	80	360
392	98.0	98.0	32.0	480.0	118.0	116.0	34.0	580.0	12.30	1.53	0.02	2.05	240	240	120	360
400	98.0	98.0	32.0	485.0	116.0	116.0	34.0	560.0	12.04	1.64	0.03	1.95	240	240	93	333

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	UF			RO						
	Q (m <sup>3</sup> /l)	P1 (MPa)	P2 (MPa)	Qf (l/min)	Qp (l/min)	Qc (l/min)	Pp (psi)	Pmf (psi)	Pin (psi)	Pout (psi)
8	1.12	0.20	0.015	630.0	420.0	100.0	65.0	51.0	140.0	150.0
16	1.12	0.20	0.015	630.0	420.0	100.0	65.0	51.0	140.0	150.0
24	1.12	0.20	0.015	620.0	400.0	110.0	65.0	51.0	140.0	150.0
32	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	100.0	64.0	51.0	140.0	150.0
40	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	100.0	64.0	50.0	140.0	150.0
48	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	100.0	64.0	50.0	140.0	150.0
56	1.12	0.20	0.015	620.0	400.0	110.0	64.0	50.0	140.0	150.0
64	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	110.0	64.0	50.0	140.0	150.0
72	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	100.0	65.0	49.5	140.0	150.0
80	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	100.0	65.0	50.0	140.0	150.0
88	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	100.0	65.0	50.0	140.0	148.0
96	1.12	0.20	0.015	630.0	420.0	100.0	63.0	49.0	140.0	149.0
104	1.12	0.20	0.015	630.0	420.0	110.0	63.0	50.0	140.0	145.0
112	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	100.0	62.0	51.0	140.0	145.0
120	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	100.0	63.0	51.0	140.0	145.0
128	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	100.0	62.0	51.0	140.0	145.0
136	1.12	0.20	0.015	640.0	430.0	100.0	64.0	54.0	140.0	145.0

ศูนย์วิจัยทรัพยากรน้ำ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	UF			RO						
	Q (m <sup>3</sup> /l)	P1 (MPa)	P2 (MPa)	Qf (l/min)	Qp (l/min)	Qc (l/min)	Pp (psi)	Pmf (psi)	Pin (psi)	Pout (psi)
144	1.12	0.20	0.015	600.0	400.0	100.0	64.0	53.0	140.0	140.0
152	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	110.0	63.0	52.0	140.0	140.0
160	1.12	0.20	0.015	630.0	420.0	110.0	64.0	50.0	140.0	145.0
168	1.12	0.20	0.015	630.0	420.0	110.0	64.0	50.0	140.0	142.0
176	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	110.0	64.0	50.0	140.0	140.0
184	1.12	0.20	0.015	640.0	430.0	100.0	64.0	50.0	140.0	145.0
192	1.12	0.20	0.015	640.0	430.0	110.0	64.0	50.0	140.0	145.0
200	1.12	0.20	0.015	620.0	400.0	110.0	64.0	50.0	140.0	148.0
208	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	110.0	64.0	50.0	140.5	150.0
216	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	110.0	64.0	51.0	140.0	150.0
224	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	100.0	64.0	51.0	140.0	148.0
232	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	100.0	64.0	50.0	140.0	148.0
240	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	100.0	65.0	50.0	140.0	148.0
248	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
256	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
264	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
272	1.12	0.20	0.015	640.0	430.0	100.0	64.0	50.0	140.0	150.0

ศูนย์วิจัยทรัพยากรน้ำ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	UF			RO						
	Q (m <sup>3</sup> /l)	P1 (MPa)	P2 (MPa)	Qf (l/min)	Qp (l/min)	Qc (l/min)	Pp (psi)	Pmf (psi)	Pin (psi)	Pout (psi)
280	1.12	0.20	0.015	640.0	420.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
288	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	100.0	65.0	50.0	140.0	150.0
296	1.12	0.20	0.015	620.0	420.0	100.0	65.0	50.0	140.0	150.0
304	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
312	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
320	1.12	0.20	0.015	620.0	400.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
328	1.12	0.20	0.015	640.0	420.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
336	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
344	1.12	0.20	0.015	600.0	400.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
352	1.12	0.20	0.015	600.0	400.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
360	1.12	0.20	0.015	620.0	400.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
368	1.12	0.20	0.015	600.0	400.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
376	1.12	0.20	0.015	610.0	400.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
384	1.12	0.20	0.015	610.0	400.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
392	1.12	0.20	0.015	620.0	400.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0
400	1.12	0.20	0.015	620.0	410.0	110.0	65.0	50.0	140.0	150.0

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ข

อัตราการผลิตน้ำสะอาดของการทดลองแต่ละชุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 ค่าฟลักซ์การทดลองที่ 1

ตัวแปร	เวลา	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /h)	ฟลักซ์
	(ชม.)	น้ำสะอาด	10 <sup>-8</sup> m/s
0.1 M Pa	2	1.20	1.73
	4	1.20	1.73
	6	1.20	1.73
	8	1.20	1.73
0.15 M Pa	2	1.40	2.01
	4	1.38	1.99
	6	1.38	1.99
	8	1.35	1.94
0.2 M Pa	2	1.51	2.17
	4	1.52	2.19
	6	1.52	2.19
	8	1.52	2.19

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ค่าฟลักซ์การทดลองที่ 2

ตัวแปร	เวลา	อัตราการไหล	ฟลักซ์
	(ชม.)	(l/h)	$10^{-5}$ m/s
60%	2	420.0	1.62
	4	410.0	1.58
	6	410.0	1.58
	8	410.0	1.58
70%	2	440.0	1.70
	4	440.0	1.70
	6	440.0	1.70
	8	440.0	1.70
80%	2	480.0	1.85
	4	480.0	1.85
	6	480.0	1.85
	8	480.0	1.85

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ค่าฟลักซ์การทดลองที่ 3

เวลา	UF		RO	
(ชม.)	Q (m <sup>3</sup> /hr)	Flux (x 10 <sup>-8</sup> m/s)	Qp (l/min)	Flux (x 10 <sup>-5</sup> m/s)
8	1.12	1.61	420.0	1.62
16	1.12	1.61	420.0	1.62
24	1.12	1.61	400.0	1.54
32	1.12	1.61	410.0	1.58
40	1.12	1.61	410.0	1.58
48	1.12	1.61	410.0	1.58
56	1.12	1.61	400.0	1.54
64	1.12	1.61	410.0	1.58
72	1.12	1.61	420.0	1.62
80	1.12	1.61	420.0	1.62
88	1.12	1.61	420.0	1.62
96	1.12	1.61	420.0	1.62
104	1.12	1.61	420.0	1.62
112	1.12	1.61	420.0	1.62
120	1.12	1.61	420.0	1.62
128	1.12	1.61	420.0	1.62
136	1.12	1.61	430.0	1.66
144	1.12	1.61	400.0	1.54
152	1.12	1.61	420.0	1.62
160	1.12	1.61	420.0	1.62
168	1.12	1.61	420.0	1.62
176	1.12	1.61	410.0	1.58
184	1.12	1.61	430.0	1.66
192	1.12	1.61	430.0	1.66

ตารางที่ ข-3 ค่าฟลักซ์การทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา	UF	Flux	RO	Flux
(ชม.)	Q (m <sup>3</sup> /hr)	x 10 <sup>-8</sup>	Qp (l/min)	x 10 <sup>-5</sup>
200	1.12	1.61	400.0	1.54
208	1.12	1.61	420.0	1.62
216	1.12	1.61	420.0	1.62
224	1.12	1.61	420.0	1.62
232	1.12	1.61	420.0	1.62
240	1.12	1.61	420.0	1.62
248	1.12	1.61	410.0	1.58
256	1.12	1.61	410.0	1.58
264	1.12	1.61	410.0	1.58
272	1.12	1.61	430.0	1.66
280	1.12	1.61	420.0	1.62
288	1.12	1.61	410.0	1.58
296	1.12	1.61	420.0	1.62
304	1.12	1.61	410.0	1.58
312	1.12	1.61	410.0	1.58
320	1.12	1.61	400.0	1.54
328	1.12	1.61	420.0	1.62
336	1.12	1.61	410.0	1.58
344	1.12	1.61	400.0	1.54
352	1.12	1.61	400.0	1.54
360	1.12	1.61	400.0	1.54
368	1.12	1.61	400.0	1.54
376	1.12	1.61	400.0	1.54

ตารางที่ ข-3 ค่าฟลักซ์การทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา	UF	Flux	RO	Flux
(ชม.)	Q (m <sup>3</sup> /hr)	x 10 <sup>-8</sup>	Qp (l/min)	x 10 <sup>-5</sup>
384	1.12	1.61	400.0	1.54
392	1.12	1.61	400.0	1.54
400	1.12	1.61	410.0	1.58
เฉลี่ย		1.61		1.59



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ค  
การคำนวณร้อยละการกำจัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-1 ผลค่านวนหาร้อยละกำจัดของการทดลองที่ 1

ตัวแปร	เวลา	ฟลักซ์ $10^{-8}$ m/s	ร้อยละกำจัด					ซีไอดี
	(ชม.)		ความกระด้าง	สภาพด่าง	สภาพนำไฟฟ้า	คลอไรด์	ความขุ่น	
0.10 M Pa	2	2.17	5.0	-3.5	2.4	-0.8	83.6	5.4
	4	2.19	4.9	-6.6	5.7	-1.7	86.2	0.0
	6	2.19	2.2	-7.4	2.9	0.4	87.7	8.1
	8	2.19	0.7	-13.9	1.2	4.1	87.9	2.7
	เฉลี่ย	2.19					86.4	
0.15 M Pa	2	2.01	12.9	2.2	7.9	0.8	88.3	5.4
	4	1.99	4.9	1.1	1.5	3.3	88.2	-2.9
	6	1.99	15.5	1.7	0.5	1.3	88.4	2.9
	8	1.94	7.0	-0.6	0.7	2.9	88.1	3.0
	เฉลี่ย	1.98					88.3	
0.20 M Pa	2	1.73	4.2	5.4	-4.3	0.4	87.9	-2.9
	4	1.73	1.4	4.8	-0.8	0.8	88.0	0.0
	6	1.73	1.4	3.8	-1.5	1.7	88.3	-2.9
	8	1.73	1.4	0.0	2.8	1.3	88.0	-6.5
	เฉลี่ย	1.73					88.1	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-2 ผลค่านวนหาร้อยละกำจัดของการทดลองที่ 2

ตัวแปร	เวลา	ฟลักซ์	ร้อยละกำจัด					
	(ชม.)	$10^{-5}$ m/s	ความกระด้าง	สภาพด่าง	สภาพนำไฟฟ้า	คลอไรด์	ความขุ่น	ซีไอดี
60%	2	1.62	96.8	81.6	91.2	86.8	96.1	80.0
	4	1.58	96.8	83.8	93.8	87.6	98.6	77.8
	6	1.58	96.8	86.0	94.1	83.8	99.1	83.8
	8	1.58	96.8	85.4	93.6	83.7	99.2	75.8
	เฉลี่ย	1.59	96.8	84.2	93.2	85.5	98.3	79.3
70%	2	1.70	97.1	86.1	92.6	88.5	97.3	77.1
	4	1.70	97.3	88.5	93.4	89.2	98.4	80.6
	6	1.70	97.4	85.5	93.2	89.0	98.2	76.5
	8	1.70	97.3	86.4	93.4	89.4	99.0	80.6
	เฉลี่ย	1.70	97.3	86.6	93.1	89.0	98.2	78.7
80%	2	1.54	97.6	83.0	89.0	83.3	96.4	80.0
	4	1.54	97.5	83.5	89.4	85.0	98.1	76.5
	6	1.54	97.5	83.7	90.5	84.6	99.1	76.5
	8	1.54	97.4	84.2	90.4	85.7	99.0	76.3
	เฉลี่ย	1.54	97.5	83.6	89.8	84.7	98.2	77.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-3 ผลคำนวณหาร้อยละกำจัดของการทดลองที่ 3

เวลา (ชม.)	Flux $\times 10^{-5}$ m/s	ร้อยละกำจัด					
		การนำไฟฟ้า	ความกระด้าง	สภาพต่าง	คลอไรด์	ความขุ่น	ซีโอดี
8	1.62	83.9	96.8	78.4	85.2	95.2	65.2
16	1.62	91.4	96.4	77.9	83.8	95.0	83.3
24	1.54	90.9	94.8	76.5	82.4	96.1	82.6
32	1.58	87.9	96.0	83.6	83.2	94.6	80.0
40	1.58	87.7	96.0	73.9	83.5	91.4	80.0
48	1.58	89.8	95.5	82.5	82.4	93.2	68.2
56	1.54	89.1	94.8	81.3	81.4	93.8	81.0
64	1.58	89.3	95.0	80.6	80.7	93.3	76.2
72	1.62	79.4	90.2	79.5	72.8	93.3	73.7
80	1.62	87.7	92.6	80.9	79.2	96.9	60.0
88	1.62	86.6	91.5	80.8	78.7	98.2	55.0
96	1.62	87.6	92.0	80.4	80.4	96.6	68.2
104	1.62	86.5	91.7	81.6	79.0	96.5	68.8
112	1.62	89.0	92.7	80.3	67.8	97.3	40.0
120	1.62	86.3	92.2	76.2	74.1	99.0	58.8
128	1.62	84.5	92.2	75.0	73.8	99.1	75.0
136	1.66	83.9	88.3	71.4	75.9	98.2	42.9
144	1.54	81.3	92.6	67.5	73.1	98.6	43.8
152	1.62	74.9	90.7	64.9	62.8	97.3	81.3
160	1.62	82.7	89.7	66.7	73.3	99.1	52.9
168	1.62	84.1	91.1	66.1	73.7	98.5	52.9
176	1.58	83.4	89.7	66.7	71.4	99.1	46.2
184	1.66	81.7	82.7	62.3	61.7	97.3	35.7
192	1.66	73.3	88.7	68.5	70.8	96.4	42.9
200	1.54	80.9	88.7	71.4	70.7	96.3	46.2
208	1.62	84.4	90.3	61.5	74.6	97.2	40.0
216	1.62	84.4	89.7	63.5	73.6	96.2	58.8

ตารางที่ ค-3 ผลคำนวณหาร้อยละกำจัดของการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	Flux $\times 10^{-5}$ m/s	ร้อยละกำจัด					
		การนำไฟฟ้า	ความกระด้าง	สภาพต่าง	คลอไรด์	ความขุ่น	ซีโอดี
224	1.62	82.2	89.3	62.5	73.6	97.9	57.9
232	1.62	82.0	77.8	69.1	73.1	96.7	61.1
240	1.62	81.3	86.2	67.3	72.3	97.6	50.0
248	1.58	83.0	90.0	71.7	80.6	95.8	47.1
256	1.58	81.4	93.3	69.0	73.4	96.2	57.9
264	1.58	80.0	89.3	68.6	78.1	97.4	57.9
272	1.66	80.4	90.7	71.3	76.6	97.6	50.0
280	1.62	71.3	80.8	66.7	67.2	97.0	63.2
288	1.58	79.5	85.7	65.7	69.7	95.4	63.6
296	1.62	77.9	87.9	66.0	73.8	94.9	41.2
304	1.58	79.4	89.3	67.6	72.5	95.5	55.0
312	1.58	79.4	86.5	67.6	72.6	96.4	50.0
320	1.54	79.8	87.0	68.6	73.0	96.8	59.1
328	1.62	74.2	83.9	60.9	68.8	97.8	55.0
336	1.58	79.0	86.7	64.6	69.0	97.5	61.9
344	1.54	79.8	91.7	63.8	69.0	96.3	56.2
352	1.54	74.4	88.0	65.6	66.9	98.7	63.6
360	1.54	81.8	88.9	62.5	71.6	97.5	65.2
368	1.54	74.5	87.0	60.0	68.1	98.7	65.2
376	1.54	78.3	88.0	65.3	70.0	97.6	47.1
384	1.54	79.2	88.0	66.3	71.7	97.9	71.4
392	1.54	79.4	87.5	67.3	70.7	98.7	50.0
400	1.58	80.0	87.5	67.3	70.7	98.2	61.1
เฉลี่ย	1.59	82.2	89.9	70.5	74.1	96.8	59.4



ภาคผนวก ง  
การคำนวณหาค่า  $K_s$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ง-1 ผลการคำนวณหาค่า Ks ของความกระด้างจากการทดลองที่ 2

ตัวแปร	เวลา	ฟลักซ์ $10^{-5}$ m/s	ความกระด้าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )			Ks $10^{-5}$ m/s
	(ชม.)		feed	per	conc	
60%	2	1.62	126.0	4.0	342.0	0.05313
	4	1.58	124.0	4.0	340.0	0.05273
	6	1.58	124.0	4.0	348.0	0.05273
	8	1.58	124.0	4.0	348.0	0.05273
70%	2	1.70	136.0	4.0	428.0	0.05144
	4	1.70	146.0	4.0	466.0	0.04782
	6	1.70	152.0	4.0	498.0	0.04588
	8	1.70	150.0	4.0	495.0	0.04651
80%	2	1.54	168.0	4.0	776.0	0.03764
	4	1.54	162.0	4.0	812.0	0.03907
	6	1.54	158.0	4.0	812.0	0.04008
	8	1.54	155.0	4.0	820.0	0.04088
					ค่าเฉลี่ย	0.04672

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-2 ผลการคำนวณหาค่า Ks ของสภาพต่างจากการทดลองที่ 2

ตัวแปร	เวลา	ฟลักซ์	สภาพต่าง (mg/l CaCO <sub>3</sub> )			Ks
	(ชม.)	10 <sup>-5</sup> m/s	feed	per	conc	10 <sup>-5</sup> m/s
60%	2	1.62	250.0	46.0	740.0	0.36538
	4	1.58	284.0	46.0	700.0	0.30572
	6	1.58	300.0	42.0	720.0	0.25750
	8	1.58	302.0	44.0	720.0	0.26976
70%	2	1.70	316.0	44.0	860.0	0.27460
	4	1.70	312.0	36.0	930.0	0.22142
	6	1.70	332.0	48.0	1,050.0	0.28691
	8	1.70	324.0	44.0	980.0	0.26675
80%	2	1.54	330.0	56.0	1,415.0	0.31540
	4	1.54	340.0	56.0	1,440.0	0.30429
	6	1.54	344.0	56.0	1,470.0	0.30007
	8	1.54	354.0	56.0	1,510.0	0.29000
					ค่าเฉลี่ย	0.28815

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-3 ผลการคำนวณหาค่า Ks ของคลอไรด์จากการทดลองที่ 2

ตัวแปร	เวลา	ฟลักซ์	คลอไรด์ (mg/l Cl)			Ks
	(ชม.)	$10^{-5}$ m/s	feed	per	conc	$10^{-5}$ m/s
60%	2	1.62	318.0	42.0	1,040.0	0.24658
	4	1.58	354.0	44.0	915.0	0.22451
	6	1.58	272.0	44.0	940.0	0.30526
	8	1.58	270.0	44.0	930.0	0.30796
70%	2	1.70	384.0	44.0	1,125.0	0.21968
	4	1.70	408.0	44.0	1,225.0	0.20520
	6	1.70	420.0	46.0	1,275.0	0.20879
	8	1.70	414.0	44.0	1,260.0	0.20187
80%	2	1.54	420.0	70.0	1,870.0	0.30864
	4	1.54	480.0	72.0	1,895.0	0.27233
	6	1.54	442.0	68.0	1,850.0	0.28058
	8	1.54	460.0	66.0	1,910.0	0.25851
					ค่าเฉลี่ย	0.25333

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

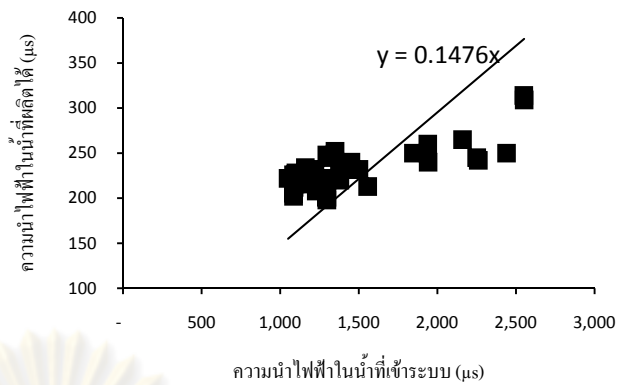
ตารางที่ ง-4 ผลการคำนวณหาค่า Ks ของการนำไฟฟ้าจากการทดลองที่ 2

ตัวแปร	เวลา	ฟลักซ์	สภาพนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}$ )			Ks
	(ชม.)	$10^{-5} \text{ m/s}$	feed	per	conc	$10^{-5} \text{ m/s}$
60%	2	1.62	2,650	232	8,310	0.15547
	4	1.58	3,120	192	7,480	0.10367
	6	1.58	3,290	193	7,850	0.09863
	8	1.58	3,100	198	7,650	0.10792
70%	2	1.70	3,340	248	9,150	0.13615
	4	1.70	3,570	237	9,860	0.12071
	6	1.70	3,680	252	10,640	0.12479
	8	1.70	3,720	244	10,440	0.11916
80%	2	1.54	3,650	400	15,250	0.18993
	4	1.54	3,850	408	15,250	0.18293
	6	1.54	3,650	347	15,050	0.16212
	8	1.54	3,750	360	15,120	0.16388
					ค่าเฉลี่ย	0.13878

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-5 ผลการคำนวณหาค่า  $K_s$  ของการนำไฟฟ้าจากการทดลองที่ 3

จากรูปสามารถเขียนสมการได้  
ค่า  $Z = 0.1476$



เวลา (ชม.)	การนำไฟฟ้า		Flux $10^{-5}$ m/s	RO		R	Ks ( $10^{-6}$ m/s)		
	น้ำเข้า	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
8	3,180	512	1.62	630.0	420.0	0.66667	1.40290	1.45133	1.68684
16	2,870	246	1.62	630.0	420.0	0.66667	1.40290	1.45133	1.68684
24	2,700	245	1.54	620.0	400.0	0.64516	1.39972	1.41834	1.64984
32	2,552	309	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788
40	2,550	314	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788
48	2,440	250	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788
56	2,250	245	1.54	620.0	400.0	0.64516	1.39972	1.41834	1.64984
64	2,260	242	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788
72	2,120	437	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
80	2,160	265	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
88	1,939	260	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
96	1,941	240	1.62	630.0	420.0	0.66667	1.40290	1.45133	1.68684
104	1,848	250	1.62	630.0	420.0	0.66667	1.40290	1.45133	1.68684
112	1,562	172	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
120	1,557	213	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
128	1,501	232	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
136	1,437	232	1.66	640.0	430.0	0.67188	1.41941	1.47633	1.71554
144	1,349	252	1.54	600.0	400.0	0.66667	1.33610	1.38222	1.60651
152	1,437	361	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
160	1,377	238	1.62	630.0	420.0	0.66667	1.40290	1.45133	1.68684
168	1,380	220	1.62	630.0	420.0	0.66667	1.40290	1.45133	1.68684
176	1,450	240	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788

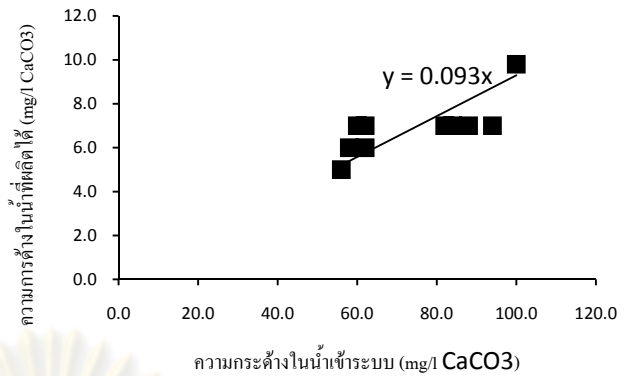
ตารางที่ ง-5 ผลการคำนวณหาค่า Ks ของการนำไฟฟ้าจากการทดลองที่ 3(ต่อ)

เวลา (ชม.)	การนำไฟฟ้า		Flux $10^{-5}$ m/s	RO		R	Ks ( $10^{-6}$ m/s)		
	น้ำเข้า	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
184	1,337	245	1.66	640.0	430.0	0.67188	1.41941	1.47633	1.71554
192	1,298	347	1.66	640.0	430.0	0.67188	1.41941	1.47633	1.71554
200	1,297	248	1.54	620.0	400.0	0.64516	1.39972	1.41834	1.64984
208	1,273	198	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
216	1,290	201	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
224	1,190	212	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
232	1,230	222	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
240	1,213	227	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
248	1,221	208	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788
256	1,162	216	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788
264	1,160	232	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788
272	1,100	216	1.66	640.0	430.0	0.67188	1.41941	1.47633	1.71554
280	1,096	315	1.62	640.0	420.0	0.65625	1.43553	1.46982	1.70902
288	1,143	234	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788
296	1,140	252	1.62	620.0	420.0	0.67742	1.36868	1.43199	1.66365
304	1,050	216	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788
312	1,100	227	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788
320	1,100	222	1.54	620.0	400.0	0.64516	1.39972	1.41834	1.64984
328	1,064	274	1.62	640.0	420.0	0.65625	1.43553	1.46982	1.70902
336	1,085	228	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788
344	1,089	220	1.54	600.0	400.0	0.66667	1.33610	1.38222	1.60651
352	1,100	282	1.54	600.0	400.0	0.66667	1.33610	1.38222	1.60651
360	1,069	195	1.54	620.0	400.0	0.64516	1.39972	1.41834	1.64984
368	1,053	269	1.54	600.0	400.0	0.66667	1.33610	1.38222	1.60651
376	1,040	226	1.54	610.0	400.0	0.65574	1.36868	1.40069	1.62867
384	1,020	212	1.54	610.0	400.0	0.65574	1.36868	1.40069	1.62867
392	1,000	206	1.54	620.0	400.0	0.64516	1.39972	1.41834	1.64984
400	1,010	202	1.58	620.0	410.0	0.66129	1.38600	1.42612	1.65788
							1.38514	1.43097	1.66327



ตารางที่ ง-6 ผลการคำนวณหาค่า Ks ของความกระด้างจากการทดลองที่ 3

จากรูปสามารถเขียนสมการได้  
ค่า  $Z = 0.093$



เวลา (ชม.)	ความกระด้าง		Flux $10^{-5}$ m/s	RO		R	Ks ( $10^{-6}$ m/s)		
	น้ำเข้า	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
8	154.0	5.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	0.83073	0.91445	1.00243
16	138.0	5.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	0.83073	0.91445	1.00243
24	96.0	5.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	0.82885	0.89367	0.98014
32	126.0	5.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515
40	126.0	5.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515
48	112.0	5.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515
56	96.0	5.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	0.82885	0.89367	0.98014
64	100.0	5.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515
72	100.0	9.8	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
80	94.0	7.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
88	82.0	7.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
96	88.0	7.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	0.83073	0.91445	1.00243
104	84.0	7.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	0.83073	0.91445	1.00243
112	82.0	6.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
120	64.0	5.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
128	64.0	5.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
136	60.0	7.0	1.66	640.0	430.0	0.67188	0.84050	0.93021	1.01957
144	54.0	4.0	1.54	600.0	400.0	0.66667	0.79117	0.87091	0.95470
152	54.0	5.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
160	58.0	6.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	0.83073	0.91445	1.00243
168	56.0	5.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	0.83073	0.91445	1.00243
176	58.0	6.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515

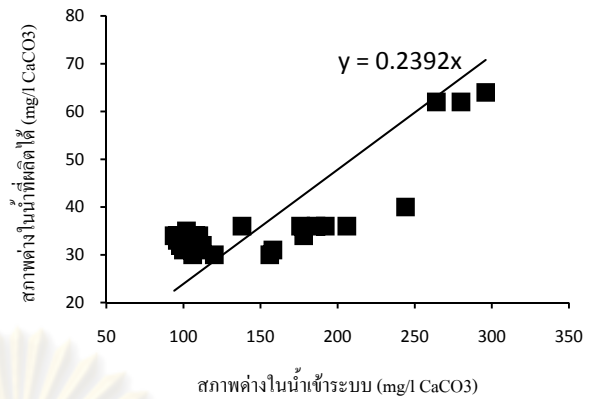
ตารางที่ ง-6 ผลการคำนวณหาค่า Ks ของความกระด้างจากการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	ความกระด้าง		Flux 10 <sup>-5</sup> m/s	RO		R	Ks (10 <sup>-6</sup> m/s)		
	น้ำเข้า	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
184	52.0	9.0	1.66	640.0	430.0	0.67188	0.84050	0.93021	1.01957
192	62.0	7.0	1.66	640.0	430.0	0.67188	0.84050	0.93021	1.01957
200	62.0	7.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	0.82885	0.89367	0.98014
208	62.0	6.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
216	58.0	6.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
224	56.0	6.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
232	54.0	12.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
240	58.0	8.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
248	60.0	6.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515
256	60.0	4.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515
264	56.0	6.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515
272	54.0	5.0	1.66	640.0	430.0	0.67188	0.84050	0.93021	1.01957
280	52.0	10.0	1.62	640.0	420.0	0.65625	0.85005	0.92610	1.01545
288	56.0	8.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515
296	58.0	7.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	0.81047	0.90227	0.98882
304	56.0	6.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515
312	52.0	7.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515
320	54.0	7.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	0.82885	0.89367	0.98014
328	62.0	10.0	1.62	640.0	420.0	0.65625	0.85005	0.92610	1.01545
336	60.0	8.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515
344	60.0	5.0	1.54	600.0	400.0	0.66667	0.79117	0.87091	0.95470
352	50.0	6.0	1.54	600.0	400.0	0.66667	0.79117	0.87091	0.95470
360	54.0	6.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	0.82885	0.89367	0.98014
368	54.0	7.0	1.54	600.0	400.0	0.66667	0.79117	0.87091	0.95470
376	50.0	6.0	1.54	610.0	400.0	0.65574	0.81047	0.88255	0.96771
384	50.0	6.0	1.54	610.0	400.0	0.65574	0.81047	0.88255	0.96771
392	48.0	6.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	0.82885	0.89367	0.98014
400	48.0	6.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	0.82072	0.89857	0.98515
							0.82021	0.90163	0.98841

ตารางที่ ง-7 ผลการคำนวณหาค่า  $K_s$  ของสภาพต่างจากการทดลองที่ 3

จากรูปสามารถเขียนสมการได้

ค่า  $Z = 0.2392$



เวลา (ชม.)	สภาพต่าง		Flux $10^{-5}$ m/s	RO		R	$K_s$ ( $10^{-6}$ m/s)		
	น้ำเข้า	น้ำสะอาด		$Q_f$ (l/min)	$Q_p$ (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
8	296.0	64.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	2.54727	2.35201	3.04347
16	280.0	62.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	2.54727	2.35201	3.04347
24	264.0	62.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	2.54149	2.29856	2.97843
32	244.0	40.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167
40	138.0	36.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167
48	206.0	36.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167
56	192.0	36.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	2.54149	2.29856	2.97843
64	186.0	36.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167
72	176.0	36.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
80	178.0	34.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
88	156.0	30.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
96	158.0	31.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	2.54727	2.35201	3.04347
104	152.0	28.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	2.54727	2.35201	3.04347
112	132.0	26.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
120	122.0	29.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
128	120.0	30.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
136	112.0	32.0	1.66	640.0	430.0	0.67188	2.57724	2.39253	3.09481
144	120.0	39.0	1.54	600.0	400.0	0.66667	2.42597	2.24001	2.89854
152	114.0	40.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
160	108.0	36.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	2.54727	2.35201	3.04347
168	112.0	38.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	2.54727	2.35201	3.04347
176	120.0	40.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167

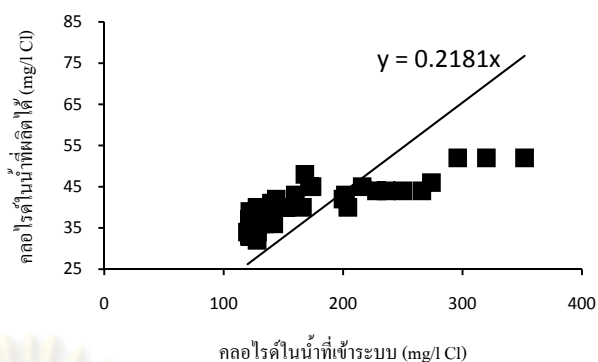
ตารางที่ ง-7 ผลการคำนวณหาค่า Ks ของสภาพต่างจากการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	สภาพต่าง		Flux 10 <sup>-5</sup> m/s	RO		R	Ks (10 <sup>-6</sup> m/s)		
	น้ำเข้า	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
184	106.0	40.0	1.66	640.0	430.0	0.67188	2.57724	2.39253	3.09481
192	108.0	34.0	1.66	640.0	430.0	0.67188	2.57724	2.39253	3.09481
200	112.0	32.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	2.54149	2.29856	2.97843
208	104.0	40.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
216	104.0	38.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
224	96.0	36.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
232	110.0	34.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
240	98.0	32.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
248	106.0	30.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167
256	100.0	31.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167
264	102.0	32.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167
272	108.0	31.0	1.66	640.0	430.0	0.67188	2.57724	2.39253	3.09481
280	102.0	34.0	1.62	640.0	420.0	0.65625	2.60651	2.38198	3.08436
288	102.0	35.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167
296	100.0	34.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.48514	2.32068	3.00072
304	102.0	33.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167
312	102.0	33.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167
320	102.0	32.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	2.54149	2.29856	2.97843
328	92.0	36.0	1.62	640.0	420.0	0.65625	2.60651	2.38198	3.08436
336	96.0	34.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167
344	94.0	34.0	1.54	600.0	400.0	0.66667	2.42597	2.24001	2.89854
352	96.0	33.0	1.54	600.0	400.0	0.66667	2.42597	2.24001	2.89854
360	96.0	36.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	2.54149	2.29856	2.97843
368	100.0	40.0	1.54	600.0	400.0	0.66667	2.42597	2.24001	2.89854
376	98.0	34.0	1.54	610.0	400.0	0.65574	2.48514	2.26995	2.93939
384	98.0	33.0	1.54	610.0	400.0	0.65574	2.48514	2.26995	2.93939
392	98.0	32.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	2.54149	2.29856	2.97843
400	98.0	32.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.51658	2.31116	2.99167
							2.51502	2.31903	3.00107

ตารางที่ ง-8 ผลการคำนวณหาค่า Ks ของคลอรีนจากการทดลองที่ 3

จากรูปสามารถเขียนสมการได้

ค่า  $Z = 0.2181$



เวลา (ชม.)	คลอรีน		Flux $10^{-5}$ m/s	RO		R	Ks ( $10^{-6}$ m/s)		
	น้ำเข้า	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
8	352.0	52.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	2.25990	2.14454	2.70417
16	320.0	52.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	2.25990	2.14454	2.70417
24	296.0	52.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	2.25477	2.09580	2.64602
32	274.0	46.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805
40	266.0	44.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805
48	250.0	44.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805
56	236.0	44.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	2.25477	2.09580	2.64602
64	228.0	44.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805
72	206.0	56.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
80	216.0	45.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
88	202.0	43.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
96	204.0	40.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	2.25990	2.14454	2.70417
104	200.0	42.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	2.25990	2.14454	2.70417
112	180.0	58.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
120	174.0	45.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
128	172.0	45.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
136	166.0	40.0	1.66	640.0	430.0	0.67188	2.28648	2.18148	2.74988
144	160.0	43.0	1.54	600.0	400.0	0.66667	2.15228	2.04242	2.57540
152	156.0	58.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
160	150.0	40.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	2.25990	2.14454	2.70417
168	152.0	40.0	1.62	630.0	420.0	0.66667	2.25990	2.14454	2.70417
176	168.0	48.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805

ตารางที่ ง-8 ผลการคำนวณหาค่า Ks ของคลอรีนจากการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เวลา (ชม.)	คลอรีน		Flux $10^{-5}$ m/s	RO		R	Ks ( $10^{-6}$ m/s)		
	น้ำเข้า	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
184	154.0	59.0	1.66	640.0	430.0	0.67188	2.28648	2.18148	2.74988
192	144.0	42.0	1.66	640.0	430.0	0.67188	2.28648	2.18148	2.74988
200	140.0	41.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	2.25477	2.09580	2.64602
208	142.0	36.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
216	140.0	37.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
224	140.0	37.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
232	134.0	36.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
240	130.0	36.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
248	134.0	26.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805
256	128.0	34.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805
264	128.0	28.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805
272	128.0	30.0	1.66	640.0	430.0	0.67188	2.28648	2.18148	2.74988
280	122.0	40.0	1.62	640.0	420.0	0.65625	2.31245	2.17187	2.74032
288	122.0	37.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805
296	122.0	32.0	1.62	620.0	420.0	0.67742	2.20478	2.11598	2.66639
304	120.0	33.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805
312	124.0	34.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805
320	126.0	34.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	2.25477	2.09580	2.64602
328	112.0	35.0	1.62	640.0	420.0	0.65625	2.31245	2.17187	2.74032
336	116.0	36.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805
344	116.0	36.0	1.54	600.0	400.0	0.66667	2.15228	2.04242	2.57540
352	118.0	39.0	1.54	600.0	400.0	0.66667	2.15228	2.04242	2.57540
360	116.0	33.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	2.25477	2.09580	2.64602
368	116.0	37.0	1.54	600.0	400.0	0.66667	2.15228	2.04242	2.57540
376	120.0	36.0	1.54	610.0	400.0	0.65574	2.20478	2.06971	2.61151
384	120.0	34.0	1.54	610.0	400.0	0.65574	2.20478	2.06971	2.61151
392	116.0	34.0	1.54	620.0	400.0	0.64516	2.25477	2.09580	2.64602
400	116.0	34.0	1.58	620.0	410.0	0.66129	2.23267	2.10729	2.65805
							2.23129	2.11447	2.66647



ตารางที่ ง-9 จำนวนค่าความกระด้างของน้ำสะอาดจากสมการ

เวลา (ชม.)	จากการทดลอง		Flux $10^{-5}$ m/s	RO			น้ำสะอาด (mg/l CaCO <sub>3</sub> )		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)	R	สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
8	154.0	5.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	14.2	12.8	14.1
16	138.0	5.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	12.7	11.5	12.7
24	96.0	5.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	8.8	8.2	9.0
32	126.0	5.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	11.7	10.7	11.8
40	126.0	5.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	11.7	10.7	11.8
48	112.0	5.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	10.4	9.5	10.4
56	96.0	5.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	8.8	8.2	9.0
64	100.0	5.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	9.3	8.5	9.3
72	100.0	9.8	1.62	620.0	420.0	0.6774	9.4	8.4	9.3
80	94.0	7.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	8.8	7.9	8.7
88	82.0	7.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	7.7	6.9	7.6
96	88.0	7.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	8.1	7.3	8.1
104	84.0	7.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	7.7	7.0	7.7
112	82.0	6.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	7.7	6.9	7.6
120	64.0	5.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	6.0	5.4	5.9
128	64.0	5.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	6.0	5.4	5.9
136	60.0	7.0	1.66	640.0	430.0	0.6719	5.5	4.9	5.4
144	54.0	4.0	1.54	600.0	400.0	0.6667	5.2	4.7	5.2
152	54.0	5.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	5.1	4.6	5.0
160	58.0	6.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	5.3	4.8	5.3
168	56.0	5.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	5.1	4.7	5.1
176	58.0	6.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	5.4	4.9	5.4
184	52.0	9.0	1.66	640.0	430.0	0.6719	4.7	4.3	4.7
192	62.0	7.0	1.66	640.0	430.0	0.6719	5.6	5.1	5.6
200	62.0	7.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	5.7	5.3	5.8

ตารางที่ ง-9 จำนวนค่าความกระด้างของน้ำสะอาดจากสมการ (ต่อ)

เวลา (ชม.)	จากการทดลอง		Flux $10^{-5}$ m/s	RO			น้ำสะอาด (mg/l CaCO <sub>3</sub> )		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)	R	สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
208	62.0	6.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	5.8	5.2	5.8
216	58.0	6.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	5.5	4.9	5.4
224	56.0	6.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	5.3	4.7	5.2
232	54.0	12.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	5.1	4.6	5.0
240	58.0	8.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	5.5	4.9	5.4
248	60.0	6.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	5.6	5.1	5.6
256	60.0	4.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	5.6	5.1	5.6
264	56.0	6.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	5.2	4.7	5.2
272	54.0	5.0	1.66	640.0	430.0	0.6719	4.9	4.4	4.9
280	52.0	10.0	1.62	640.0	420.0	0.6563	4.7	4.3	4.7
288	56.0	8.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	5.2	4.7	5.2
296	58.0	7.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	5.5	4.9	5.4
304	56.0	6.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	5.2	4.7	5.2
312	52.0	7.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	4.8	4.4	4.9
320	54.0	7.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	5.0	4.6	5.1
328	62.0	10.0	1.62	640.0	420.0	0.6563	5.6	5.1	5.6
336	60.0	8.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	5.6	5.1	5.6
344	60.0	5.0	1.54	600.0	400.0	0.6667	5.8	5.2	5.8
352	50.0	6.0	1.54	600.0	400.0	0.6667	4.8	4.4	4.8
360	54.0	6.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	5.0	4.6	5.1
368	54.0	7.0	1.54	600.0	400.0	0.6667	5.2	4.7	5.2
376	50.0	6.0	1.54	610.0	400.0	0.6557	4.7	4.3	4.7
384	50.0	6.0	1.54	610.0	400.0	0.6557	4.7	4.3	4.7
392	48.0	6.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	4.4	4.1	4.5
400	48.0	6.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	4.5	4.1	4.5

ตารางที่ ง-10 จำนวนค่าสภาพต่างของน้ำสะอาดจากสมการ

เวลา (ชม.)	จากการทดลอง		Flux $10^{-5}$ m/s	RO		R	น้ำสะอาด (mg/l CaCO <sub>3</sub> )		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
8	296.0	64.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	62.1	55.6	70.0
16	280.0	62.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	58.7	52.6	66.2
24	264.0	62.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	55.5	50.6	63.5
32	244.0	40.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	51.7	46.5	58.5
40	138.0	36.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	29.2	26.3	33.1
48	206.0	36.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	43.6	39.3	49.4
56	192.0	36.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	40.3	36.8	46.2
64	186.0	36.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	39.4	35.5	44.6
72	176.0	36.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	37.6	33.4	42.1
80	178.0	34.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	38.1	33.8	42.6
88	156.0	30.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	33.4	29.6	37.3
96	158.0	31.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	33.1	29.7	37.4
104	152.0	28.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	31.9	28.6	36.0
112	132.0	26.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	28.2	25.0	31.6
120	122.0	29.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	26.1	23.1	29.2
128	120.0	30.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	25.7	22.8	28.7
136	112.0	32.0	1.66	640.0	430.0	0.6719	23.3	20.7	26.2
144	120.0	39.0	1.54	600.0	400.0	0.6667	26.2	23.4	29.5
152	114.0	40.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	24.4	21.6	27.3
160	108.0	36.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	22.7	20.3	25.5
168	112.0	38.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	23.5	21.0	26.5
176	120.0	40.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	25.4	22.9	28.8
184	106.0	40.0	1.66	640.0	430.0	0.6719	22.0	19.6	24.8
192	108.0	34.0	1.66	640.0	430.0	0.6719	22.4	20.0	25.2
200	112.0	32.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	23.5	21.5	26.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-10 จำนวนค่าสภาพต่างของน้ำสะอาดจากสมการ (ต่อ)

เวลา (ชม.)	จากการทดลอง		Flux $10^{-5}$ m/s	RO		R	น้ำสะอาด (mg/l CaCO <sub>3</sub> )		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
208	104.0	40.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	22.2	19.7	24.9
216	104.0	38.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	22.2	19.7	24.9
224	96.0	36.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	20.5	18.2	23.0
232	110.0	34.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	23.5	20.9	26.3
240	98.0	32.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	21.0	18.6	23.4
248	106.0	30.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	22.4	20.2	25.4
256	100.0	31.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	21.2	19.1	24.0
264	102.0	32.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	21.6	19.4	24.5
272	108.0	31.0	1.66	640.0	430.0	0.6719	22.4	20.0	25.2
280	102.0	34.0	1.62	640.0	420.0	0.6563	21.0	19.0	23.9
288	102.0	35.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	21.6	19.4	24.5
296	100.0	34.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	21.4	19.0	23.9
304	102.0	33.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	21.6	19.4	24.5
312	102.0	33.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	21.6	19.4	24.5
320	102.0	32.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	21.4	19.6	24.5
328	92.0	36.0	1.62	640.0	420.0	0.6563	18.9	17.1	21.5
336	96.0	34.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	20.3	18.3	23.0
344	94.0	34.0	1.54	600.0	400.0	0.6667	20.5	18.4	23.1
352	96.0	33.0	1.54	600.0	400.0	0.6667	20.9	18.8	23.6
360	96.0	36.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	20.2	18.4	23.1
368	100.0	40.0	1.54	600.0	400.0	0.6667	21.8	19.5	24.6
376	98.0	34.0	1.54	610.0	400.0	0.6557	21.0	19.0	23.8
384	98.0	33.0	1.54	610.0	400.0	0.6557	21.0	19.0	23.8
392	98.0	32.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	20.6	18.8	23.6
400	98.0	32.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	20.8	18.7	23.5

ตารางที่ ง-11 จำนวนค่าคลอไรด์ของน้ำสะอาดจากสมการ

เวลา (ชม.)	จากการทดลอง		Flux $10^{-5}$ m/s	RO		R	น้ำสะอาด (mg/l Cl)		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
8	352.0	52.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	76.0	61.4	50.6
16	320.0	52.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	69.1	55.8	46.0
24	296.0	52.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	64.0	52.7	41.9
32	274.0	46.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	59.7	48.5	39.6
40	266.0	44.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	58.0	47.1	38.5
48	250.0	44.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	54.5	44.2	36.1
56	236.0	44.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	51.1	42.0	33.4
64	228.0	44.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	49.7	40.3	33.0
72	206.0	56.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	45.4	36.3	30.4
80	216.0	45.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	47.6	38.0	31.9
88	202.0	43.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	44.5	35.6	29.8
96	204.0	40.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	44.1	35.6	29.3
104	200.0	42.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	43.2	34.9	28.8
112	180.0	58.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	39.6	31.7	26.6
120	174.0	45.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	38.3	30.6	25.7
128	172.0	45.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	37.9	30.3	25.4
136	166.0	40.0	1.66	640.0	430.0	0.6719	35.5	28.5	23.7
144	160.0	43.0	1.54	600.0	400.0	0.6667	35.9	29.0	23.9
152	156.0	58.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	34.3	27.5	23.0
160	150.0	40.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	32.4	26.2	21.6
168	152.0	40.0	1.62	630.0	420.0	0.6667	32.8	26.5	21.9
176	168.0	48.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	36.6	29.7	24.3
184	154.0	59.0	1.66	640.0	430.0	0.6719	33.0	26.5	22.0
192	144.0	42.0	1.66	640.0	430.0	0.6719	30.8	24.8	20.6
200	140.0	41.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	30.3	24.9	19.8

ตารางที่ ง-11 จำนวนค่าคลอไรด์ของน้ำสะอาดจากสมการ (ต่อ)

เวลา (ชม.)	จากการทดลอง		Flux $10^{-5}$ m/s	RO		R	น้ำสะอาด (mg/l Cl)		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
208	142.0	36.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	31.3	25.0	21.0
216	140.0	37.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	30.8	24.7	20.7
224	140.0	37.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	30.8	24.7	20.7
232	134.0	36.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	29.5	23.6	19.8
240	130.0	36.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	28.6	22.9	19.2
248	134.0	26.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	29.2	23.7	19.4
256	128.0	34.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	27.9	22.7	18.5
264	128.0	28.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	27.9	22.7	18.5
272	128.0	30.0	1.66	640.0	430.0	0.6719	27.4	22.0	18.3
280	122.0	40.0	1.62	640.0	420.0	0.6563	25.9	21.1	17.1
288	122.0	37.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	26.6	21.6	17.6
296	122.0	32.0	1.62	620.0	420.0	0.6774	26.9	21.5	18.0
304	120.0	33.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	26.2	21.2	17.4
312	124.0	34.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	27.0	21.9	17.9
320	126.0	34.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	27.3	22.4	17.8
328	112.0	35.0	1.62	640.0	420.0	0.6563	23.8	19.3	15.7
336	116.0	36.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	25.3	20.5	16.8
344	116.0	36.0	1.54	600.0	400.0	0.6667	26.0	21.0	17.3
352	118.0	39.0	1.54	600.0	400.0	0.6667	26.5	21.4	17.6
360	116.0	33.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	25.1	20.6	16.4
368	116.0	37.0	1.54	600.0	400.0	0.6667	26.0	21.0	17.3
376	120.0	36.0	1.54	610.0	400.0	0.6557	26.4	21.6	17.4
384	120.0	34.0	1.54	610.0	400.0	0.6557	26.4	21.6	17.4
392	116.0	34.0	1.54	620.0	400.0	0.6452	25.1	20.6	16.4
400	116.0	34.0	1.58	620.0	410.0	0.6613	25.3	20.5	16.8



ตารางที่ ง-12 จำนวนค่าการนำไฟฟ้าของน้ำสะอาดจากสมการ

เวลา (ชม.)	จากการทดลอง		Flux $10^{-5}$ m/s	RO		R	น้ำสะอาด ( $\mu$ S)		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
8	3,180	512	1.62	630.0	420.0	0.6667	464.3	399.4	463.7
16	2,870	246	1.62	630.0	420.0	0.6667	419.0	360.5	418.5
24	2,700	245	1.54	620.0	400.0	0.6452	395.0	346.4	401.3
32	2,552	309	1.58	620.0	410.0	0.6613	376.5	325.5	377.7
40	2,550	314	1.58	620.0	410.0	0.6613	376.2	325.3	377.4
48	2,440	250	1.58	620.0	410.0	0.6613	360.0	311.3	361.1
56	2,250	245	1.54	620.0	400.0	0.6452	329.1	288.7	334.4
64	2,260	242	1.58	620.0	410.0	0.6613	333.4	288.3	334.5
72	2,120	437	1.62	620.0	420.0	0.6774	316.1	269.2	312.9
80	2,160	265	1.62	620.0	420.0	0.6774	322.1	274.3	318.8
88	1,939	260	1.62	620.0	420.0	0.6774	289.1	246.2	286.1
96	1,941	240	1.62	630.0	420.0	0.6667	283.4	243.8	283.0
104	1,848	250	1.62	630.0	420.0	0.6667	269.8	232.1	269.5
112	1,562	172	1.62	620.0	420.0	0.6774	232.9	198.3	230.5
120	1,557	213	1.62	620.0	420.0	0.6774	232.2	197.7	229.8
128	1,501	232	1.62	620.0	420.0	0.6774	223.8	190.6	221.5
136	1,437	232	1.66	640.0	430.0	0.6719	207.7	177.8	206.5
144	1,349	252	1.54	600.0	400.0	0.6667	205.3	176.7	205.1
152	1,437	361	1.62	620.0	420.0	0.6774	214.3	182.5	212.1
160	1,377	238	1.62	630.0	420.0	0.6667	201.0	173.0	200.8
168	1,380	220	1.62	630.0	420.0	0.6667	201.5	173.3	201.2
176	1,450	240	1.58	620.0	410.0	0.6613	213.9	185.0	214.6
184	1,337	245	1.66	640.0	430.0	0.6719	193.3	165.4	192.1
192	1,298	347	1.66	640.0	430.0	0.6719	187.6	160.6	186.5
200	1,297	248	1.54	620.0	400.0	0.6452	189.7	166.4	192.8

ตารางที่ ง-12 จำนวนค่าการนำไฟฟ้าของน้ำสะอาดจากสมการ (ต่อ)

เวลา (ชม.)	จากการทดลอง		Flux $10^{-5}$ m/s	RO		R	น้ำสะอาด ( $\mu$ S)		
	น้ำเข้าระบบ	น้ำสะอาด		Qf (l/min)	Qp (l/min)		สมการที่ 1	สมการที่ 2	สมการที่ 3
208	1,273	198	1.62	620.0	420.0	0.6774	189.8	161.6	187.9
216	1,290	201	1.62	620.0	420.0	0.6774	192.4	163.8	190.4
224	1,190	212	1.62	620.0	420.0	0.6774	177.4	151.1	175.6
232	1,230	222	1.62	620.0	420.0	0.6774	183.4	156.2	181.5
240	1,213	227	1.62	620.0	420.0	0.6774	180.9	154.0	179.0
248	1,221	208	1.58	620.0	410.0	0.6613	180.1	155.8	180.7
256	1,162	216	1.58	620.0	410.0	0.6613	171.4	148.2	172.0
264	1,160	232	1.58	620.0	410.0	0.6613	171.1	148.0	171.7
272	1,100	216	1.66	640.0	430.0	0.6719	159.0	136.1	158.1
280	1,096	315	1.62	640.0	420.0	0.6563	156.9	136.3	158.0
288	1,143	234	1.58	620.0	410.0	0.6613	168.6	145.8	169.2
296	1,140	252	1.62	620.0	420.0	0.6774	170.0	144.8	168.2
304	1,050	216	1.58	620.0	410.0	0.6613	154.9	133.9	155.4
312	1,100	227	1.58	620.0	410.0	0.6613	162.3	140.3	162.8
320	1,100	222	1.54	620.0	400.0	0.6452	160.9	141.1	163.5
328	1,064	274	1.62	640.0	420.0	0.6563	152.3	132.3	153.4
336	1,085	228	1.58	620.0	410.0	0.6613	160.1	138.4	160.6
344	1,089	220	1.54	600.0	400.0	0.6667	165.7	142.7	165.6
352	1,100	282	1.54	600.0	400.0	0.6667	167.4	144.1	167.3
360	1,069	195	1.54	620.0	400.0	0.6452	156.4	137.1	158.9
368	1,053	269	1.54	600.0	400.0	0.6667	160.3	137.9	160.1
376	1,040	226	1.54	610.0	400.0	0.6557	155.1	134.8	156.3
384	1,020	212	1.54	610.0	400.0	0.6557	152.1	132.2	153.3
392	1,000	206	1.54	620.0	400.0	0.6452	146.3	128.3	148.6
400	1,010	202	1.58	620.0	410.0	0.6613	149.0	128.8	149.5



ภาคผนวก จ  
มาตรฐานน้ำทิ้งที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมฟอกย้อม

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## มาตรฐานน้ำทิ้งที่เหมาะสมสำหรับโรงงานฟอกย้อม

### 1. มาตรฐานน้ำทิ้งของหน่วยงานต่างๆ

มาตรฐานน้ำทิ้งปัจจุบันที่ควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อม ก่อนที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ จากกรมโรงงานอุตสาหกรรม กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และกรมเจ้าท่า สรุปได้ดังตารางที่ จ-1 สำหรับมาตรฐานน้ำทิ้งของประเทศต่างๆ แสดงดังตารางที่ จ-2

ตารางที่ จ-1 มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม ลำดับที่ 22(1) และ 22(3) ก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ดัชนีวิเคราะห์	มาตรฐานน้ำทิ้ง			
	กรมโรงงานอุตสาหกรรม <sup>1</sup>	กรมควบคุมมลพิษ <sup>2</sup>	กรมชลประทาน <sup>3</sup>	กรมเจ้าท่า <sup>4</sup>
พีเอช	5.5 – 9.0	5.5 – 9.0	6.5 – 8.5	5 - 9
บีโอดี (มก./ล.)	≤ 60	≤ 60	≤ 20	≤ 20 - 60
ซีโอดี (มก./ล.)	≤ 400	≤ 400	-	-
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	≤ 50	≤ 50	≤ 30	-
ทีเคเอ็น (มก./ล.)	≤ 100	≤ 100	-	-
ไขมัน และน้ำมัน (มก./ล.)	≤ 5	≤ 5	≤ 50	-
ปริมาณสี	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	-

#### หมายเหตุ :

ที่มา “1” ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 เรื่องกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน และประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ให้มีค่าแตกต่างจากที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539)

ที่มา “2” ประกาศคณะกรรมการควบคุมมลพิษ วันที่ 20 สิงหาคม 2539 และประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539) เรื่องกำหนดมาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ที่มา “3” มาตรการป้องกันและแก้ไขการระบายน้ำที่มีคุณภาพต่ำลงทางน้ำชลประทานและทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน

ที่มา “4” กรมเจ้าท่า ม.119 เรื่องห้ามระบายของเสีย ขยะมูลฝอยลงแหล่งน้ำที่เกิดขวางการเดินเรือและทำลายสิ่งแวดล้อม  
ตารางที่ จ-2 มาตรฐานน้ำทิ้งของประเทศต่างๆ

ประเทศ	ดัชนีเคราะห์						
	บีโอดี (มก./ล.)	ซีโอดี (มก./ล.)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ทีเคเอ็น (มก./ล.)	ไขมัน และ น้ำมัน (มก./ล.)	ปริมาณสี	
เกาหลี	$\leq 50 - 100$	$\leq 80 - 100$	$\leq 80 - 100$	ไม่ได้กำหนด	ไม่ได้กำหนด	ไม่ได้กำหนด	
ญี่ปุ่น	$\leq 160$ (โดยเฉลี่ยต่อ วัน ไม่เกิน 120)	$\leq 160$ (โดยเฉลี่ยต่อ วัน ไม่เกิน 120)	$\leq 200$ (โดยเฉลี่ยต่อ วัน ไม่เกิน 150)	ไม่ได้กำหนด <sup>ก</sup>	ไม่ได้กำหนด	ไม่ได้กำหนด	
เยอรมัน	$\leq 30^{\text{ก}}$	$\leq 200^{\text{ก}}$	$\leq 40^{\text{ก}}$	ไม่ได้กำหนด <sup>ก</sup>	ไม่ได้กำหนด	ไม่ได้กำหนด	
อินเดีย	$\leq 20$	$\leq 20$	$\leq 30$	ไม่ได้กำหนด <sup>ก</sup>	ไม่เกิน 5	ไม่ได้กำหนด	
สิงคโปร์	1	$\leq 400$	$\leq 600$	$\leq 400$	ไม่ได้กำหนด	ไม่เกิน 60	ไม่ได้กำหนด
	2	$\leq 50$	$\leq 100$	$\leq 50$	ไม่ได้กำหนด	ไม่เกิน 10	ไม่ได้กำหนด
	3	$\leq 20$	$\leq 60$	$\leq 30$	ไม่ได้กำหนด <sup>ก</sup>	ไม่เกิน 5	ไม่ได้กำหนด

หมายเหตุ :

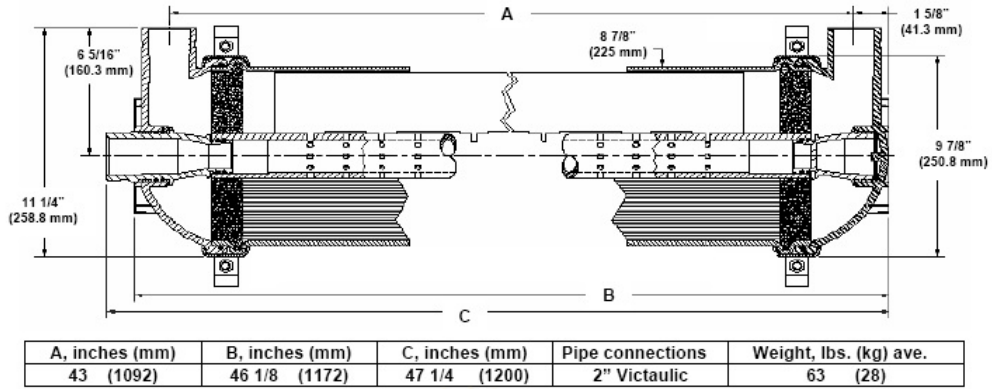
- ก = ค่าเฉลี่ยต่อปี  
 ข = กำหนดไนโตรเจน > 120 มก. / ล. (เฉลี่ยต่อวัน > 60 มก. / ล.)  
 ค = เก็บตัวอย่างแบบผสม 24 ชม.  
 ง = เก็บตัวอย่างแบบจ้วงตัก  
 จ = กำหนดเฉพาะแอมโมเนีย-ไนโตรเจน > 10 มก. / ล.  
 ฉ = กำหนดเฉพาะแอมโมเนีย-ไนโตรเจน > 10 มก. / ล. และไนเตรท-ไนโตรเจน > 10 มก. / ล.  
 ช = กำหนดเฉพาะแอมโมเนีย-ไนโตรเจน > 20 มก. / ล.  
 1 = Sewer  
 2 = Water source  
 3 = Controlled Water source



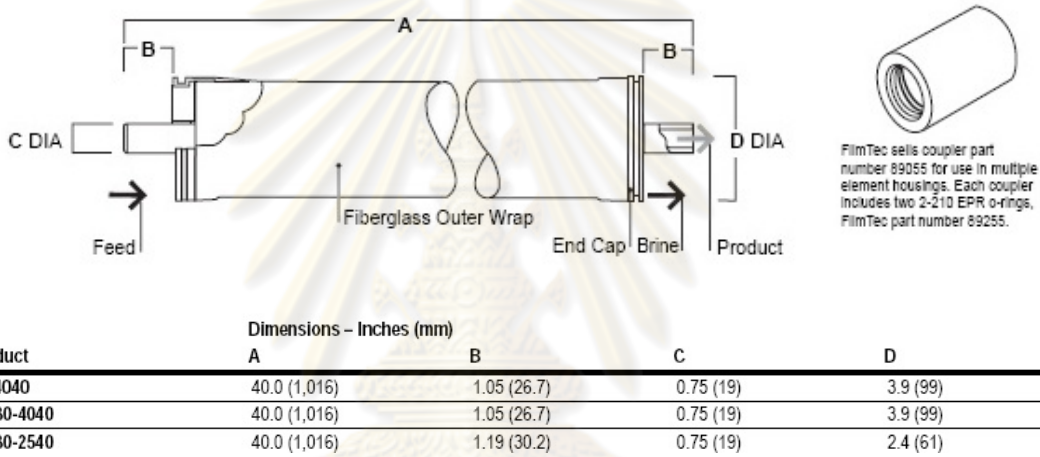
ภาคผนวก ฉ  
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



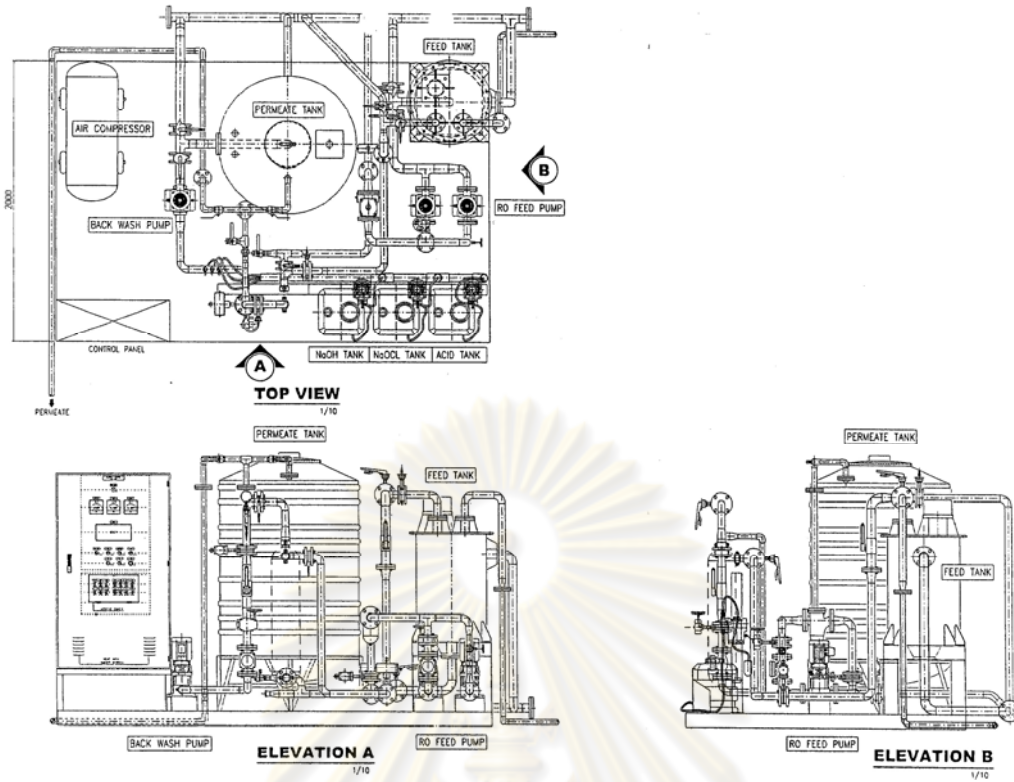


รูปที่ น-1 ลักษณะเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชั่น

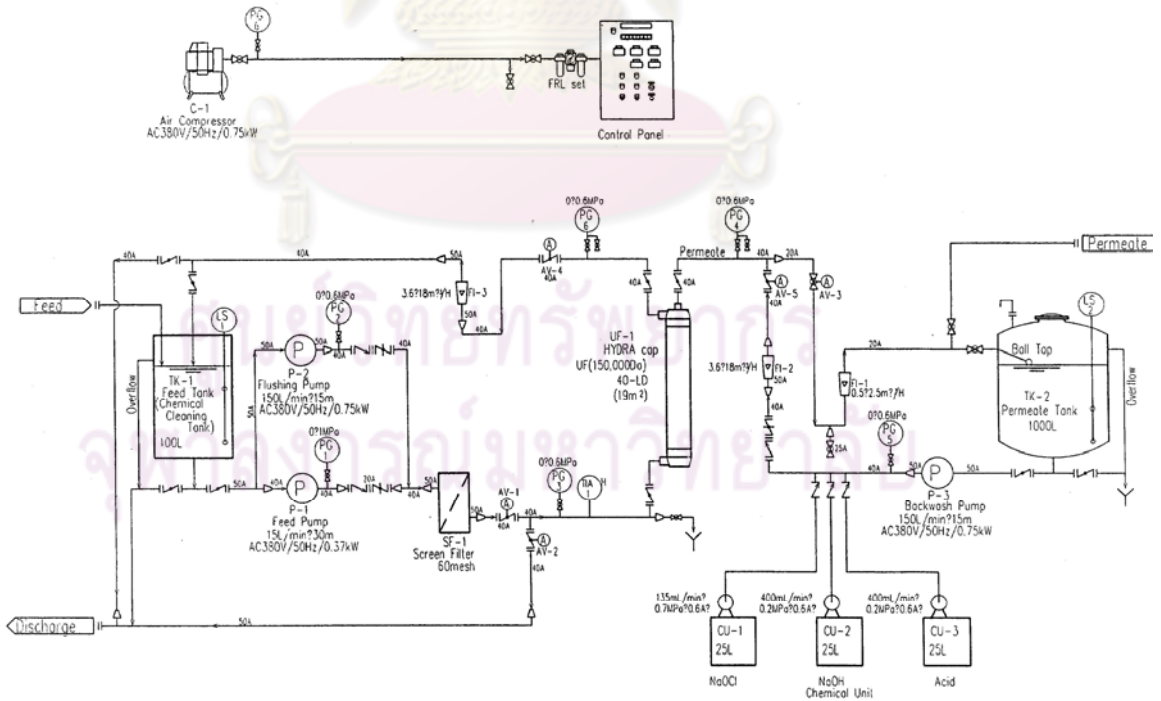


รูปที่ น-2 ลักษณะเมมเบรนออสโมซิสผันกลับ

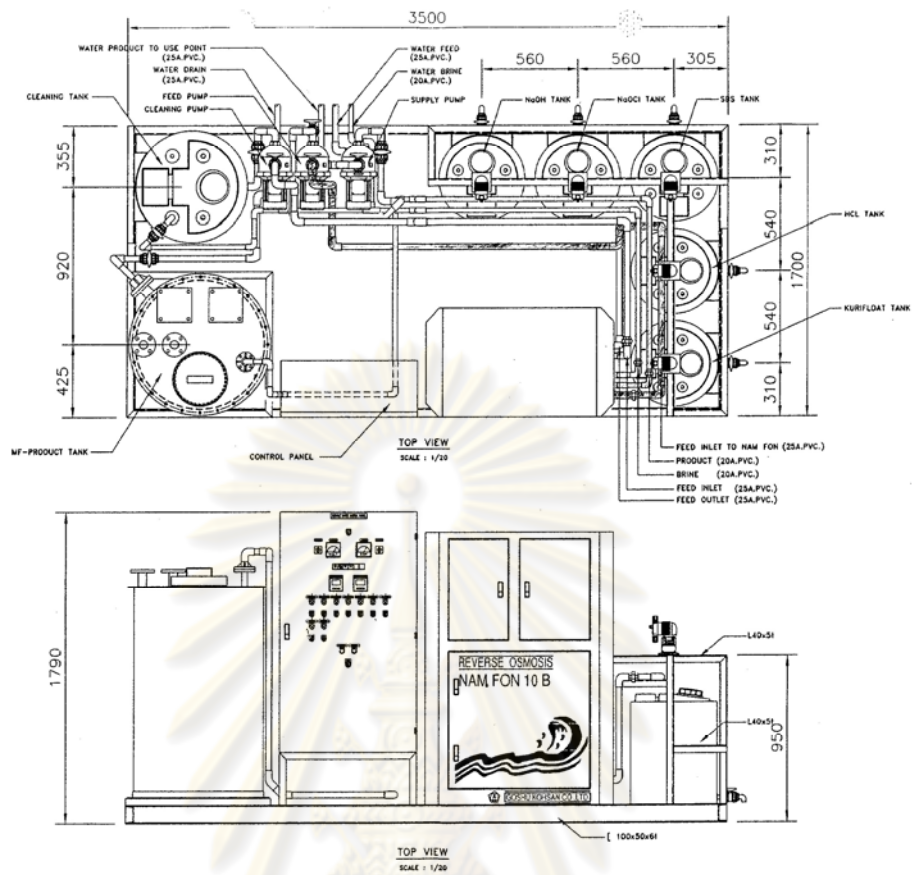
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๓-3 ระบบเมมเบรน UF ขนาดทดสอบ



รูปที่ ๓-4 แผนผังระบบเมมเบรน UF ขนาดทดสอบ



รูปที่ ๓-5 ระบบเมมเบรน RO ขนาดทดสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ น-1 รายชื่ออุปกรณ์ระบบ UF

No.	Name	Q'ty	Specification	Material	Remarks
1	UF Module (UF-1)	1	Capillary type (inside-out) HYDRAcap 40-LD (19m <sup>2</sup> ) Nominal MWCO: 150,000Da		HYDRANAUTICS
2	Feed Pump (P-1)	1	Multi-stage centrifugal Pump CRN1-6 15 L/min × 30 m AC380V/50Hz/0.37kW	SUS316	Grundfos Pump
3	Flushing Pump (P-2)	1	Multi-stage centrifugal Pump CRN8-20 150 L/min × 15 m AC380V/50Hz/0.75kW	SUS316	Grundfos Pump
4	Backwash Pump (P-3)	1	Multi-stage centrifugal Pump CRN8-20 150 L/min × 15 m AC380V/50Hz/0.75kW	SUS316	Grundfos Pump
5	Feed Tank (Chemical Cleaning Tank) (TK-1)	1	Round type 100 L	FRP	
6	Permeate Tank (TK-2)	1	Closed round type 1,000 L (Bottom : taper)	SUS304	
7	Screen Filter (SF-1)	1	Bucket strainer 60 mesh	SUS304	
8	Chemical Unit (NaOCl) (CU-1)	1 set	Pump: Electromagnetic metering pump MAX 135 mL/min × 0.7MPa AC220V Tank: 25L	Acryl PVC PTFE Ceramics PE	
9	Chemical Unit (NaOH) (CU-2)	1 set	Pump: Electromagnetic metering pump MAX 400 mL/min × 0.2MPa AC220V Tank: 25L	PVC PTFE Ceramics PE	
10	Chemical Unit (Acid) (CU-3)	1 set	Pump: Electromagnetic metering pump MAX 400 mL/min × 0.2MPa AC220V Tank: 25L	PVC PTFE Ceramics PE	
11	Air Compressor (C-1)	1	Oil Free type AC380V/50Hz/0.75kW		

ตารางที่ น-1 รายชื่ออุปกรณ์ระบบ UF (ต่อ)

No.	Name	Q'ty	Specification	Material	Remarks
12	Pressure Gauge (PG-2,3,4,5,6)	5	Bourdon tube φ 75 0-0.6 MPa PT1/2"	SUS304	Nagano
13	Pressure Gauge (PG-1)	1	Bourdon tube φ 75 0-1.0 MPa PT1/2"	SUS304	Nagano
14	Thermo sensor (TIA-1)	1	Pt100Ω	SUS304	
15	Flowmeter (FI-1)	1	Orifice meter 0.5-2.5m <sup>3</sup> /h 20A	SUS304	Tokyo Keiso
16	Flowmeter (FI-2)	1	Orifice meter 3.6-18m <sup>3</sup> /h 50A	SUS304	Tokyo Keiso
17	Flowmeter (FI-3)	1	Orifice meter 3.6-18m <sup>3</sup> /h 50A	SUS304	Tokyo Keiso
18	Level switch (LS-1)	1	Float type H, L		
19	Level switch (LS-2)	1	Float type H, L		
20	Auto Valves (AV-1,2,4,5)	4	Butterfly valve with pneumatic actuator 40A	SUS304	
21	Auto Valve (AV-3)	1	Ball valve with pneumatic actuator 20A	SUS304	
22	Manual valves	1set	Butterfly valve Ball valve Globe valve Check valve	SUS304 PVC	
23	Piping	1set		SUS304	
24	Frame (Skid base)	1set		SUS304	
25	Control panel	1		SS400	









ตารางที่ จ-2 รายชื่ออุปกรณ์ระบบ RO (ต่อ)

UNIT LIST					CUSTOMER : WATER RE-USE PROMOTION CENTER		PAGE NO. : 1/1	
					PROJECT NAME : THAI TEXTIE DEVELOPMENT & FINISHING CO., LTI JOB NO. : P10401002			
					SUBJECT : RECYCLE WATER SYSTEM			
ITEM NO.	DESCRIPTION	Q'TY	SPECIFICATION	DRIVER		MFR NAME	INSPEC. & TESTING	REMARKS
				TYPE	KW			
1.	R.O. UNIT	1	- MODEL Z-NAMFON 10 BaE - PRODUCT CAPACITY 500 L/Hr - HIGH PRESSURE PUMP 1.5 KW - MEMBRANE 2 PCS. - CARTRIDGE FILTER 5 μ - PRESSURE SWITCH - FLOW METER	M	1.5	GKC	GKC	
Rev.	Date	Note	Approved	Prepared	<b>TYPE</b> TEFC : Totally on closed Fan cooled		<b>INSPEC. &amp; TESTING</b> CUR : with Customer GKC : By GKC MFR (R) : By Manufacturer/Record MFR : By Manufacturer	
0	22/3/04							
1								
2								
3								
4								
5								

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนรา รัตนพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 ธันวาคม 2526 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมต้นจากโรงเรียนเมืองสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย