การแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยการกรอง แบบอัลตราฟิลเตรชัน

ไชยคมน์ ใจเอ็นดู

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
พ.ศ. 2548

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

MOLECULAR WEIGHT FRACTIONATION OF NATURAL ORGANIC MATTER BY ULTRAFILTRATION

CHAIYAKOM JIENDOO

AN INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF

THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

MAJOR IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

UBON RAJATHANEE UNIVERSITY

YEAR 2005

COPPYRIGHT OF UBON RAJATHANEE UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน

ผู้วิจัย นายไชยคมน์ ใจเอ็นดู

ได้พิจารณาเห็นชอบโดยคณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒน์พงษ์ มัตราช)

.... กรรมการ

(ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพรัตน์ แก้วสาร)

.... คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร โภคา)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีรับรองแล้ว

....

(ศาสตราจารย์ ดร.ประกอบ วิโรจนกูฏ)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2548

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ผศ.ดร. สุพัฒน์พงษ์ มัตราช อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และดูแลในระหว่างทำการทดลองที่มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และอบรมสั่งสอนทั้งด้านจริยธรรมและคุณธรรมเพื่อให้อยู่ได้ในสังคมอย่างมีความสุข

ผศ.ดร. ไพรัตน์ แก้วสาร หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และข้อคิดต่าง ๆ ในการนำไปใช้ในการดำเนินชีวิตเพื่อความก้าวหน้าของตนเองต่อไปในอนาคต

ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และช่วยแนะแนวทางการแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์สุมนา สิริพัฒนากุลที่แนะนำในการศึกษาต่อตลอดจนให้คำปรึกษาแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่างๆที่เข้ามาให้สำเร็จผ่านไปได้ด้วยดี

เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความช่วยเหลือในระหว่างทำการทดลอง และวิเคราะห์ตัวอย่างอยู่ที่มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว รวมทั้งเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ และเป็นกำลังใจให้สามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นอกจากรายนามที่ได้กล่าวมาแล้ว ผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกท่านที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

(ไชยคมน์ ใจเอ็นดู)
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน
โดย : ไชยคมน์ ใจเอ็นดู
ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผศ. ดร. สุพัฒน์พงษ์ มัตราช

ศัพท์สำคัญ : ขนาดโมเลกุล การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอท การกรองแบบอัลตรา

ขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ที่พบอยู่ในการผลิตน้ำประปา มีผลต่อการเกิดสารประกอบอินทรีย์อันตรายต่างๆ เช่น กลุ่มไตรฮาโลมีเทนและกลุ่มฮาโลอะซิติก ในระหว่างกระบวนการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดสารประกอบอินทรีย์อันตรายต่างๆในการผลิตน้ำประปา

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาถึงการแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยกระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันและวิเคราะห์ผลของการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ ได้แก่ พีเอช และความแรงของประจุของระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน ในการศึกษาการแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) โดยการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์คาร์บอนมีค่าเท่ากับ 40, 18.2, 10.9, 9, 7.2, 5.6, และ 4.7 เปอร์เซ็นต์ตามช่วงขนาดโมเลกุลที่มีค่ามากกว่า 100K, น้อยกว่า 1K, 30K-100K, 10K-30K, 5K-10K, 1K-3K และ 3K-5K ตามลำดับ ช่วงขนาดโมเลกุลขนาดมากกว่า 100K ให้ค่าขนาดโมเลกุลเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 17,689 กรัมต่อโมล ขณะที่ขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำที่ไม่ผ่านการแยกมีขนาด 4,144 กรัมต่อโมล โดยที่ขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติจากขนาดเล็กไปขนาดใหญ่ให้ค่า UV/TOC สูงขึ้นอาจแสดงถึงค่าความเป็นไฮโดรโฟบิกเพิ่มขึ้นจากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่าการเพิ่มความแรงประจุในสารละลายมีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์และการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอน ขณะที่การเพิ่มค่าพีเอชทำให้ลดค่าการลดลงของฟลักซ์และการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนด้วย

ABSTRACT

TITLE : MOLECULAR WEIGHT FRACTIONATION OF NATURAL ORGANIC MATTER BY ULTRAFILTRATION

BY : CHAIYAKOM JIENDOO

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : ENVIRONMENTAL ENGINEERING

CHAIR : ASST. PROF. DR. SUPATPONG MATTARAJ

KEYWORDS : MOLECULAR WEIGHT / NOM REMOVAL / PERMEATE FLUX / ULTRAFILTRATION MEMBRAND

Natural organic matter (NOM), which presents in water supply system, plays an important role in producing many hazardous substances such as trihalomethanes and haloacetic acids during chlorination process. NOM molecular weight can be an important factor, which causes disinfection by-products in water supply system.

The purpose of this research is to study molecular weight fractionation of NOM by ultrafiltration (UF) and to evaluate the influence of NOM rejection, pH and ionic strength for hollow-fiber UF system. Experimental results showed that the present of organic carbon had about 40,18.2, 10.9, 9, 7.2, 5.6 and 4.7% for NOM molecular weight of greater than 100K, less than 1K, 30K-100K, 10K-30K, 5K-10K, 1K-3K and 3K-5K, respectively. NOM molecular weight fraction greater than 100 kDa showed the highest averaged-molecular weight about 17, 689 g/mole, while the averaged-molecular weight of unfractionated NOM was about 4,114 g/mole. The increment of molecular weight resulted in higher UV/TOC ratio, possibly higher NOM hydrophobicity. It was observed that increased ionic strength decreased solution flux and total organic carbon (TOC) rejection, while increased solution pH decreased flux decline and TOC rejection.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 สมมติฐานของการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนของการทำงานวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 กระบวนการเมมเบรน	12
2.3 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF)	14
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	25
3.2 อุปกรณ์และ เครื่องมือ	25
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	33
3.4 ตัวอย่างน้ำและการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ	34
3.5 การแยกขนาดโมเลกุลและการหาเปอร์เซ็นต์ของมวลสารอินทรีย์ธรรมชาติ	36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6 การศึกษาการทำงานระบบเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน 37
3.7 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบอัลตรา 40
3.8 การวิเคราะห์ตัวอย่าง 41
4 ผลการทดลอง
4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง 43
4.2 การศึกษาสมดุลมวลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 44
4.3 ขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 47
4.4 การเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยเครื่องอัลตราฟิลเตรชันและเครื่อง HPLC 50
4.5 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าฟลักซ์และความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 57
5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผลการวิจัย 62
5.2 ข้อเสนอแนะ 63
เอกสารอ้างอิง 65
ภาคผนวก 69
ก ตารางแสดงผลฟลักซ์ 70
ข ตารางแสดงความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ของเยื่อกรองแบบอัลตรา 75
ค ตารางแสดงการดำเนินระบบแบบอัลตรา 78
ง วิธีการเตรียมสารละลายและตัวอย่างการคำนวณ 85
ประวัติผู้วิจัย 89

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 การกำจัดสารที่ทำให้เกิด THMs โดยใช้โอโซน 8

2.2 ข้อดีและข้อเสียของการกำจัด NOM โดยกระบวนการต่างๆ 9

2.3 คุณภาพของน้ำดิบที่สามารถใช้ผลิตน้ำประปา 11

2.4 เปรียบเทียบกระบวนการเมมเบรนชนิดต่างๆ 13

2.5 เปรียบเทียบข้อดีของโมดูลแต่ละชนิด 18

2.6 เมมเบรน UF ที่มีขายตามท้องตลาด 21

3.1 แสดงเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันแบบ hollow fiber cartridge 31

3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน 32

3.3 ตารางสรุปการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบอัลตรา 37

3.4 คุณสมบัติของเยื่อกรองแบบอัลตราของ A/G Technology Corporation 38

3.5 ตารางสรุปการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน 41

3.6 พารามิเตอร์ที่ศึกษาและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ 42

4.1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำ 43

4.2 ตารางเปอร์เซ็นต์มวลสารอินทรีย์ในช่วงขนาดโมเลกุลต่างๆ และเปอร์เซ็นต์การสูญเสีย 44

4.3 ขนาดโมเลกุลเฉลี่ยและค่าการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 47

4.4 ตารางเปรียบเทียบระหว่างค่ายูวีและทีโอซีของช่วงโมเลกุลขนาดต่างๆ 49

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่

2.1 การเปรียบเทียบการกรองแบบไหลผ่านและไหลขวาง 16

2.2 โมดูลของเมมเบรน 4 ชนิด 20

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของอินทรีย์คาร์บอน 27

3.2 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ขนาดโมเลกุลด้วยเครื่อง HPLC 28

3.3 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบระหว่างค่าความแรงประจุกับค่าการนำไฟฟ้า 29

3.4 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ 31

3.5 คุณสมบัติการซึมผ่านของแผ่นเมมเบรน 32

3.6 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน 33

3.7 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 34

3.8 ภาพแสดงระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ 36

3.9 ภาพระบบเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน 40

4.1 ร้อยละของมวลสารอินทรีย์คาร์บอน 45

4.2 ร้อยละของการสูญเสียมวลสารอินทรีย์ธรรมชาติ 46

4.3 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแต่ละช่วงขนาดโมเลกุลต่างๆ 48

4.4 ค่าอัตราส่วนระหว่าง UV/TOC ในแต่ละช่วงขนาดโมเลกุลต่างๆ 49

4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาดน้อยกว่า 1K 50

4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาด 1K – 3K 51

4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาด 3K – 5K 52

4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาด 5K – 10K 53

4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาด 10K – 30K 54

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาด 30K – 100K 55
4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาดมากกว่า 100K 56
4.12 ผลของความแรงประจุที่มีต่อการลดลงของฟลักซ์ 57
4.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันขนาด 1K ที่มีความประจุ 0.01 กับความแรงประจุ 0.05 58
4.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเกลือของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันขนาด 1K ที่มีความประจุ 0.01 กับความแรงประจุ 0.05 59
4.15 ผลของพีเอชที่มีต่อการลดลงของฟลักซ์ 60
4.16 ค่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ pH 4,7 และ 10 60
4.17 ค่าการกำจัดเกลือที่ pH 4,7 และ 10 61

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยทั่วไปการผลิตน้ำประปาแบบ conventional water treatment process ซึ่งประกอบด้วยการกำจัดอนุภาค (screening) กระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) ฟลอกคูเลชัน (flocculation) การตกตะกอน (sedimentation) และการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (chlorination) ไม่สามารถที่จะกำจัด NOM (Natural Organic Matter) ออกจากน้ำได้อย่างเพียงพอที่จะสามารถควบคุมไม่ให้เกิดสาร Disinfection by-products (DBPs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและยังทำให้ระบบประสาทและการทำงานของตับไตและของมนุษย์เกิดการผิดปกติ (ปรภาภรณ์, 2546)

ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเอากระบวนการเมมเบรนมาใช้ในการกำจัด NOM (Natural Organic Matter) แพร่หลายมากขึ้น จากงานวิจัยของ Kim และคณะ (2005) ได้นำเอาระบบ UF(Ultrafiltration)-NF(Nanofiltration) มาประยุกต์ใช้ในการกำจัด NOM โดยพบว่ากระบวนการ UF-NF สามารถที่จะใช้ในการกำจัด NOM ได้ดีกว่ากระบวนการผลิตน้ำประปาแบบทั่วไปและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันนอกจากจะใช้ในการกำจัด NOM ยังใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของ NOM จากงานวิจัยของ Cai (1999) พบว่าระบบอัลตราฟิลเตรชันเป็นการดำเนินระบบที่ง่ายและสะดวกในการทำงานและสามารถที่จะทำการแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ความเข้มข้นน้อยโดยใช้ปริมาณของสารละลายเยอะได้ดี เนื่องจากขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติมีผลต่อการเกิดสาร DBPs มากน้อยต่างกัน จากงานวิจัยของ Chang และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาแยกกลุ่มของ NOM ออกเป็น 3 กลุ่มซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีขนาดที่แตกต่างกันโดยพบว่ากลุ่มไฮโดรฟิลิกที่ไม่ใช่กรด (Non-Acid Hydrophilics) เกิดปฏิกิริยากับคลอรีนไดออกไซด์มากที่สุด ส่วนกลุ่มของไฮโดรโฟบิค (Hydrophobic Substance) และกลุ่มของกรดไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic Acid) มีปริมาณลดหลั่นลงมาตามลำดับซึ่งผลการทดลองดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่าสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่มีอัตราการก่อตัวของสารจากการฆ่าเชื้อโรคเป็นสาร DBPs ของกลุ่มไฮโดรฟิลิกที่ไม่ใช่กรดมีปริมาณสูงสุดซึ่งสารกลุ่มนี้มีขนาดโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ และจากงานวิจัยของ Gjessing (1966) รายงานผลจากการทดลองโดยใช้ Gel Filtration ถึงน้ำหนักโมเลกุลของกลุ่มไฮโดรฟิลิกที่ไม่ใช่กรดมีค่าระหว่างน้อยกว่า 700 ถึงมากกว่า 20,000 ดาลตัน

จากเหตุผลข้างต้นจึงมีความจำเป็นที่จะศึกษาคุณสมบัติของสารอินทรีย์ธรรมชาติและศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด NOM โดยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันของแหล่งน้ำธรรมชาติที่ใช้

ในการผลิตน้ำประปาในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงคุณภาพน้ำอุปโภคบริโภคภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีและประยุกต์ใช้กับแหล่งน้ำธรรมชาติแหล่งอื่น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษากลไกในการทำงานของระบบอัลตราฟิวเตรชันในการแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

1.2.2 เพื่อแยกขนาดโมเลกุลตามปริมาณคาร์บอนของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้ระบบอัลตราฟิลเตรชัน

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยอัลตราฟิวเตรชันเมมเบรน

1.2.4 เพื่อทราบขนาดของสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำที่นำมาทำการศึกษา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 น้ำตัวอย่าง NOM จากหนองอีเจมที่ผ่านกระบวนการแยกสารอินทรีย์โดยระบบออสโมซิสย้อนกลับ (RO) ถูกนำมาทดสอบกับระบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน

1.3.2 ขนาดเมมเบรนอัลตราฟิวเตรชันที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ 1,000 3,000 5,000 10,000 30,000 100,000 Da เพื่อศึกษาในการแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพของเยื่อกรองโดยศึกษาจาก

1.3.3.1 ค่าฟลักซ์ที่ลดลง (Flux decline)

1.3.3.2 เปอร์เซ็นต์การกำจัด (% Rejection)

1.4 สมมติฐานของการวิจัย

1.4.1 อัลตราฟิวเตรชันสามารถแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติได้

1.4.2 อัลตราฟิวเตรชันสามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติได้ขึ้นกับขนาดโมเลกุลของเมมเบรน

1.5 ขั้นตอนของการทำงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมผลการศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.5.2 จัดซื้อและจัดเตรียมเครื่องมือและสารละลายที่ใช้ในการทดลอง

1.5.3 ดำเนินการทดลองและรวบรวมข้อมูลจากการทดลองต่าง ๆ

1.5.4 วิเคราะห์และสรุปผลของการทดลองพร้อมทั้งข้อเสนอแนะต่าง ๆ

1.5.5 จัดทำรูปเล่มรายงานและนำเสนอวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถทราบถึงขนาดโมเลกุลของ NOM ที่ใช้ทดสอบ

1.6.2 สามารถเข้าใจถึงกระบวนการดำเนินการกรองแบบอัลตราฟิวเตรชัน

1.6.3 สามารถทราบถึงประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยอัลตราฟิวเตรชัน

1.6.4 สามารถใช้เป็นข้อมูลในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำอุปโภคบริโภคภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

1.6.5 สามารถใช้เป็นข้อมูลของสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำผิวดินเพื่อประยุกต์ใช้เปรียบเทียบกับแหล่งน้ำอื่น

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter ; NOM)

2.1.1.1 คุณสมบัติของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

สารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เกิดจากการย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์หรือเกิดจากการเจริญเติบโตและกระบวนการย่อยสลายตัวของจุลชีพต่างๆที่อยู่ในน้ำ NOM เป็นอนุภาคตัวหนึ่งที่ต้องกำจัดออก แหล่งที่มาที่สำคัญของ NOM ในแหล่งน้ำจืดคือ สาหร่าย และ Cyanobacteria ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูป Aliphatic และปราศจากสารลิกนินโดย สารอินทรีย์จากแหล่งนี้จะมีองค์ประกอบที่เป็น ฟีนอลลิก (Phenolic) และ อะโรมาติก (Aromatic) ในปริมาณที่ต่ำ ตรงข้ามกับสารอินทรีย์ที่เกิดจากดิน ซึ่งโดยมากจะมาจากซากพืชที่อยู่บนบกทำให้มีองค์ประกอบที่เป็นลิกนินในปริมาณที่สูง

ลิกนินมีโครงสร้างหลักเป็นสารอะโรมาติก ทำให้ NOM ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากดินมีส่วนประกอบเป็นสารอะโรมาติกมากกว่า NOM ที่มีแหล่งกำเนิดในน้ำ นอกจากนี้สถานที่ และอายุของดินที่ทำให้เกิด NOM ก็มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของ NOM โดยองค์ประกอบที่สำคัญของ NOM ในน้ำผิวดินที่เกิดจากซากพืชที่ทับทมกัน แล้วถูกชะลงสู่แหล่งน้ำจะมีองค์ประกอบหลักเป็นกรดฟัลวิก ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย ซึ่งละลายน้ำได้และไม่ถูกติดโดยดิน ต่างจาก NOM ที่อยู่ในแหล่งน้ำบาดาลที่มีอายุมากๆซึ่งมักจะถูกกำจัดโดยการดูดติด เนื่องจากเวลาสัมผัสที่ยาวนานกับชั้น Aquifer ดังนั้น NOM ที่ยังละลายอยู่ในน้ำจะเป็นส่วนที่ถูกดูดติดได้น้อย (Goel และคณะ, 1995 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544)

NOM ในน้ำอาจจะอยู่ในรูปของอนุภาคคอลลอยด์หรือในรูปของสารละลาย โดยทั่วไปอนุภาคสารอินทรีย์จะถูกกำจัดได้ง่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟลอคคูเลชัน และการตกตะกอน เหมือนกับอนุภาคทั่วไปที่ทำให้เกิดความขุ่นในน้ำ NOM ละลาย คือ โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่สามารถผ่านเมมเบรนที่ขนาด 0.45 ไมครอน ส่วน NOM ที่เป็นคอลลอยด์ จะแตกต่างจากโมเลกุลของ NOM ตรงที่สามารถกำจัดออกโดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชั่นแบบทำให้เป็นประจุเป็นกลาง(Charge Neutralization) (Crozes และคณะ, 1995 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544)

NOM สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นสารฮิวมิก และส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิก NOM ส่วนที่เป็นสารฮิวมิกจะมีคุณสมบัติเป็นสาร Hydrophobic โดยประกอบด้วย กรดฮิวมิก กรดฟัลวิก และฮิวมิน ส่วน NOM ที่ไม่ใช่สารฮิวมิกจะมีคุณสมบัติเป็นสาร Hydrophobic น้อยกว่าสารฮิวมิก โดยประกอบด้วย Hydrophilic Acid โปรตีน กรดอะมิโน และคาร์โบไฮเดรต(Owen และคณะ, 1995 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) โดยทั่วไป NOM ส่วนที่เป็นสารฮิวมิกจะมีประมาณ 45-65% และส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิกจะมีประมาณ 35-55% (Hanra และคณะ, 1996 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544)

2.1.1.2 ปัญหาจาก NOM ในกระบวนการผลิตน้ำประปา

ในช่วงแรกที่ได้มีการศึกษาวิจัยการกำจัด NOM เกิดจากต้องการกำจัดสีที่เกิดจาก NOM ในแหล่งน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาจึงเกิดงานวิจัยในเรื่องลักษณะคุณสมบัติของ NOM ในน้ำดื่มในช่วงก่อนปี ค.ศ.1970 หลังจากนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงปัญหาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับ NOM ซึ่งประกอบไปด้วยความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ และสารฆ่าเชื้อโรคที่มากขึ้นของน้ำที่มี NOM ความสามารถในการกำจัดโลหะและสารอินทรีย์เกลียดน้ำ การทำให้เกิดการกัดกร่อน และการเติบโตขึ้นใหม่ของแบคทีเรียในระบบจ่ายน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้สารออกซิแดนท์ระหว่างกระบวนการบำบัด การทำให้เกิดกลิ่น และรสในน้ำ แนวโน้มในการเป็นตัวขัดขวางการกำจัดสารปนเปื้อนอื่นๆในน้ำ และการเป็นสารที่ก่อให้เกิดสาร Disinfection By-product (DBPs) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญมากในปัจจุบัน

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติทางเคมี และกระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา NOM ส่วนที่เป็นสารฮิวมิกจะมีบทบาทสำคัญมากต่อปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับน้ำประปา ในขณะที่ NOM ส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิกจะทำให้เกิดปัญหาต่อคุณภาพน้ำประปาน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม Owen และคณะ (1995) พบว่า NOM ส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิกสามารถทำให้เกิด DBPs ในปริมาณที่มีนัยสำคัญ นอกจากนั้น ยังอาจเป็นส่วนสำคัญของสารอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายได้ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการเติบโตขึ้นใหม่ของแบคทีเรียในระบบจ่ายน้ำ

2.1.1.3 ลักษณะสมบัติของสารฮิวมิก

(1) โครงสร้างทางเคมีของสารฮิวมิก

สารฮิวมิกมีสูตรโมเลกุล และสูตรโครงสร้างที่ไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่ากรดฮิวมิกเป็นสารโพลิเมอร์ ที่ประกอบด้วย อะโรมาติกโมโนเมอร์ (Aromatic Monomers) ในปริมาณต่างๆ กัน Chistman และ Ghassemi (1966 อ้างถึงใน ปฏิรูป , 2544) ได้เสนอว่าโครงสร้างของกรดฮิวมิก ประกอบไปด้วยกลุ่มทำปฏิกิริยา(Functional Groups) หลายกลุ่ม เช่น กรดคาร์บอกซิลิก(Carboxylic Acid) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และ คีโตน(Ketone) โดยพบว่ากลุ่มทำปฏิกิริยาที่เป็นคาร์บอกซิลิก มีปริมาณถึง 60-90% ของกลุ่มทำปฏิกิริยาทั้งหมด

ดังนั้นสารฮิวมิกจึงมีประจุลบในช่วงค่าพีเอชของน้ำธรรมชาติและค่าพีเอชที่สูงกว่านั้น และเนื่องมาจากกลุ่มทำปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้สารฮิวมิกละลายน้ำได้ดีที่ค่าพีเอชสูงๆ และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยน และการเกิดสารประกอบกับอิออนประจุบวกที่มีสองและสามวาเลนซ์ โดยอิออนประจุบวกที่มีสองวาเลนซ์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญขององค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติสามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มคาร์บอกซิลิก ในสารฮิวมิกทำให้ประจุของสารฮิวมิกมีค่าลดลง (Hanra และคณะ, 1996 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544)

Stevenson (1982 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) อธิบายถึงลักษณะโครงสร้างของกรดฮิวมิกว่าเป็นวงของโมเลกุลสายยาวๆ โมเลกุลซึ่งเชื่อมจากส่วนหนึ่งของวงไปยังส่วนอื่นๆการเชื่อมของวงนี้อาจเชื่อมมาจากพันธะระหว่างส่วนที่เป็น Hydrophobic ของโมเลกุล เช่นไฮโดรคาร์บอน และส่วนที่เป็น Hydrophobic อื่นๆกับส่วนที่เป็น Hydrophobic (กลุ่มทำปฏิกิริยาที่มีขั้ว)โดยเกิดขึ้นในสารละลายในดิน หรือเกิดขึ้นโดยตรงกับผิวของแร่ธาตุในดิน

(2) น้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิก

น้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิกมีค่ากว้างมาก Gjessing (1966 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) รายงานผลจากการทดลองโดยใช้ Gel Filtration ถึงน้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิกว่ามีค่าระหว่างน้อยกว่า 700 ถึงมากกว่า 20,000 ซึ่งค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ได้ยังขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย เช่น น้ำหนักโมกุลของกรดฮิวมิกโดยการใช้วิธีทางเคมีพบว่ามีค่าประมาณ 1,300-13,000 โดยวิธี Osmometric Cryoscopy และวิธี Diffusion และ Viscosity มีค่า 700-26,000 และโดยวิธี Ultracentrifugation และ Light Scattering มีค่าเท่ากับ 30,000-80,000 ส่วนกรดฟัลวิก พบว่าส่วนใหญ่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 200-1,000 (Gassemi และ Cristman,1968 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544)

การหาค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิก สามารถทำได้แน่นอนขึ้น เช่น Hassett และ Banwart (1992 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) ได้สรุปค่าน้ำหนักโมเลกุลของกรดฮิวมิกว่ามีค่าอยู่ในช่วง 20,000-1,360,000 และน้ำหนักโมเลกุลของกรดฟัลวิกอยู่ในช่วง 275-2110

2.1.1.4 กระบวนการที่ใช้กำจัด NOM

(1) การกำจัด NOM ด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพ

กระบวนการโคแอกกูเลชั่น

การสำรวจโดยหน่วยงานของประเทศสหรัฐอเมริกา ภายใต้ชื่อ The National Organic Reconnaissance (NORS) ระบุว่าการกำจัดสาร NPTOC โดยกระบวนการ Convention Treatment สามารถทำได้ 30% โดยการใช้สารส้มตามด้วยการกรองด้วยทรายสามารถกำจัดสาร THMP ได้ประมาณ 2 ใน3 (Symons และคณะ,1975 ; Oliver และ Lawrence, 1979 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544)

Kavanaugh (1978 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) ได้ทำการศึกษาถึงการใช้การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการโคแอกกูเลชันในการกำจัด สารTHMP และสรุปว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสาร THMP มีดังนี้คือ

ปัจจัยทางกายภาพ ประกอบด้วย การผสมขั้นแรกของสารโคแอกกูแลนท์ สภาวะในการกวนในถังกวนช้าและ กระบวนการแยกระหว่างของแข็งกับของเหลว

ผลของปัจจัยทางเคมี ค่าพีเอชที่เหมาะสม อยู่ในช่วง 5-6 สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้ม ในขณะที่พีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันโดย Fe^{3+} มีค่าในช่วง 3-5 และพบว่า 15% ของกรดฮิวมิกไม่ถูกกำจัดโดยการใช้สารส้ม

ผลของประเภทของสารฮิวมิก กรดฟัลวิกต้องการปริมาณสารส้มสูงกว่ากรดฮิวมิกเพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์การกำจัด 80% เท่ากัน

ความต้องการโพลิเมอร์ การเกิดของฟล้อค ในสภาวะที่ไม่มีความขุ่นทำให้คุณสมบัติในการตกตะกอนไม่ดี

Crozes และคณะ (1995 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) สรุปผลของการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันในการกำจัด NOM ว่า สารโคแอกกูแลนท์ที่เป็นธาตุเหล็ก เช่น $FeCl_3$ มีประสิทธิภาพดีกว่าสารส้ม โดยค่าพีเอชในกระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นปัจจัยสำคัญในการกำจัด NOM เมื่อใช้ $FeCl_3$ เป็นสารโคแอกกูแลนท์เบื้องต้น โดยการปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.0_+0.2 จะสามารถกำจัด NOMได้ถึง 65% และลดปริมาณโคแอกกูแลนท์ลงถึง 60% แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูแลนท์อาจจะไม่พอเพียงในการกำจัด NOM เพื่อควบคุมปริมาณสารDBPs (Jacangelo และคณะ ,1995 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544)

(2) การกำจัด NOM โดยกระบวนการดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ด

Mc Creary และ Snoeyink(1997 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) ศึกษาผลของเกลืออนินทรีย์ และพีเอชต่อการดูดติดผิวของ NOM โดยพบว่า การเพิ่มการดูดติดผิวของกรดฟัลวิกที่มีพีเอชต่ำเป็นผลมาจากคุณสมบัติที่ NOM มีความเป็นกรดอ่อนโดยการลดลงของพีเอชทำให้ความสามารถในการละลายได้ลดลงและถูกดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ดได้ดีขึ้น แหล่งที่มาของ NOM ก็เป็นปัจจัยสำคัญดังจะเห็นได้ว่ากรดฟัลวิกที่เกิดจากการสลายตัวของพืชดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ดได้ดีกว่ากรดฮิวมิกที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด และกรดฮิวมิกที่มาจากดิน การใช้กระบวนการดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ดในการกำจัด NOM อย่างมีประสิทธิภาพต้องทำการศึกษาในสภาวะเฉพาะของ NOM และคาร์บอนแบบเกร็ดในแต่ละแห่ง โดยการบำบัดเบื้องต้น หรือการปรับปรุงคุณสมบัติของ NOM จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้กระบวนการดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ดในการกำจัด NOM ได้ (Jacangelo และคณะ, 1995 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544)

(3) การกำจัด NOM โดยใช้กระบวนการเติมโอโซน

การกำจัด NOM โดยใช้กระบวนการเติมโอโซนได้มีการทดลองใช้กระบวนการเติมโอโซนเพื่อลด NOM สำหรับโรงผลิตน้ำประปาบางแห่งในระดับ Pilot-scale ตามตารางสรุปผลจากการทดลองดังกล่าว โดยพิจารณาถึงการลดสาร THMs ทั้งหมดเมื่อใช้เวลาสัมผัสของคลอรีนประมาณ 24 ชม.สรุปผลการกำจัดสารที่ทำให้เกิด THMs โดยใช้โอโซน (Trussell และ Umphres, 1978 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การกำจัดสารที่ทำให้เกิด THMs โดยใช้โอโซน

สถานที่	ปริมาณโอโซนที่ใช้, มก/ล	คุณภาพน้ำ		ร้อยละการลดปริมาณ THMs ทั้งหมด
		TOC, มก./ล.	พีเอช	
Owens River	1	1.3	8.3	78
Lake Casitas	2	3.5	8.1	6
Columbia River	0.4-0.5	2.4	8.0	16
Ohio River	1.0-8.0	3.0	7.1	46
Bay Bull's big pond	1.0-3.0	-	5.7	27
Mokelumne	2.0-6.0	2.4	9.2	62
Middle River	2.6-11.0	3.5	7.3	32

ที่มา : Trussell และ Umphres ,1978 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544

สำหรับปัจจัยที่อาจมีผลต่อความไม่แน่นอนในการกำจัดสารที่ทำให้เกิด THMs มี 5 ปัจจัย สำหรับการทดลองที่แตกต่างกัน (Trussell และ Umphres,1978 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) คือ

- ความเข้มข้นและคุณสมบัติจำเพาะของสารอินทรีย์ธรรมชาติ
- คุณสมบัติทางเคมีของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ
- ประสิทธิภาพในการถ่ายเทโอโซน
- ความแตกต่างของเวลาสัมผัสหลังจากการเติมคลอรีน
- ความล่าช้าระหว่างเวลาในการเติมโอโซนกับเวลาในการเติมคลอรีน

อย่างไรก็ตามการเติมโอโซนก็สามารถเกิด DBPs ได้เช่นกัน โดย Najm และ Krasner (1995 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) ศึกษาผลของ Br^- ในปริมาณสูงจะทำให้เกิดโบรเมท

(Bromate) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในปริมาณสูงด้วยภายหลังการเติมโอโซน และถ้าน้ำมีค่า TOC สูงก็จะเพิ่มปริมาณความต้องการ โอโซน ซึ่งจะทำให้เพิ่มปริมาณการผลิตโบรเมทด้วยเช่นกัน

สรุปข้อดีและข้อเสียของการกำจัด NOM โดยกระบวนการต่างๆ (Marsono,1996 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) ได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของการกำจัด NOM โดยกระบวนการต่างๆ

กระบวนการที่ใช้	ข้อดี	ข้อเสีย
โคแอกกูเลชัน	- เป็นทางเลือกที่ประหยัดที่สุด - สามารถทำได้โดยปรับปรุงกระบวนการ โคแอกกูเลชันที่มีอยู่แล้ว - มีข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการนี้มาก - หลังจากกระบวนการ โคแอกกูเลชันอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งเป็นผลดีต่อการใช้ GAC ในขั้นตอนต่อมา	- ใช้สารส้มในปริมาณสูงถ้าน้ำมีความขุ่นต่ำและมีค่าของสีสูง - ประสิทธิภาพในการกำจัด พอใช้-ดีโดยกำจัดTHMsได้ <60%และ DOC<50%
การดูดติดผิวคาร์บอนแบบเกร็ด	- สามารถกำจัดสี กลิ่น และรสออกจากน้ำ - ต้องการเวลาสัมผัสน้อย(10-15นาที) - สามารถกำจัดสารปนเปื้อนอื่นด้วย (เช่นยาฆ่าแมลง)	- ประสิทธิภาพในการกำจัด DOC<50%,THMP 29-56% - ข้อมูลในการใช้ต้องศึกษาเฉพาะแต่ละแห่ง - การกำจัด Br^- ได้น้อย
โอโซน	- สามารถกำจัดสี กลิ่น และรส ออกจากน้ำ - สามารถใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคได้ด้วย - สามารถทำลายสารประกอบอินทรีย์ (เช่น ฟีนอล) - ไม่ทำให้เกิดของแข็งละลายและพีเอชของน้ำไม่มีผลต่อระบบ	- สามารถทำปฏิกิริยากับ NOM เกิดเป็น Ozonation By-product. - ทำปฏิกิริยากับ NOM และ Br^- เกิดเป็นสาร Brominated By-product

ที่มา : Marsono,1996 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544

ในระบบผลิตน้ำสะอาด มีหลายวิธีที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำ เช่น ใช้วิธีโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี การดูดซับด้วยผงถ่านคาร์บอน และเมมเบรนฟิลเตรชั่น วิธีดังกล่าวที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อให้น้ำมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอุปโภคบริโภค

สารอินทรีย์ธรรมชาติ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้น้ำมีคุณภาพไม่ได้มาตรฐาน อาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งทำให้น้ำมีสี หรือเป็นสาเหตุทำให้น้ำมีความขุ่นทำให้คุณภาพไม่ได้มาตรฐาน น้ำไม่น่าอุปโภคบริโภคหรืออาจจะไปรวมตัวกับสารชนิดอื่น เกิดเป็นสารอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ ในขั้นตอนการผลิตน้ำสะอาดเพื่อใช้อุปโภคบริโภคหรือใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆที่จำเป็นจะต้องใช้น้ำที่มีคุณภาพสูง

(4) ดัชนีที่ใช้เป็นตัวแทนในการวัดปริมาณของ NOM

ค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด TOC และค่า UV 254 เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนที่ดีในการวัดปริมาณของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ

การวัดค่า TOC เป็นการวัดปริมาณสารอินทรีย์ทุกชนิดที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุคาร์บอนซึ่งประกอบด้วย สารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย (Dissolved Organic Carbon หรือ DOC) ซึ่งเป็น TOC ส่วนที่ผ่านสารกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน อนุภาคของสารอินทรีย์คาร์บอน (Particulate Organic Carbon หรือ POC) คือสารอินทรีย์คาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ และถูกกักโดยสารกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน สารคาร์บอนอินทรีย์ละเหย (Volatile Organic Carbon หรือ VOC) คือสารอินทรีย์คาร์บอนที่สลายตัวได้และถูกกำจัดออกโดย Gas stripping ภายใต้สภาวะจำเพาะ และสารคาร์บอนอินทรีย์คงตัว (Nonpurgeable Organic Carbon หรือ NPOC) คือส่วนของ TOC ที่ไม่ถูกกำจัดออกโดยวิธี Gas Stripping

Edzwald และคณะ (1985 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) พบว่าค่า UV 254 เป็นตัวแทนที่ดีมากในการวัดปริมาณ Nonpurgeable TOC (NPTOC) และสารที่ทำให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน(Trihalomethane Precursors หรือ THMP) โดยอัตราส่วนระหว่างค่า UV254 กับค่า TOC ยังสามารถใช้ในการบอกลักษณะสมบัติของ NOM ในน้ำได้ โดยบอกถึงระดับความไม่อิ่มตัวของ NOM (Goel และคณะ, 1995 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544)

การวัดค่า UV254 อาศัยหลักการที่ว่า สารอินทรีย์ที่เป็นสารอะโรมาติก หรือเป็นสารที่มีพันธะทางเคมีเป็นพันธะคู่ จะสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลต โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร จึงทำให้การวัดค่าดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นวิธีการที่ดีและเหมาะสมในการวัดปริมาณของ NOM เช่น สารฮิวมิก เพราะมันประกอบด้วยสารอะโรมาติก และมีปริมาณมากในน้ำธรรมชาติ

Eaton (1995 อ้างถึงใน ปฏิรูป, 2544) ได้สรุปผลจากการใช้ค่าการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตของสารอินทรีย์ในน้ำเพื่อใช้เป็นวิธีมาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีความสัมพันธ์อย่างมากกับปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน สี THMs และสารที่ทำให้เกิด สารDBPs ชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ยังใช้การดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตในการตรวจสอบน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม และประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์โดยกระบวนการโคแอกกูเลชั่น การดูดซับโดยคาร์บอนแบบเกร็ด และกระบวนการบำบัดน้ำแบบอื่นๆ

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วน้ำดิบที่จะนำมาผลิตน้ำประปาจะต้องมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่จะสามารถนำมาผลิตเป็นน้ำประปาได้ดังข้อมูลในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณภาพของน้ำดิบที่สามารถใช้ผลิตน้ำประปา (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2535)

ลักษณะของน้ำดิบ	ค่าสูงสุดที่ยอมให้มีได้	
	องค์การอนามัยโลก	อเมริกา
สี, หน่วยสี	300	75
ของแข็งละลายน้ำ (TDS), มก/ลิตร	1,500	500
ไขมัน, มก/ลิตร	1	ต้องไม่ปรากฏเห็น
โคลิฟอร์ม, จำนวนต่อ 100 มล.	-	10,000
Zine, มก/ลิตร	1.5	5
Copper, มก/ลิตร	1.5	1.0
Manganese, มก/ลิตร	5	0.05
Iron, มก/ลิตร	50	0.3
Lead, มก/ลิตร	0.05	0.05
Nitrate, มก/ลิตร	45	-
Ammonia, มก/ลิตรของ N	0.5	0.5
TKN, มก/ลิตรของ N	1.0	-
Carbon Chloroform Extract	0.5	0.15
BOD5, มก/ลิตร	6	-
COD, มก/ลิตร	10	-

2.2 กระบวนการเมมเบรน

เมมเบรน คือเยื่อฟิล์มบางที่สังเคราะห์ขึ้นจากวัสดุอินทรีย์หรืออนินทรีย์ เช่น เซลลูโลส อะซิเตตและโพลีเอไมล์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการเลือกกักแยกอนุภาคต่างๆ สารอินทรีย์ – อนินทรีย์และไอออน ออกจากของเหลวหรือก๊าซได้

กระบวนการเมมเบรน หมายถึง กระบวนการต่างๆ ที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (Semi-Permeable Membrane) ในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลวใช้แรงขับดันในการเคลื่อนของไหวให้ซึมผ่านเยื่อเมมเบรนไปและกักสารต่างๆ ไว้ในรูปของสารละลายเข้มข้นโดยไม่ยอมให้ผ่านไปได้

กระบวนการเมมเบรนที่ใช้ในการบำบัดน้ำและน้ำเสียที่สำคัญมี 4 แบบ คือ Reverse Osmosis (RO), Nanofiltration (NF), Ultrafiltration (UF) และ Microfiltration (MF)

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบกระบวนการเมมเบรนชนิดต่างๆ (Zeman and Zydney, 1996)

Process	Materials remover	Applications	Transmembrane Pressures kPa (psi)
Microfiltration	ของแข็งละลายน้ำ และสารแขวนลอย ขนาดใหญ่	กำจัดแบคทีเรีย, สารแขวนลอย, ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด	69 – 173 (90-25)
Ultrafiltration	สารแขวนลอย, โปรตีน, เชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ และสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่	กำจัดไวรัส, กำจัดสารแขวนลอย และโมเลกุลสารอินทรีย์	103 – 690 (15 – 100)
Nanofiltration	สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200-400 ดาลตัน หรือปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด	กำจัดสี,ความกระด้าง, ลดปริมาณของแข็งไม่ละลายน้ำทั้งหมด	345 – 1550(50 – 225)
Reverse osmosis	เกลือที่ไม่ละลายน้ำ, สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่า 100 ดาลตัน	การกำจัดเกลือ,การนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่, กระบวนการผลิตอาหารและเครื่องดื่ม	1379 – 6895 (200 – 1000)

ประโยชน์ของกระบวนการเมมเบรนเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการบำบัดน้ำแบบธรรมดา (Anselme และคณะ, 1993) มีดังนี้คือ

- เป็นการกรองซึ่งแยกออกอย่างสมบูรณ์ ตรงข้ามกับการกรองแบบติดค้างในขั้นกรอง
- การแยกของแข็งออกจากของเหลวและการฆ่าเชื้อโรค โดยไม่มีการเติมสารเคมีเพิ่ม

- ไม่พบสารโคแอกกูเลชัน และสารฆ่าเชื้อโรค เหลือตกค้างในน้ำออก
- ขนาดกระทัดรัด และช่วยลดต้นทุนการเดินระบบและบำรุงรักษา
- การใช้เครื่องจักรแทนการทำงานของมนุษย์
- คุณภาพของน้ำที่ผ่านการกรองคงที่และมีคุณภาพสูง แม้ว่าคุณภาพแหล่งน้ำเปลี่ยน

ปัจจุบันนี้เริ่มมีการใช้กระบวนการเมมเบรนในการปรับปรุงคุณภาพน้ำแทนกระบวนการบำบัดแบบธรรมดา เนื่องจากเหตุผลดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

2.3 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF)

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) เป็นกระบวนการทางกายภาพ อาศัยแรงดันที่ต่ำเป็นแรงขับดันให้ของเหลวผ่านช่องว่างของเมมเบรน ในการแยกอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ รวมทั้งแบคทีเรียและจุลชีพอื่นๆ ออกจากของเหลว กระบวนการ UF เป็นกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่ง เนื่องจากมีอัตราการผลิตน้ำสูงกว่ากระบวนการเมมเบรนแบบอื่นที่ความดันเดียวกัน น้ำที่ผ่านการกรองมีคุณภาพดีกว่าน้ำที่ได้จากกระบวนการแยกทั่วไป เช่น การตกตะกอน การเหวี่ยงหนีศูนย์ การกรองทราย เป็นต้น นอกจากนี้สารมลพิษในน้ำส่วนใหญ่ จะมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.05 – 10 ไมโครเมตร ทำให้สามารถกำจัดได้โดยกระบวนการ UF เนื่องจากขนาดอนุภาคดังกล่าวอยู่ในช่วงค่าที่กำหนดของ UF พอดี

2.3.1 กลไกการทำงานของกระบวนการ UF

กลไกการทำงานของกระบวนการ UF จะแตกต่างจากกระบวนการกรองแบบธรรมดา (Conventional filtration) คือ ในระบบการกรองแบบธรรมดา เมื่อปล่อยให้น้ำไหลผ่านชั้นกรองอนุภาคแขวนลอยจะถูกกำจัดโดยจะติดค้างอยู่ที่ผิวหนังของสารกรอง (Surface filtration) หรือติดค้างในชั้นกรอง (Indepth filtration) ส่วนใน UF อนุภาคแขวนลอยหรือสารอินทรีย์ จะถูกกำจัดโดยจะติดค้างอยู่ในช่องว่างของเมมเบรน เรียกกลไกนี้ว่า “กลไกการแยกสารแบบคัดขนาดอนุภาค (Sieve Mechanism)” สำหรับสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน แบคทีเรีย อนุภาคแขวนลอย อาจถูกกำจัดด้วยกลไกการดูดติดผิวหน้าของเมมเบรนหรือภายในโครงสร้าง ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน คือ วัสดุชนิด Hydrophobic จะมีสมบัติในการดูดติดสารอินทรีย์สูง และยอมให้น้ำไหลผ่านได้น้อยกว่าชนิด Hydrophilic (เทียบที่ MWCO เดียวกัน) แต่จะก่อให้เกิดการอุดตันเมมเบรน

จุลชีพอาจถูกกำจัดด้วยกลไกที่เป็นไปได้ (Jacangelo และคณะ, 1995) คือ

- การเกาะติดของอนุภาคซึ่งอยู่ในน้ำดิบและสามารถถูกกำจัดโดยเมมเบรนได้
- การกำจัดโดยการเกิดชั้นเค้กขึ้นที่ผิวหน้าของเมมเบรน

- การกำจัดโดย membrane foulants ซึ่งอัดแน่นโดยไม่สามารถล้างย้อนโดยอาศัยแรงดันนี้แก้ไขให้คืนสภาพเดิมได้

2.3.2 ลักษณะการกรองในกระบวนการ UF

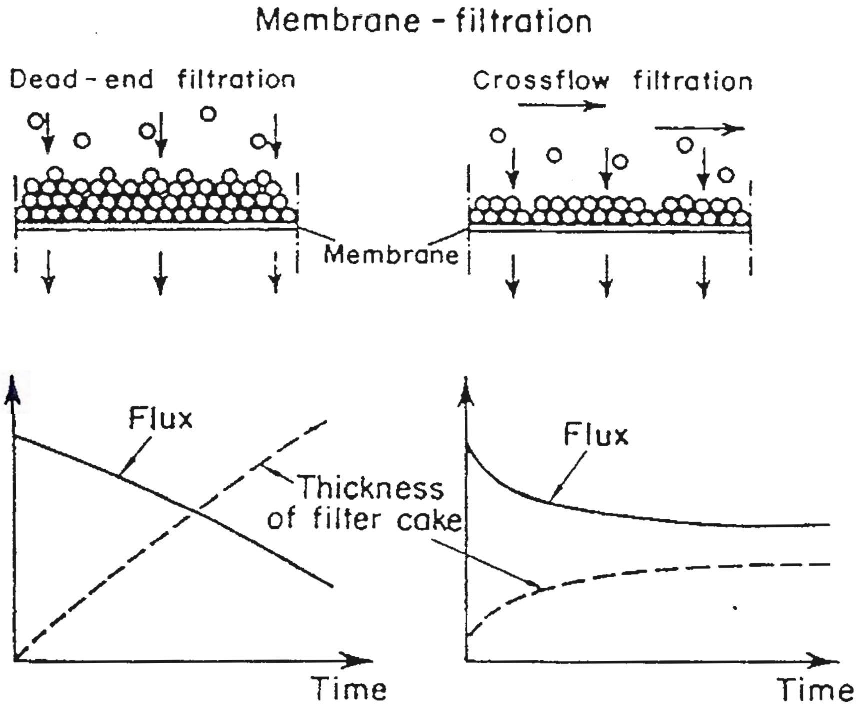
ลักษณะการกรองแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ Dead – end และ Crossflow

1) การกรองแบบ Dead – end

เป็นการใช้ความดันป้อนสารละลายให้ไหลในทิศทางที่ตั้งฉากกับเมมเบรน ดังแสดงในภาพที่ 2.1 สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะถูกกักไว้บนผิวหน้าของเมมเบรน หรืออยู่ในรูพรุนของเมมเบรน ทำให้เกิดการอุดตันของอนุภาคบนผิวหน้าของเมมเบรนและเกิดการสะสมอย่างต่อเนื่อง เรียกว่า “เค้ก (cake)” ปริมาณ permeate ที่ได้จะลดลงอย่างมาก ในทางปฏิบัติอาจต้องทำการล้างเมมเบรนบ่อยครั้งหรือเปลี่ยนเมมเบรนใหม่ ก่อนทำการต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งระบบนี้เหมาะสำหรับใช้เมื่อสารละลายประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กและมีความเข้มข้นต่ำ

2) การกรองแบบ Crossflow

เป็นการใช้ความดันป้อนสารละลายให้ไหลในแนวขนานกับเยื่อแผ่น หรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของ permeate ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน กวาดอนุภาคที่เกาะบริเวณนั้นให้กลับเข้าไปในสารละลายอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถควบคุมการอุดตันของเมมเบรนได้ดี ปริมาณ permeate ที่ได้จึงมีค่าสูงกว่าการกรองแบบแรก ดังนั้นการประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน จึงเป็น UF แบบไหลขวางโดยส่วนใหญ่



ภาพที่ 2.1 การเปรียบเทียบการกรองแบบไหลผ่านและไหลขวาง (Ripperger และคณะ, 1989)

2.3.3 ทฤษฎีอัลตราฟิลเตรชัน

ในกระบวนการ UF แบบไหลขวาง ค่าฟลักซ์จะเป็นตัวบอกถึงประสิทธิภาพของการกรอง โดยแสดงในรูปปริมาตรของ permeate ที่ผ่านรูพรุนของเมมเบรนต่อหน่วยพื้นที่ของเมมเบรนต่อเวลา ซึ่งในการกรองสารละลายแขวนลอย ค่า permeate flux ของสารละลายที่ผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่น สามารถแสดงในรูปของความต้านทานการกรองดังนี้

$$J_v = L_p(\Delta P - \sigma\Delta\pi) = \frac{Q_p}{A_m} \tag{2.1}$$

โดยที่ J_v คือ อัตราการซึมผ่านเมมเบรน มีหน่วยเป็น $Lm^{-2}hr^{-1}kPa^{-1}$

L_p คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเมมเบรน มีหน่วยเป็น $Lm^{-2}hr^{-1}kPa^{-1}$

ΔP คือ ความดันเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ $\left[\frac{(P_f + P_r)}{2} - P_p\right]$ มีหน่วยเป็น kPa

σ คือ Osmotic reflection coefficient มีค่าเท่ากับ $1 - \frac{C_p}{C_m}$

$\Delta\pi$ คือ ค่าความแตกต่างของแรงดันออสโมติก

(Osmotic pressure $\pi_m - \pi_p$) มีหน่วยเป็น kPa

ส่วนการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ (Rejection) โดยการกรองผ่านเยื่อกรองจะสกัดเอาสารละลายต่างๆออกจากน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2)

$$R_{\mathrm{feed}} = 1 - \frac{C_{perm}}{C_{feed}} \qquad (2.2)$$

โดยที่ R_{feed} คือ อัตราการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ (%)

C_{perm} คือ ความเข้มข้นของเพอร์มีเอท (mg.L^{-1})

C_{reten} คือ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น (mg.L^{-1}) (Mattaraj and Kilduff. 2003)

2.3.4 การหาขนาดโมเลกุล

ในการหาขนาดโมเลกุลที่ทำการแยกโดยใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7)

$$M_w = \frac{\sum_{i=1}^{N} MW_i(t) M_i(t)}{M_T} \qquad (2.3)$$

โดยที่ Mw คือ ขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

M_i(t) คือ มวลในแต่ละช่วงเวลา

MW_i (t) คือ ขนาดโมเลกุลในแต่ละช่วงเวลา

$\sum_{i=1}^{N} MWi$ (t)M_i(t)คือ ผลรวมขนาดโมเลกุลทั้งหมดในช่วงเวลาที่วิเคราะห์

M_T คือ มวลทั้งหมดของตัวอย่าง

$$M_n = \frac{\sum_{i=1}^{N} M_i(t)}{\sum_{i=1}^{N} M_i(t) / MW_i(t)} \qquad (2.4)$$

โดยที่ $\sum_{i=1}^{N} M_i(t)$ คือ ผลรวมของมวลในช่วงการวิเคราะห์

$\sum_{i=1}^{N} M_i(t) / MW_i(t)$ คือผลรวมของมวลในช่วงเวลานั้นส่วนด้วยขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติในช่วงเวลานั้น

2.3.5 โมดูลชนิดต่างๆ ของกระบวนการ UF

โมดูลที่ใช้สำหรับกระบวนการ UF มี 4 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 คือ

- แบบม้วน (Spiral wound)
- แบบท่อ (Tubular)
- แบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber)
- แบบแผ่น (Plate and frame)

สำหรับข้อดีของโมดูลแต่ละชนิด แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบข้อดีของโมดูลแต่ละชนิด (Mallevialle และคณะ, 1996)

เกณฑ์มาตรฐาน	แบบแผ่น	แบบม้วน	แบบท่อ	แบบเส้นใยกลวง หลอดปลายเปิด Fine (RO)	แบบเส้นใยกลวง หลอดปลายเปิด (UF/MF)	แผ่นจาน/กระบอก
ความหนาแน่น	+	++	-	+++	+++	-
ความสะอาด						
- ล้างผ่านเมมเบรน	+	-	++	-	-	+
- ล้างย้อนกลับ	-	-	-(1)	-	+++	-
ราคา	+	+++	-	+++	+++	-
ความดัน	-	++	+++	++	++	+++
ควบคุมปริมาตร	+	+	-	+++	++	-
ความนิยมในการใช้งาน	+	-	+++	-	++	+++

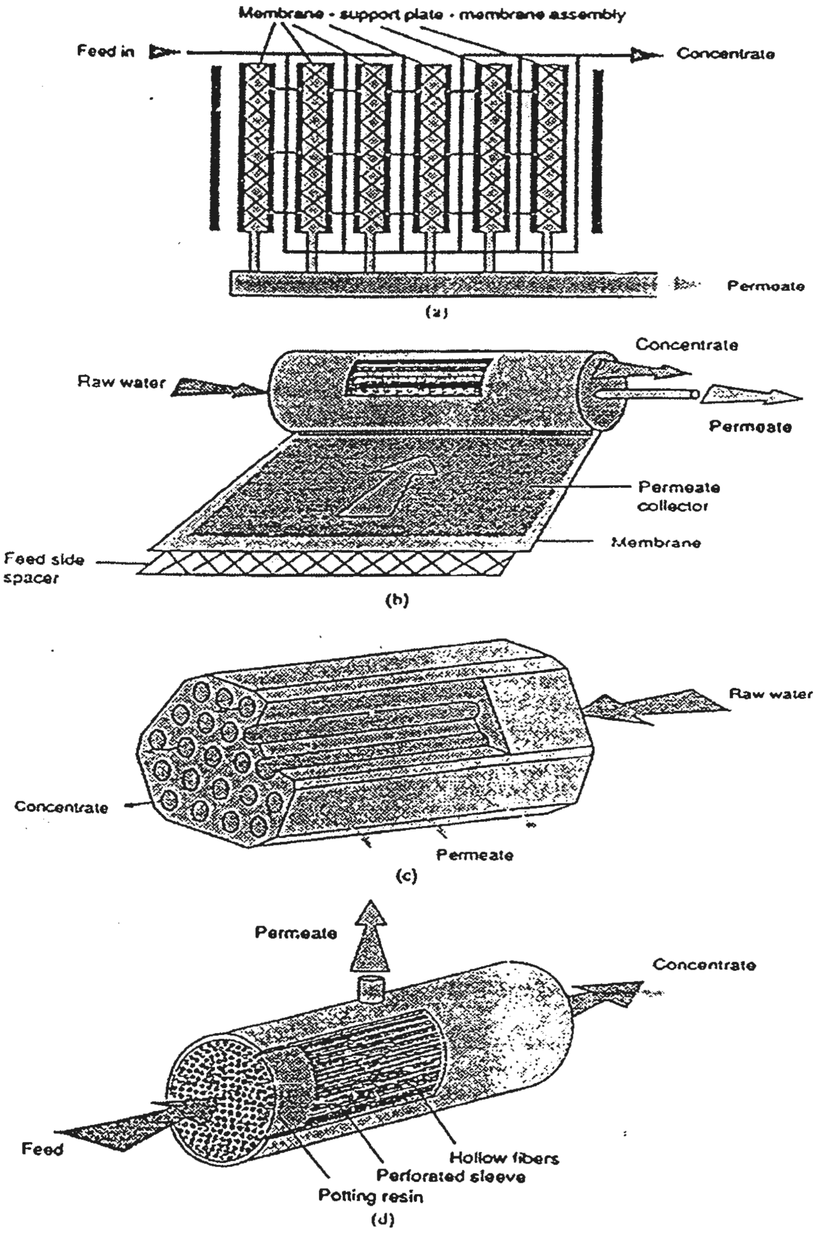
- ข้อเสียเปรียบ

+++ ข้อได้เปรียบ

(1) : โดยที่ไม่มีการเปรียบเทียบโมดูลแบบเซรามิกเนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนเป็นคนละชนิดกับข้อมูลที่จะนำมาเปรียบเทียบกัน

ในกระบวนการ UF ไม่นิยมใช้เมมเบรนแบบม้วน เนื่องจากโครงสร้างเมมเบรนเป็นแบบแผ่น ซึ่งยากต่อการทำความสะอาดผิวหน้าของเมมเบรน แต่สำหรับแบบเส้นใยกลวงและแบบท่อ สามารถทำการล้างย้อน ซึ่งเป็นกลไกในการควบคุมการอุดตันเนื่องจากอนุภาคและ

สารอินทรีย์ เมมเบรน UF ที่มีขายในท้องตลาด แสดงในตารางที่ 2.6 ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะแบบเส้นใยกลวง เนื่องจากใช้ในการทำงานวิจัย



ภาพที่ 2.2 โมดูลของเมมเบรน 4 ชนิด (Mallevialle และคณะ, 1996)
a) แบบแผ่น b) แบบม้วน c) แบบท่อ d) แบบเส้นใยกลวง

ตารางที่ 2.6 เมมเบรน UF ที่มีขายตามท้องตลาด (Mallevialle และคณะ, 1996))

Pore size µm	Configuration	Material	Mambrane area permodule m^2 (min – max)	manufacturer
2, 3, 5	T	C	0.02 – 7.1	US Filters
1.4	T	C	0.005 – 7.4	US Filters
1	T	C	0.09 – 10.0	CTI Techsep
0.5, 0.7, 0.8	T	C	0.02 – 7.1	US Filters
0.5	T	C	0.13 – 11.5	Ceramem
0.45	T	C	0.09 – 10.0	CTI Techsep
0.45	HF	PS	0.01 – 3.7	AG Technology
0.2	T	C	0.02 – 7.1	US Filters
0.2	T	C	0.13 – 11.5	Ceramem
0.2	T	C	0.09 – 10.0	CTI Techsep
0.2	HF	PP	2.0	Akzo
0.2	HF	PP/VF	10.8 – 15	Memtee
0.2	T	C		Membralox
0.2	HF	VF		Dow
0.2 – 0.5	T	PWF	4.7 – 106	Renovexa Technology
0.1	T	C	0.02 – 7.1	US Filters
0.1	HF	PS	0.01 – 3.7	AG Technology
0.1	HF	PVA	0.09 – 12.0	Kuraray
0.1	SW	PTFE	0.5 – 8.0	Desal
0.05	T	C		Membralox

HF = hollow Fiber

SW = spiral wound

T = ceramic

C = ceramic

PP = polypropylene

PS = polysulfone

PVA = polyvinytalcohol

VF = fiuorinated polymer

PWF = polyester woman fiber

2.3.6 Hollow Fiber Capillary Membrane

ลักษณะโครงสร้างของ Hollow Fiber Capillary Membrane เหมือนกับท่อขนาดเล็กหรือเส้นผม ด้านในจะมีผิวคล้ายฟองน้ำล้อมรอบผิวชั้นใน เมื่อมองรูปตัดจะเป็นรูปวงแหวน การนำไปใช้งานจะนำเส้นใยมามัดรวมกันเป็นรูปเกือกม้าหรือตัวยู (U) ปลายทั้ง 2 ข้างของเส้นใยถูกตรึงติดกับทางน้ำออก บรรจุอยู่ในท่อรูปทรงกระบอก เรียกว่าโมดูล ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยหลายร้อยถึงหลายพันเส้นทำให้มีพื้นที่ผิวสูง

นอกจากนี้ Hollow Fiber Capillary Membrane ยังสามารถใช้งานได้ในอีกลักษณะหนึ่งคือ นำเส้นใยมาขึงเรียงเป็นแผ่นปลายทั้ง 2 ข้าง ตรึงติดกับทางน้ำออก 2 ท่อ มีลักษณะเป็นโมดูลแบบเปลือย ติดตั้งจมตัวอยู่ใต้น้ำภายในถัง โดยดูดซึมน้ำผ่านเข้าภายในเส้นใยไหลตามรูกลวงไปรวมกันที่ท่อทางน้ำออก ดังแสดงในภาพที่ 2.3

2.3.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของ UF

เนื่องจากกลไกการกำจัดอนุภาคของกระบวนการ UF เป็นการกรองแบบคัดขนาด ดังนั้นปัญหาที่มักเกิดขึ้นในการทำงาน คือ การอุดตันที่เกิดจากสิ่งสกปรกต่างๆ ที่อยู่ในน้ำทำให้อัตราการผลิตน้ำ (Permeate flux) และอายุการใช้งานของเมมเบรนลดลง ซึ่งปัจจัยต่างๆ มีดังนี้

1) ลักษณะสมบัติของน้ำดิบ

ความเข้มข้นและชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำ จะมีผลถึงลักษณะสมบัติของน้ำที่จะผ่านเมมเบรนโดยตรง โมเลกุลสารอินทรีย์ที่ติดค้างจะทำปฏิกิริยากับเมมเบรน เช่น ดูดติด เกิดเจลขึ้น ที่บริเวณผิวเมมเบรนกับความต้านทานการไหลที่ต่างๆ กันองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำจะแตกต่างกันในแต่ละแห่ง และเปลี่ยนแปลงเป็นบางครั้งในแหล่งเดียวกัน

2) วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน

วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน ขนาดของรูกรอง และการกระจายขนาดของรูในเมมเบรน มีผลต่อลักษณะการอุดตันในระบบ UF วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ วัสดุที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยเมมเบรนชนิดที่ชอบน้ำจะดูดซับสารอินทรีย์น้อยกว่าเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่า การเกิดการอุดตันจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำ และชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน

3) การปรับสภาพน้ำเบื้องต้น

สารปนเปื้อนที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติ แบ่งเป็น 4 ประเภทคือ อนุภาคแขวนลอย (ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์ แต่จะรวมถึงสารอินทรีย์ด้วย) เกลืออนินทรีย์ละลาย สารอินทรีย์ละลาย จุลชีพ ซึ่งสารเหล่านี้จะทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนและอัตราการผลิตน้ำลดลง วิธีการป้องกันการอุดตันอาจทำได้โดย การปรับสภาพน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการ UF ได้แก่

การกำจัดอนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่ การเติมสารโคแอกกูแลนด์หรือผงถ่านกัมมันต์ การปรับ pH และอุณหภูมิ

4) ความดัน

การเพิ่มแรงดันมากขึ้นจะทำให้อัตราการผลิตน้ำและคุณภาพน้ำที่ได้ดีขึ้น แต่ถ้าแรงดันเพิ่มขึ้นจนเกินขีดจำกัด จะทำให้อนุภาคและโครงสร้างต่างๆ ที่สะสมบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนอัดตัวกันแน่น จนทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง และอาจทำลายโครงสร้างภายในของเมมเบรน จนไม่อาจคืนสภาพการกรองน้ำได้ดังเดิม

5) ความเร็วของการไหลของของเหลว

การไหลของของเหลวด้วยความเร็วสูงผ่านเมมเบรนทำให้เกิดแรงเฉือน ซึ่งจะช่วยลดการอุดตันที่หน้าของเมมเบรน ทำให้อัตราการผลิตน้ำสูงขึ้น ในการประยุกต์ใช้อัตราการเกิดแรงเฉือน สามารถควบคุมโดยปั้มและรูปร่างทางเรขาคณิตของเมมเบรนได้

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

COSTAS PELEKANI (1999) การศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เครื่อง High performance Exclusion Chomatography (HPLC) โดยได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติจากแหล่งน้ำ 2 แหล่งในตอนใต้ของออสเตรเลียได้ศึกษาขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติในช่วง (<500, 500-3000, 3000-10000, 10000-30000 และ >30000) โดยใช้ Ultarfiltration แยกเอาขนาดของสารอินทรีย์ธรรมชาติออกมาก่อนที่จะนำไปวัดด้วยเครื่อง HPLC โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีอื่นโดยเปรียบเทียบกับวิธี Flow field –Flow Fractionation (FIFFF) ซึ่งเป็นวิธีแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้หลักการความแตกต่างทางด้านไฮโดรไดนามิกในการแพร่สารอินทรีย์ธรรมชาติในการที่จะแยกขนาดโมเลกุลซึ่งแตกต่างจากวิธี High performance Exclusion Chomatography (HPLC) ที่ใช้หลักการแยกโดยผ่านรูเจลที่ใช้ในการแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ซึ่งจากการศึกษาเปรียบเทียบกันโดยใช้ขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติในช่วง (<500,500-3000,3000-10000,10000-30000,>30000) โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่จะวัดคือ น้ำหนักเฉลี่ยของโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ขนาดโมเลกุล ช่วงโมเลกุลที่พบมากที่สุดพบว่าวิธี HPLC จะได้กราฟข้อมูลขนาดของโมเลกุลที่ชัดเจนกว่า เร็วกว่า และวิเคราะห์ขนาดได้โมเลกุลขหลายขนาดกว่าคือสามารถวิเคราะห์ได้ละเอียดกว่าเครื่อง FIFFF

JAMES KILDUFF AND WAILTER J. WEBBER (1999) เป็นการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยวิธี Ultarfiltration โดยศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นประจุของ

สารละลายว่ามีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยวิธี Ultarfiltration หรือไม่ซึ่งได้ใช้สาร poly styrene sulfonate เป็นตัวเปรียบเทียบในการหาขนาดของสารอินทรีย์ธรรมชาติเพราะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกันกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยเมมเบรนที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยวิธี Ultarfiltration เป็นพวก celluosic type ใช้ในการศึกษาโดยใช้ขนดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง 2 ขนาด (3000 Da ,10000Da) โดยศึกษาอัตราการไหลของน้ำดีว่ามีอัตราการไหลเพิ่มขึ้นหรือไม่เมื่อเพิ่มจำนวนประจุในน้ำจากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนประจุพบว่า อัตราการไหลของน้ำดีไหลออกมาเพิ่มขึ้นเนื่องจากว่าผลของประจุไป ทำให้โครงสร้างของสารอินทรีย์ธรรมชาติหดสั้นลงทำให้ขนาดของสารอินทรีย์ลดน้อยลงทำให้การอุดตันเมมเบรนลดน้อยลงไปด้วย

Taylor และคณะ (1987) ใช้กระบวนการเมมเบรน 3 ชนิด คือ RO NF และ UF ในการกำจัดสาร THMP ออกจากน้ำบาดาล และน้ำผิวดิน พบว่าต้องการเมมเบรนที่มีค่า MWCO น้อยกว่าหรือเท่ากับ 400 ในสภาวะปกติในการดำเนินระบบ เพื่อควบคุม THMP และสรุปผลการวิจัยว่ากระบวนการเมมเบรนให้ผลดีทั้งทางด้านประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ ในการควบคุม THMP ในแหล่งน้ำที่มีสารอินทรีย์ในปริมาณสูง และควรใช้เป็นระบบบำบัดเบื้องต้นสำหรับควบคุมปริมาณ THMs

Tan และ Amy (1991) ทำการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการเติมโอโซนกับกระบวนการเมมเบรนในการกำจัดสีและควบคุมปริมาณ DBPs พบว่ากระบวนการทั้งสองมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในการกำจัดสีออกจากน้ำบาดาล โดยกระบวนการเมมเบรนกำจัดสีออกโดยกระบวนการทางกายภาพ ในขณะที่กระบวนการเติมโอโซนเปลี่ยนรูปสีในน้ำได้สารที่ก็ยังคงก่อให้เกิด DBPs กระบวนการเมมมเบรนสามารถควบคุมการเกิด DBPs ได้ดีกว่า เนื่องมาจากประสิทธิภาพในการกำจัดสารที่ก่อให้เกิด DBPs ที่ดีกว่า นอกจากนั้นกระบวนการเติมโอโซนยังทำให้เกิด Ozonnation By-product ด้วย

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 Hydrochloric Acid (HCl), Analytical univar reagent, APS Finechem

3.1.2 Di-Sodium hydrogen phosphate dodecahydrate ($Na_2H_2PO_4.12H_2O$), Analytical univar reagent, APS Finechem

3.1.3 Sodium chloride (NaCl), Analytical univar reagent, APS Finechem

3.1.4 Sodium hydroxide (NaOH), Analytical univar reagent, Ajax Finechem

3.1.5 Sodium dihydrogen orthophosphate ($NaH_2PO_4.H_2O$), Analytical univar reagent, APS Finechem

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 อุปกรณ์

3.2.1.1 บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร

3.2.1.2 บีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร

3.2.1.3 บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร

3.2.1.4 แท่งแก้วคนสาร

3.2.1.5 ถังผสมน้ำตัวอย่าง

3.2.1.6 ถังสำหรับใส่น้ำตัวอย่างที่เตรียมแล้ว

3.2.1.7 ช้อนตักสารเคมี

3.2.1.8 เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง

3.2.1.9 สายยางซิลิโคน

3.2.1.10 ถังน้ำขนาด 20 ลิตร

3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์

3.2.2.1 เครื่องวัดค่าพีเอช (Wissenschaftlich-Technische Werkstatten GMBH, ประเทศเยอรมัน)

3.2.2.2 เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้า (Wissenschaftlich-Technische Werkstatten GMBH,ประเทศเยอรมัน)

3.2.2.3 เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (Shimadzu Corporation รุ่น UV mini 1240, ประเทศญี่ปุ่น)

3.2.2.4. เครื่องวิเคราะห์ Total Organic Carbon (TOC) (Shimadzu Corporation รุ่น TOC-VCPH, ประเทศญี่ปุ่น)

หลักการและวิธีการทำงานของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1) เครื่องมือวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)

เครื่องมือวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS spectrophotometer)รุ่น UV mini 1240 จากบริษัท Shimadzu corporation (Japan) เป็นเครื่องแบบ single beam 5 nm ที่ใช้วิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสารอินทรีย์ธรรมชาติ สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงยูวี (UV-VIS spectrophotometer) โดยค่าความยาวคลื่นที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารอินทรีย์วัดที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 254 นาโนเมตร การวัดค่า UV_{254} อาศัยหลักการที่ว่าสารอินทรีย์ที่เป็นสารอะโรมาติกหรือเป็นสารที่มีพันธะทางเคมีเป็นพันธะคู่ จะสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลตโดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร จึงทำให้การวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นวิธีการที่ดีและเหมาะสมในการวัดปริมาณของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

2) เครื่องมือวิเคราะห์คาร์บอนทั้งหมดของสารอินทรีย์ (Total Organic Carbon, TOC)

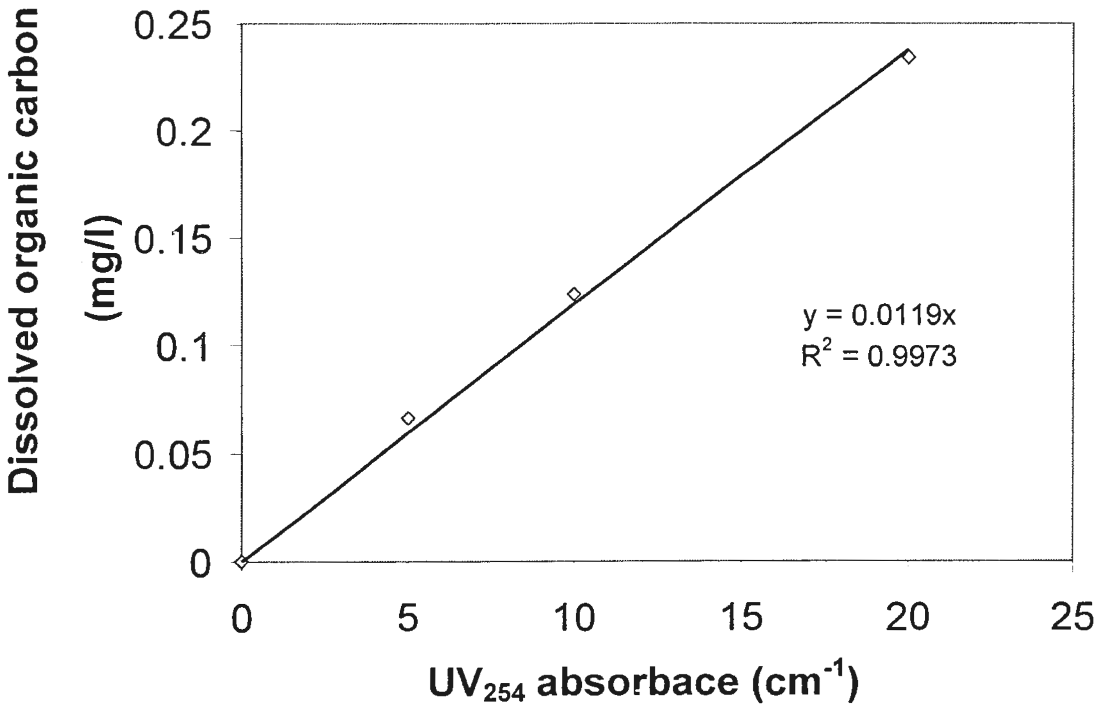
เครื่องมือวิเคราะห์คาร์บอนทั้งหมดของสารอินทรีย์ (Total Organic carbon, TOC) รุ่น TOC-VCPH ของบริษัท Shimadzu Corporation (Japan) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สารคาร์บอนของสารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง ภาพที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของสารคาร์บอนทั้งหมดและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร โดยใช้น้ำตัวอย่างจากแหล่งน้ำหนองอีเจมส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

หลักการทำงานของเครื่อง TOC แยกออกเป็น 3 ระบบ คือ

1. วิเคราะห์หา total organic carbon โดยน้ำตัวอย่างจะถูกนำเข้าไปที่ combustion tube ซึ่งตัวอย่างจะถูกทำการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียสกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นจะถูกทำให้เย็นลงโดย cooling tubing จากนั้นจะถูกกำจัดความชื้นโดยการดูดซับที่ pure water trap และส่งต่อไปที่ halogen scrubber เพื่อดูดซับเอาก๊าซกลุ่ม halogenจากนั้นส่งไปที่ NDIR เพื่อทำการวัดความเข้มข้นของแสงออกมาเป็นพื้นที่ใต้กราฟ

2. วิเคราะห์หา inorganic carbon โดยน้ำตัวอย่างจะถูกเติมด้วยกรดฟอตฟลอริค เพื่อเปลี่ยนกลุ่มสาร inorganic carbon เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากนั้นเครื่องก็จะทำการวิเคราะห์ผลเหมือนกับขั้นตอนการวิเคราะห์ total organic carbon

3. วิเคราะห์หา inorganic carbon ในตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณสาร inorganic carbon มากกว่าสาร organic carbon มากมากโดยการเติมกรดไล่ส่วนที่เป็น organic carbon ออกแล้ววิเคราะห์ส่วนที่เป็น inorganic carbon



ภาพที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของอินทรีย์คาร์บอน

วิธีการวิเคราะห์เครื่อง TOC

1. เตรียม ค่าความเข้มข้นของ Potassium Hydrogen Phthalate ที่ความเข้มข้น 0, 5000, 10000 และ 20000 ppb

2. เตรียมตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์โดยเจือจางความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างให้มีค่าอยู่ในช่วงความเข้มข้นของ standard ที่นำมาทำการวิเคราะห์

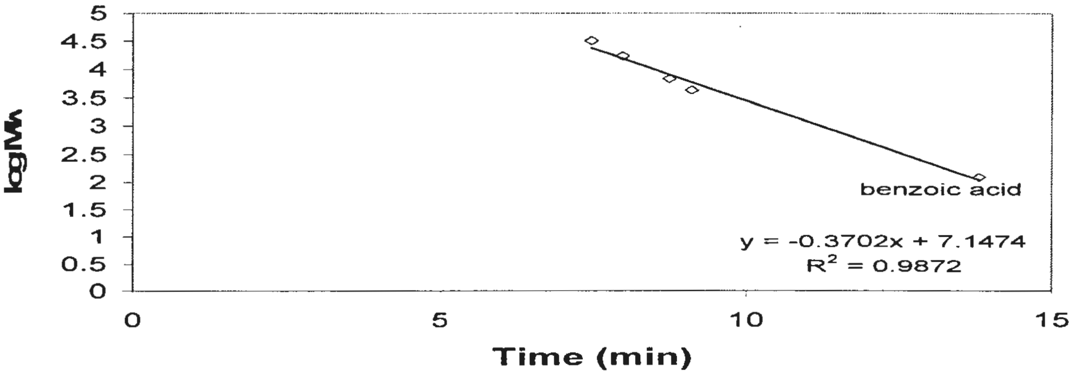
3. ทำการวิเคราะห์โดยการนำตัวอย่างเข้าเครื่อง TOC โดยการใช้การวิเคราะห์แบบ Auto dilution สำหรับการวิเคราะห์ standard และทำการวิเคราะห์แบบ Auto injection สำหรับวิเคราะห์ตัวอย่าง

3) เครื่องมือวิเคราะห์โครมาโทรกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatography, HPLC)

เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดโมเลกุลโดยใช้กระบวนการแยกแบบใช้ความดันสูง (High performance liquid chromatography, HPLC) รุ่น CTO – 10 Avp ของบริษัท Shimadzu Corporation (Japan) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง

หลักการทำงานของเครื่อง HPLC

โดยน้ำตัวอย่างถูกฉีดเข้าไปใน column installation จากนั้นจะถูกสารที่เป็น mobile phase ชะออกจาก column จากนั้นตัวอย่างจะถูกส่งต่อไปที่ UV detector โดยสารที่มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าจะหลุดออกมาก่อนเครื่องจะวิเคราะห์ออกมาเป็นพื้นที่ใต้กราฟ ระหว่างค่าดูดกลืนแสงของ UV กับ เวลา



ภาพที่ 3.2 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ขนาดโมเลกุลด้วยเครื่อง HPLC

วิธีวิเคราะห์เครื่อง HPLC

1. เตรียมตัวอย่าง standard ของ polysulfonate ที่ขนาดโมเลกุล 4300 6800 17000 32000 ดอลตัน และ benzoic acid ขนาดน้ำหนักโมเลกุล 122 กรัมต่อโมล

2. จากนั้นทำการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยต้องทำการกรองน้ำตัวอย่างผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอนก่อนนำไปทำการวิเคราะห์

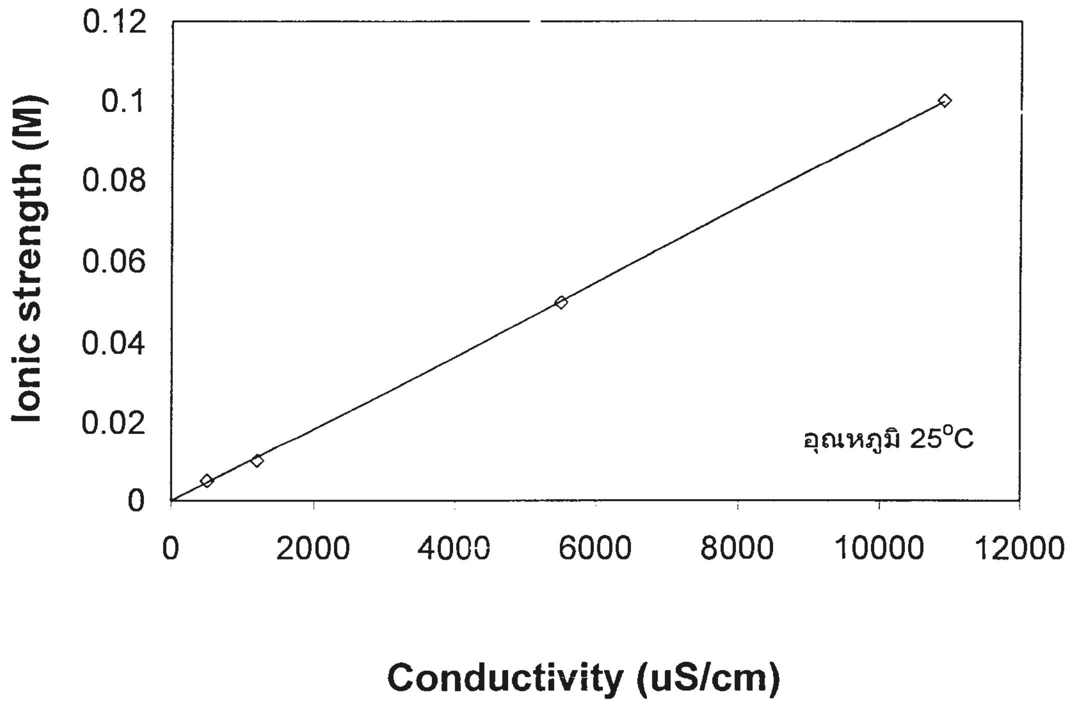
3. วิเคราะห์ตัวอย่างโดยการฉีดแบบ Auto injection

4) เครื่องวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)

เครื่องมือวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) รุ่น inoLab Cond Level 2 จากบริษัท Wissenschaftlich- Technische Werkstatten (WTW) GmbH & Co. (Weilheim, Germany) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าหรือปริมาณไอออนที่อยู่ในน้ำตัวอย่าง เช่น ไอออนที่เป็นประจุลบและเป็นประจุบวก แสดงหน่วยเป็นไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (μS / cm) หรือ มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (mS/cm) ภาพที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์กับค่าการนำไฟฟ้า สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์และค่าการนำไฟฟ้า แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$NaCl\ concentration\ (M) = 9.0 \times 10^{-6} \times (conductivity,\ \mu S/cm)\ ;\ r^2 = 1$$

โดยที่ค่า Conductivity มีหน่วยเป็นไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

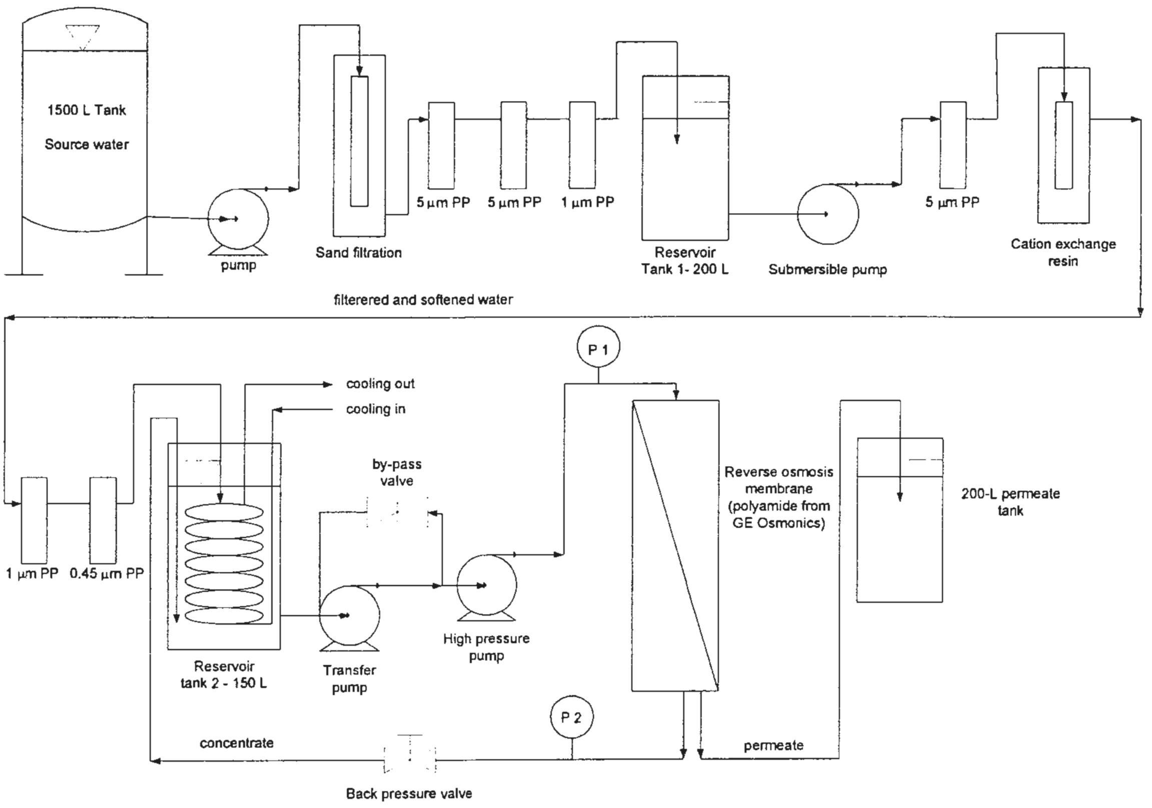


ภาพที่ 3.3 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบระหว่างค่าความแรงประจุกับค่าการนำไฟฟ้า

3.2.3 ระบบเยื่อกรอง

3.2.3.1 ระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis Membrane) ดังแสดงในภาพที่ 3.4 ประกอบด้วย

- เยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ จากบริษัท GE Osmonics ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเภท Brackish Water- RO Polyamide PA Membrane ชนิด Thin-film composite (TFC) membrane รุ่น AG4040F (Spiral wound crossflow)
- ปั๊มแบบทรานสเฟอร์ปั๊ม Transfer pump (Model PL-95 M) จาก Bacelona ประเทศสเปน
- ปั๊มที่มีความดันสูงแบบ High pressure boost pump (Model 25) จาก GRUNDFOS
- ปั๊มน้ำแบบจุ่มลงในน้ำ (Submersible pump) ของ Monoflo จากประเทศออสเตรเลีย
- ถังบรรจุ Cation exchange resin
- ถังกรองทราย
- ชุดกรองขนาด 5 ไมครอน (μm) เป็นแบบโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) ชนิด Purtrexdept cartridge filters, บริษัท GE Osmonics ประเทศสหรัฐอเมริกา
- ชุดกรองขนาด 1 ไมครอน (μm) เป็นแบบโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) ชนิด Purtrexdept cartridge filters, บริษัท GE Osmonics ประเทศสหรัฐอเมริกา
- ชุดกรองขนาด 0.45 ไมครอน (μm) เป็นแบบโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) ชนิด Flotrex PN pleated filters, บริษัท GE Osmonics ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องชั่งของ Kern & Sohn GMBH (Model EOB 60K50) ประเทศสหรัฐอเมริกา
- ถังน้ำสแตนเลส ขนาด 1,500 ลิตร ของ บริษัท แอล.วี.พี. กรุ๊ปโปรดักส์ ประเทศไทย
- ถังน้ำสแตนเลส ขนาด 150 ลิตร
- ถังน้ำ ขนาด 200 ลิตร



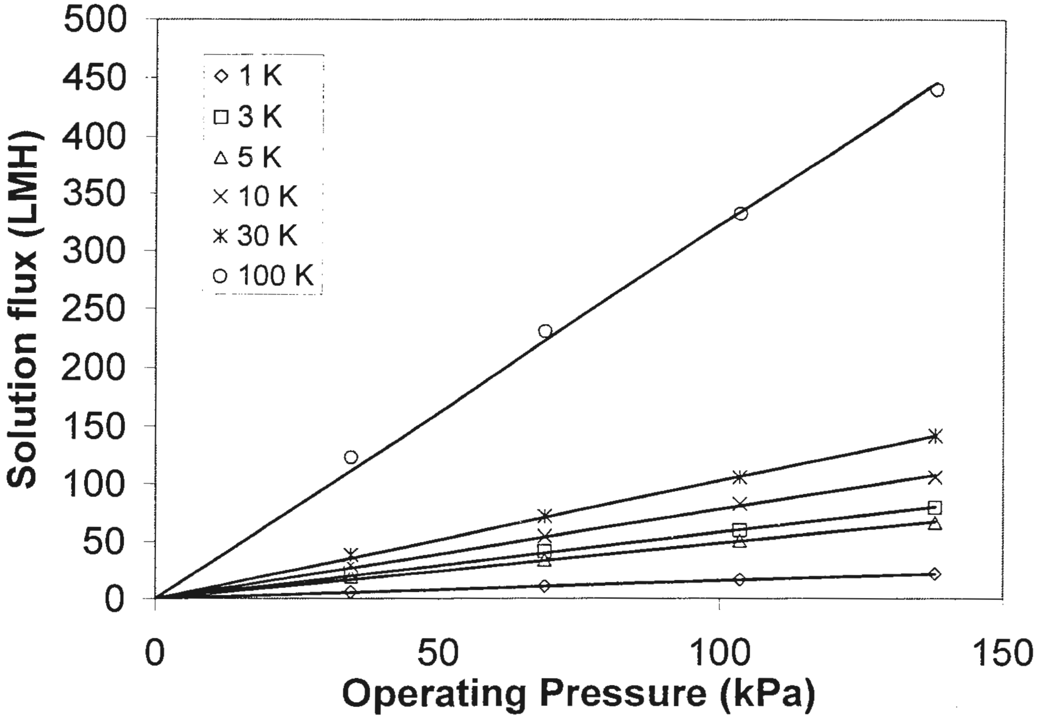
ภาพที่ 3.4 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ

3.2.3.2 ระบบเยื่อกรองแบบอัลตรา (Ultrafiltration Membrane) ดังแสดงในภาพที่ 3.5

ตารางที่ 3.1 แสดงเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันแบบ hollow fiber cartridge

ขนาดรูพรุน	Model Number	พื้นที่หน้าตัด(cm^2)	Batch Number
1 K	UFP-1- C-4 MA	625	4-1533
3 K	UFP-3- C-4 MA	625	4-1134
5 K	UFP-5- C-4 MA	625	4-1484
10 K	UFP-10- C-4 MA	625	4-1408
30 K	UFP-30- C-4 MA	625	4-1436
100 K	UFP-100- C-4 MA	625	4-1349

- ปั๊มขนาดเล็กของ Watsan Marlow 323 Pump ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องชั่งของ Shimadzu รุ่น BL-2200H ผลิตในประเทศญี่ปุ่น

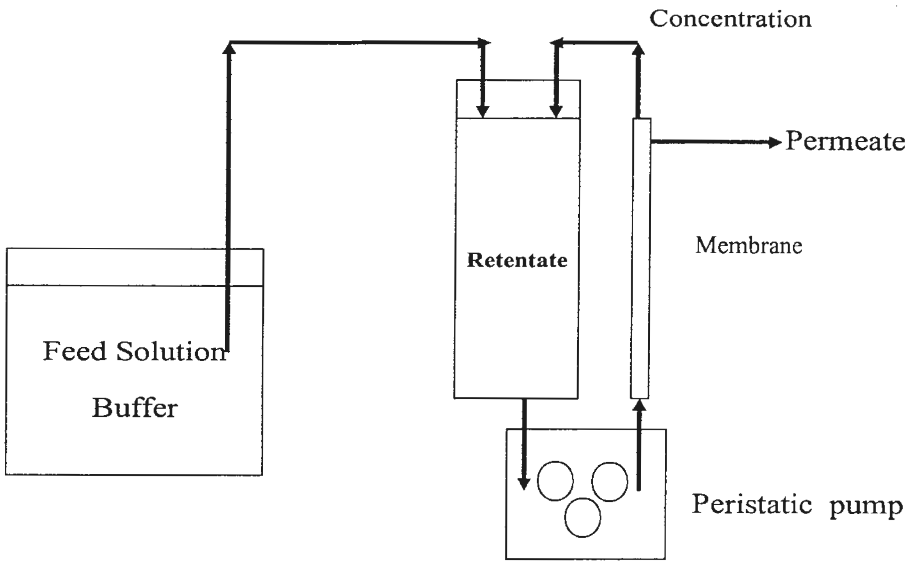


ภาพที่ 3.5 คุณสมบัติการซึมผ่านของแผ่นเมมเบรน

จากภาพที่ 3.5 เป็นกราฟแสดงค่าฟลักซ์ต่างๆ ของแต่ละเมมเบรนที่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันที่ใช้ทดสอบในการดำเนินระบบ และจากการศึกษาคุณสมบัติของการซึมผ่านแผ่นเมมเบรนแต่ละขนาดจะทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของแผ่นเมมเบรนแต่ละขนาดโดยการหาค่าความชันของแต่ละกราฟจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของแผ่นเมมเบรนตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

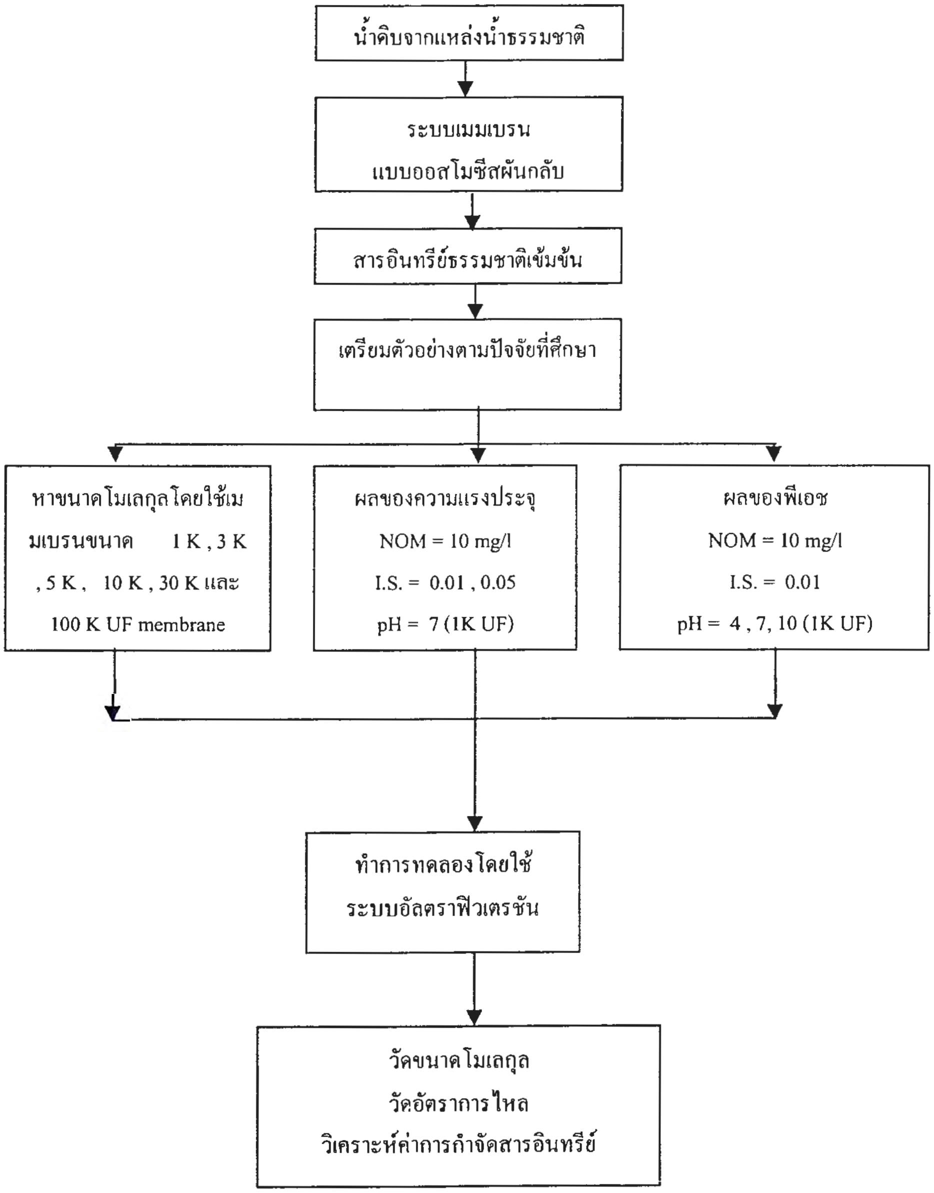
ขนาดรูพรุนแผ่นเมมเบรน (ดาลตัน)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ($Lm^{-2}hr^{-1}kPa^{-1}$)
100000	3.23
30000	1.03
10000	0.78
5000	0.59
3000	0.49
1000	0.16



ภาพที่ 3.6 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ ได้แก่ 1) การหาขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ และ 2) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ พีเอช และสภาพความแรงของไอออน การหาขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ภาพที่ 3.6 แสดงแผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 3.7 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4 ตัวอย่างน้ำและการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

3.4.1 การเก็บตัวอย่างน้ำ

ตัวอย่างน้ำถูกนำมาจากแหล่งน้ำผิวดินธรรมชาติภายในบริเวณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งใช้เป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับกระบวนการผลิตน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคภายในมหาวิทยาลัย ตัวอย่างน้ำประมาณ 1,500 ลิตรถูกเก็บไว้ภายในถังสแตนเลส ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติโดยใช้ระบบออสโมซิสผันกลับ น้ำตัวอย่างถูกเก็บตัวอย่างและทำการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ได้แก่ พีเอช, ค่าการนำไฟฟ้า

(Conductivity), ค่าการดูดกลืนแสง $UV_{254\ nm}$ และสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon)

3.4.2 การเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

ระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ เป็นระบบที่ใช้แยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติในแหล่งน้ำธรรมชาติ ดังแสดงในภาพที่ 3.4 การเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติมีขั้นตอนดังนี้

1. เก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำดิบประมาณ 1,000 ลิตร

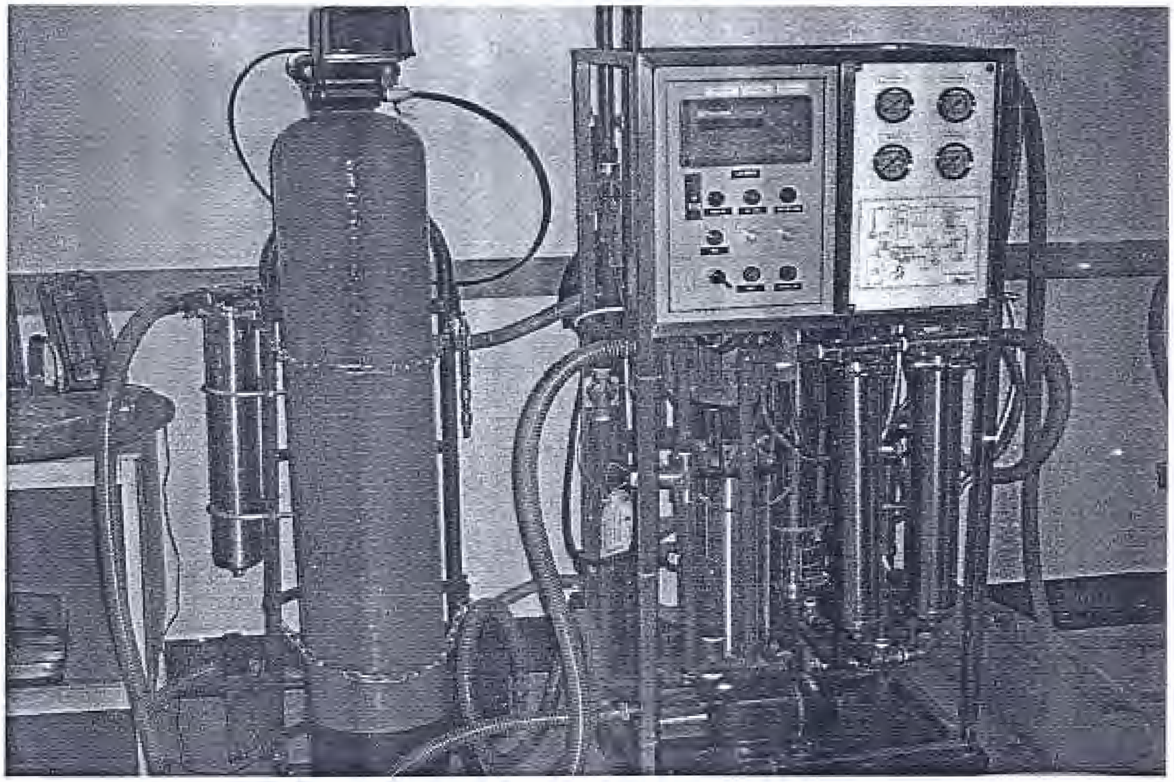
2. ผ่านเข้าสู่กระบวนการบำบัดเบื้องต้นเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่ และกำจัดไอออนที่ส่งผลต่อการเกิดตะกรันบนผิวของเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ

3. การผ่านน้ำเข้าสู่ระบบเยื่อกรองทำให้สามารถแยกน้ำออกมาได้เป็น 2 ส่วน คือน้ำที่มีผ่านระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับที่มีความสะอาดสูงหรือมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำมากเรียกส่วนนี้ว่า เพอร์มีเอท (Permeate) และน้ำที่ไม่ผ่านเยื่อกรอง เรียกว่า คอนเซนเตรท (Concentrate) ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติสูง อันเนื่องมาจากความสามารถในการกักกัน (Retention) ของเยื่อกรอง

4. ทำการเวียน (Retentate) น้ำคอนเซนเตรทกลับไปยังถังป้อน ผสมกับน้ำดิบเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบเยื่อกรองตลอดเวลาที่เดินระบบ ส่วนน้ำเพอร์มีเอทที่ผลิตได้ ถือว่าเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง ถูกเก็บแยกในถังเก็บ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการล้างระบบต่อไป

5. หยุดการเดินระบบเยื่อกรอง ตามข้อ 4. เมื่อปริมาณน้ำเพอร์มีเอทที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 970 ลิตร และน้ำคอนเซนเตรทในถังป้อน ลดลงเหลือประมาณ 30 ลิตร

6. เก็บน้ำคอนเซนเตรท ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติสูงนำไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์เพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพ และการเกิดการอุดตันของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติบนผิวของเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันต่อไป



ภาพที่ 3.8 ภาพแสดงระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ

3.5 การแยกขนาดโมเลกุลและการหาเปอร์เซ็นต์ของมวลสารอินทรีย์ธรรมชาติ

โดยทำการดำเนินระบบออกเป็น 2 ส่วนการทำงานได้แก่ Concentration Mode กับ Dialfiltration Mode

3.5.1 Concentration Mode มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมน้ำตัวอย่างความเข้มของสารอินทรีย์ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความแรงของประจุเท่ากับ 0.01 และพีเอชเท่ากับ 7 ปริมาตร 10 ลิตร

2. ทำการ feed น้ำตัวอย่างที่เตรียมไว้โดยทำการแยกขนาดจากเมมเบรนที่มีขนาด 100 K ก่อน

3. ดำเนินระบบไปจนถึงกระทั่งน้ำในส่วนที่อยู่ในส่วน Concentrate เหลือปริมาตร 1.5 ลิตร

4. ทำการ Dialfiltration Mode เก็บน้ำตัวอย่างในส่วนของ Concentrate แล้วนำไปวัดขนาดโมเลกุล

3.5.2 Dialfiltration Mode มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการ feed สารละลาย Buffer ที่มีค่าความแรงประจุเท่ากับ 0.01 และมีค่าพีเอช เท่ากับ 7

2. ดำเนินระบบต่อไปจนกระทั่งสารละลาย Buffer หมดไป 1.5 ลิตร

3. นำส่วนของน้ำเพอร์มิเอทที่ผ่านกระบวนการอัลตราฟิวเตรชันทั้ง 2 ระบบไปทำการแยกขนาดโมเลกุลที่ 30K, 10K, 5K, 3K, และ 1K ตามลำดับต่อไป

4. นำส่วนของน้ำที่เป็น Concentrate ของแต่ละเมมเบรนที่ได้ไปทำการวัดขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3.3 ตารางสรุปการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเยื่อกรองแบบอัลตรา

ปัจจัยที่ศึกษา	**ค่าที่ศึกษา**	**ปัจจัยควบคุม**
ขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ	<1K,1K-3K,3K-5K,5K-10K,10K-30K, 30K-100K และ >100K	pH = 7, I.S. = 0.01 M, NOM = 40 $mg.L^{-1}$ Buffer (pH = 7, I.S. = 0.01 M)

3.6 การศึกษาการทำงานระบบเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน

3.6.1 แผ่นเมมเบรนแบบอัลตราชัน

ในการวิจัย ใช้เยื่อกรองแบบอัลตราของ A/G Technology Corporation ลักษณะของเมมเบรนจะเป็นแบบท่อม้วนมองภายนอกจะคล้ายโมดูลแบบท่อจะเก็บรักษาโดยแช่ไว้ในสารละลาย Sodium Azide ความเข้มข้น 100mg/L เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แล้วนำไปแช่ไว้ในตู้เย็นเพื่อลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่มีผลต่อผิวหน้าเยื่อกรอง โดยเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของเยื่อกรองแบบอัลตราของ A/G Technology Corporation

คุณลักษณะ	ค่า
ประเภทของเยื่อกรอง	Hollow fiber cartridge
วัสดุที่ใช้ทำเยื่อกรอง	Polysulfone
ขนาดรูพรุน	<1K,1K-3K,3K-5K,5K-10K,10K-30K, 30K-100K และ >100K
พื้นที่ผิว	0.625 m^2
ความยาว	31.8 cm.
เส้นผ่านศูนย์กลาง	3.2 cm.
ความดันของการดำเนินการ	15 psi (724.5 kPa)

3.6.2 การทำความสะอาดเยื่อกรอง

มีขั้นตอนดังนี้

1. นำเยื่อกรองแบบอัลตราที่ได้เก็บรักษาไว้ออกมา ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน
2. ติดตั้งเยื่อกรองในชุดทดลองเยื่อกรอง
3. ทำการล้างเบส โดยใช้ด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร โดยการฟลัชชิ่งประมาณ 45 นาที
4. ล้างออกด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยผ่านน้ำปราศจากไอออนจนกระทั่งพีเอชของน้ำที่ออกจากระบบเท่ากับพีเอชของน้ำที่เข้าสู่ระบบ
5. ทำการเดินระบบด้วยน้ำตัวอย่าง

3.6.3 การเก็บรักษาเมมเบน

เก็บไว้ในสารละลายโซเดียมเอไซด์ความเข้มข้น 100 mg/l เก็บไว้ในภาชนะปิดเพื่อไม่ให้สัมผัสถูกอากาศที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.6.4 ขั้นตอนการเดินระบบเยื่อกรองแบบอัลตรา

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชั่นได้แก่ ชุดทดลองเยื่อกรอง (A/G Technology Corporation) ซึ่งเป็นระบบเยื่อกรองแบบไหลขวาง (Crossflow filtration unit) ดังภาพที่ 3.5 โดยในการทดลองด้วยระบบเยื่อกรองแบบอัลตราทำการควบคุมการทำงานของระบบดังนี้

- อัตราการไหลเริ่มต้น (Initial flux) : 1.68 ลิตรต่อนาที
- ความดันของการดำเนินการ 15 พีเอชไอ
- เวลาที่ใช้ในการเดินระบบ : 250 นาที

ขั้นตอนการเดินระบบเยื่อกรองแบบอัลตราดังนี้

1. ติดตั้งเยื่อกรองในระบบ และทำความสะอาดเยื่อกรอง ดังได้กล่าวมาแล้วในข้อ 3.5.1 และ 3.5.2

2. ทำความสะอาดเยื่อกรองก่อนใช้โดย เดินระบบด้วย NaOH0.0001M เป็นเวลาอย่างน้อย 45 นาที วัดอัตราการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรอง (Pure water permeability) ปรับสภาวะการทำงานของระบบดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

3. ผ่านน้ำตัวอย่างที่ต้องการศึกษา เริ่มจับเวลานับตั้งแต่น้ำตัวอย่างผ่านเข้าสู่ระบบเยื่อกรอง

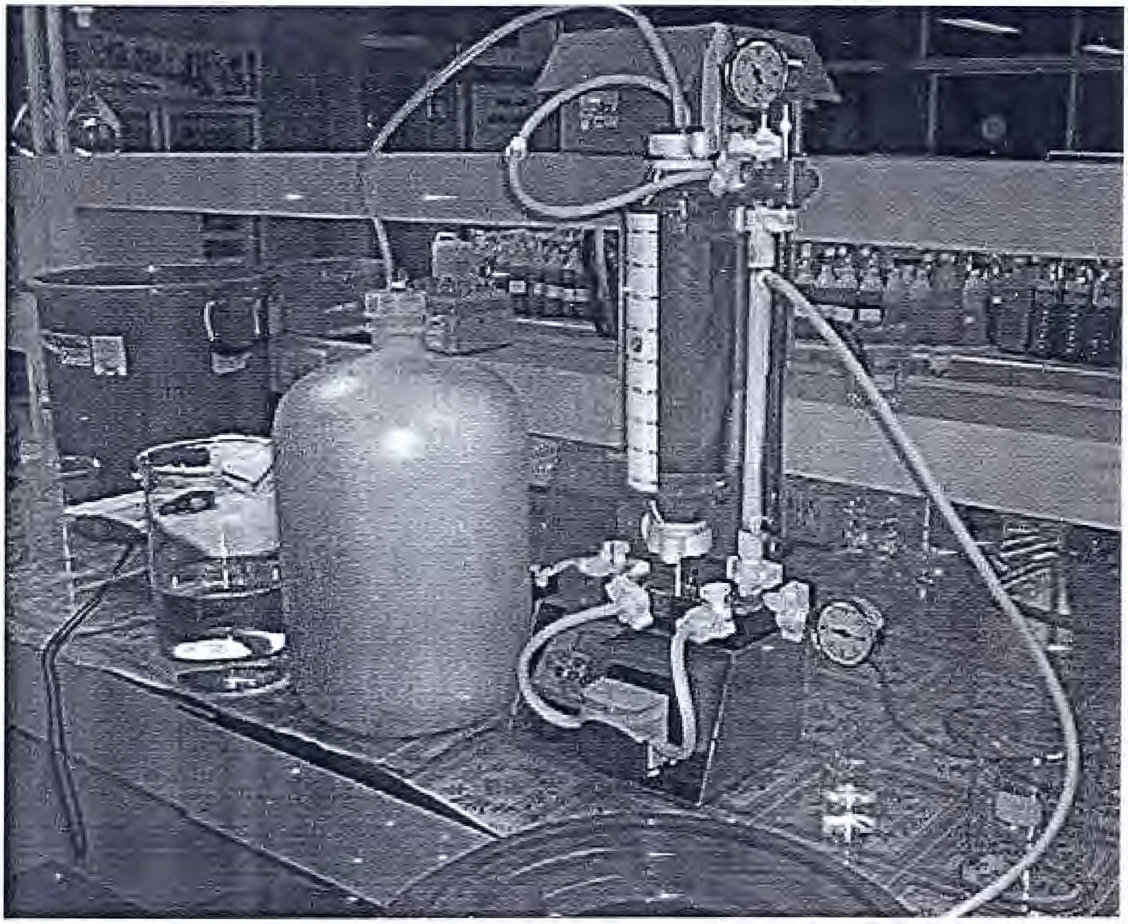
4. วัดอัตราการไหล ทุก 10 นาทีในช่วง 1 ชั่วโมงแรกและทุก 30 นาทีหลังจากนั้นตลอดการเดินระบบ เพื่อศึกษาการทดลองของอัตราการไหลอันเนื่องมาจากการอุดตัน การวัดอัตราการไหล โดยใช้บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร รองน้ำที่ผ่านออกมาทางเพอร์มีเอท เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (เนื่องจากต้องการความแม่นยำจึงต้องใช้การชั่งน้ำหนัก) เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของเพอร์มิเอท

5. เก็บตัวอย่างน้ำและนำไปวิเคราะห์ค่าพีเอช สภาพการนำไฟฟ้า ค่าการดูดกลืนแสง สารอินทรีย์ทั้งหมด เพื่อทดสอบความสามารถของเยื่อกรองในการกักสาร โดยเก็บตัวอย่างทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ที่ปริมาตร 250 มิลลิลิตร, 1,000 มิลลิลิตร, 1,500 มิลลิลิตร, 2,000 มิลลิลิตร, 2,500 มิลลิลิตร, และ 3,000 มิลลิลิตร โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพอร์มีเอท

6. ทำความสะอาดเยื่อกรองด้วยน้ำปราศจากไอออนเมื่อเดินระบบครบเวลาที่กำหนด โดยการใช้น้ำปราศจากไอออนไล่สารอินทรีย์ทางธรรมชาติในระบบออกมาก่อน โดยใช้น้ำประมาณ 1,000 มิลลิลิตร เป็นการทำความสะอาดสารอินทรีย์ที่เกาะอยู่บนผิวหน้าเยื่อกรองโดยการฟลัชชิ่งใช้เวลาประมาณ 45 นาที วัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอท ด้วยการผ่านน้ำปราศจากไอออน

7. ทำความสะอาดเยื่อกรองด้วยด่าง โดยผ่านด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.0001 โมลต่อลิตร โดยการฟลัชชิ่งประมาณ 45 นาที เพื่อทำความสะอาดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่ถูกดูดซับและอุดตันเยื่อกรองที่ยังเหลืออยู่หลังจากทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้ว วัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มีเอท ด้วยการผ่านน้ำปราศจากไอออน

8. ล้างเยื่อกรองด้วยน้ำปราศจากไอออนอีกครั้ง และเก็บเยื่อกรองที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์หาหลักฐานการอุดตันต่อไป



ภาพที่ 3.9 ภาพระบบเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน

3.7 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรนแบบอัลตรา

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันเยื่อกรองแบบอัลตราสามารถที่จะสรุปได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตารางสรุปการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน

ปัจจัยที่ศึกษา	ค่าที่ศึกษา	ปัจจัยควบคุม
ค่าความแรงของประจุ	0.01, และ 0.05 M	NOM = 10 mg.L^{-1}, pH = 7
ค่าพีเอช	4, 7, และ10	NOM = 10 mg.L^{-1}, I.S. = 0.01

3.7.1 ผลของความแรงของประจุ (Ionic Strength)

1. เจือจางสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นสูง ด้วยน้ำปราศจากไอออน ให้มีค่าความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมของคาร์บอนต่อลิตร
2. ปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 7 โดยการใช้ HCl ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร หรือ NaOH ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
3. วัดค่าการนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับค่าความแรงของประจุ (Ionic Strength)
4. ปรับค่าความแรงของประจุ โดยใช้ NaCl โดยแปรค่าความแรงของประจุเท่ากับ 0.01, และ 0.05 โมลต่อลิตร
5. ทำการเดินระบบเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.5

3.7.2 ผลของค่าพีเอช

1. เจือจางสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นสูง ด้วยน้ำปราศจากไอออน ให้มีค่าความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมของคาร์บอนต่อลิตร
2. ปรับพีเอช โดยแปรค่าพีเอช ที่ 4, 7 และ 10 โดยใช้ HCl เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร หรือ NaOH เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
3. วัดค่าการนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับค่าความแรงของประจุ (Ionic Strength)
4. ปรับค่าความแรงของประจุ โดยใช้ NaCl ให้มีค่าเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
5. ทำการเดินระบบเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.5

3.8 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ จากการเดินระบบเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน นำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ที่ศึกษาและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

พารามิเตอร์	เครื่องมือ
สภาพการนำไฟฟ้า	เครื่องวัด Conductivity
ค่าการดูดกลืนแสง	UV-Visible Spectrophotometer
สารอินทรีย์ทั้งหมด	Total Organic Carbon Analyzer (TOC)
ขนาดโมเลกุลสารอินทรีย์ธรรมชาติ	HPLC

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง

แหล่งน้ำผิวดินที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาเพื่อการอุปโภคและบริโภคภายในมหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำ

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้
พีเอช	7.04
สารคาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon)	5.54 $mg.L^{-1}$
การดูดกลืนแสง UV_{254nm}(UV Absorbance)	0.1432 cm^{-1}
การดูดกลืนแสงจำเพาะ (Specific UVA (UV_{254nm}/TOC))	5.98 $L.\ mg^{-1}.\ m^{-1}$
การนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่อุณหภูมิ 25°C	30.7 $\mu S.cm^{-1}$
ความขุ่น (Turbidity)	6.25 NTU
ความกระด้าง (Hardness)	15.4 mg as $CaCO_3$/L
ความเป็นด่าง (Alkalinity) i.e. HCO_3^-	22 mg as $CaCO_3$/L
ปริมาณแคลเซียม (Ca^{2+})	5.6 mg as $CaCO_3$/L
ปริมาณแมกนีเซียม (Mg^{2+})	9.8 mg as $CaCO_3$/L
ปริมาณคลอไรด์ (Cl^-)	3.25 mg Cl^-/L
ปริมาณซัลเฟต (SO_4^{2-})	0.07 mg SO_4^{2-}/L

จากข้อมูลในตารางจะเห็นได้ว่าค่าจากพารามิเตอร์ของน้ำตัวอย่าง มีค่าคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำดิบ ที่สามารถนำมาทำการผลิตน้ำประปาได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับตารางคุณภาพน้ำดิบตามตารางที่ 2.3 และค่าพีเอชของที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 7.04 อยู่ในช่วงของค่าพีเอชที่จะทำการศึกษาคืออยู่ในช่วงพีเอช 4-10 ส่วนค่าของสาร

คาร์บอนทั้งหมดของน้ำดิบมีค่าเท่ากับ 5.54 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งอยู่ในช่วงที่ใช้ทำการศึกษาคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรจากการเตรียมน้ำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการกรองแบบย้อนกลับ

4.2 การศึกษาสมดุลมวลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

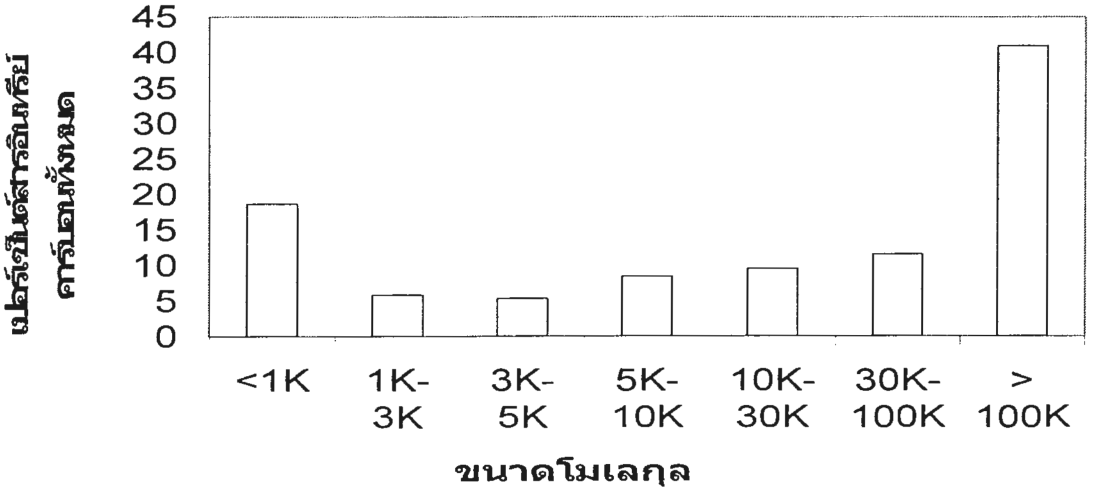
ในการศึกษาสมดุลมวลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของแหล่งน้ำที่ทำการศึกษาโดยใช้กระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน ทำการแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เมมเบรนขนาด 100 K, 30K, 10K, 5K, 3K, และ 1K ตามลำดับ สามารถแยกช่วงขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติได้ตามช่วงขนาดมากกว่า 100K, ช่วงขนาดโมเลกุล 30K-100K, ช่วงขนาดโมเลกุล 10K-30K, ช่วงขนาดโมเลกุล 5K-10K, ช่วงขนาดโมเลกุล 3K-5K, ช่วงขนาดโมเลกุล 1K-3K และช่วงขนาดน้อยกว่า 1K ตามลำดับ และทำการวัดหาปริมาณมวลของสารอินทรีย์ธรรมชาติตามแต่ละช่วงของขนาดโมเลกุลต่างๆ โดยใช้เครื่อง TOC

ตารางที่ 4.2 ตารางเปอร์เซ็นต์มวลของสารอินทรีย์ในช่วงขนาดโมเลกุลต่างๆ และเปอร์เซ็นต์การสูญเสีย

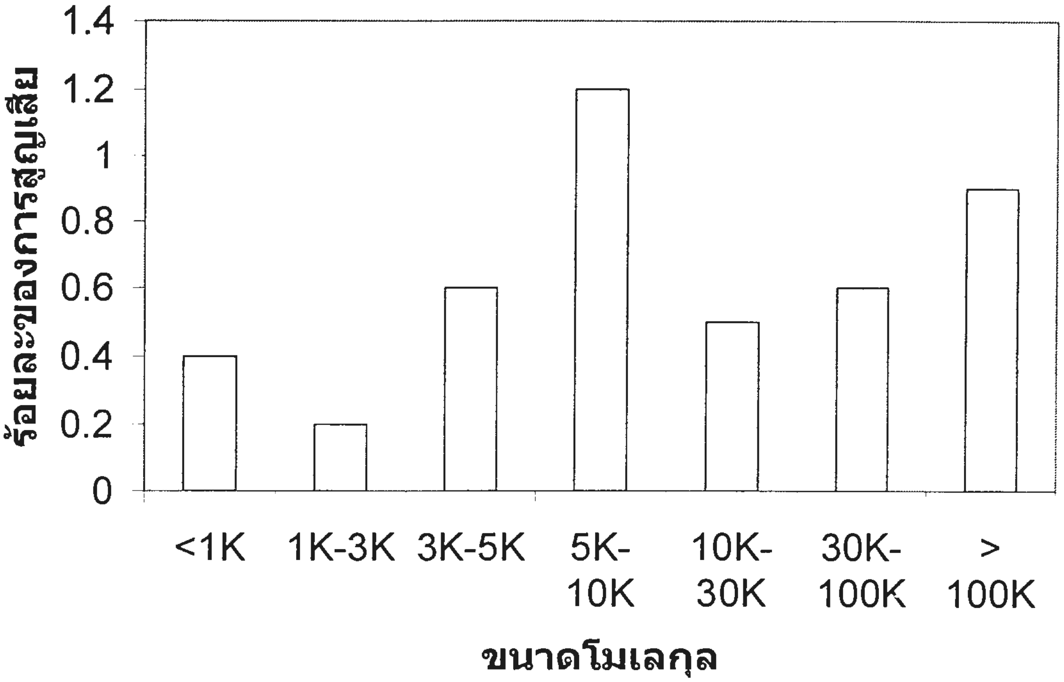
ช่วงขนาดโมเลกุล (ดาลตัน)	ร้อยละของมวลสารอินทรีย์	ร้อยละของการสูญเสีย
<1000	18.2	0.4
1000-3000	5.6	0.2
3000-5000	4.7	0.6
5000-10000	7.2	1.2
10000-30000	9.0	0.5
30000-100000	10.9	0.6
> 100000	40.0	0.9
รวม	95.6	4.4

จากค่าในตารางพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเปอร์เซ็นต์มวลของสารอินทรีย์ที่สูญเสียไปเนื่องมาจากมีบางส่วนที่มีการติดค้างบนผิวเมมเบรนโดยที่แผ่นเมมเบรนขนาด 5000 ดาลตันที่ทำการแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติในช่วง 5K-10K มีค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลของสารอินทรีย์มากที่สุดคือ 1.2 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากว่าขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำดิบมีขนาด 4,144 กรัมต่อโมล ซึ่งมีขนาดค่อนข้างที่จะใกล้เคียงกับขนาดของเมมเบรนและจากการศึกษาสมดุลมวลพบว่าช่วงขนาดโมเลกุลมากกว่า 100K มีขนาด 17,687 กรัมต่อโมล และมี

เปอร์เซ็นต์มวลมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์จึงมีโอกาสที่จะติดค้างบนผิวเมมเบรนมากขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเปอร์เซ็นต์มวลของสารอินทรีย์ในช่วง 1K-3K มีค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลของสารอินทรีย์น้อยที่สุดคือ 0.2 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากเปอร์เซ็นต์มวลของสารอินทรีย์ที่มีขนาดน้อยกว่า 1K มีค่าค่อนข้างมากจึงมีโอกาสที่หลุดลอดผ่านรูของเมมเบรนค่อนข้างสูงจึงทำให้มีสารอินทรีย์ธรรมชาติติดค้างบนผิวเมมเบรนค่อนข้างน้อยและค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเปอร์เซ็นต์มวลของสารอินทรีย์รวมทั้งหมดเท่ากับ 4.4 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.1 ร้อยละของมวลสารอินทรีย์คาร์บอน



ภาพที่ 4.2 ร้อยละของการสูญเสียมวลสารอินทรีย์ธรรมชาติ

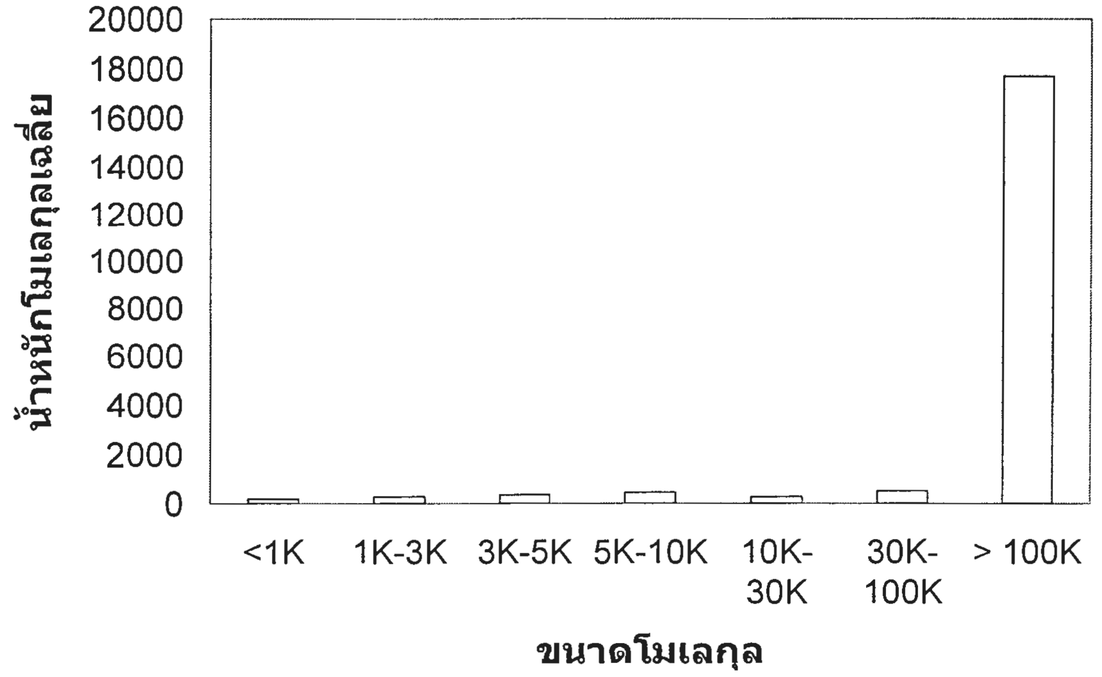
จากกราฟภาพที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์มวลของสารอินทรีย์คาร์บอนขนาดโมเลกุลมากกว่า 100 K มีค่ามากที่สุดประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์และขนาดน้อยกว่า 1K มีเปอร์เซ็นต์มวลของสารอินทรีย์คาร์บอนรองลงมาประมาณ 18.2 เปอร์เซ็นต์และขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติช่วง 30K-100K, 10K-30K, 5K-10K, 1K-3K และ 3K-5K มีปริมาณมีเปอร์เซ็นต์มวลของสารอินทรีย์คาร์บอนน้อยลงมาตามลำดับ โดยมีค่าประมาณ 10.9, 9, 7.2, 5.6 และ 4.7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และจากกราฟภาพที่ 4.2 จะพบว่าร้อยละของการสูญเสียของสารอินทรีย์คาร์บอนช่วงขนาดโมเลกุล 5K-10K มีร้อยละของการสูญเสียของสารอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับ 1.2 รองลงมาช่วงขนาดโมเลกุลมากกว่า 100K, ช่วงขนาดโมเลกุล30K-100K, ช่วงขนาดโมเลกุล 3K-5K, ช่วงขนาดโมเลกุล 10K-30K,ช่วงขนาดโมเลกุลน้อยกว่า 1K และช่วงขนาดโมเลกุล 1K-3K มีร้อยละของการสูญเสียของสารอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับ 0.9, 0.6, 0.6, 0.5, 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fan และคณะ (1997) พบว่ามวลของสารอินทรีย์ธรรมชาติส่วนใหญ่ของแหล่งน้ำผิวดินในธรรมชาติเป็นกลุ่มไฮโดรโฟบิคที่มีขนาดโมเลกุลค่อนข้างใหญ่

4.3 ขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

จากการศึกษามวลสมดุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยทำการแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ข้างต้น แล้วนำขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติแต่ละช่วงขนาดโมเลกุลมาหาขนาดโดยใช้เครื่อง HPLC โดยจะศึกษา หาค่า Mw ซึ่งคือค่า น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และค่า Mn ซึ่งเท่ากับค่า จำนวนโมเลกุลเฉลี่ย ซึ่งจะนำเอาสองค่านี้มาเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่าง Mw/Mn จะทำให้สามารถทราบลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำ ว่ามีการกระจายตัวของขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำว่ามากน้อยเพียงใด โดยที่ถ้าช่วงขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีค่า Mw/Mn มีค่าน้อยกว่าหนึ่งแสดงว่าช่วงขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาตินั้นมีขนาดค่อนข้างที่จะใกล้เคียงกัน แต่ถ้าช่วงขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีค่า Mw/Mn มีค่ามากกว่าหนึ่งแสดงว่าช่วงขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาตินั้นมีขนาดการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาตินั้นค่อนข้างจะมีขนาดโมเลกุลหลายขนาด

ตารางที่ 4.3 ขนาดโมเลกุลเฉลี่ยและค่าการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

ขนาดโมเลกุล	MW	MN	ค่าการกระจายตัว= MW/ MN
<1K	187	209	0.89
1K-3K	277	136	2.02
3K-5K	352	174	2.02
5K-10K	441	219	2.02
10K-30K	267	281	0.95
30K-100K	500	863	0.57
>100K	17687	827	21.37
น้ำดิบ	4144	244	16.95

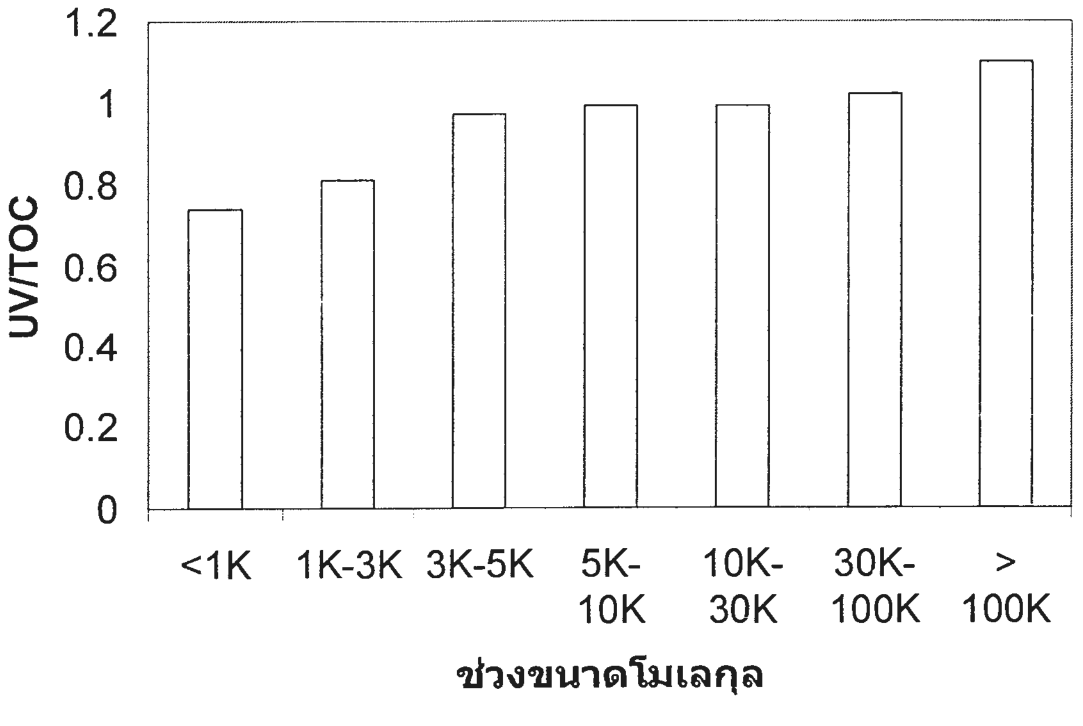


ภาพที่ 4.3 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแต่ละช่วงขนาดโมเลกุลต่างๆ

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าการกระจายตัวของช่วงขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขนาดมากกว่า 100K มีค่าการกระจายตัวมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 21.37 และช่วงขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ 30K-100K มีค่าเท่ากับ 0.57 ซึ่งค่าการกระจายเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกให้ทราบถึงการที่โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เราทำการศึกษามีขนาดโมเลกุลหลายขนาดที่ปนกันอยู่ในสารละลายนั้นๆ และจากกราฟที่ 4.3 จะพบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของช่วงขนาดโมเลกุลน้อยกว่า1K, ช่วงขนาดโมเลกุล 1K-3K, ช่วงขนาดโมเลกุล 3K-5K, ช่วงขนาดโมเลกุล 5K-10K,ช่วงขนาดโมเลกุล 10K-30K และ ช่วงขนาดโมเลกุล 30K-100K นั้นมีขนาดน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าน้ำในแหล่งน้ำนี้ส่วนใหญ่จะมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกับขนาดโมเลกุลที่ใหญ่แบ่งให้เห็นเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าร้อยละส่วนใหญ่ของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ส่วนจะมีร้อยละของมวลสารอินทรีย์ธรรมชาติ 40 ในช่วงขนาดที่มากกว่า 100 kDa กับร้อยละของมวลสารอินทรีย์ธรรมชาติ 18.2 ในช่วงขนาดโมเลกุลน้อยกว่า 1K ซึ่งมีร้อยละของมวลสารอินทรีย์ค่อนข้างมากในแหล่งน้ำที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้

ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบระหว่างค่ายูวีและค่าทีโอซีของช่วงโมเลกุลขนาดต่างๆ

ขนาดโมเลกุล	TOC (mg/L)	UV (1/cm)	UV/ TOC (L/mg-m)
< 1K	7.28	0.0544	0.74
1K-3K	14.93	0.1224	0.81
3K-5K	12.53	0.1222	0.97
5K-10K	19.20	0.1902	0.99
10K-30K	3.60	0.0355	0.99
30K-100K	4.36	0.0449	1.02
> 100K	109.00	1.2032	1.10
น้ำดิบ	40.00	0.4021	1.00



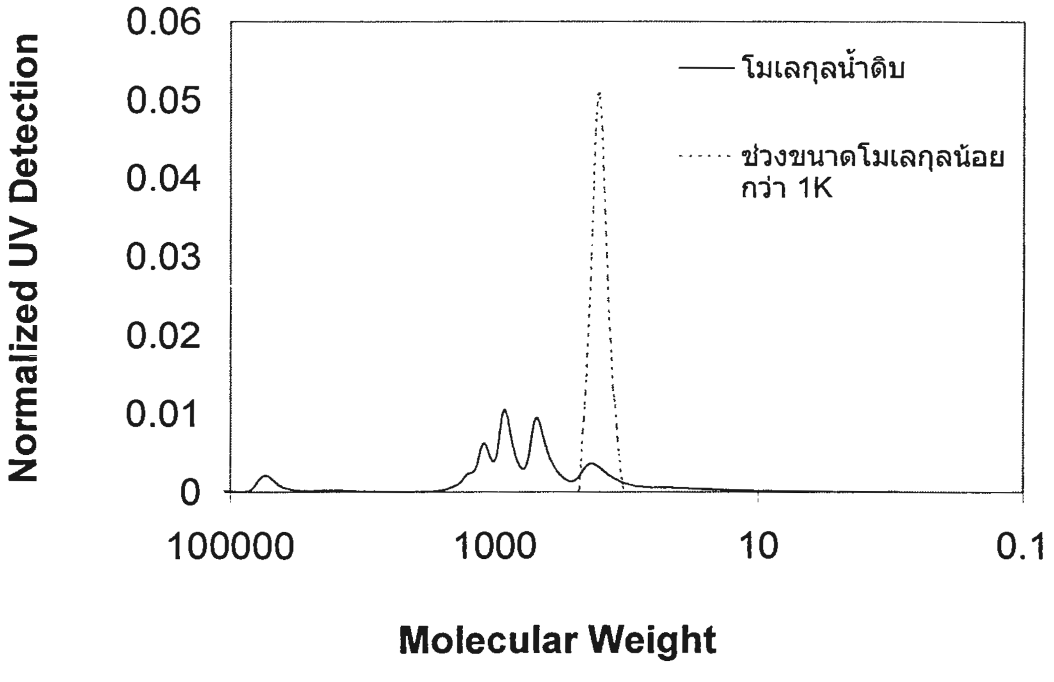
ภาพที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนระหว่าง UV/ TOC ในแต่ละช่วงขนาดโมเลกุลต่างๆ

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าอัตราส่วนยูวีต่อทีโอซีของช่วงขนาดโมเลกุลมากกว่า 100K มีค่ามากที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.10 ส่วนค่าอัตราส่วนยูวีต่อทีโอซีของช่วงขนาดโมเลกุลน้อยกว่า 1K มีค่าน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.74 ซึ่งอัตราส่วนของค่ายูวีต่อทีโอซีเป็นค่าคงที่แสดงถึงช่วงขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมีค่ายูวีต่อทีโอซี เพิ่มขึ้นเนื่องจากคลื่นแสงยูวีจะมีการตรวจวัดพันธะคู่ของโมเลกุล

ของสารอินทรีย์ได้ดี ซึ่งโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีพันธะคู่จะมีขนาดโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ดังนั้น จากค่าในตารางข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในในแหล่งน้ำที่ใช้ในการศึกษาพบว่าช่วงขนาดโมเลกุล มากกว่า 100K มีเปอร์เซ็นต์มวลมากที่สุดและมีขนาดโมเลกุลเท่ากับ 17,687 กรัมต่อโมลซึ่งมีขนาด ค่อนข้างใหญ่และสัมพันธ์กับค่ายูวีต่อทีโอซี และจากกราฟภาพที่ 4.4 จะพบว่าค่ายูวีต่อทีโอซีจะ เพิ่มขึ้นตามช่วงขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น

4.4 การเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยเครื่องอัลตราฟิลเตรชัน และเครื่องHPLC

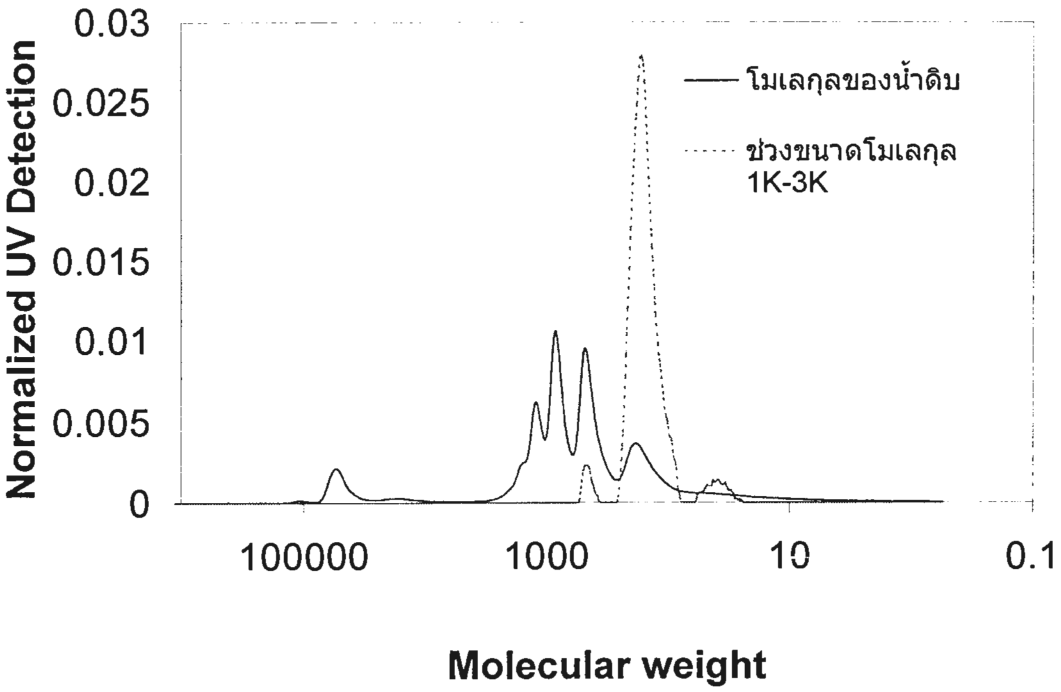
โดยศึกษาการแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยการกรองแยกขนาด โมเลกุลด้วยเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชันศึกษาเปรียบเทียบระหว่างโมเลกุลของน้ำดิบกับช่วงขนาด ของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ผ่านการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเตรชันในช่วงขนาดน้อยกว่า1K , 1K-3K, 3K-5K, 5K-10K, 10K-30K, 30K-100K และขนาดมากกว่า 100K แสดงผลตามข้อมูลดังนี้



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วง ขนาดน้อยกว่า1K

จากกราฟภาพที่ 4.5 ในช่วงขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขนาดน้อยกว่า 1K มีฐาน กราฟค่อนข้างแคบซึ่งสอดคล้องกับค่า Mw/Mn ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.89 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็น

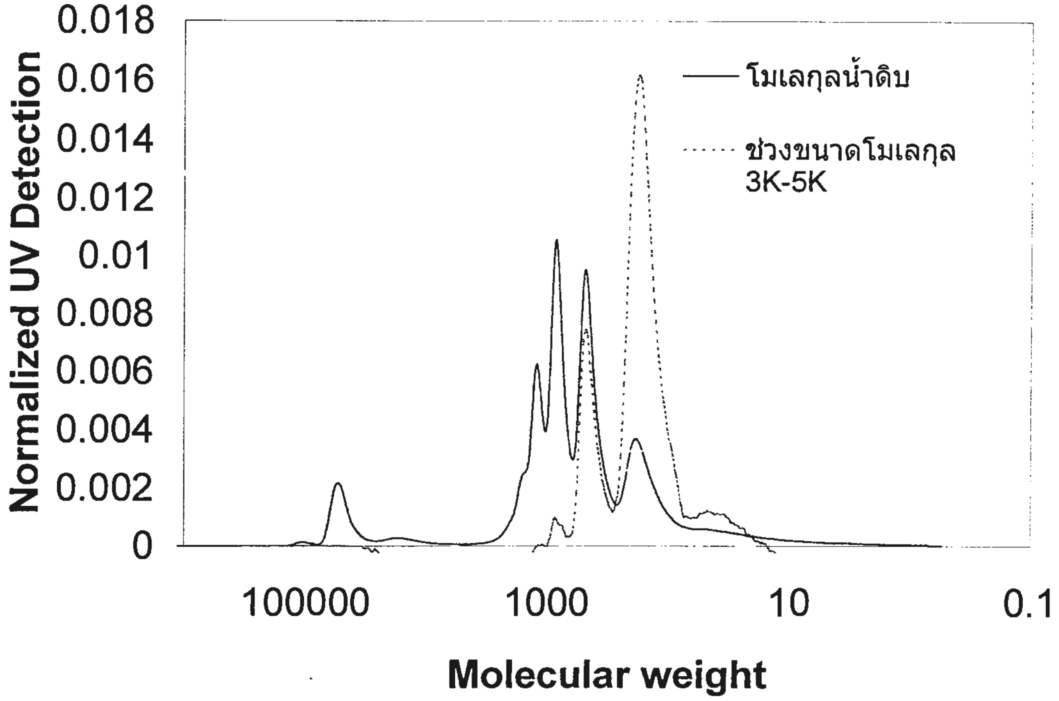
ว่าการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่อนข้างน้อยเพราะจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยส่วนใหญ่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยค่อนข้างใกล้เคียงกันและมีค่ายูวีต่อค่าทีโอซีเท่ากับ 0.74 ซึ่งจะมีขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่เป็นพันธะคู่ค่อนค้างน้อยดังนั้นโมเลกุลส่วนใหญ่จึงมีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟขนาดโมเลกุลของน้ำดิบ พบว่ามีรูปกราฟค่อนข้างกว้างซึ่งสัมพันธ์กับค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่อค่าจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยที่มีค่าสูง แสดงให้เห็นว่าขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำที่ใช้ทำการศึกษามีการกระจายตัวของขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติค่อนข้างสูง และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของน้ำดิบพบว่าส่วนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ของน้ำดิบนั้นหายไปเนื่องจากถูกทำการแยกขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของแผ่นเมมเบรนที่ใช้ออกไปโดยระบบอัลตราฟิลเตรชัน



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาด1K-3K

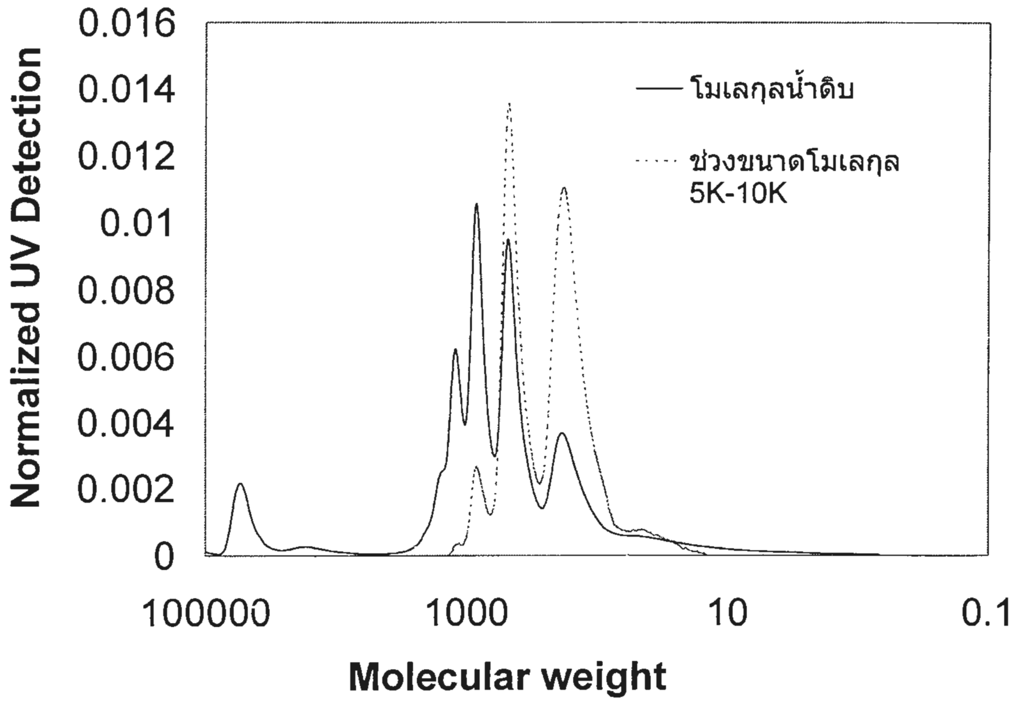
จากกราฟภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่ากราฟของขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ในช่วงขนาด 1K-3K จะมีช่วงความกว้างของกราฟที่แคบกว่าเส้นกราฟของน้ำดิบแต่มีความกว้างของกราฟมากกว่าช่วงขนาดโมเลกุลที่น้อยกว่า 1K ซึ่งสอดคล้องกับค่ายูวีต่อค่าทีโอซีเท่ากับ 0.81 ตามตารางที่ 4.4 เพราะมีการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติน้อยกว่าในน้ำดิบแต่มากกว่าช่วงโมเลกุลขนาดน้อยกว่า 1K และมีค่า Mw/Mn เท่ากับ 2.02 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าค่าน้ำหนักโมเลกุล

เฉลี่ยต่อค่าจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยมีการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติค่อนข้างสูงกว่าช่วงโมเลกุลขนาดน้อยกว่า 1K และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของน้ำดิบพบว่าส่วนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ของน้ำดิบนั้นหายไปเนื่องจากถูกทำการแยกขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของแผ่นเมมเบรนที่ใช้ออกไปโดยระบบอัลตราฟิลเตรชัน



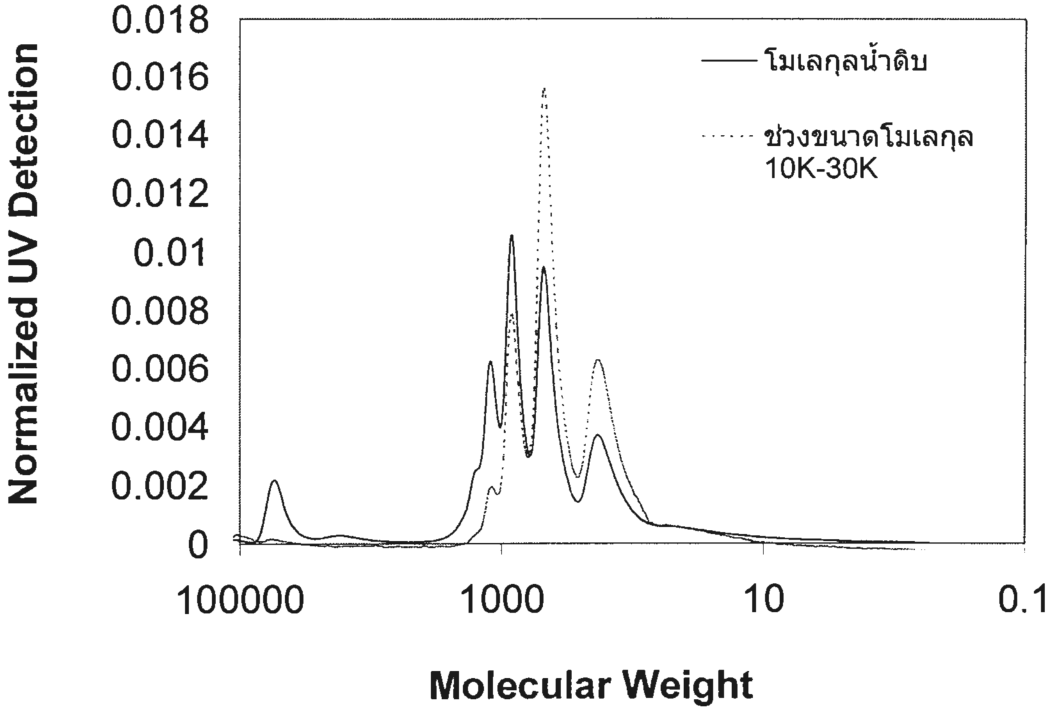
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาด 3K-5K

จากกราฟภาพที่ 4.7 จะเห็นได้ว่ากราฟของขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ในช่วงขนาด 3K-5K จะมีช่วงความกว้างของกราฟที่แคบกว่าเส้นกราฟของน้ำดิบแต่มีความกว้างของกราฟมากกว่าช่วงขนาดโมเลกุลที่น้อยกว่า 1K ซึ่งสอดคล้องกับค่ายูวีต่อค่าทีโอซีเท่ากับ 0.97 ตามตารางที่ 4.4 เพราะมีการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติน้อยกว่าในน้ำดิบแต่มากกว่าช่วงโมเลกุลขนาด 1K-3K กับช่วงโมเลกุลขนาดน้อยกว่า 1K กับ ซึ่งดูได้จากมีค่าจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยที่มีค่ามากกว่าทำให้กราฟมีการกระจายตัวมากกว่าและมีค่า Mw/Mn เท่ากับ 2.02 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่อค่าจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยมีการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติค่อนข้างสูงกว่าช่วงโมเลกุลขนาดน้อยกว่า 1K และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของน้ำดิบพบว่าส่วนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ของน้ำดิบนั้นหายไปเนื่องจากถูกทำการแยกขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของแผ่นเมมเบรนที่ใช้ออกไปโดยระบบอัลตราฟิลเตรชัน



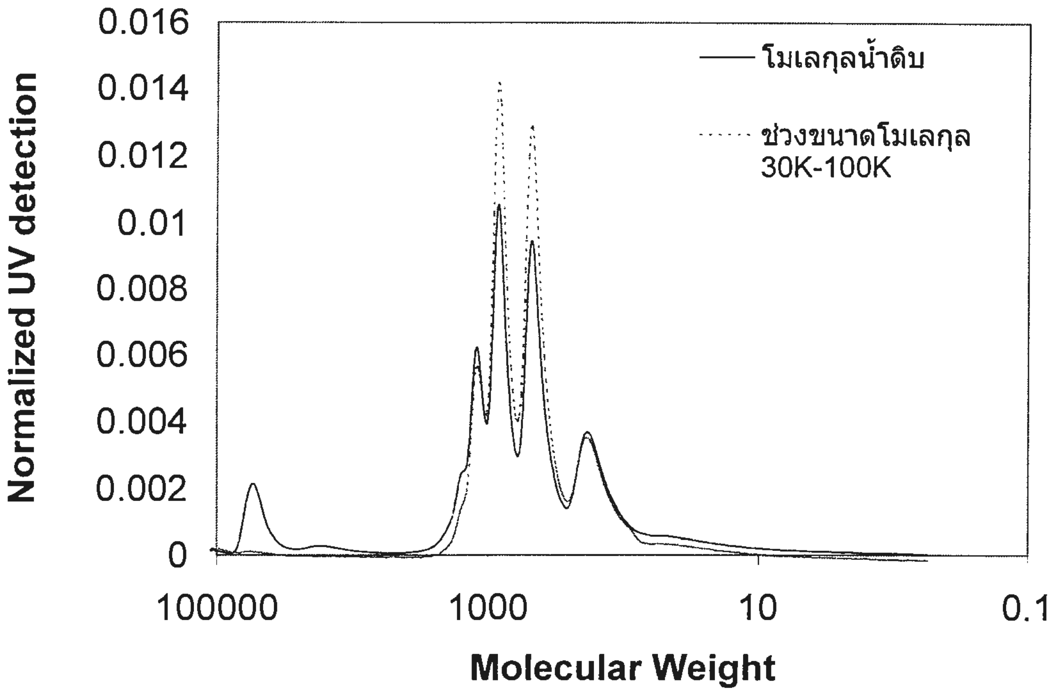
ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาด 5K-10K

จากกราฟภาพที่ 4.8 จะเห็นได้ว่ากราฟของขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ในช่วงขนาด 5K-10K จะมีช่วงความกว้างของกราฟที่แคบกว่าเส้นกราฟของน้ำดิบแต่มีความกว้างของกราฟมากกว่าช่วงขนาดโมเลกุลที่น้อยกว่า 1K ซึ่งสอดคล้องกับค่ายูวีต่อค่าทีโอซีเท่ากับ 0.99 ตามตารางที่ 4.4 เพราะมีการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติน้อยกว่าในน้ำดิบแต่มากกว่าช่วงโมเลกุลขนาด 3K-5K , ช่วงโมเลกุลขนาด 1K-3K และช่วงขนาดโมเลกุลน้อยกว่า 1K กับ ซึ่งดูได้จากมีค่าจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยที่มีค่ามากกว่าทำให้กราฟมีการกระจายตัวมากกว่าและมีค่า Mw/Mn เท่ากับ 2.02 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่อค่าจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยมีการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติค่อนข้างสูงกว่าช่วงโมเลกุลขนาด 5K-10K , ช่วงโมเลกุลขนาด 1K-3K และช่วงขนาดโมเลกุลน้อยกว่า 1K และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของน้ำดิบพบว่าส่วนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ของน้ำดิบนั้นหายไปเนื่องจากถูกทำการแยกขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของแผ่นเมมเบรนที่ใช้ออกไปโดยระบบอัลตราฟิลเตรชัน



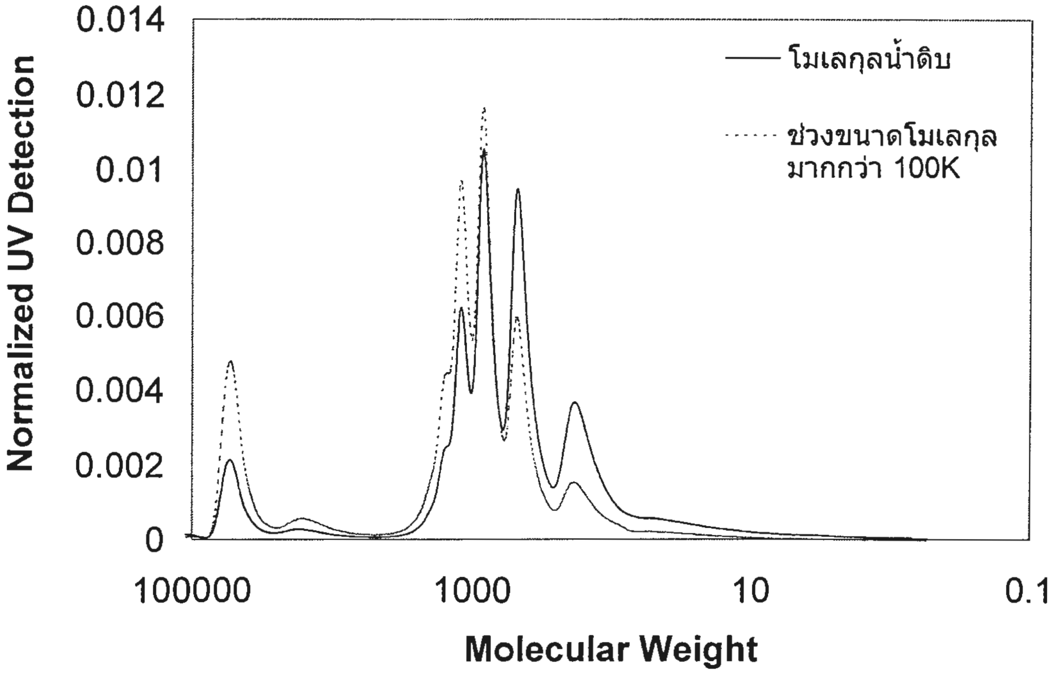
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาด 10K-30K

จากกราฟภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ว่ากราฟของขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ในช่วงขนาด 10K-30K จะมีช่วงความกว้างของกราฟที่แคบกว่าเส้นกราฟของน้ำดิบ ซึ่งสอดคล้องกับค่ายูวีต่อค่าทีโอซีเท่ากับ 0.99 ตามตารางที่4.4 เพราะมีการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติน้อยกว่าในน้ำดิบแต่มากกว่าช่วงโมเลกุลขนาด 5K-10K , ช่วงโมเลกุลขนาด 3K-5K , ช่วงโมเลกุลขนาด 1K-3K และช่วงขนาดโมเลกุลน้อยกว่า 1K กับ ซึ่งดูได้จากมีค่าจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยที่มีค่ามากกว่าทำให้กราฟมีการกระจายตัวมากกว่าและมีค่า Mw/Mn เท่ากับ 0.95 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่อค่าจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยมีการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติค่อนข้างสูงกว่าช่วงโมเลกุลขนาด 5K-10K , ช่วงโมเลกุลขนาด 3K-5K , ช่วงโมเลกุลขนาด 1K-3K ,ช่วงขนาดโมเลกุลน้อยกว่า 1K และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของน้ำดิบพบว่าส่วนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ของน้ำดิบนั้นหายไปเนื่องจากถูกทำการแยกขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของแผ่นเมมเบรนที่ใช้ออกไปโดยระบบอัลตราฟิลเตรชัน



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาด 30K-100K

จากกราฟภาพที่ 4.10 จะเห็นได้ว่ากราฟของขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ในช่วงขนาด 30K-100K จะมีช่วงความกว้างของกราฟที่แคบกว่าเส้นกราฟของน้ำดิบ ซึ่งสอดคล้องกับค่ายูวีต่อค่าทีโอซีเท่ากับ 1.02 ตามตารางที่4.4 เพราะมีการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติน้อยกว่าในน้ำดิบแต่มากกว่าช่วงโมเลกุลขนาด 10K-30K , ช่วงโมเลกุลขนาด 5K-10K , ช่วงโมเลกุลขนาด 3K-5K , ช่วงโมเลกุลขนาด 1K-3K และช่วงขนาดโมเลกุลน้อยกว่า 1K กับ ซึ่งดูได้จากมีค่าจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยที่มีค่ามากกว่าทำให้กราฟมีการกระจายตัวมากกว่าและมีค่า Mw/Mn เท่ากับ 0.57 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่อค่าจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยมีการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติค่อนข้างสูงกว่าช่วงโมเลกุลขนาด 10K-30K , ช่วงโมเลกุลขนาด 5K-10K , ช่วงโมเลกุลขนาด 3K-5K , ช่วงโมเลกุลขนาด 1K-3K ,ช่วงขนาดโมเลกุลน้อยกว่า 1K และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของน้ำดิบพบว่าส่วนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ของน้ำดิบนั้นหายไปเนื่องจากถูกทำการแยกขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของแผ่นเมมเบรนที่ใช้ออกไปโดยระบบอัลตราฟิลเตรชัน



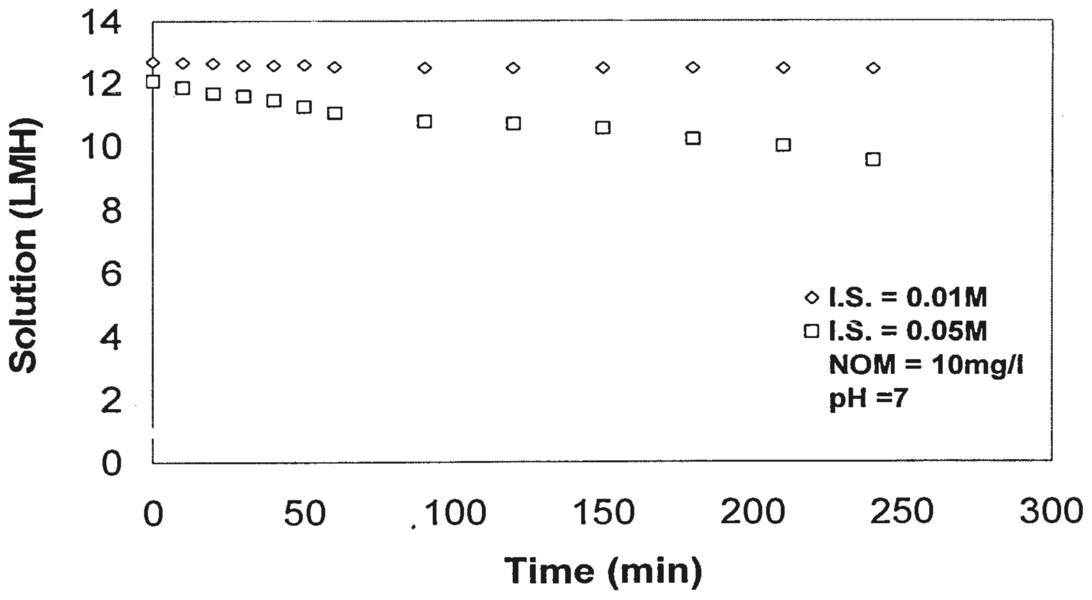
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติของน้ำดิบกับช่วงขนาดมากกว่า 100K

จากกราฟภาพที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ในช่วงมากกว่า 100K จะมีช่วงความกว้างของกราฟพอดีกับเส้นกราฟของน้ำดิบ เพราะมีการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติพอๆกับน้ำดิบ ซึ่งสอดคล้องกับค่ายูวีต่อค่าทีโอซีมีค่าเท่ากับ 1.10 ตามตารางที่ 4.4 และมีค่า Mw/Mn เท่ากับ 21.32 แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติมากโดยมีขนาดน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของสารอินทรีย์มีค่ามากกว่าจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยมากกว่ามากๆ และมีค่าจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยเท่ากับ 877 แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวมากกว่าช่วงขนาดโมเลกุลอื่นๆ ทำให้กราฟมีขนาดกว้างและมีการกระจายมากกว่าช่วงขนาดโมเลกุลอื่นๆ ซึ่งจะพบว่าส่วนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ของน้ำดิบนั้นยังอยู่เนื่องจากขนาดโมเลกุลสารอินทรีย์ธรรมชาติ มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของแผ่นเมมเบรนที่ใช้ในการแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยการกรองแบบระบบอัลตราฟิลเตรชัน

4.5 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าฟลักซ์และความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ

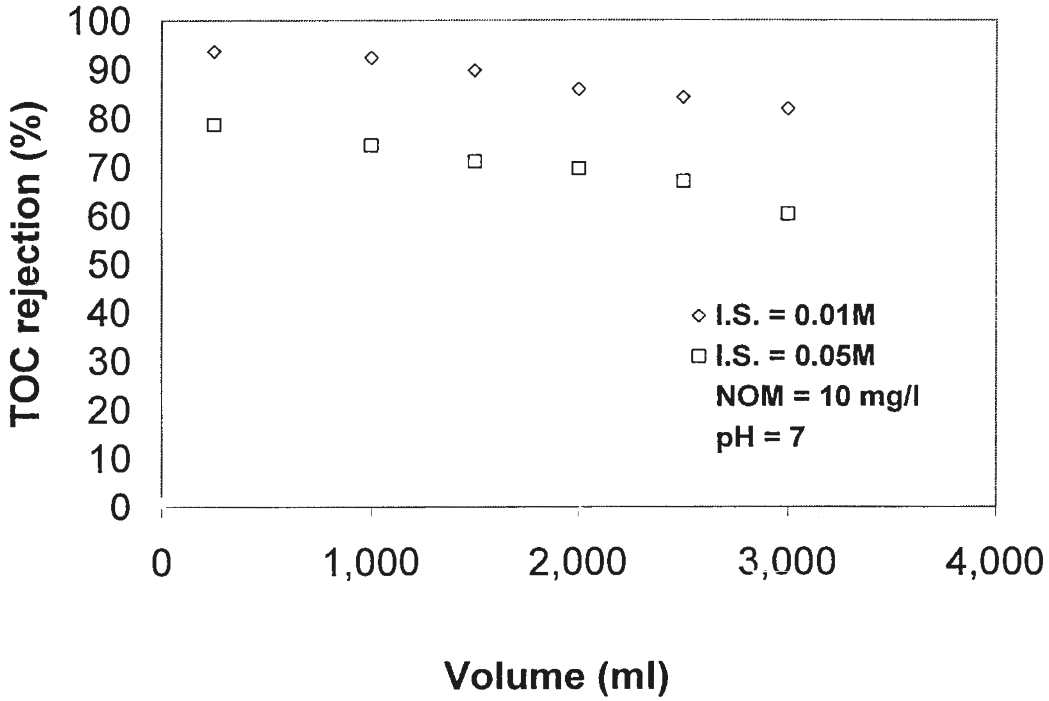
4.5.1 ผลของความแรงประจุ

ในการทดสอบผลของความแรงประจุต่อค่าเพอร์มีเอทฟลักซ์ โดยทดลองที่ความแรงประจุต่างๆ ซึ่งปรับความแรงประจุด้วยโซเดียมคลอไรด์ ที่มีสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรปรับพีเอชเท่ากับ 7 เมมเบรนขนาด 1K แปรค่าความแรงของประจุเป็น 0.01 กับ 0.05 โมลต่อลิตร ผลการทดสอบการลดลงของฟลักซ์ แสดงในภาพที่ 4.12 จากการทดลองพบว่า ค่าความแรงของประจุที่สูงขึ้น มีผลทำให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทลดต่ำลง การเพิ่มความแรงประจุเป็นการเพิ่มโซเดียมคลอไรด์ให้มีค่าสูงขึ้น อาจทำให้สารอินทรีย์ธรรมชาติมีขนาดเล็กลงเพราะความแรงของประจุจะทำให้โครงสร้างสารอินทรีย์ธรรมชาติเกิดการขดตัวทำให้เกิดการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าและรูของเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน ความเข้มข้นของเกลือที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้แรงดันออสโมติกมีค่าสูงขึ้น แต่เนื่องจากระหว่างการทดลองมีการควบคุมความดันให้มีค่าคงที่ตลอด จึงทำให้ผลต่างของแรงดันที่จะเอาชนะแรงดันออสโมติกที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าต่ำลง เป็นผลให้ฟลักซ์ของน้ำเพอร์มีเอทที่ได้มีค่าที่ลดลง โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยความสัมพันธ์ของ Londale ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้ $J_v = L_p(\Delta P - \Delta \pi)$ โดยที่ J_v คือ ฟลักซ์ของน้ำที่ได้ (L/m^2.hr), L_p คือ ค่าคงตัวการไหลของน้ำ (L/(m^2.hr.kPa)), ΔP คือ แรงดันน้ำ (kPa) และ $\Delta \pi$ คือ แรงดันออสโมติก (kPa)

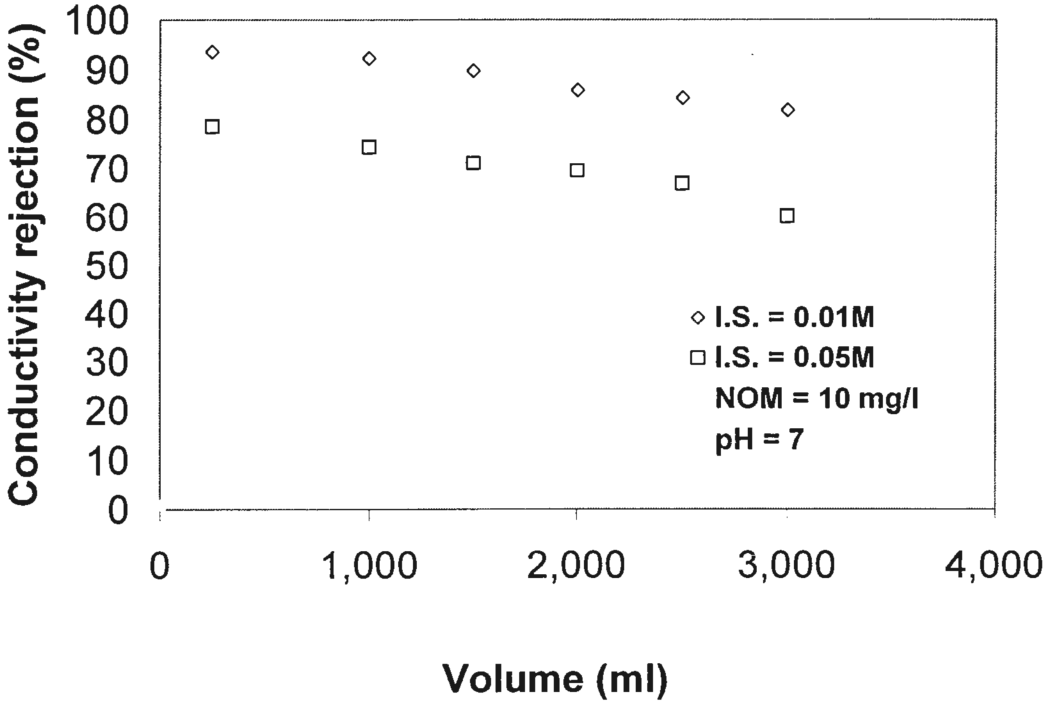


ภาพที่ 4.12 ผลของความแรงประจุที่มีต่อการลดลงของฟลักซ์

ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติของเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันที่ทดลองเพิ่มความแรงประจุเป็น 0.01 กับ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ แสดงในภาพที่ 4.13 พบว่า ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติของเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน มีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดลดลงเมื่อเพิ่มความแรงของประจุหรือเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากเกิดชั้นของเกลือที่ผิวของเมมเบรนทำให้เกิดการอุดตันของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่สะสมที่ชั้นผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟภาพที่ 4.14 และพบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดเกลือมีค่าลดลงเมื่อค่าความแรงของประจุมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ผ่านรูของเยื่อกรองแบบอัลตราออกมาได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เข้าสู่ระบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.14



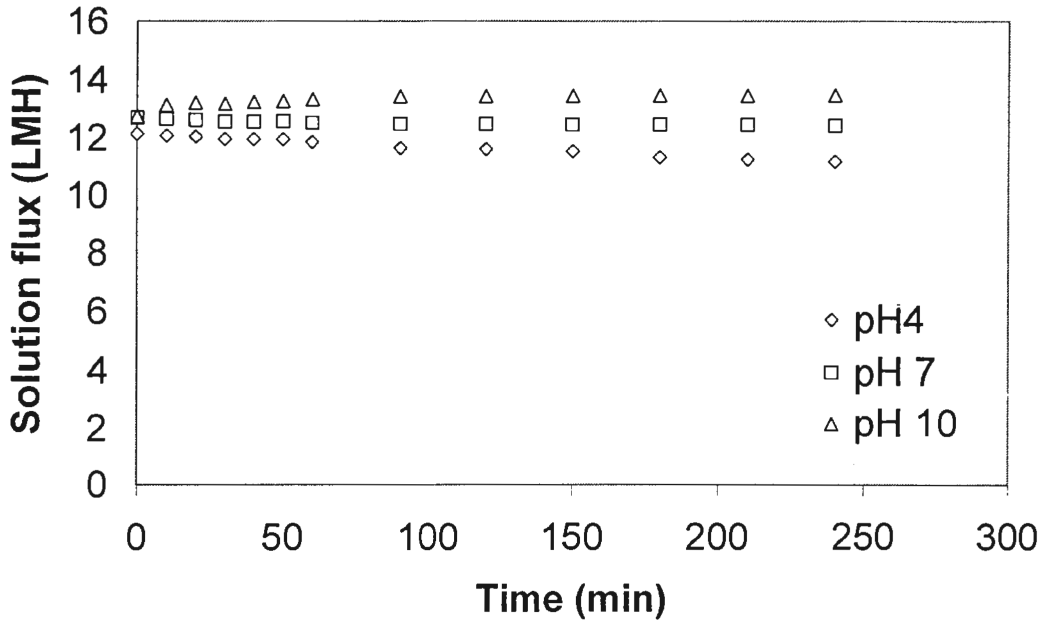
ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันขนาด 1K ที่ความแรงประจุ 0.01 กับความแรงประจุ 0.05



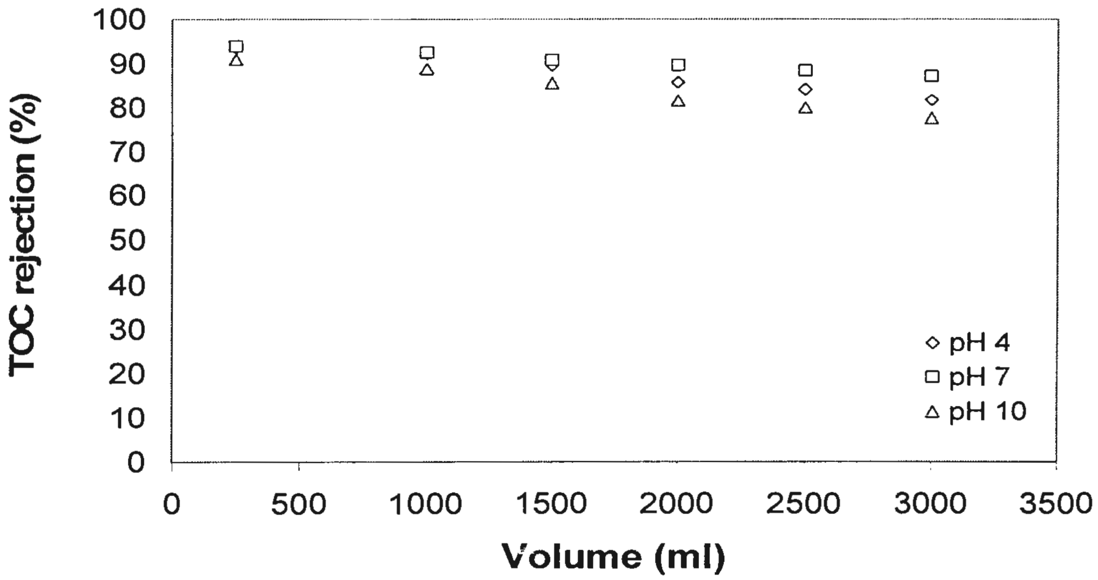
ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเกลือของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันขนาด 1K ที่ความแรงประจุ 0.01 กับความแรงประจุ 0.05

4.5.2 ผลของค่าพีเอช

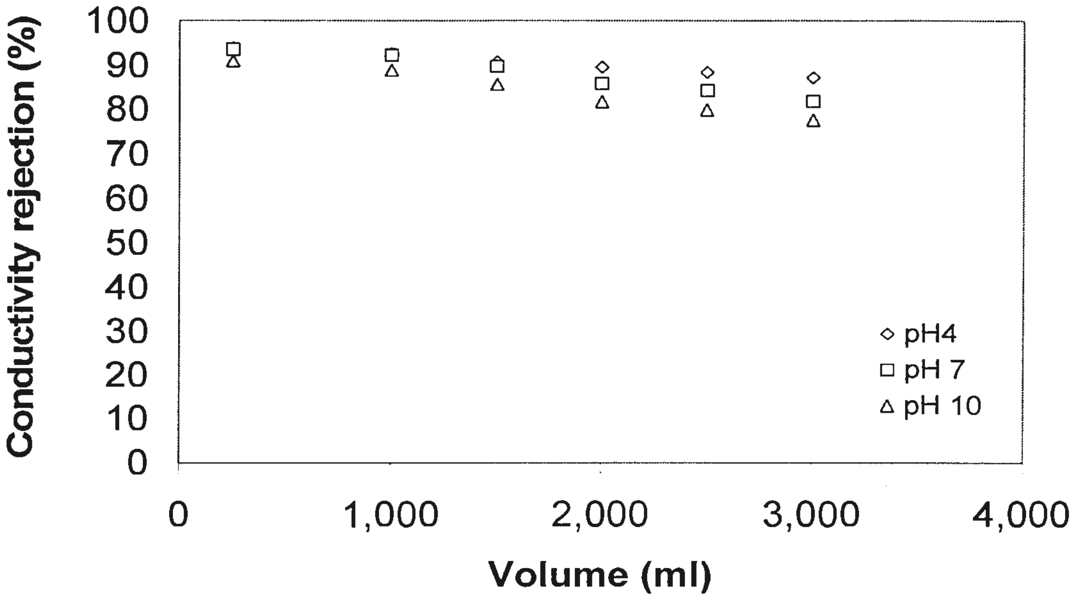
ในการทดลองผลของค่าพีเอชต่อการลดลงของเพอร์มีเอทฟลักซ์ ใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 4, 7 และ 10 ปรับค่าความแรงประจุเป็น 0.01 โมลต่อลิตรด้วยโซเดียมคลอไรด์ ภาพที่ 4.15 แสดงผลของพีเอชที่มีต่อการลดลงของฟลักซ์ จากผลการทดลองพบว่า ฟลักซ์ของเพอร์มีเอทของน้ำตัวอย่างที่มีพีเอชสูงขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ที่ค่าพีเอช 7 และ 10 ค่าฟลักซ์ที่วัดได้มีค่าสูงกว่าที่ค่าพีเอช 4 ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากที่พีเอช 4 มีปริมาณของไฮโดรเจนไอออนในน้ำตัวอย่างมีปริมาณสูงกว่าที่พีเอช 7 และ10 ซึ่งไฮโดรเจนไอออนนี้ มีผลทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติรวมตัวกันได้มากขึ้นและทำให้ความหนาของชั้น Double layer ของผิวหน้าเยื่อกรองเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดการซึมผ่านออกมาได้ยากกว่าและความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองจึงมีความเข้มข้นมากกว่าที่พีเอช 7 และ10 จึงทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ด้วยอัตราที่น้อยกว่า



ภาพที่ 4.15 ผลของพีเอชที่มีต่อการลดลงของฟลักซ์



ภาพที่ 4.16 ค่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ pH 4,7 และ 10



ภาพที่ 4.17 ค่าการกำจัดเกลือที่ pH 4,7 และ 10

สำหรับความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติของสารละลายที่มีค่าพีเอช 4 7 และ 10 ภาพที่ 4.16 แสดงผลของค่าการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติของสารตัวอย่างโดยพิจารณาจากค่าTOC ที่ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร ผลของค่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ ค่าพีเอช ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติลดลง เนื่องจากการที่สารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าเป็นประจุลบ เกิดแรงผลักกันเกิดช่องว่างระหว่างชั้นกับผิวของเมมเบรน ทำให้เกิดการสะสมของชั้นเกลือ ซึ่งดูได้จากค่าการกำจัดเกลือที่มีค่าลดลงทำให้ประจุลบของสารอินทรีย์ธรรมชาติเกาะติดกับชั้นเกลือ ทำให้เกิดการอุดตันที่บนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อค่าพีเอชเพิ่ม ทำให้มีบางส่วนของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ติดบนผิวเมมเบรนผ่านรูเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันออกมาได้มากขึ้น และพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดเกลือมีค่าลดลงเมื่อพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงภาพที่ 4.17 จากผลการทดลองดังกล่าว เห็นว่าพีเอชที่เพิ่มมีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อศึกษาการแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชั่นและศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติของเยื่อกรองแบบอัลตราฟิลเตรชั่นที่ทำในงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1) สามารถแยกขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติได้ในช่วง ขนาดโมเลกุลต่างดังนี้คือ น้อยกว่า 1K, ในช่วง 1K-3K, ในช่วง 3K-5K,ในช่วง 5K-10K,ในช่วง 10K-30K,ในช่วง 30K-100K และ ขนาดใหญ่กว่า 100K โดยพบว่าตัวอย่างจากแหล่งน้ำที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ขนาดของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่พบมากที่สุดคือโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่า 100K มีเปอร์เซ็นต์มวลของสารอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์รองลงมาคือขนาดน้อยกว่า 1K มีเปอร์เซ็นต์มวลของสารอินทรีย์คาร์บอนรองลงมาประมาณ 18.2 เปอร์เซ็นต์และขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติช่วง 30K-100K, 10K-30K, 5K-10K, 1K-3K และ 3K-5K มีปริมาณมีเปอร์เซ็นต์มวลของสารอินทรีย์คาร์บอนน้อยลงมาตามลำดับ โดยมีค่าประมาณ 10.9, 9, 7.2, 5.6 และ 4.7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

2) ผลของค่ายูวีต่อค่าทีโอซีพบว่าช่วงขนาดโมเลกุลมากกว่า 100K มีค่ามากที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.1102 รองลงมาได้แก่ช่วงขนาด 30K-100K, 10K-30K, 5K-10K, 3K-5K, 1K-3K และน้อยกว่า 1K มีค่าเท่ากับ 0.0102, 0.0099, 0.0099, 0.0097, 0.0081และ 0.0074 ตามลำดับ ซึ่งการกระจายตัวของขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติจะมีค่ามากขึ้นตามค่าของยูวีต่อค่าทีโอซี

3) ผลของค่าพีเอชของน้ำในช่วง 4 -10 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดค่า TOC มีค่าลดลงเมื่อพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่พีเอช 4 มีค่ามากที่สุดรองลงมาคือที่พีเอช7 และ 10 ตามลำดับและค่าฟลักซ์ของน้ำ Permeate ที่พีเอช 10 จะมีค่ามากที่สุดรองลงมาคือพีเอช 7 และ 4 ตามลำดับแต่ไม่ต่างกันมากนักซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกการกรองติดผิวเมมเบรนคือกลไกหลักในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติของเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชั่นเนื่องจากเมื่อพีเอชมีค่ามากขึ้นจะทำให้สารอินทรีย์ธรรมชาติมีขนาดเล็กลง และทำให้สารอินทรีย์ธรรมชาติมีความสามารถในการละลายที่มากขึ้นทำให้สารอินทรีย์ธรรมชาติสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้มากขึ้น ในขณะที่พีเอชต่ำลงประจุลบที่ผิวเมมเบรนจะมีค่าน้อยลงด้วย ส่งผลให้อิออนต่างๆ สามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้มากขึ้นด้วย

4) ผลของค่าความแรงของประจุในช่วง 0.01-0.05 โมลของโซเดียมคลอไรด์พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดค่า TOC มีค่าลดลงเมื่อความแรงของประจุมีค่าเพิ่มขึ้นโดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่ความแรงของประจุมีค่า 0.01 จะมีค่ามากกว่าที่ความแรงของประจุ 0.05 โมลของโซเดียมคลอไรด์เนื่องจากว่าความแรงของประจุจะไปทำให้โครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติเกิดการขดตัวเล็กลงทำให้เกิดการอุดตันที่ผิวของเมมเบรนมากขึ้นซึ่งทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติหลุดผ่านเมมเบรนออกมาได้มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าลดลงเมื่อความแรงของประจุมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าฟลักซ์ของน้ำ Permeate ที่ความแรงของประจุ 0.01 โมลโซเดียมคลอไรด์จะมีค่ามากกว่าค่าฟลักซ์ของน้ำ Permeate ที่ความแรงของประจุ 0.05 โมลโซเดียม คลอไรด์เนื่องมาจากสาเหตุที่เกิดจากการอุดตันของสารอินทรีย์ธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นเพราะความแรงประจุที่เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดโมเลกุลเล็กลงจึงเกิดการอุดตันที่ผิวเมมเบรนได้มากขึ้นดังนั้นจึงทำให้ค่า ฟลักซ์ของน้ำ Permeate ไหลผ่านเยื่อกรองเมมเบรนได้น้อยลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการศึกษาคุณสมบัติของสารอินทรีย์ธรรมชาติเพิ่มเติมในแต่ละฤดูกาลเนื่องจากว่าขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติเกิดจากการย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์ที่อยู่ในแหล่งน้ำและในดินที่อยู่บริเวณใกล้แหล่งน้ำเมื่อถึงฤดูฝนเมื่อฝนตกลงมาก็จะมีการชะเอาดินบริเวณนั้นลงแหล่งน้ำด้วยทำให้ขนาดโมเลกุลและปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำนั้นเพิ่มขึ้นด้วยดังนั้นน่าที่จะทำการศึกษาคุณสมบัติของสารอินทรีย์ธรรมชาติในแต่ละฤดูกาลเพิ่มเติม เนื่องจากขนาดโมเลกุลและปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดของเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชั่น

5.2.2 ควรศึกษาถึงคุณลักษณะของเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชั่นชนิดอื่นที่นำมาผลิตใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติเพื่อเปรียบเทียบดูว่าเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชั่นชนิดไหนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติได้ดีกว่ากันเนื่องจากว่าวัสดุที่นำมาผลิตเยื่อกรองอัลตราที่ต่างชนิดกันถึงแม้ว่าเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชั่นจะมีขนาดรูพรุนเท่ากันแต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาตินั้นไม่เท่ากัน เพราะอาจมีความแตกต่างชนิดของประจุที่ผิวหน้าเยื่อกรองของเมมเบรนแต่ละประเภทจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติไม่เท่ากัน

5.2.3 ควรศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยกระบวนการกรองแบบ อัลตราฟิลเตรชั่นในระดับ Pilot scale เนื่องจากว่าการศึกษาในครั้งนี้เป็นการทำในระดับ Lab scale ทำให้สามารถเลือกใช้ค่าสภาวะในการดำเนินระบบที่เหมาะสม ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชั่นในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติออกจากน้ำดิบที่

ใช้ในการผลิตน้ำประปาในระดับ Pilot scale โดยใช้โมดูลของเมมเบรนที่เหมาะสมในการผลิตน้ำจริง

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2535. วิศวกรรมประปา. พิมพ์ครั้งที่ 1 : มิตรนราการพิมพ์.

ปฏิรูป ผลจันทร์. 2544. การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติออกจากน้ำโดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน. เอกสารวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา, มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.

ปรภาภรณ์ ผาติสุนทร. 2546. ระบบนาโนฟิลเตรชันขนาดทดสอบสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำประปา. เอกสารวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา, มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.

Amy,G.L., Alleman, B.C. , and Cluff, C.B. (1990). Removal of dissolved organic matter by Nanofiltration. Journal of Environment Engineering._ Vol. 116; pp. 200-205.

Anselme, C. , Mandra, V. , Baudin, I. and Mallevialla, J. (1993). Optimum use of membrane processes in drinking-water Treatment. Water Supply. Vol. 14, Nos.3/4, pp. 473-486.

Chai, C-F., Lin, T-Y. and Hao, O.J. 2000. Effect of Humic Substances Characteristics on UF Performance. Wat. Res. 34(4) : 1097-1106.

Christman, R.F. nad Ghassemi, M. (1966). Chemical nature of organic colour in water. Jounal AWWA. Vol. 58 : No. 6 : pp. 723-741.

Chang, M.R., Amy, G.L. and King, P.H. (2001). Removal of Organic Matter in Water Treatment. J. Environ. Eng. 111(6) : 850-864.

Costas Pelekani (1999). Characterization of Clean and Natural Organic Matter (NOM) Fouled NF and UF Membranes, and the Foulants Characterization. Desalination. 118 : 101– 108.

Crozes, G. , White, P. < and Marshall, M. (1995). Enhanced coagulation: its effect on NOM Removaland and chemical costs. Journal AWWA. Vol. 87 : NO 1 : pp. 78-89.

Eaton, A. (1995). Measuring UV-absorbing organics : a standard method. Journal AWWA. Vol. 87 : No. 2 : pp. 86-90.

Edzwald, J.K. , Becker, W.C. , and watties, K.L. (1985). Surrogate parameters for monitoring organic matter and THM precursors. Journal AWWA. Vol. 77 : N. 4 : pp. 122-132.

Gassemi, M. and Chirstman, R.F. (1968). Properties of yellow organic acids of natural waters. Limna. Oceanog. Vol. 13 : p. 583.

Gjessing, E.T. (1996). Humic substance in natural water : Method for separation and Characterization. Preceeding of IPB. Symopsium : Amsterdam : pp. 191.201.

Goel, S. , Hozalski, R.M. , and Vouwer, E.J. (1995). Bioegradation of NOM: effect of NOM source and ozone dose. Journal AWWA. Vol. 87 :No. 1 : pp. 90-105.

Hanra, A.M. , Allgeier, S.C. , and Summers, R.S. (1996). Assessment of nanofiltration membrane for NOM and bromide removal from surface waters. USA. (Unpublished Manuscript).

Hassett, J. J. , and Banwart, W. L. (1992). Soils and Their Environment. New Jersey : Prentice-Hall.

Jacangelo, J.G. , DeMarco, J. , Owen, D.M., and Randtke, S.J. (1995). Selected processes for removing NOM : an overview. Journal AWWA. Vol. 87 : No. 1 : pp. 64-77.

James kilduff and wailter j. webber (1999). "Flux Decline During NanoFiltration of Naturally-Occurring Dissolved Organic Matter Effects of Osmotic Pressure, Membrane Permeability, and Cake Formation." J. Membrane. Sci. 239 : 39-53.

Kavanaugh, M.C. (1978). Modified coagulation for improved removal of Trihalomethane Precursors. Journal AWWA. Vol. 70 : No. 11 : pp. 613-620.

Kim, S. and Elimelech, M. (2005). Chemical and Physical Aspects of Natural Organic Matter (NOM) Fouling of Nanofiltration Membranes. J. Membr. Sci. 132 : 159-181.

Mallevialle, J., Odendaal, P.E., Wiesner, M.R. (1996). Water Treatment Membrane Process. AWWARF, Lyonnaise des Eaux, Water Research Commission of South Africa, New York : McGraw-Hill.

Marsono, B.D. (1996). Removal of Trihalomethane Precursors by Nanofiltration. Thesis of Master of Engineering, Asian Institute of Technology.

Najm, I.N. , Patania, N.L. , Jacangelo, J.G. , and Krasner, S.W. (1994). Evaluating surrogates for disinfection by-products. Journal AWWA. Vol. 86 : No. 6 : pp. 98-106.

Owen, D.M. , Amy G.L. , Chowdhury, Z.K. , Paode, R. McCoy, G. , and Viscosil, K. (1995). NOM characterization and treatability. Journal AWWA. Vol. 87 : No. 1 : pp. 46-63.

Ripperger,S. Vigneswaran, S. and Ben Aim, R. (eds). (1989). Microfiltration. In : Water, Wastewater and Sludge Filtration. CRC Press, Florida, USA. pp. 173-190.

Stevenson, F.J. 1982. Humus Chemistry : Genesisl composition. Reactions. New York : Wilery-Interscience.

Symons, J.M. , Bellar, T.A. , Arswell, K. , Demarco, J. , Kropp, K.L. , Robeck, G.G. , Seeger, D.R. , Slocum, C.J. , Smith, B.L. , and Stevents, A.A. (1975). National Organics Reconnaissance survey for Halogenated organics. Journal AWWA. Vol. 67 : No. 11 : pp. 634-647.

Tan, L. and Amy, G.L. (1991). Comparing Ozonation and Membrane Separation for Color Removaland Disinfection By Product Control. Journal AWWA. Vol. 83 : No. 5 : pp. 74-79.

Taylor, J.S. , Thompson, D.M. , and Carswell, J.K. (1987). Applying Membrane Precesses to Groundwater Sources for Trihalomethane Precursor Control. Journal AWWA. Vol. 79 : No. 8 : pp. 72-82.

Zeman, L.J., Zydney,A.L. (1996). Microfiltration and Ultrafiltration : Principles and Applications. : Marcel Dekker.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลฟลักซ์

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ความดัน15 psi พีเอช 4 เมมเบรนขนาด 1000 ดอลตัน

เวลา (min)	**ปริมาตรตัวอย่างต่อเวลา (ml/min)**	**ปริมาตรตัวอย่างต่อเวลา (l/hr)**	**ค่าฟลักซ์ (l/hr/m^2)**
0	12.64	0.758100	12.1296
10	12.57	0.753900	12.0624
20	12.53	0.751800	12.0288
30	12.45	0.747000	11.9520
40	12.46	0.747300	11.9568
50	12.43	0.745800	11.9328
60	12.33	0.739800	11.8368
90	12.11	0.726600	11.6256
120	12.07	0.724200	11.5872
150	12.01	0.720300	11.5248
180	11.78	0.706800	11.3088
210	11.71	0.702600	11.2416
240	11.63	0.697800	11.1648

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ความดัน 15 psi พีเอช 7 เมมเบรนขนาด 1000 คอลตัน

เวลา (min)	**ปริมาตรตัวอย่างต่อเวลา (ml/min)**	**ปริมาตรตัวอย่างต่อเวลา (l/hr)**	**ค่าฟลักซ์ ($l/hr/m^2$)**
0	13.21	0.792300	12.6768
10	13.17	0.789900	12.6384
20	13.13	0.787800	12.6048
30	13.08	0.784500	12.5520
40	13.07	0.784200	12.5472
50	13.08	0.784800	12.5568
60	13.03	0.781800	12.5088
90	12.99	0.779400	12.4704
120	12.98	0.778800	12.4608
150	12.97	0.778200	12.4512
180	12.98	0.778500	12.4560
210	12.96	0.777600	12.4416
240	12.95	0.776700	12.4272

ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ความดัน 15 psi พีเอช 10 เมมเบรนขนาด 1000 คอลตัน

เวลา (min)	**ปริมาตรตัวอย่างต่อเวลา (ml/min)**	**ปริมาตรตัวอย่างต่อเวลา (l/hr)**	**ค่าฟลักซ์ (l/hr/m^2)**
0	13.28	0.796800	12.7488
10	13.67	0.820200	13.1232
20	13.74	0.824400	13.1904
30	13.71	0.822600	13.1616
40	13.78	0.826800	13.2288
50	13.82	0.828900	13.2624
60	13.87	0.831900	13.3104
90	13.97	0.838200	13.4112
120	13.98	0.838500	13.4160
150	14.00	0.839700	13.4352
180	14.02	0.841200	13.4592
210	14.01	0.840300	13.4448
240	14.03	0.841800	13.4688

ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงฟลักซ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ความดัน 15 psi พีเอช 7 เมมเบรนขนาด 1000 คอลตัน

เวลา (min)	ปริมาตรตัวอย่างต่อเวลา (ml/min)	ปริมาตรตัวอย่างต่อเวลา (l/hr)	ค่าฟลักซ์ (l/hr/m^2)
0	12.19	0.731100	11.6976
10	12.11	0.726300	11.6208
20	12.11	0.726600	11.6256
30	12.03	0.721500	11.5440
40	11.92	0.715200	11.4432
50	11.71	0.702600	11.2416
60	11.49	0.689400	11.0304
90	11.22	0.672900	10.7664
120	11.12	0.667200	10.6752
150	10.98	0.658500	10.5360
180	10.62	0.637200	10.1952
210	10.39	0.623400	9.9744
240	9.92	0.595200	9.5232

ภาคผนวก ข
ตารางแสดงความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ของเยื่อกรองแบบอัลตรา

ตารางที่ ข.1 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ เมมเบรนขนาด 1000 ดอลตัน ปรับพีเอชเป็น 4, 7 และ 10

ปริมาตร (ml)	TOC ในน้ำ Permeate (mg/l)			ประสิทธิภาพการกำจัด NOM (%)		
	pH = 4	pH = 7	pH = 10	pH = 4	pH = 7	pH = 10
250	0.60	0.64	0.90	94.00	93.60	91.00
1,000	0.74	0.77	1.12	92.60	92.30	88.80
1,500	0.92	1.03	1.44	90.80	89.70	85.60
2,000	1.04	1.42	1.83	89.60	85.80	81.70
2,500	1.16	1.58	2.01	88.40	84.20	79.90
3,000	1.28	1.82	2.24	87.20	81.80	77.60

ตารางที่ ข.2 ผลการกำจัดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 4 ความแรงประจุ 0.01 และ 0.05โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ เมมเบรน ขนาด 1000 ดอลตัน

ปริมาตร (ml)	TOC ในน้ำ Permeate (mg/l)		ประสิทธิภาพการกำจัด NOM (%)	
	I = 0.01	I = 0.05	I = 0.01	I = 0.05
250	0.64	2.14	93.60	78.60
1,000	0.77	2.56	92.30	74.40
1,500	1.03	2.89	89.70	71.10
2,000	1.42	3.04	85.80	69.60
2,500	1.58	3.30	84.20	67.00
3,000	1.82	3.97	81.80	60.30

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงการดำเนินระบบอัลตรา

ตารางที่ ค.1 ตารางแสดงผลการดำเนินระบบแบบอัลตราสารละลายที่มีปริมาตรของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 ลิตร ปรับความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ความดัน15 psi พีเอช 7 เมมเบรนขนาด 1000 คอลตัน

ตัวอย่าง	ปริมาตรที่ (ml)	TOC (mg/L)	UV (1/cm)	pH	Conductivity (μS/cm)
Vial 1	250	5.19	0.0453	7.3	338
Vial 2	1,000	5.24	0.0457	7.5	352
Vial 3	2,000	5.93	0.0518	7.6	390
Vial 4	5,000	6.96	0.0607	7.5	450
Vial 5	7,500	7.85	0.0685	7.6	512
Vial 6	8,500	8.31	0.0725	7.4	540
Dial 1	8,750	6.52	0.0574	7.5	430
Dial 2	9,250	5.02	0.0442	7.5	325
Dial 3	9,500	4.59	0.0404	7.4	300
Dial 4	10,000	3.95	0.0345	7.4	260

ตารางที่ ค.2 ตารางแสดงผลการดำเนินระบบแบบอัลตราสารละลายที่มีปริมาตรของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 ลิตร ปรับความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ความดัน15 psi พีเอช 7 เมมเบรนขนาด 3000 ดอลตัน

ตัวอย่าง	ปริมาตรที่ (ml)	TOC (mg/L)	UV (1/cm)	pH	Conductivity (μS/cm)
Vial 1	250	8.07	0.0701	7.4	530
Vial 2	1,000	8.23	0.0718	7.5	536
Vial 3	2,000	9.43	0.0822	7.5	615
Vial 4	5,000	10.01	0.0873	7.5	625
Vial 5	7,500	10.48	0.0912	7.6	680
Vial 6	8,500	10.86	0.0948	7.5	709
Dial 1	8,750	9.87	0.0862	7.4	644
Dial 2	9,250	9.29	0.0811	7.4	610
Dial 3	9,500	8.88	0.0775	7.5	580
Dial 4	10,000	8.41	0.0734	7.4	548

ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงผลการดำเนินระบบแบบอัลตราสารละลายที่มีปริมาตรของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 ลิตร ปรับความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ความดัน15 psi พีเอช 7 เมมเบรนขนาด 5000 คอลตัน

ตัวอย่าง	**ปริมาตรที่ (ml)**	**TOC (mg/L)**	**UV (1/cm)**	**pH**	**Conductivity (µS/cm)**
Vial 1	250	9.58	0.0836	7.4	625
Vial 2	1,000	10.53	0.0919	7.3	686
Vial 3	2,000	11.43	0.0997	7.4	746
Vial 4	5,000	12.43	0.1084	7.4	811
Vial 5	7,500	13.89	0.1211	7.4	906
Vial 6	8,500	14.03	0.1224	7.4	920
Dial 1	8,750	10.95	0.0956	7.3	714
Dial 2	9,250	10.78	0.0941	7.3	704
Dial 3	9,500	10.45	0.0912	7.3	680
Dial 4	10,000	10.18	0.0889	7.3	664

ตารางที่ ค.4 ตารางแสดงผลการดำเนินระบบแบบอัลตราสารละลายที่มีปริมาตรของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 ลิตร ปรับความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ความดัน15 psi พีเอช 7 เมมเบรนขนาด 10000 ดอลตัน

ตัวอย่าง	ปริมาตรที่ (ml)	TOC (mg/L)	UV (1/cm)	pH	Conductivity (μS/cm)
Vial 1	250	14.58	0.1273	7.6	950
Vial 2	1,000	15.59	0.1361	7.6	1,016
Vial 3	2,000	16.43	0.1434	7.6	1,071
Vial 4	5,000	17.39	0.1518	7.6	1,134
Vial 5	7,500	18.76	0.1637	7.6	1,224
Vial 6	8,500	19.75	0.1741	7.6	1,288
Dial 1	8,750	13.58	0.1185	7.5	880
Dial 2	9,250	13.09	0.1142	7.5	853
Dial 3	9,500	12.58	0.1097	7.5	820
Dial 4	10,000	11.61	0.1013	7.5	757

ตารางที่ ค.5 ตารางแสดงผลการดำเนินระบบแบบอัลตราสารละลายที่มีปริมาตรของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 ลิตร ปรับความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ความดัน15 psi พีเอช 7 เมมเบรนขนาด 30000 ดอลตัน

ตัวอย่าง	**ปริมาตรที่ (ml)**	**TOC (mg/L)**	**UV (1/cm)**	**pH**	**Conductivity (μS/cm)**
Vial 1	250	5.77	0.0504	7.5	376
Vial 2	1,000	7.42	0.0648	7.5	484
Vial 3	2,000	8.93	0.0779	7.4	583
Vial 4	5,000	10.43	0.0909	7.5	680
Vial 5	7,500	11.13	0.0970	7.3	730
Vial 6	8,500	11.95	0.1043	7.4	779
Dial 1	8,750	8.64	0.0751	7.4	563
Dial 2	9,250	8.45	0.0739	7.5	550
Dial 3	9,500	7.99	0.0698	7.4	521
Dial 4	10,000	7.64	0.0657	7.4	498

ตารางที่ ค.6 ตารางแสดงผลการดำเนินระบบแบบอัลตราสารละลายที่มีปริมาตรของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 ลิตร ปรับความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตรปรับด้วยโซเดียมคลอไรด์ ความดัน15 psi พีเอช 7 เมมเบรนขนาด 100000 ดอลตัน

ตัวอย่าง	ปริมาตรที่ (ml)	TOC (mg/L)	UV (1/cm)	pH	Conductivity (μS/cm)
Vial 1	250	5.36	0.0468	7.5	349
Vial 2	1,000	5.47	0.0477	7.4	356
Vial 3	2,000	5.93	0.0517	7.4	386
Vial 4	5,000	6.24	0.0544	7.4	407
Vial 5	7,500	6.43	0.0560	7.5	420
Vial 6	8,500	6.61	0.0577	7.4	435
Dial 1	8,750	4.35	0.0380	7.4	285
Dial 2	9,250	4.01	0.0350	7.4	260
Dial 3	9,500	3.78	0.0329	7.4	246
Dial 4	10,000	3.50	0.0305	7.4	228

ภาคผนวก ง

วิธีการเตรียมสารละลายและตัวอย่างการคำนวณ

1. การเตรียมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวอย่างเช่น การเตรียมตัวอย่างของ NOM 10 mg/L ปรับที่ pH7 และ I.S. 0.01 M as NaCl มีขั้นตอนและวิธีการคำนวณดังนี้

(1) เจือจางสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีความเข้มข้นสูงด้วยน้ำปราศจากไอออน(D.I. Water) โดยที่ความเข้มข้นของ NOM ที่ต้องการ (C1) = 10 mg/L

ความเข้มข้นของ NOM จากแหล่งน้ำธรรมชาติ (C2) = 241 mg/L

ปริมาตรของน้ำ D.I. (V1) = 10 L

ปริมาตรของ NOM จากแหล่งน้ำธรรมชาติที่ต้องการ (V2)

จากสมการ $C1V1 = C2V2$

จะได้ $$V2 = \frac{C1V1}{C2} = \frac{(10mg/L)x(10L)}{(241mg/L)} = 0.414L(414mL)$$

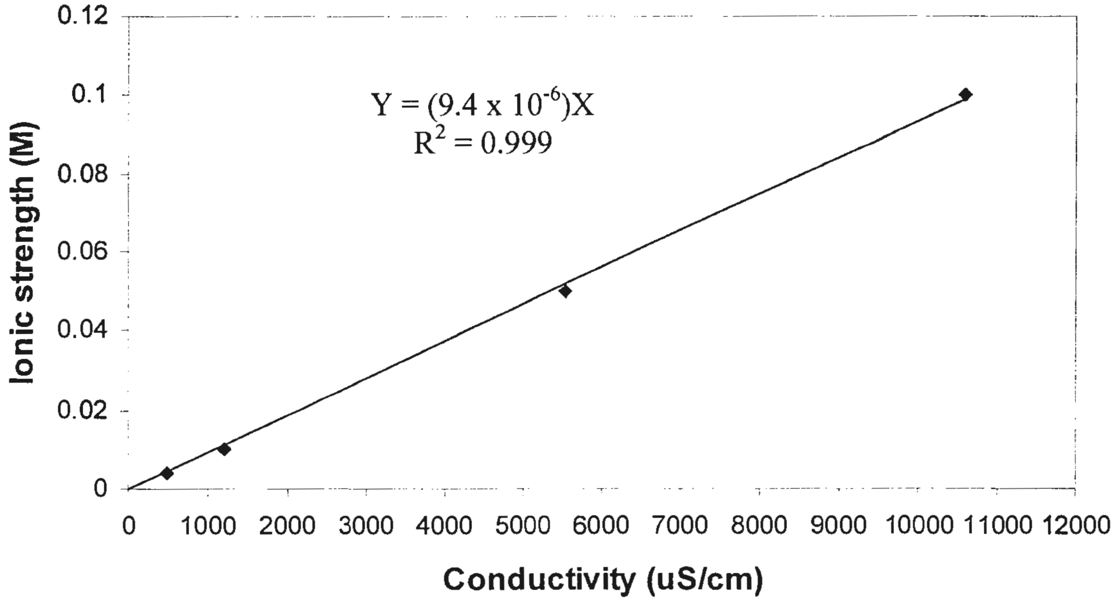
(2) นำน้ำตัวอย่างที่เจือจางในข้อ (1) ไปวัดค่าความนำไฟฟ้า(Conductivity) ซึ่งวัดค่าได้เท่ากับ 625 μS .cm^{-1} ที่อุณหภูมิ 26.1 °C และทำการคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าที่ 25 °C ดังนี้

จากสมการ $$Conductivity(25°C) = \frac{Conductivity(T)}{(1+0.01090(T-25))}$$

$$= \frac{625\mu S.cm^{-1}}{(1+0.01909(26.1-25))}$$

จะได้ ค่าความนำไฟฟ้าที่ 25 °C $= 612.17\mu S.cm^{-1}$

(3) ทำการคำนวณหาความเข้มข้นของ NaCl ในตัวอย่างน้ำที่มีค่าการนำไฟฟ้า 612.17 μS .cm^{-1} คำนวณให้เป็นโมลต่อลิตร โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานในภาพที่ ง-1



ภาพที่ 1. กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบระหว่างค่าความแรงประจุกับค่าการนำไฟฟ้า

สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$I.S. = (9.4 \times 10^{-6}) \times 612.17$$

$$= 5.75 \times 10^{-3} M$$

จาก $$NaCl \Rightarrow Na^{+} + Cl^{-}$$

$$x \qquad x$$

จากสมการการคำนวณค่าความแรงประจุ

$$I.S. = \frac{1}{2} \Sigma Z_i^2 [i]$$

ความเข้มข้นของ NaCl ในตัวอย่างที่เตรียมเท่ากับ 0.00575 M ซึ่งคำนวณได้จาก NaCl standard

ดังนั้นการคำนวณความแรงประจุแสดงได้ดังนี้

$$I.S. = \frac{1}{2}\left\{(1)^2\left[Na^+\right] + (1)^2\left[Cl^-\right] + 0.00575 + 0.00575\right\}$$

$$0.01M = \frac{1}{2}\{x + x + 0.00575 + 0.00575\}$$

$$x = 0.01 - 0.00575$$

$$x = 4.25 \times 10^{-3} M$$

น้ำหนักของ $NaCl$ ที่จะต้องเติมเพิ่มคำนวณได้ดังนี้

$$X = 4.25 \times 10^{-3} mol / L \times 58.48 g / mol$$

$$X = 0.25 g / L$$

(4) เมื่อเติมสารโซเดียมคลอไรด์ลงในน้ำตัวอย่างแล้วให้ทำการปรับค่าพีเอชให้ได้เท่ากับ 7 และเมื่อศึกษาพีเอชอื่นๆก็ทำการปรับพีเอชให้ได้ตามที่เราต้องการศึกษาที่พีเอช 4 และพีเอช 10

(5) การศึกษาผลของความแรงของประจุก็ทำการปรับค่าความแรงประจุตามข้อ (3) ปรับความแรงประจุเป็น 0.05

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	นายไชยคมน์ ใจเอ็นดู
วัน เดือน ปีเกิด	1 ตุลาคม 2520
ที่อยู่	171 หมู่ 2 ตำบลผักปัง อำเภอภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ 36110 โทร. 044-861472
ประวัติการศึกษา	
2542	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2548	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี