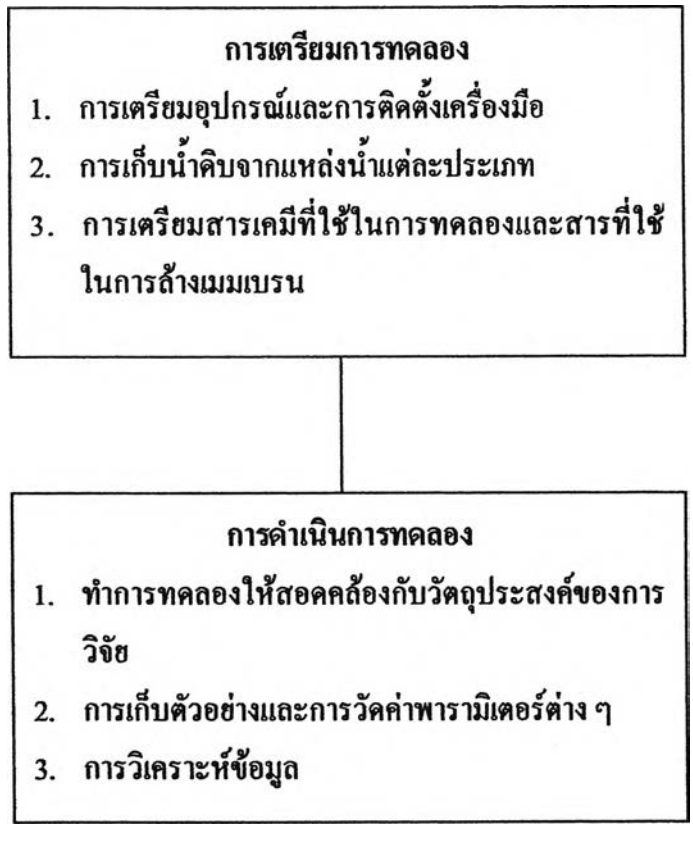
บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

การดำเนินการทดลองทั้งหมด กระทำที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีแผนการดำเนินการวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

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

3.1.1 ตัวแปรคงที่ คือตัวแปรที่กำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง ได้แก่

- ประเภทของโมดูล และพื้นที่ผิวประสิทธิผลของเมมเบรน : ใช้โมดูลของเมมเบรนแบบ Flat Sheet โดยมีพื้นที่ผิวประสิทธิผลของเมมเบรน เท่ากับ 60 cm^2
- ปริมาณน้ำ Influent ที่ใช้ในแต่ละครั้งของการทดลอง : ใช้ปริมาณน้ำ Influent เท่ากับ 5 L

3.1.2 ตัวแปรอิสระ ในงานวิจัยนี้ ตัวแปรอิสระ คือปัจจัยในการดำเนินระบบต่าง ๆ ที่ทำการแปรค่า อันได้แก่

- ลักษณะสมบัติของ NOM ในน้ำ : โดยจะใช้น้ำจากแหล่งน้ำ 2 แหล่ง คือน้ำจากคลองประปาบริเวณจุดรับน้ำดิบของโรงกรองน้ำสามเสน และน้ำจากเขื่อนวชิราลงกรณ์ ที่ระดับความลึก 3 m.
- ชนิดของ NF เมมเบรนที่ใช้ : ใช้ NF เมมเบรนที่มีลักษณะสมบัติแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ES-10 NTR-729HF และNTR-7410
- ความดัน : ใช้ค่าความดัน 5 ค่า คือ 1 2 3 4 และ5 bar
- Crossflow Velocity : ใช้ค่า Crossflow Velocity 5 ค่า คือ 0.05 0.1 0.3 0.5 และ0.7 m/s
- พีเอช : ใช้ค่าพีเอช 5 ค่า คือ 4 5 6 7 และ8
- ความเข้มข้นของโบรไมด์ในน้ำ Influent : ทำการแปรค่าความเข้มข้นของโบรไมด์ 5 ค่า โดยการเติมสารละลายโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ลงในน้ำดิบเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของโบรไมด์ในน้ำ Influent ตั้งแต่ความเข้มข้นเดิมในน้ำดิบ 0.1 0.2 0.4 และ0.8 mg/L ตามลำดับ
- ระยะเวลาในการดำเนินระบบ : โดยจะทำการเลือกสภาวะในการดำเนินระบบ และชนิดของเมมเบรนที่เหมาะสมที่สุด มาดำเนินระบบระยะยาว 24 ชั่วโมง
- วิธีการบำบัดน้ำดิบขั้นต้น : เปรียบเทียบผลของวิธีการบำบัดน้ำดิบขั้นต้นที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ การบำบัดขั้นต้นโดยกระบวนการ MF ขนาดรูพรุน 0.1 μm และการบำบัดขั้นต้นโดยใช้ Cartridge Filter ขนาดรูพรุน 1 และ 5 μm ตามลำดับ

ในการศึกษาถึงผลของตัวแปรอิสระหนึ่ง ๆ เมื่อทำการแปรค่าตัวแปรอิสระนั้น ค่าตัวแปรอิสระตัวอื่น ๆ จะต้องมีค่าคงที่ โดยเหตุผลของการเลือกช่วงค่าของตัวแปรอิสระต่าง ๆ รวมถึงตารางการทดลอง จะกล่าวถึง และแสดงในหัวข้อที่ 3.9

3.1.3 ตัวแปรตาม คือตัวแปรที่จะเปลี่ยนแปลงเมื่อตัวแปรอิสระเปลี่ยนแปลง ได้แก่

- พีเอช
- อุณหภูมิ (°C)
- ค่าฟลักซ์ : ซึ่งคือค่าปริมาณน้ำที่ผลิตได้ ต่อพื้นที่ผิวประสิทธิผลของเมมเบรน ต่อเวลา (m^3/m^2-s)
- Recovery : ซึ่งคือค่าอัตราส่วนของอัตราการผลิตน้ำ Permeate ต่ออัตราไหลของน้ำ Influent เข้าสู่ระบบ
- ประสิทธิภาพการกำจัดค่า UV260 และค่า TOC
- ประสิทธิภาพการกำจัดค่าความนำไฟฟ้า
- ประสิทธิภาพการกำจัดค่าความเข้มข้นของโบรไมด์ : โดยจะทำการวัดปริมาณความเข้มข้นของโบรไมด์ รวมถึงอิออนลบชนิดอื่น ๆ คือ F^- Cl^- NO^-_2 NO^-_3 PO^{3-}_4 และ SO^{2-}_4 ในการศึกษาถึงผลของปริมาณความเข้มข้นของโบรไมด์ต่อสมรรถนะของกระบวนการ NF ในการกำจัด NOM

3.2 การเตรียมน้ำ Influent

น้ำ Influent ที่ใช้ในการทดลอง เตรียมจากน้ำดิบจากแหล่งต่าง ๆ 2 แหล่ง คือ

- ◆ น้ำจากคลองประปา บริเวณจุดรับน้ำดิบของโรงกรองน้ำสามเสน
- ◆ น้ำจากเขื่อนวชิราลงกรณ์ ซึ่งจะใช้เป็นแหล่งน้ำดิบในการผลิตน้ำประปา ของกรุงเทพมหานคร แทนน้ำจากแม่น้ำท่าจีน โดยทำการเก็บน้ำดิบเหนือเขื่อนจากระดับความลึก 3 m. ซึ่งเป็นระดับความลึกที่การประปาจะผันน้ำจากเขื่อนลงสู่คลองประปา

การเก็บตัวอย่างน้ำดิบจากแหล่งน้ำทั้งสองแหล่ง จะทำการเก็บในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากต้องการให้ค่าความเข้มข้นของ NOM และลักษณะสมบัติของน้ำดิบมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยการเตรียมน้ำ Influent จากน้ำดิบ จะทำโดยนำน้ำจากแหล่งน้ำทั้งสองแหล่งข้างต้นมาผ่านกระบวนการกรองติดผิว 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกจะกรองน้ำผ่านแผ่นกรองใยแก้ว ที่มีขนาดรูพรุนหยาบ และละเอียด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ตามลำดับ เพื่อกำจัดสารแขวนลอย

รูปที่ 3.2 แผ่นกรองใยแก้วแบบหยาบ

รูปที่ 3.3 แผ่นกรองใยแก้วแบบละเอียด

ขนาดใหญ่ในน้ำดิบ หลังจากนั้นน้ำที่ผ่านแผ่นกรองใยแก้วแล้วจะถูกสูบเข้าสู่ Cartridge Filter ขนาดรูพรุน 1 μm ซึ่งเป็นกระบวนการกรองติดผิวขั้นตอนที่สอง เพื่อกำจัดสารแขวนลอยขนาดเล็กออกจากน้ำดิบ รูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 แสดง Cartridge Filter ขนาดรูพรุน 1 μm และชุดเครื่องมือที่ใช้บำบัดน้ำดิบขั้นต้น ตามลำดับ

ในการศึกษาถึงผลของการบำบัดน้ำดิบขั้นต้นที่แตกต่างกัน ต่อสมรรถนะของกระบวนการ NF ในการกำจัด NOM จะใช้ชุดการบำบัดน้ำดิบขั้นต้นชุดเดียวกับ การศึกษาถึงผลของปัจจัยอื่น ๆ สำหรับ Cartridge Filter ขนาดรูพรุน 1 μm และ 5 μm โดยจะเปลี่ยนเฉพาะตัว Cartridge Filter สำหรับขนาดรูพรุน 5 μm ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ส่วนการบำบัดขั้นต้นโดยใช้กระบวนการ MF ขนาดรูพรุน 0.1 μm จะใช้ MF เมมเบรนแบบ Submerged type Microfiltration (SMF) ซึ่งดำเนินระบบโดยใช้ค่าฟลักซ์เท่ากับ 0.3 m^3/m^2-d ดังแสดงในรูปที่ 3.7

3.3 การเตรียมสารล้างเมมเบรน

สารล้างเมมเบรนที่ใช้มี 3 ชนิด (อ้างจากงานวิจัยของ Allgeier และ Summers, 1995) คือ

- น้ำกลั่น : โดยในที่นี้จะใช้น้ำ Demineralization ที่ผ่านกระบวนการ RO และเรซินแลกเปลี่ยนอิออนแบบ Mixed Bed ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สารละลายกรดไฮโดรคลอริก พีเอชประมาณ 3 : โดยเตรียมจากการปรับพีเอชของน้ำ Demineralization ปริมาตร 5 L โดยใช้กรด HCl ความเข้มข้น 0.1 N
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พีเอชประมาณ 10.5 : โดยเตรียมจากการปรับพีเอชของน้ำ Demineralization ปริมาตร 5 L โดยใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.1 N

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

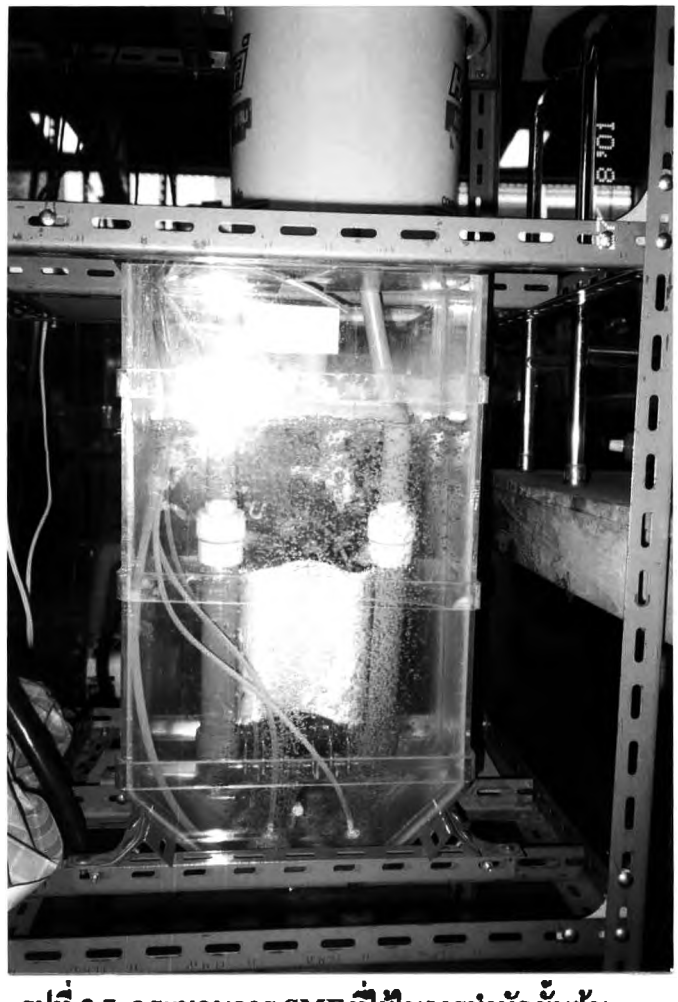
การทดลองในแต่ละครั้ง ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์เดียวกัน ต่างกันเพียงชนิดของ NF เมมเบรนที่ใช้ และวิธีการบำบัดน้ำดิบขั้นต้น ซึ่งจะเลือกใช้ตามจุดมุ่งหมายของการทดลองเพื่อศึกษาผลของปัจจัยดังกล่าว โดยเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ประกอบด้วย

- ◆ ถังน้ำ Influent : เป็นถังอะคลิลิกใส ขนาด 8 L จำนวน 1 ใบ สำหรับบรรจุน้ำ Influent โดยจะเจาะรูบริเวณส่วนล่างของถังเพื่อต่อเข้าสู่เครื่องสูบน้ำ

รูปที่ 3.4 Cartridge Filter ขนาดรูพรุน 1 *µm*

รูปที่ 3.5 ชุดเครื่องมือที่ใช้บำบัดน้ำดิบขั้นต้น

รูปที่ 3.6 Cartridge Filter ขนาดรูพรุน 5 *μm*



รูปที่ 3.7 กระบวนการ SMF ที่ใช้ในการบำบัดขั้นต้น

◆ เครื่องสูบน้ำ : เครื่องสูบน้ำที่ใช้เป็นแบบ Booster pump ขนาดเล็ก โดยให้ค่าอัตราไหล (Nominal Flow Rate) เท่ากับ 1.8 LPM และสามารถให้ค่าความดันสูงสุดเท่ากับ 110 PSI (7.6 bar) เครื่องสูบน้ำที่ใช้แสดงในรูปที่ 3.8

◆ มาตรวัดความดัน (Pressure Gauge) : ใช้มาตรวัดความดันขนาด 7 bar จำนวน 2 ตัว โดยมาตรวัดความดันของน้ำ Influent จะต้องเป็นแบบมีน้ำมัน เพื่อให้สามารถวัดค่าความดันที่แน่นอน ไม่กวัดแกว่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ส่วนมาตรวัดความดันของน้ำ Concentrate เป็นมาตรวัดความดันน้ำแบบธรรมดา

◆ เมมเบรน และโมดูลของเมมเบรน : เมมเบรน และโมดูลของเมมเบรนที่ใช้เป็นแบบ Flat Sheet ชนิด C-10T ของบริษัท Nitto Denko โดยมีพื้นที่ผิวประสิทธิผลของเมมเบรน 60 cm^2 ลักษณะสมบัติของ NF เมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในตารางที่ 3.1 รูปของ NF เมมเบรน และรูปที่ถ่ายโดยใช้ Scanning electron microscopes (SEM) ของเมมเบรนทั้งสามชนิด แสดงในรูปที่ 3.10 ถึง รูปที่ 3.12 ส่วนรูปแสดงโมดูลของเมมเบรน และส่วนประกอบต่าง ๆ ของโมดูล แสดงในรูปที่ 3.13 ถึงรูปที่ 3.16 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติของ NF เมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

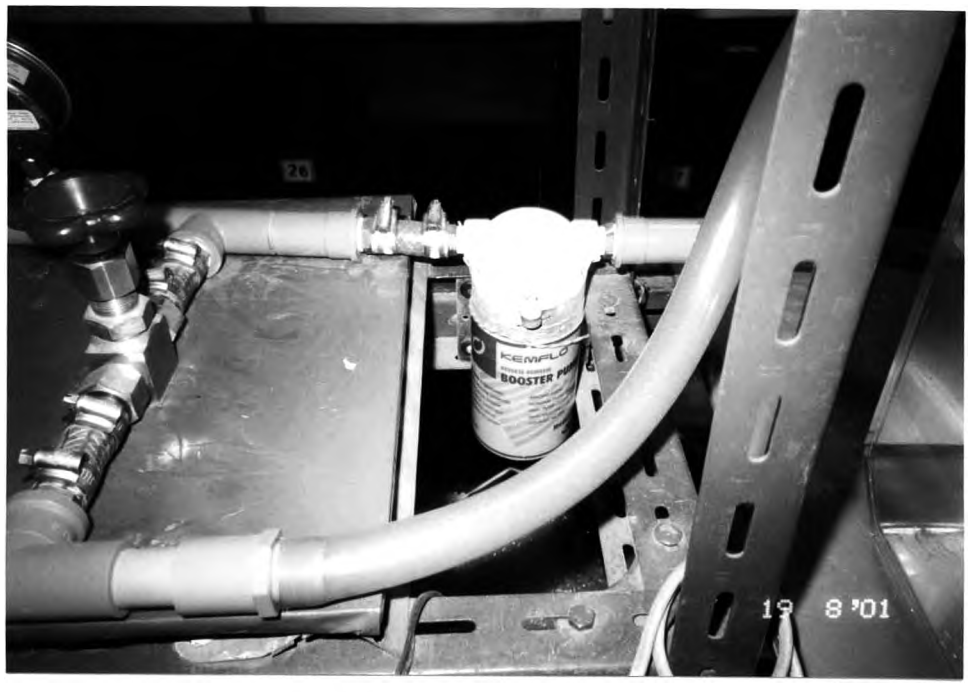
ชนิดของเมมเบรน	วัสดุ	%กำจัด NaCl*	ขนาดรูพรุน** (nm)
NTR-7410	Polysulfonate	15%	4
NTR-729HF	Polyvinyl alcohol/Polyamide	93%	1
ES-10	Aromatic polyamide	99.6%	1

ข้อมูลที่แสดงเป็นข้อมูลที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต , * ที่ 15 บาร์ , 0.15% NaCl

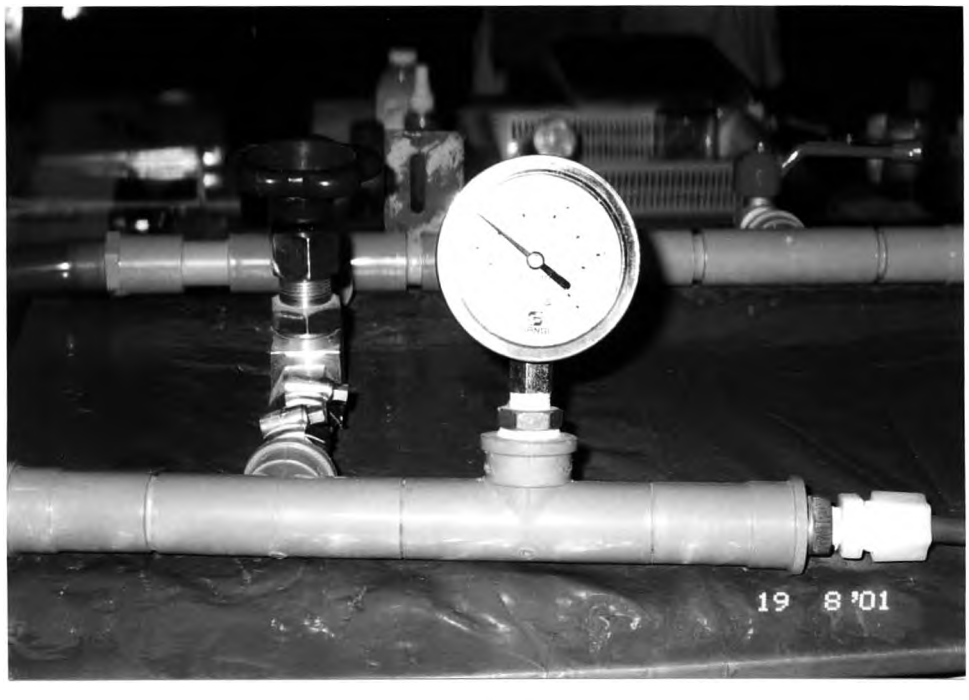
** ชวลิต รัตนธรรมสกุล (Personal Communication)

◆ วาล์วเข็ม (Needle Valve) : ในการทดลองจะทำการปรับค่าความดัน และค่า Crossflow Velocity โดยใช้วาล์วเข็ม 2 ตัว โดยตัวแรกจะติดตั้งที่ท่อ By-pass และตัวที่สองจะติดตั้งที่ท่อนำน้ำ Concentrate รูปที่ 3.17 แสดงรูปวาล์วเข็มที่ใช้

◆ บอลล์วาล์วและก๊อกสำหรับวัดค่าอัตราไหลของน้ำ Influent ผ่านโมดูล : บอลล์วาล์วและก๊อกสำหรับวัดค่าอัตราไหลของน้ำ Influent ผ่านโมดูล ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณค่า Crossflow Velocity แสดงในรูปที่ 3.18 การวัดค่าอัตราไหลของน้ำ Influent ผ่านโมดูลจะทำโดยการปิดบอลล์วาล์วสีเหลืองตัวขวา (แสดงในรูปที่ 3.18) แล้วเปิดก๊อกสีแดงตัวซ้าย เพื่อวัดค่าอัตราไหลโดยใช้กระบอกตวงขนาด 250 mL วัดปริมาตรน้ำต่อเวลา

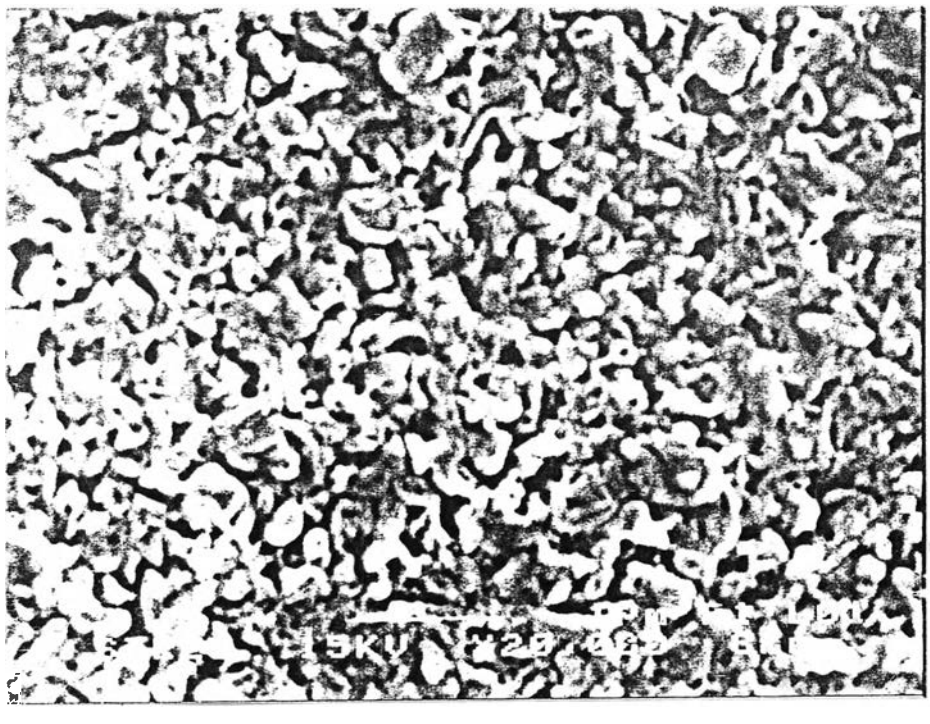


รูปที่ 3.8 เครื่องสูบน้ำแบบ Booster pump



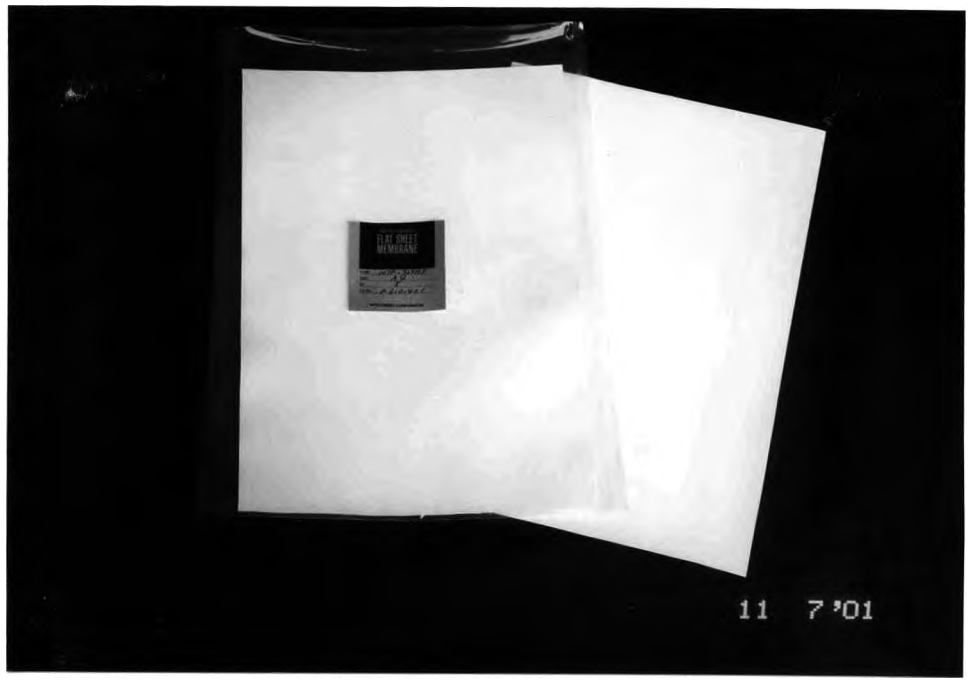
รูปที่ 3.9 มาตรวัดความดันแบบมีน้ำมัน

รูปที่ 3.10 ก. รูปของเมมเบรนชนิด ES-10

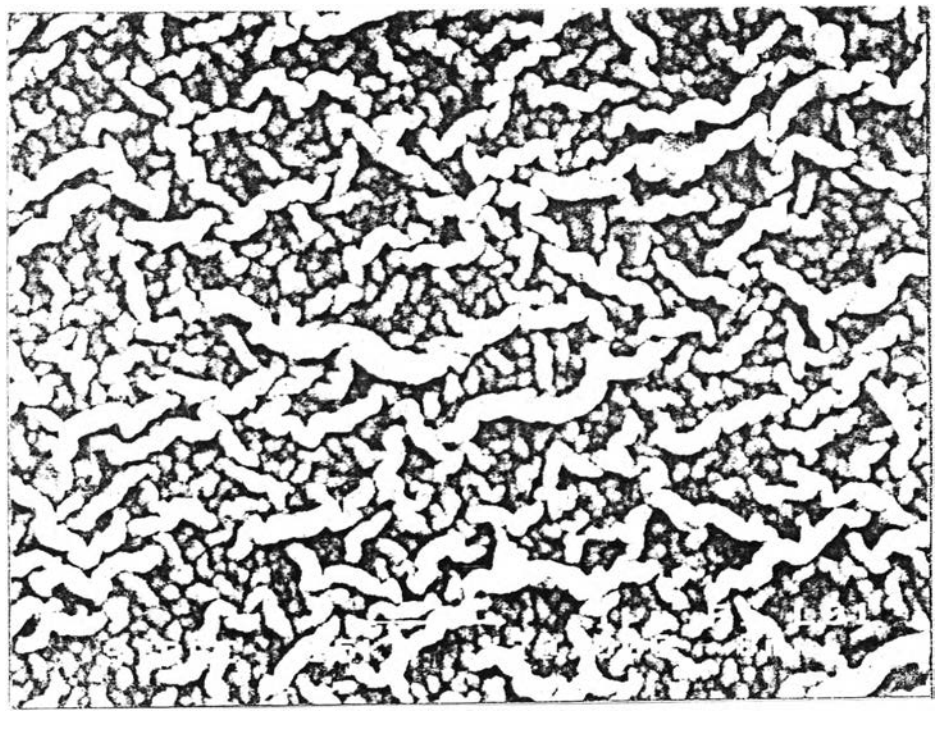


รูปที่ 3.10 ข. รูปถ่าย SEM ของเมมเบรนชนิด ES-10

รูปที่ 3.10 เมมเบรนชนิด ES-10



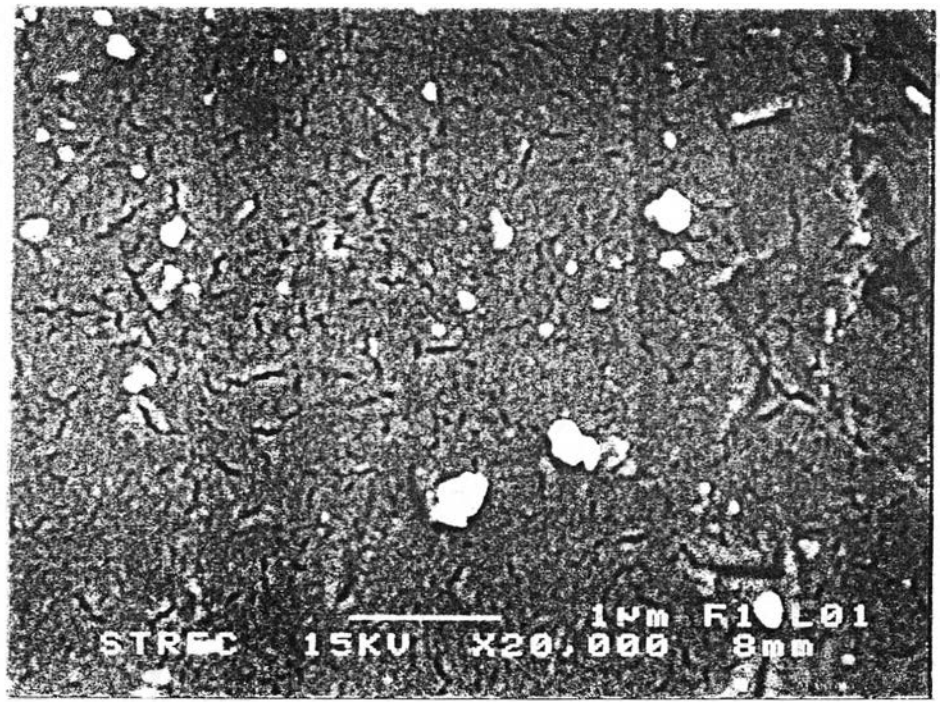
รูปที่ 3.11 ก. รูปของเมมเบรนชนิด NTR-729HF



รูปที่ 3.11 ข. รูปถ่าย SEM ของเมมเบรนชนิด NTR-729HF

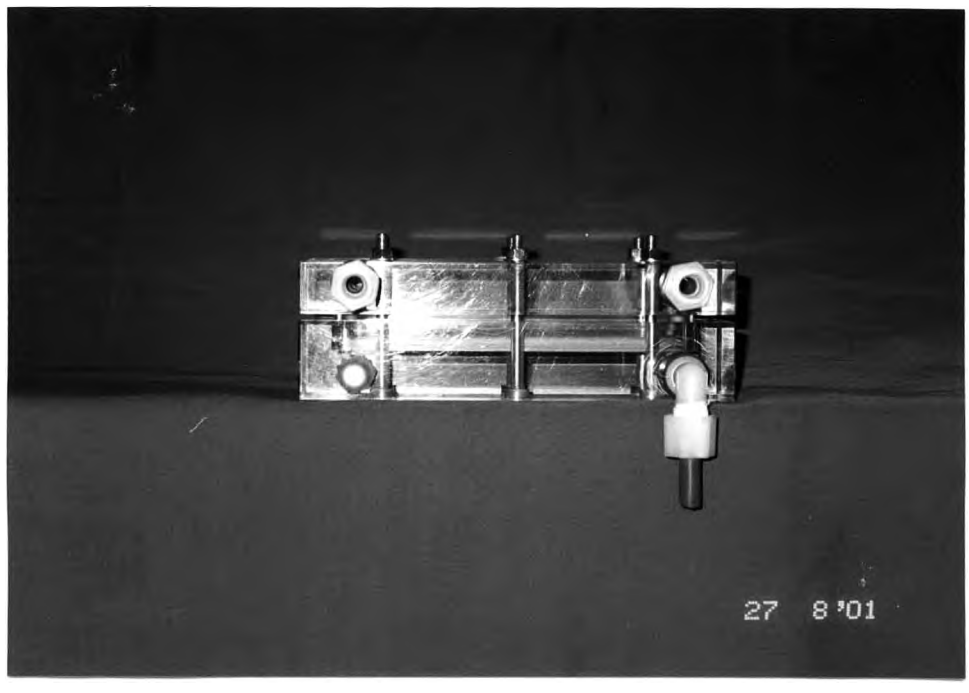
รูปที่ 3.11 เมมเบรนชนิด NTR-729HF

รูปที่ 3.12 ก. รูปของเมมเบรนชนิด NTR-7410

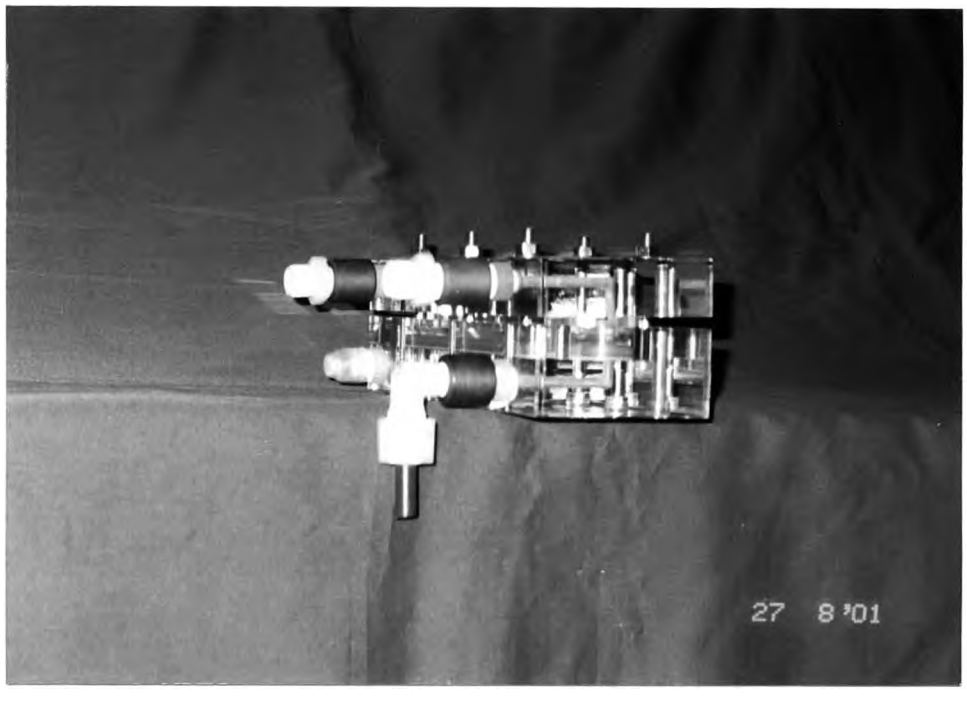


รูปที่ 3.12 ข. รูปถ่าย SEM ของเมมเบรนชนิด NTR-7410

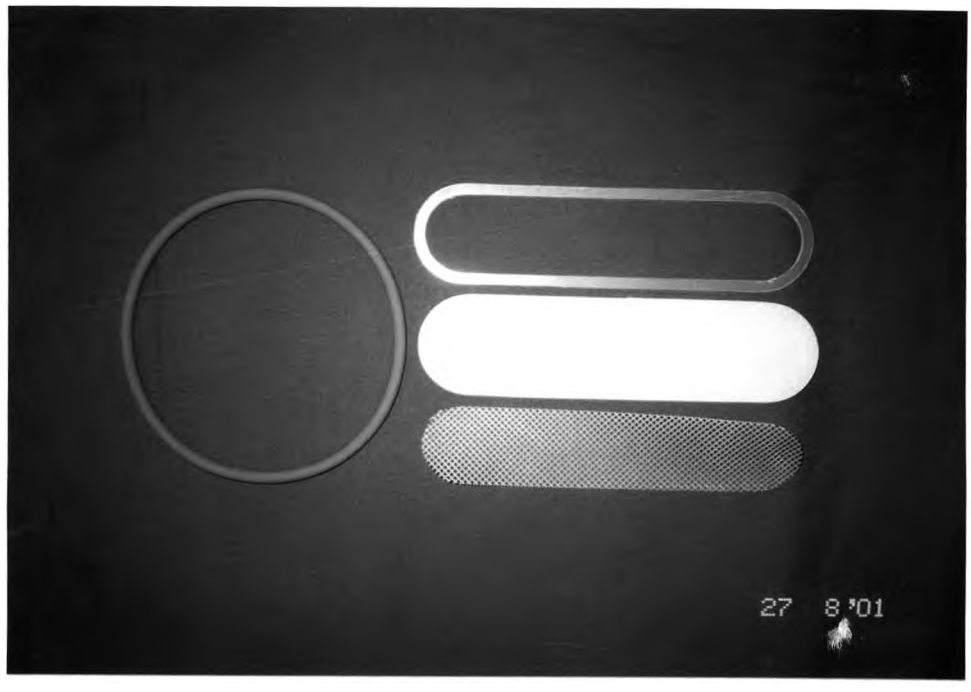
รูปที่ 3.12 เมมเบรนชนิด NTR-7410



รูปที่ 3.13 รูปถ่ายด้านหน้าของโมดูลของเมมเบรน

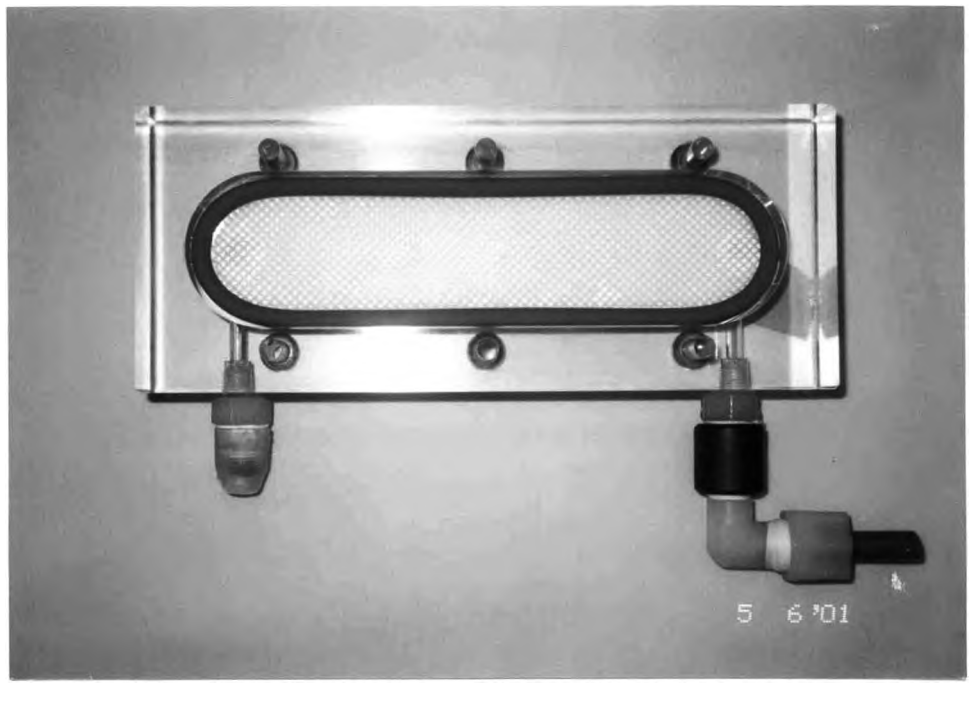


รูปที่ 3.14 รูปถ่ายด้านข้างของโมดูลของเมมเบรน



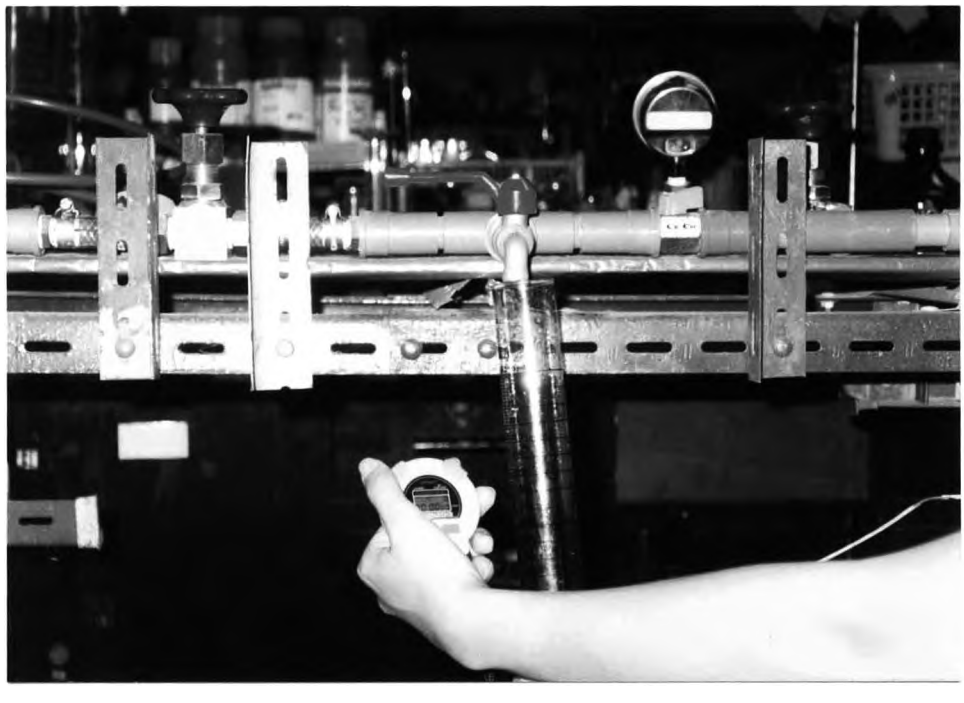
รูปที่ 3.15 รูปแสดงส่วนประกอบของโมดูลของเมมเบรน

(ซ้าย: ยางกันน้ำซึม, ขวา: จากบน ขอบพลาสติกรองรับแผ่นกระจายน้ำ Permeate, แผ่นกระจายน้ำ Permeate และ Feed Spacer ตามลำดับ)



รูปที่ 3.16 รูปโมดูลที่บรรจุเมมเบรนและอุปกรณ์ทั้งหมดในโมดูลแล้ว

รูปที่ 3.17 วาล์วเข็ม (Needle Valve)



รูปที่ 3.18 บอลล์วาล์วและก๊อกสำหรับวัดค่าอัตราไหลของน้ำ Influent ผ่านโมดูล

3.5 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมด และรูปแบบการดำเนินระบบที่ใช้ในการทดลอง

แผนผังการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดในงานวิจัยนี้ แสดงในรูปที่ 3.19 ส่วนรูปแสดงการติดตั้งเครื่องมือ และอุปกรณ์ทั้งหมดแสดงในรูปที่ 3.20 โดยรูปแบบของการดำเนินการทดลอง จะทำการเวียนน้ำ Concentrate และน้ำ Permeate กลับสู่ถังน้ำดิบตลอดเวลาในช่วงที่ระบบยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุล และจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ Permeate มาวิเคราะห์เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว ซึ่งตรวจสภาวะสมดุลโดยใช้การวัดค่าฟลักซ์ หลังจากดำเนินระบบ 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยปริมาณตัวอย่างน้ำ Permeate ที่เก็บ (ประมาณ 60 mL) ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำดิบทั้งหมด (เท่ากับ 5 L) ทำให้ลักษณะสมบัติของน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบมีค่าสม่ำเสมอ ไม่เปลี่ยนแปลง

3.6 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองที่ใช้ อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Ratanatamskul และคณะ , 1996 ซึ่งแสดงได้ดังนี้

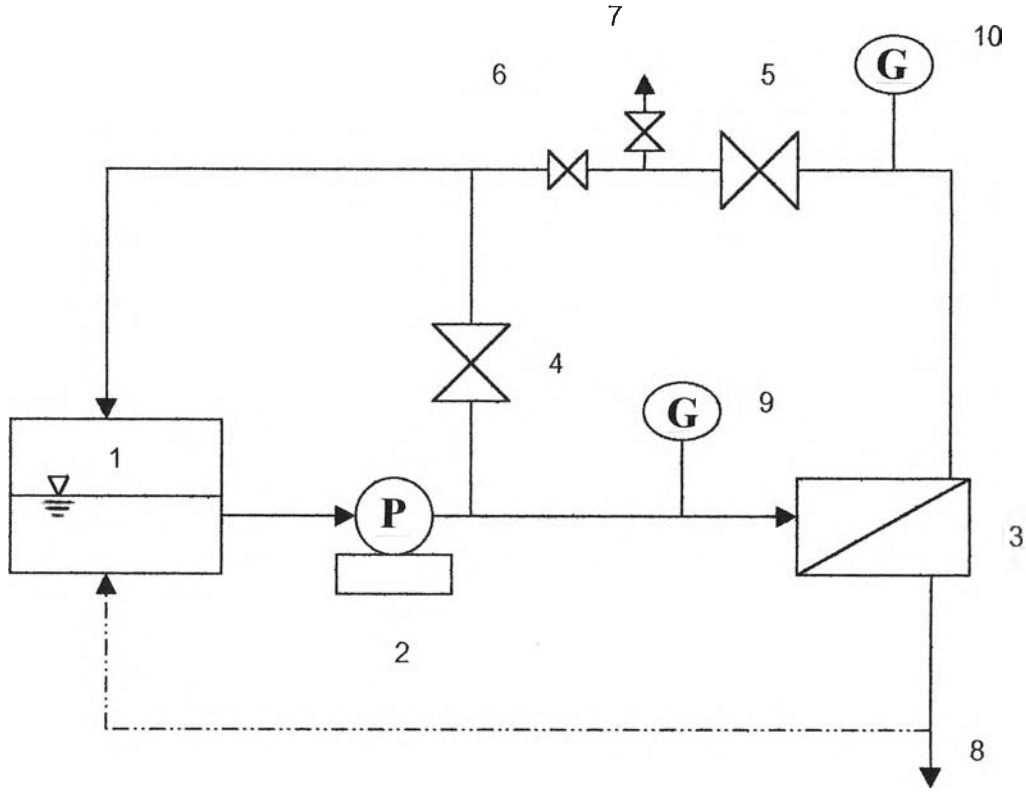
1. หลังจากติดตั้งเมมเบรนชนิดที่ต้องการทดลองลงภายในโมดูลของเมมเบรนแล้วจะทำการล้างเมมเบรน โดยป้อนสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเป็นเวลา 30 นาที ต่อด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 30 นาที เข้าสู่ระบบผ่านเครื่องสูบน้ำโดยใช้ค่าความดันประมาณ 2 bar เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่อาจเกาะติดอยู่ที่เมมเบรน ท่อ และอุปกรณ์ต่าง ๆ

2. ทำการกรองน้ำ Demineralization โดยใช้ความดัน 3 bar และ Crossflow Velocity 0.7 m/s ทำการวัดค่าฟลักซ์ของน้ำ Permeate หลังจากดำเนินระบบ 1 และ 2 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าระบบอยู่ในสภาวะสมดุล โดยเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว ค่าฟลักซ์ที่เวลาทั้งสองจะมีค่าคงที่หรือแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะแสดงถึงค่า MTC ของน้ำ Demineralization ผ่านเมมเบรน

3. ดำเนินระบบกับน้ำ Influent ที่ใช้ในการทดลองโดยใช้ค่าปัจจัยต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษา

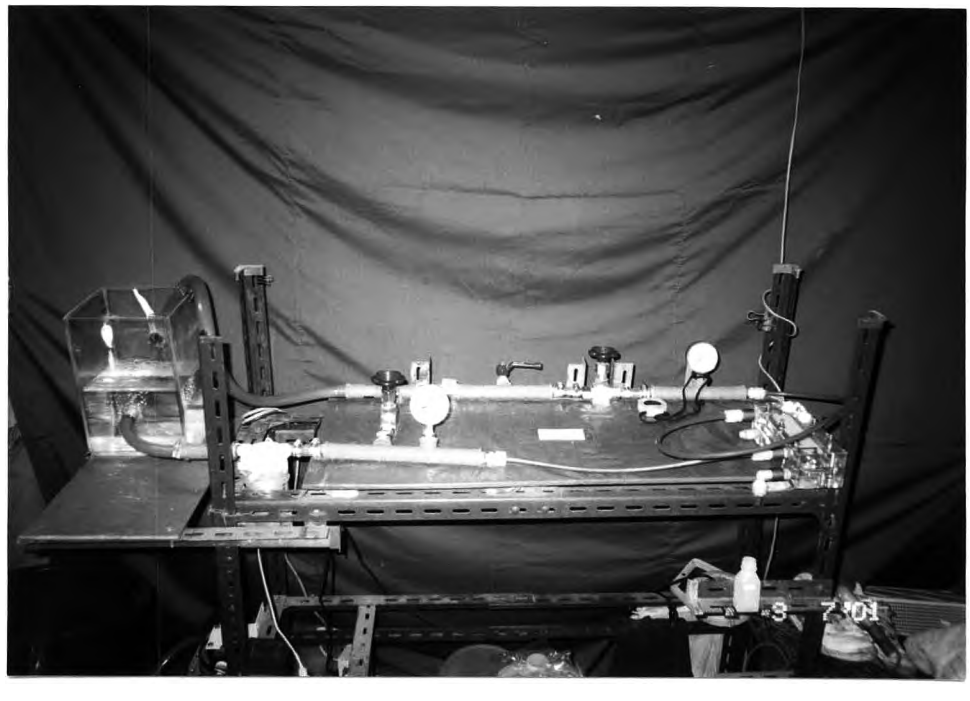
4. วัดค่าฟลักซ์ของน้ำ Permeate ตามวิธีในข้อ 2. โดยรูปที่ 3.21 แสดงการวัดค่าฟลักซ์โดยใช้กระบอกตวงขนาด 25 mL วัดปริมาตรน้ำ Permeate ต่อเวลา และทำการเก็บตัวอย่างน้ำ Permeate เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ หลังจากดำเนินระบบ 2 ชั่วโมง (หลังจากตรวจสอบสภาวะสมดุลของระบบโดยวัดค่าฟลักซ์ที่เวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับแล้ว) และจะสิ้นสุดการทดลองเมื่อเก็บน้ำ Permeate ได้ตามปริมาตรที่ต้องการ คือประมาณ 60 mL

5. ล้างเมมเบรน โดยถอดโมดูลของเมมเบรนออก แล้วนำเมมเบรนไปล้าง โดยใช้น้ำประปาไหลผ่านแรง ๆ เป็นเวลาประมาณ 5 นาที แล้วติดตั้งเมมเบรนลงภายในโมดูล หลังจากนั้นทำการล้างเมมเบรนโดยสารละลายกรด ตามด้วยสารละลายด่างเหมือนในขั้นตอนที่ 1.

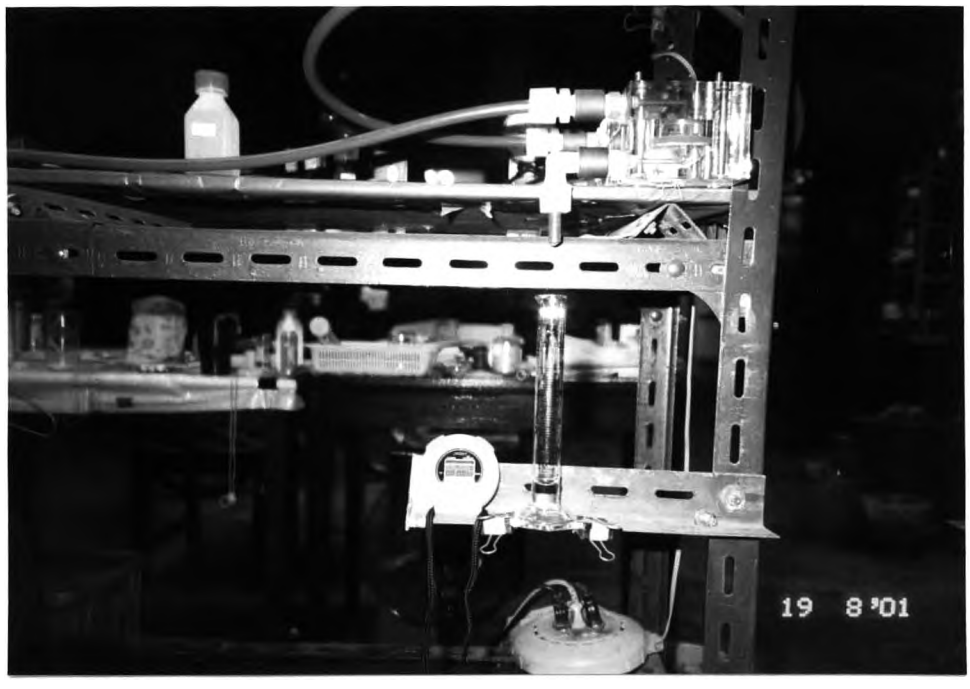


1=ถังน้ำInfluent,2=Booster pump,3=โมดูลเมมเบรน,4,5=วาล์วเข็ม,6=บอลล์วาล์ว,7=ก๊อกสำหรับเปิดเพื่อวัดอัตราไหลของน้ำ,8=น้ำPermeate, 9,10 มาตรวัดความดัน

รูปที่ 3.19 แผนผังการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดในงานวิจัย



รูปที่ 3.20 การติดตั้งเครื่องมือ และอุปกรณ์ทั้งหมด



รูปที่ 3.21 รูปแสดงการวัดค่าฟลักซ์ของน้ำ Permeate

6. กรองน้ำ Demineralization เพื่อตรวจสอบค่า MTC ของน้ำกลั่นและสภาวะการอุดตันของเมมเบรน โดยทำตามวิธีในข้อ 2. ทำการล้างเมมเบรนจนค่า MTC ของน้ำกลั่นเท่ากับ หรือใกล้เคียงกับค่าที่ได้ในขั้นตอนที่ 2.

7. เปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้แล้วทำตามขั้นตอนที่ 3-6 จนครบทุกค่าที่ต้องการศึกษา

8. ใช้ปัจจัยอื่น ๆ ที่ต้องการศึกษา ทำการทดลองจนครบทุกปัจจัย

9. เปลี่ยนแปลงชนิดของเมมเบรน แล้วทำตามขั้นตอนที่ 1-8 ใหม่จนครบทุกชนิดของเมมเบรนและน้ำดิบ

3.7 พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนของปริมาณ NOM

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัด NOM ออกจากน้ำส่วนใหญ่ใช้ค่า UV254 หรือค่า UV260 และค่า TOC เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนปริมาณของ NOM โดยพบว่าค่า UV254 และ UV260 มีความสัมพันธ์ที่ดีมากกับค่า TOC และปริมาณสาร THMP รวมถึงปริมาณสาร DBPs อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำประปา (Edzwald และคณะ, 1985) (Eaton, 1995) โดยในปัจจุบันได้มีการคิดแบบจำลองที่ใช้คำนวณปริมาณสาร DBPs ซึ่งหนึ่งในพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในแบบจำลอง ก็คือค่า UV254 (Sung และคณะ, 2000) โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่า UV260 เป็นพารา

มิเตอร์ที่เป็นตัวแทนปริมาณของ NOM ทั้งนี้เพื่อให้เป็นค่าเดียวกันกับค่าที่การประปานครหลวงใช้ และจะทำการวัดค่า TOC ควบคู่ไปด้วยเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่า UV260 และเพื่อใช้ความสัมพันธ์ของค่าทั้งสอง ในการบอกถึงลักษณะสมบัติบางประการของ NOM

3.8 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

- ความดัน : ค่าความดันที่ใช้ คือค่าความดันเฉลี่ยผ่านเมมเบรน (Transmembrane Pressure) ซึ่งเท่ากับ

$$\frac{P_f + P_c}{2} - P_p \tag{3.1}$$

โดยที่ P_f P_c และ P_p คือ ค่าความดันของน้ำ Influent น้ำ Concentrate และน้ำ Permeate ตามลำดับ มีหน่วยเป็น bar

- Crossflow Velocity (m/s) : ค่า Crossflow Velocity คำนวณจาก อัตราไหลของน้ำ Influent ต่อพื้นที่ภาคตัดขวางของ Feed Spacer โดยจากงานวิจัยของ Ratanatamskul และคณะ, 1996 ซึ่งใช้โมดูลชนิดเดียวกัน สามารถคำนวณได้ว่า ค่าอัตราการไหลของน้ำ Influent 1 L/min จะทำให้ได้ค่า Crossflow Velocity เท่ากับ 0.42 m/s

- %Recovery (R) = $\frac{Q_p}{Q_f} * 100\%$ (3.2)

โดยที่ Q_p และ Q_f คือ อัตราการไหลของน้ำ Permeate และน้ำ Influent ตามลำดับ

- %กำจัดค่า UV260 TOC และโบรไมด์ : %กำจัดค่า UV260 TOC และโบรไมด์ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\%\text{กำจัด} = [1 - \frac{C_p}{C_f}] * 100\% \tag{3.3}$$

โดยที่ C_p และ C_f คือ ความเข้มข้นของน้ำ Permeate และน้ำ Influent ตามลำดับ (ในหน่วย cm^{-1} สำหรับค่า UV260 และ mg/L สำหรับค่า TOC และความเข้มข้นของโบรไมด์ ตามลำดับ)

3.9 เหตุผลของการเลือกใช้ค่าปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง และตารางการทดลอง

ในการทดลองแต่ละครั้ง จะทำการศึกษาถึงผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อการกำจัด NOM ของ NFเมมเบรนโดยปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ลักษณะสมบัติของ NOM ในน้ำ ชนิดของ NF เมมเบรนที่ใช้ ความดัน Crossflow Velocity พีเอช ความเข้มข้นของโบรไมด์ในน้ำ ระยะเวลาในการดำเนินระบบ และผลของการบำบัดน้ำดิบขั้นต้นที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้ คือ

◆ ลักษณะสมบัติของ NOM ในน้ำ

ในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำจากแหล่งน้ำ 2 แหล่ง คือ น้ำจากคลองประปาบริเวณจุดรับน้ำดิบของโรงกรองน้ำสามเสน และน้ำจากเขื่อนวชิราลงกรณ์ที่ระดับความลึก 3 m. โดยคาดว่าลักษณะสมบัติ รวมถึงปริมาณของ NOM ในแหล่งน้ำทั้งสองน่าจะมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำในคลองประปาจะถูกผันโดยตรงมาจากแม่น้ำเจ้าพระยา ทำให้น้ำมีค่าความขุ่นสูง และมีสีดิน (เหลือง-น้ำตาล) อย่างชัดเจน ดังนั้น NOM ในน้ำจากคลองประปาส่วนใหญ่ ก็น่าจะมีกำเนิดมาจากดิน ซึ่งเป็น NOM ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ต่างกับน้ำในเขื่อนวชิราลงกรณ์ ซึ่งมีสีที่ค่อนข้างใส และมีสารแขวนลอยน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากมีการตกตะกอนของสารแขวนลอยบริเวณเหนือเขื่อน ดังนั้น NOM ที่อยู่ในน้ำก็น่าจะมีขนาดโมเลกุลเล็ก และบางส่วนน่าจะมีกำเนิดจากพืช หรือแบคทีเรียในน้ำ

◆ ชนิดของ NF เมมเบรนที่ใช้

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ NF เมมเบรนทั้งหมด 3 ชนิด คือES-10 NTR-729HF และ NTR-7410 โดยเมมเบรนทั้งสามชนิดมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน ทั้งโพลิเมอร์ที่ใช้ทำ และประสิทธิภาพของเมมเบรน (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) โดยจะเห็นได้ว่าช่วงประสิทธิภาพของเมมเบรน (ในการกำจัด NaCl) ที่เลือกใช้มีค่ากว้างมาก ตั้งแต่ NF เมมเบรนที่มีลักษณะเป็น Loose RO เมมเบรนจนถึง NF เมมเบรนที่เป็น Loose NF เมมเบรน ทั้งนี้เพื่อให้ได้ชนิดและลักษณะสมบัติของ NF เมมเบรนที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัด NOM ออกจากน้ำ

◆ ความดัน

ในการทดลองใช้ค่าความดัน 5 ค่า คือ 1 2 3 4 และ 5 bar ซึ่งถือว่าเป็นช่วงค่าความดันที่ต่ำมากสำหรับกระบวนการ NF ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานที่ใช้ โดย Ratanatamskul และคณะ , 1996 ได้ใช้ช่วงความดันนี้ในการกำจัดสารเจือปนในน้ำที่เป็นอิออนประจุลบ และพบว่าสามารถกำจัด PO_4^{3-} และ SO_4^{2-} ได้มากเมื่อใช้แรงดันอย่างน้อย 1 bar สำหรับเมมเบรนที่มีความหนาแน่นของประจุที่ผิวสูง เช่น NTR-729HF และ NTR-759HR และสามารถกำจัดอิออนลบ วา

เลนซ์เดี่ยวชนิดต่าง ๆ โดยใช้เมมเบรนที่มีความหนาแน่นของประจุที่ผิวสูงมาก ๆ เช่น NTR-759HR โดยใช้ความดันอย่างน้อย 2 bar ดังนั้น เนื่องจาก NOM ที่อยู่ในน้ำธรรมชาติ แสดงคุณสมบัติเป็นประจุลบ และมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าอิออนมาก จึงน่าจะถูกกำจัดได้ดีในช่วงแรงดันนี้เช่นกัน โดยการปรับค่าแรงดันที่ใช้ในการทดลองควบคุมโดยการปรับวาล์วเข็มที่ท่อ By-pass และที่ท่อนำน้ำ Concentrate โดยตารางการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2

◆ Crossflow Velocity

ค่า Crossflow Velocity ที่ใช้ในการทดลอง คือ 0.05 0.1 0.3 0.5 และ 0.7 m/s ตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงผลของ Crossflow Velocity และหาค่าที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพดีที่สุดในการกำจัด NOM โดยกระบวนการ NF โดยใช้ความดันที่มีค่าต่ำมากสำหรับกระบวนการ NF โดยทั่วไป ซึ่งช่วงค่า Crossflow Velocity นี้ครอบคลุมค่า Crossflow Velocity ที่ใช้ในระดับ Full-scale คือ ประมาณ 0.17 m/s การปรับค่า Crossflow Velocity ที่ใช้ในการทดลองควบคุมโดยการปรับวาล์วเข็มที่ท่อ By-pass และที่ท่อนำน้ำ Concentrate โดยตารางการทดลองแสดงในตารางที่ 3.3

◆ พีเอช

การทดลองทำการศึกษาถึงค่าพีเอช โดยทำการแปรค่าพีเอชทั้งหมด 5 ค่า คือ 4 5 6 7 และ 8 ในขณะที่ค่าพีเอชปกติของน้ำตามธรรมชาติอยู่ในช่วง 7-8 ทั้งนี้เนื่องจากในแหล่งน้ำบางประเภทที่มีค่าความกระด้าง และ ปริมาณของแข็งละลายสูงอาจจำเป็นต้องมีการปรับพีเอชของน้ำให้มีค่าต่ำลงเพื่อป้องกันการเกิดตะกรัน ซึ่งจะมีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน นอกจากนี้ ยังรวมไปถึงกรณีที่อาจนำกระบวนการ NF ไปใช้ต่อจากกระบวนการ Conventional Process ซึ่งคือกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟล้อคคูเลชัน และการตกตะกอน โดยใช้กระบวนการเหล่านี้ในการบำบัดน้ำขั้นต้นเพื่อกำจัดสารแขวนลอยออกก่อนถึงกระบวนการ NF โดยกระบวนการเหล่านี้จะทำให้พีเอชของน้ำมีค่าต่ำลง ซึ่งจะมีผลต่อการใช้กระบวนการ NF ในการกำจัด NOM ในน้ำ ในการทดลองนี้จะทำการปรับค่าพีเอชโดยใช้การเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.1 N และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 N ตารางการทดลองแสดงในตารางที่ 3.4

◆ ความเข้มข้นของโบรไมด์ในน้ำ

ในการทดลองจะทำการแปรค่าความเข้มข้นของโบรไมด์ 5 ค่า ตั้งแต่ความเข้มข้นเดิมในน้ำดิบ 0.1 0.2 0.4 และ 0.8 mg/L ตามลำดับ โดยในการทดลองนี้นอกจากจะศึกษาถึงผลของความเข้มข้นโบรไมด์ต่อการกำจัด NOM ของ NF เมมเบรนทั้งสามชนิดแล้วยังศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการ NF ในการกำจัดโบรไมด์ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเติมคลอรีนลงไปในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ $HOCl$ และ OCl^- และถ้าในน้ำมี Br^- ทั้ง $HOCl$ และ OCl^- จะออกซิไดซ์

Br^- ได้ $HOBr$ และ OBr^- โดยทั้ง $HOCl$ และ $HOBr$ สามารถทำให้เกิด Chlorinated และ Brominated By-products นอกจากนี้ถ้ามีการเติมโอโซนลงในน้ำที่มี Br^- และ NOM จะทำให้เกิด Bromoform และ Brominated By-products ตัวอื่น ๆ และยังพบว่าโอโซนสามารถออกซิไดซ์ Br^- เป็น $HOBr$ และ OBr^- ซึ่ง OBr^- สามารถทำปฏิกิริยาต่อได้ BrO_3^- ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลของปริมาณ Br^- ในแหล่งน้ำผิวดิน ปริมาณ Br^- ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงอ้างอิงจากงานวิจัยของ Najm และ Kransner , 1995 ซึ่งทำในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งคาดว่าน่าจะมีปริมาณที่ครอบคลุมปริมาณ Br^- ในแหล่งน้ำผิวดินของประเทศไทย โดยจะทำการปรับค่าความเข้มข้นโบรไมด์โดยใช้สารละลาย KBr ตารางการทดลองแสดงในตารางที่ 3.5

◆ ระยะเวลาในการดำเนินระบบ

ในการศึกษาถึงผลของการดำเนินระบบระยะยาว จะทำการเลือกชนิดของเมมเบรน รวมถึงค่าความดัน และค่า Crossflow Velocity ที่เหมาะสมที่สุดมาดำเนินระบบระยะยาวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง กับน้ำดิบจากแหล่งน้ำที่เลือก ทั้งนี้จะพิจารณาจากค่าฟลักซ์ ประสิทธิภาพ และความชัดเจนของผลที่เกิดจากการอุดตันของเมมเบรน เพื่อที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการ NF รวมถึงการอุดตันของเมมเบรน ในการดำเนินระบบต่อเวลา โดยตารางการทดลองแสดงในตารางที่ 3.6

◆ การบำบัดน้ำดิบขั้นต้น

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลของการบำบัดน้ำดิบขั้นต้นที่แตกต่างกันต่อการทำงานของกระบวนการ NF โดยใช้วิธีในการบำบัดขั้นต้น 3 วิธี คือ การบำบัดขั้นต้นโดยกระบวนการ MF ขนาดรูพรุน 0.1 μm และการบำบัดขั้นต้นโดยใช้ Cartridge Filter ขนาดรูพรุน 1 และ 5 μm ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อดูความแตกต่างของประสิทธิภาพของ NF เมมเบรน เมื่อดำเนินระบบกับน้ำที่บำบัดขั้นต้นที่แตกต่างกัน ตลอดจนเพื่อศึกษาถึงการอุดตันของเมมเบรน และระดับของการบำบัดน้ำดิบขั้นต้นที่พอเพียง โดยในการทดลองนี้จะทำควบคู่ไปกับการศึกษาถึงผลของการดำเนินระบบระยะยาว ต่อการทำงานของกระบวนการ NF โดยตารางการทดลองแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของค่าความดันที่ใช้ในการดำเนินระบบ

ความดัน (bar)	Crossflow Velocity (m/s)	NF เมมเบรน ที่ใช้	น้ำดิบ
1	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ,เขื่อนฯ
2	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ,เขื่อนฯ
3	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ,เขื่อนฯ
4	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ,เขื่อนฯ
5	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ,เขื่อนฯ

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของ Crossflow Velocity ที่ใช้

Crossflow Velocity (m/s)	NF เมมเบรน ที่ใช้	น้ำดิบ
0.05	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ,เขื่อนฯ
0.1	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ,เขื่อนฯ
0.3	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ,เขื่อนฯ
0.5	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ,เขื่อนฯ
0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ,เขื่อนฯ

หมายเหตุ : ใช้ค่าความดัน 3 bar สำหรับเมมเบรนชนิด ES-10 และ NTR-729HF และ 2 bar สำหรับเมมเบรนชนิด NTR-7410

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของค่าพีเอช

พีเอช	Crossflow Velocity (m/s)	NF เมมเบรน ที่ใช้	น้ำดิบ
4	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ, เขื่อนฯ
5	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ, เขื่อนฯ

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของค่าพีเอช (ต่อ)

พีเอช	Crossflow Velocity (m/s)	NF เมมเบรน ที่ใช้	น้ำดิบ
6	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ, เขื่อนฯ
7	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ, เขื่อนฯ
8	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ, เขื่อนฯ

หมายเหตุ : ใช้ค่าความดัน 3 bar สำหรับเมมเบรนชนิด ES-10 และ NTR-729HF และ 2 bar สำหรับเมมเบรนชนิด NTR-7410

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของโบรไมด์

ปริมาณโบรไมด์ที่เติม (mg/L)	Crossflow Velocity (m/s)	NF เมมเบรน ที่ใช้	น้ำดิบ
0	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ, เขื่อนฯ
0.1	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ, เขื่อนฯ
0.2	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ, เขื่อนฯ
0.4	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ, เขื่อนฯ
0.8	0.7	ES-10,NTR-729HF,NTR-7410	คลองประปาฯ, เขื่อนฯ

หมายเหตุ : ใช้ค่าความดัน 3 bar สำหรับเมมเบรนชนิด ES-10 และ NTR-729HF และ 2 bar สำหรับเมมเบรนชนิด NTR-7410

ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของการดำเนินระบบระยะยาว และการบำบัดน้ำดิบขั้นต้นที่แตกต่างกัน

วิธีการบำบัดขั้นต้น	ระยะเวลาในการดำเนินระบบ(ชั่วโมง)	ความดัน (bar)	Crossflow Velocity (m/s)	NF เมมเบรนที่ใช้	น้ำดิบ
MF 0.1 μm	24	3	0.7	NTR-729HF	น้ำคลองฯ
Cartridge Filter 1 μm	24	3	0.7	NTR-729HF	น้ำคลองฯ
Cartridge Filter 5 μm	24	3	0.7	NTR-729HF	น้ำคลองฯ

3.10 วิธีที่ใช้และจุดเก็บตัวอย่างน้ำในการวิเคราะห์พารามิเตอร์

ตารางแสดงวิธีที่ใช้ และจุดเก็บตัวอย่างน้ำในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ แสดงในตารางที่ 3.7 และตารางที่ 3.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.7 วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	เครื่องมือที่ใช้
ความดัน	มาตรวัดความดัน	SANGI^ และTFJ@ ขนาด 7 bar
อัตราไหลของน้ำ Influent ผ่านโมดูล	วัดปริมาตรน้ำต่อเวลา	กระบอกตวงขนาด 250 mL, นาฬิกาจับเวลา
ฟลักซ์	วัดปริมาตรน้ำ Permeate ต่อเวลา	กระบอกตวงขนาด 25 mL, นาฬิกาจับเวลา
พีเอช และอุณหภูมิ	พีเอชมิเตอร์	HORIBA รุ่น F-13* , HACH รุ่น EC 30+
UV260	เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	SHIMADZU รุ่น UV-1601
TOC>	High-temperature combustion	SHIMADZU รุ่น TOC-5000

ตารางที่ 3.7 วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	เครื่องมือที่ใช้
ค่าความนำไฟฟ้า	เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า	SCHOTT รุ่น CG855
ความเข้มข้นโบรไมด์ และอิออนลบชนิดอื่น ๆ [#]	เครื่อง Ion Chromatograph	DIONEX รุ่น DX-100*, DIONEX รุ่น DX-120[+]

อ้างอิงจาก Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA,AWWA,WPCF , 1995)

[>] ค่า TOC วัดโดยทำการกรองน้ำด้วยกระดาษกรอง GF/C ก่อน, [^] มาตรวัดความดันของน้ำ Influent ก่อนเข้าโมดูล , [@] มาตรวัดความดันของน้ำ Concentrate , * ใช้วิเคราะห์ในการดำเนินระบบกับน้ำจากคลองประปาสามเสน , [+] ใช้วิเคราะห์ในการดำเนินระบบกับน้ำจากเขื่อนวชิราลงกรณ์ เนื่องจากเครื่องมือตัวแรกชำรุด , [#] อิออนลบชนิดอื่น ๆ ที่วิเคราะห์ คือ F^- Cl^- NO_2^- NO_3^- PO_4^{3-} และ SO_4^{2-}

ตารางที่ 3.8 จุดเก็บตัวอย่างน้ำในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์

การทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของ	ฟลักซ์	พีเอช	อุณหภูมิ	UV260	TOC	ความนำไฟฟ้า	ความเข้มข้นโบรไมด์และอิออนลบอื่น ๆ	ความถี่
ความดัน	น้ำPermeate ที่เวลา 1 และ 2 ชม.	I/P	I/P	I/P	I/P	I/P	-	เก็บตัวอย่างน้ำ Influent และ น้ำ Permeate หลังสภาวะสมดุล อย่างละ 1 ตัวอย่าง
Crossflow Velocity	น้ำPermeate ที่เวลา 1 และ 2 ชม.	I/P	I/P	I/P	I/P	I/P	-	เก็บตัวอย่างน้ำ Influent และ น้ำ Permeate หลังสภาวะสมดุล อย่างละ 1 ตัวอย่าง
พีเอช	น้ำPermeate ที่เวลา 1 และ 2 ชม.	I/P	I/P	I/P	I/P	I/P	-	เก็บตัวอย่างน้ำ Influent และ น้ำ Permeate หลังสภาวะสมดุล อย่างละ 1 ตัวอย่าง
ความเข้มข้นของโบรไมด์และอิออนลบอื่น ๆ	น้ำPermeate ที่เวลา 1 และ 2 ชม.	I/P	I/P	I/P	I/P	I/P	I/P	เก็บตัวอย่างน้ำ Influent และ น้ำ Permeate หลังสภาวะสมดุล อย่างละ 1 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.8 จุดเก็บตัวอย่างน้ำในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ (ต่อ)

การทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของ	ฟลักซ์	พีเอช	อุณหภูมิ	UV260	TOC	ความนำไฟฟ้า	ความเข้มข้นโบรไมด์และอิออนลบอื่นๆ	ความถี่
การดำเนินระบบระยะยาว และการบำบัดขั้นต้นที่ต่างกัน	ของน้ำPermeate ที่ชั่วโมงที่ 1 3 5 7 9 12 15 18 21 และ 24	I/P	I/P	I/P	I/P	I/P	-	ของน้ำ Influent และน้ำPermeate ที่ชั่วโมงที่ 1 3 5 7 9 12 15 18 21 และ 24 อย่างละ 1 ตัวอย่าง

I/P = เก็บตัวอย่างทั้งน้ำ Influent และน้ำ Permeate , ค่าความดัน และอัตราการไหลของน้ำ Influent ผ่านโมดูล เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องควบคุมให้ได้ตามค่าที่ต้องการในแต่ละการทดลอง