# บทที่ 3
# วิธีดำเนินการทดลอง

## 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี ที่ใช้ในการทดลอง

**3.1.1 ถังบรรจุก๊าซไนโตรเจน** พร้อมอุปกรณ์ (มาตรวัดแรงดัน วาล์ว สายยาง) เพื่อใช้แรงดันของก๊าซขับสารอินทรีย์จากถังเก็บไปยังชุดทดลอง

**3.1.2 ชุดทดลอง** ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ชุดทดลอง Stirred cell unit amicon 8400 แบบไหลตามแนวดิ่ง ขนาดความจุ 400 มิลลิลิตร ความดันไม่เกิน 75 บาร์ เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.6 cm

**3.1.3 อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน** ในการศึกษาครั้งนี้ใช้แผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน จากบริษัทออสโมนิค (Osmonics) รุ่น GK2540F1072 ประเทศสหรัฐอเมริกา

**3.1.4 เครื่องกำเนิดแรงเฉือน** ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ LABINCO รุ่น LD-12 Bioculture stirrer ความเร็วรอบ 100-990 รอบต่อนาที

**3.1.5 เครื่องมือวิเคราะห์** ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้เครื่องมือเพื่อวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ดังนี้

(1) เครื่องวัดค่าพีเอช ความละเอียด 2 ตำแหน่ง (WTW inolab pH level 2, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ใช้ในการวัดค่าพีเอชของสารละลาย

(2) เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้า ความละเอียด 3 ตำแหน่ง (WTW inolab cond level 2, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ใช้วัดสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลาย

**3.2.6 อุปกรณ์** ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้อุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

(1) บีกเกอร์ขนาด 100 250 400 1,000 และ 4,000 มิลลิลิตร เพื่อบรรจุสารละลายในการทดลองและทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง

(2) แท่งแก้วคนสาร เพื่อคนสารละลายและสารเคมีเข้าด้วยกัน

(3) ถังผสมน้ำตัวอย่าง ใช้ผสมสารอินทรีย์ธรรมชาติกับน้ำ DI เพื่อให้ได้สารละลายตามความต้องในการทดลอง

(4) ถังสแตนเลสควบคุมความดันสำหรับใส่น้ำตัวอย่างที่เตรียมทดลอง ขนาดปริมาตร 10 ลิตร

(5) ช้อนตักสารเคมี

(6) เครื่องชั่ง ความละเอียด 2 ตำแหน่ง (Mettler Toledo Monobloc รุ่น PB3002-S) ใช้ในการชั่งน้ำหนักของสารละลายที่ซึมผ่านเมมเบรน เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ

(7) เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo รุ่น AB204-S) ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักของสารเคมีเพื่อเติมในสารละลายเตรียมทดลอง

(8) นาฬิกาจับเวลา

(9) ขวดแก้วเก็บกรดขนาด 500 มิลลิลิตร และขวดพลาสติกเก็บเบสขนาด 1,000 มิลลิลิตร

(10) กระบอกตวงขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง

(11) แท่งกรองไมโครฟิลเตรชันขนาด 10 ไมครอน ใช้ในการกรองน้ำตัวอย่างก่อนที่จะนำน้ำตัวอย่างผ่านเข้าดำเนินระบบอัลตราฟิลเตรชัน

(12) กระดาษกรอง GF/C (Glass Fiber Filter) ซึ่งไม่มีสารอินทรีย์ติดอยู่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร

(13) ถ้วยกรองกูซ (Gooch Crucible) หรือกรวยบุคเนอร์ ความจุ 100 มิลลิลิตร

(14) ขวดกรอง (Membrane Filter) ใช้ในการวิเคราะห์ของแข็งที่ละลายน้ำ

(15) เครื่องอังน้ำ (Water Bath) ใช้ในการระเหยน้ำตัวอย่างจนได้ปริมาณของแข็ง

(16) Magnetic stirrer

(17) ถ้วยระเหย (Evaporating dishes) ซึ่งมีความจุ 100 มิลลิลิตร ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าของแข็ง

(18) โถทำแห้ง (Disiccator) ใช้ในการดูดความชื้นออกจากปริมาตรของแข็งในการวิเคราะห์หาค่าของแข็ง

(19) ตู้อบ (Oven) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ $150 \pm 2\ ^{0}$ซ

(20) ขวดบีโอดี ขนาด 300 มิลลิลิตร พร้อมจุกแก้วที่เป็น Ground joint

(21) ขวดรูปกรวยขนาด 125 250 และ 300 มิลลิลิตร ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง

(22) บิวเรตต์ ใช้ในการไตเตรทสารต่างๆ

(23) เครื่องจ่ายลม ใช้พ่นอากาศเข้าไปในน้ำเจือจาง สำหรับวิเคราะห์หาค่าบีโอดี

(24) ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่ $20 \pm 1\ ^{0}$ซ และต้องมืด ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าบีโอดี

(25) หลอดย่อย (Digestion Vessels) ขนาด 16x100 และ 25x150 มีฝาสลักเกลียวซึ่งทำด้วย TEE

(26) บล็อก (Block) ทำด้วยอะลูมิเนียม ความลึกของช่องใส่ประมาณ 45-50 มิลลิเมตร

(27) ขวดเคลดาห์ล (Kjeldahl Flask) ขนาด 800 มิลลิลิตร ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าทีเคเอ็น

(28) ชุดเครื่องมือสำหรับการย่อยสลาย ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าทีเคเอ็น

(29) ชุดเครื่องมือสำหรับทำการกลั่นแอมโมเนีย ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าทีเคเอ็น

**3.2.7 สารเคมี** ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยสารเคมีต่างๆ ดังนี้

(1) Hydrochloric acid (HCl, 36 %), Analysis reagent, Analytical Univar reagent ใช้ปรับค่าพีเอชของสารละลาย

(2) Sodium hydroxide (NaOH), Analytical univar reagent, Ajax Finechem ใช้ปรับค่าพีเอชของสารละลายและล้างเมมเบรน

(3) Sodium metabisulphite ($Na_2S_2O_5$), Analytical univar reagent, APS Finechem ใช้สำหรับการแช่เมมเบรนที่ตัดได้ขนาดแล้วแต่ยังไม่ใช้งานเพื่อรักษาสภาพของเมมเบรน

(4) สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่างเบื้องต้น แสดงในภาคผนวก ก

**3.2 กรอบแนวทางการดำเนินการ**

การดำเนินการทดลองครั้งนี้ เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์โดยการแปรผันค่าความดัน ค่าอัตราแรงเฉือน และค่าพีเอช ในระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน การดำเนินการทดลองเบื้องต้นจะทำการศึกษาคุณภาพน้ำตัวอย่างเบื้องต้นที่ผ่านการบำบัดแล้วด้วยวิธีแบบสระเติมอากาศ และบ่อประดิษฐ์ (Aerated Lagoon and Constructed Wetland) ภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี คือ การวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด การวิเคราะห์หาปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์ม นำน้ำตัวอย่างเข้าสู่เครื่องกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน เพื่อกำจัดอนุภาคสารแขวนลอย และของแข็งที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง จากนั้นนำน้ำที่ผ่านการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันเข้าสู่การดำเนินระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน ทำการศึกษาการทำงานของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน โดยวัดจากฟลักซ์ของน้ำที่ผ่านเมมเบรนต่อหน่วยพื้นที่กรองและความสามารถในการกักสาร โดยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่มีการดำเนินระบบแบบไหลตามแนวดิ่ง (Dead-End Operation) ซึ่งมีปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ ผลของค่าพีเอช ผลของอัตราแรงเฉือน และผลของความดันที่ใช้ในการดำเนินระบบที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์และการอุดตันที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา เพื่อให้กระบวนการผลิตน้ำประปามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น หรือสามารถนำน้ำที่ผ่านการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันไปใช้ประโยชน์ในการอุปโภคได้ เช่น ใช้ในห้องน้ำ ทำน้ำพุ และรดน้ำต้นไม้ เป็นต้น

แนวทางการดำเนินการทดลองเบื้องต้น สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(1) ศึกษาและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง โดยรวบรวมเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการลดลงของฟลักซ์ของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน การกำจัดสารแขวนลอยและของแข็งต่างๆ จากระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

(2) รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่างเบื้องต้นจากบ่อ Final Pond ที่ผ่านการบำบัดแล้ว ก่อนนำเข้าสู่เครื่องกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำอีกครั้ง นำผลการวิเคราะห์ที่ได้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้นก่อนเข้าสู่เครื่องกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน และนำน้ำที่ผ่านเครื่องกรองแบบไมโครฟิลเตรชันมาใช้ในการดำเนินระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันที่มีการดำเนินระบบแบบไหลตามแนวดิ่ง (Dead-End Operation)

(3) เตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ และตรวจสอบการทำงานของเครื่องมือและอุปกรณ์ให้พร้อมสำหรับการใช้งาน

(4) ดำเนินการทดสอบปัจจัยที่ศึกษา ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยดำเนินการทดสอบตามขอบเขตที่ทำการศึกษา

(5) วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยวัดค่าพารามิเตอร์ทางด้านพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด หาปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์ม การวิเคราะห์ฟลักซ์ การอุดตัน และความสามารถในการกำจัดของแข็งและสารแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำ

(6) สรุปผลการทดลอง โดยเป็นการประมวลผลการทดลองที่ได้

**3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่างเบื้องต้น**

**3.3.1 การเก็บตัวอย่างน้ำ**

น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มาจากบ่อ Final Pond ที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีแบบสระเติมอากาศ และบ่อประดิษฐ์ (Aerated Lagoon and Constructed Wetland) โดยน้ำตัวอย่างประมาณ 60 ลิตรถูกเก็บไว้ภายในถังพลาสติก ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำตัวอย่างเบื้องต้น ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าพีเอช ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด หาปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด และฟีคัลโคลิฟอร์ม ก่อนที่จะนำน้ำตัวอย่างเข้าสู่ระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน ที่มีการดำเนินระบบแบบไหลตามแนวดิ่ง (Dead-End Operation) น้ำตัวอย่างถูกเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส

**3.3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดคุณภาพน้ำเบื้องต้น**

3.3.2.1 ค่าการนำไฟฟ้า โดยวิธี Conductivity Meter

3.3.2.2 ค่าความเป็นกรดและเบส (pH Value) โดยวิธี pH Meter

3.3.2.3 ค่าบีโอดี (BOD หรือ Biochemical Oxygen Demand) โดยวิธี Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน

3.3.2.4 ค่าซีโอดี (COD หรือ Chemical Oxygen Demand) โดยวิธีย่อยสลายโดยโปตัสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion)

3.3.2.5 ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen) โดยวิธีเจลดาห์ล (Kjeldahl)

3.3.2.6 ค่าของแข็งทั้งหมด (TDS หรือ Total Dissolved Solids) โดยวิธีระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 $^{0}$ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.2.7 ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS หรือ Total Suspended Solids) โดยวิธีระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 $^{0}$ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.2.8 หาปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด โดยวิธี MPN Method (Most Probable Number Method)

3.3.2.9 ฟีคัลโคลิฟอร์ม โดยวิธี MPN Method (Most Probable Number Method)

รายละเอียดทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ก จากนั้นนำน้ำตัวอย่างกรองผ่านเครื่องกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน นำผลการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างเบื้องต้นเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างผ่านเครื่องกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัด ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น ค่าของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

**3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายและแผ่นเมมเบรน**

**3.4.1 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดลอง**

3.4.1.1 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric, HCl) 0.01 โมลต่อลิตร

เตรียมสารละลายกรดไฮโรคลอริก (HCl 36.5 %) เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร โดยปิเปตกรดไฮโดรคลอริกปริมาตร 0.12 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากประจุ (D.I. Water) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเตรียมกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลต่อลิตร โดยการปิเปตกรดไฮโดรคลอริก (1โมลต่อลิตร) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากประจุ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.4.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) 0.01 โมลต่อลิตร

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์น้ำหนักประมาณ 4 กรัม เติมน้ำปราศจากประจุ (D.I. Water) ปริมาตร 100

มิลลิลิตร หลังจากนั้นเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01 โมลต่อลิตร โดยการปิเปตโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากประจุ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**3.4.2 การเตรียมแผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน**

เมมเบรนที่ใช้เป็นของบริษัทออสโมนิค (OSMONICS) รุ่น GK2540F1072 ประเทศสหรัฐอเมริกา มีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ ขนาดรูพรุนประมาณ 10-200 อังสตรอม %Recovery > 90% นำมาตัดให้เป็นแผ่นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร ใช้กับชุดทดสอบเมมเบรนแบบไหลตามแนวดิ่ง (Dead-End Unit Cell, Amicon 8400) สำหรับแผ่นเมมเบรนตัดได้ขนาดเรียบร้อยแล้วถ้ายังไม่ได้ใช้งานในทันทีจะเก็บรักษาโดยแช่ไว้ในสารละลาย Sodium Metabisulphite ความเข้มข้น 1% แล้วนำไปแช่ไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส

**3.5 การออกแบบการทดลอง**

การทดลองนี้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

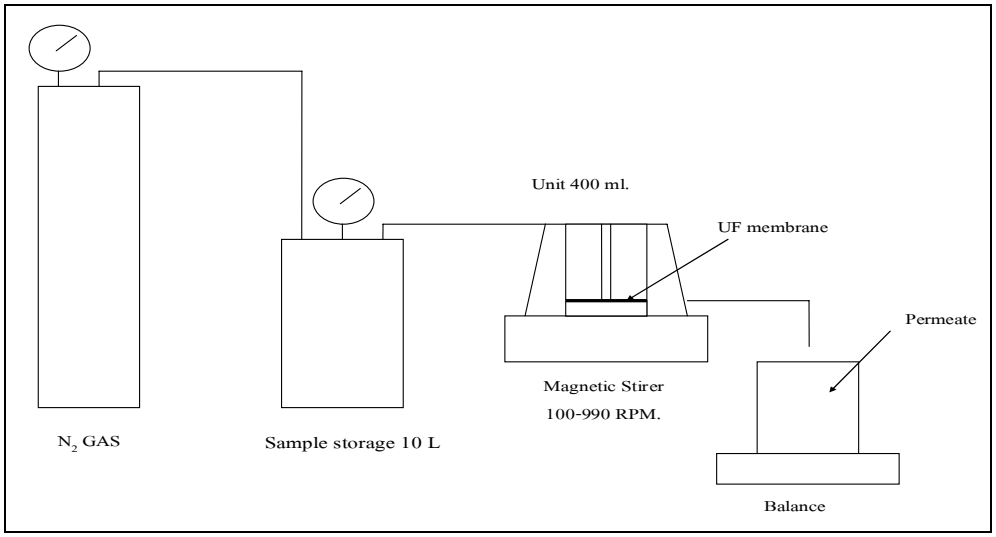
1) วิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่างเบื้องต้น ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าพีเอช ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด หาปริมาณแบคทีเรียโคลิ-ฟอร์มทั้งหมด และฟีคัลโคลิฟอร์ม

2) นำน้ำตัวอย่างจากบ่อ Final Pond ผ่านเข้าสู่เครื่องกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน จากนั้นทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำอีกครั้งเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างเบื้องต้น ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าพีเอช ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น ค่าของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

3) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์ และการอุดตันของระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ ผลของพีเอช ผลของอัตราแรงเฉือน และผลของความดันที่ใช้ในการดำเนินระบบ แล้วทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเพอร์มิเอทที่ได้ ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น และค่าของแข็งทั้งหมด

**3.5.1 เตรียมชุดการทดลองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane)** ชุดการทดลองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane) โดยใช้เมมเบรนของบริษัท Osmonics รุ่น GK2540F1072 มีคุณสมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 หน่วยทดสอบที่ใช้เป็นแบบการดำเนินระบบแบบไหลตามแนวดิ่ง (Dead-End Operation) เตรียมชุดการทดลองเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane) แสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยถังก๊าซไนโตรเจนที่สามารถสร้างแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 100 psi เพื่อให้แรงดันกับระบบเมมเบรนและต่อท่อพีอี (Polyethylene Tube, ที่สามารถทนแรงดันก๊าซได้ มายังถังเก็บตัวอย่างที่มีขนาดบรรจุ 10

ลิตร ตัวถังทำจากสแตนเลสสตีล มีระบบเกจวัดความดัน และสามารถปรับค่าความดันได้ตั้งแต่ 5 – 90 psi) ต่อท่อเข้าหน่วยทดสอบของระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Amicon 8400, ประเทศสหรัฐอเมริกา) Stirred Cell มีลักษณะเป็นแบบ Dead-End Operation ขนาดบรรจุ 400 มล. สามารถทนแรงดันได้ 75 psi ภายในบรรจุด้วยใบพัดกวน (Spacer) สามารถใช้งานได้ภายใต้แรงดันตั้งแต่ 1-70 psi ติดตั้งอยู่บนแท่นกวนแบบแม่เหล็กขับเคลื่อนแรงเฉือนใช้ LABINCO รุ่น LD-12 Bioculture Stirrer ความเร็วรอบ 100-990 รอบต่อนาที ประเทศเนเธอร์แลนด์ สารละลายที่ซึมผ่านเมมเบรนออกมาแล้วจะถูกส่งมายังภาชนะเก็บตัวอย่างตั้งอยู่บนเครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง (Mettler Toledo Monobloc รุ่น PB3002-S, USA) เพื่อวัดน้ำหนักและฟลักซ์ที่เกิดขึ้นต่อหน่วยพื้นที่กรองตามเวลาที่กำหนด ในการเก็บตัวอย่างจะใช้บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร และขวดพีอี (Polyethylene Bottle, ขนาด 60 มิลลิลิตร) นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น และค่าของแข็งทั้งหมด




**รูปที่ 3.1** แผนผังระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration and Dead-End Operating)

**ตารางที่ 3.1** คุณสมบัติของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันของ Osmonics รุ่น GK2540F1072

| คุณลักษณะ | ค่าที่ได้ |
|---|---|
| ประเภทของเมมเบรน | Composite Membrane |
| ชนิดของเมมเบรน | Thin-Film Ultrafiltration Membrane (TFM) |
| ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทำเมมเบรน | G-Series |
| ขนาดรูพรุน | 10-200 อังสตรอม |
| ช่วงพีเอชของการดำเนินการ | 2-11 |
| ช่วงพีเอชของการทำความสะอาด | 2-11.5 |
| ความทนทานต่อคลอรีน | 1,000 ppm-days |
| ความดันของการดำเนินการ | 70-400 psig (483 – 2,758 kPa) |
| ความดันสูงสุดที่ทนได้ | 400 psi (2,758 kPa) |
| อุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้ | 122 $^{0}$F (50 $^{0}$C) |
| ความสามารถในการกำจัดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุล | สามารถกำจัดสาร Polyethylene glycol ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 3,500 |
| การประยุกต์ใช้เมมเบรน | ใช้ในทางเคมี เช่น การทำให้บริสุทธิ์<br>ใช้ในการลดสี/ปริมาณ TOC<br>ใช้ในกระบวนการ Stream Separation<br>RO Pretreatment<br>การบำบัดน้ำเสีย<br>กำจัด Colloidal Iron/Silica<br>Oil-Water Separation |

**3.5.2 การทำความสะอาดเมมเบรน** มีขั้นตอนดังนี้ นำเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่เก็บไว้มาล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ ติดตั้งเมมเบรนในชุดทดลอง การล้างด้วยเบสโดยแช่แผ่นเมมเบรนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) พีเอช 10 เป็นเวลา 30 นาที ล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ ล้างด้วยกรดโดยแช่แผ่นเมมเบรนในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) พีเอช 4 เป็นเวลา 30 นาที ล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ นำแผ่นเมมเบรนเข้าระบบวัดฟลักซ์ที่ความดัน 0 10 20 30 40 และ 50 psi ทำการดำเนินระบบด้วยน้ำปราศจากประจุเป็นเวลา 30 นาที วัดฟลักซ์อีกครั้งก่อนเดินระบบด้วยน้ำตัวอย่างทดสอบปัจจัยที่ต้องการศึกษา หลังจากทำการศึกษาปัจจัยที่ต้องการทราบเสร็จสิ้นแล้วให้วัด

ค่าฟลักซ์ที่ความดัน 0 10 20 30 40 และ 50 psi ตามลำดับ ทำการล้างแผ่นเมมเบรนด้วยเบสโดยแช่แผ่นเมมเบรนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) พีเอช 10 เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ วัดฟลักซ์ที่ความดัน 0 10 20 30 40 และ 50 psi เปรียบเทียบค่าความต้านทานของเมมเบรนที่เกิดขึ้นก่อนและหลังการศึกษาปัจจัยที่สนใจศึกษา

**3.5.3 การทดสอบการทำงานของระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน** เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ ชุดทดลองเมมเบรน (Bench Sale Filtration Test Cell) เป็นระบบแบบไหลตามแนวดิ่ง (Dead-End Filtration Unit) ดังรูปที่ 3. 2 โดยควบคุมเวลาในการดำเนินระบบเป็น 210 นาที โดยมีขั้นตอนการดำเนินระบบเมมเบรนอัลตราฟิล-เตรชัน ดังนี้

(1) ติดตั้งเมมเบรนในระบบ และทำความสะอาดเมมเบรน

(2) หลังจากทำความสะอาดเมมเบรนก่อนใช้งานแล้ว เดินระบบด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที วัดฟลักซ์ของน้ำผ่านเมมเบรน (Pure Water Permeability) ปรับสภาวะการทำงานของระบบดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

(3) ทดสอบน้ำตัวอย่างตามปัจจัยที่ต้องการศึกษา เริ่มจับเวลานับตั้งแต่น้ำตัวอย่างผ่านเข้าสู่ระบบเมมเบรน

(4) วัดฟลักซ์ ที่ 5 นาทีในช่วง 10 นาทีแรก 10 นาที ใน 1 ชั่วโมงถัดมา และทุก 30 นาทีหลังจากนั้น ตลอดการเดินระบบ เพื่อศึกษาการลดลงของฟลักซ์อันเกิดจากการอุดตัน วัดฟลักซ์โดยชั่งน้ำหนักบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ที่รองน้ำที่ผ่านออกมาทางเพอร์มิเอท เป็นเวลา 1 นาที เพื่อคำนวณหาฟลักซ์

(5) เก็บตัวอย่างน้ำและนำไปวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ เพื่อทดสอบความสามารถของเมมเบรนในการกักสาร โดยเก็บน้ำเพอร์มิเอททั้งหมด 3 ตัวอย่าง คือ จะเก็บน้ำเพอร์มิเอทที่ผ่านการกรองที่เวลา 210 นาที เก็บน้ำล้าง (Flushing) และเก็บน้ำหลังการล้างด้วยสารเคมี

(6) พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ คือ พีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น และค่าของแข็งทั้งหมด

**3.5.4 การหาความแม่นยำของของระบบ (Reproducibility)** ทำการทดสอบซ้ำเพื่อตรวจสอบความแม่นยำและความเที่ยงตรงของระบบที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ โดยทำการทดสอบที่ความดัน 60 psi อัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที และปรับพีเอช 7 ทดสอบกับระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันในระบบที่มีการหมุน โดยทำการทดสอบด้วยสภาวะเช่นเดียวกัน 3 ครั้ง วัดค่าฟลักซ์ต่อหน่วยพื้นที่ นำผลที่ได้มาทำการคำนวณความแม่นยำของระบบทางสถิติ

**3.5.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์**

3.5.5.1 ผลของการดำเนินระบบการกรอง (Operating Effects)

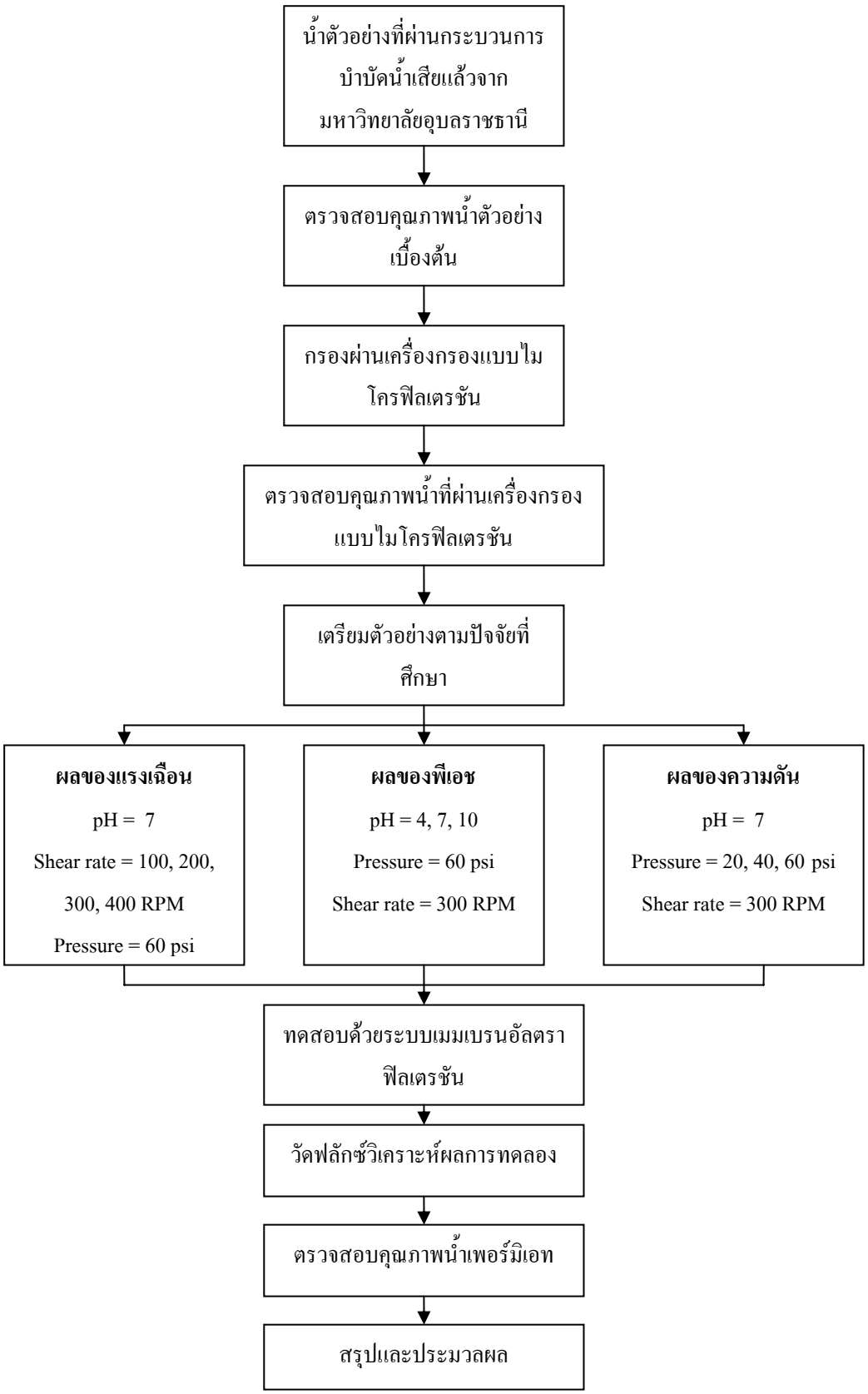
(1) ผลของความดัน ทำการทดสอบความดันที่ใช้ในการดำเนินระบบ คือ ที่ระดับความดัน 20 40 และ 60 psi ตามลำดับ ที่มีผลกระทบต่อฟลักซ์และประสิทธิภาพการกำจัดของระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยควบคุมพารามิเตอร์อื่นให้คงที่ (แสดงในรูปที่ 3.2)

(2) ผลของอัตราแรงเฉือน ทำการทดสอบสภาพการทำงาน คือ อัตราแรงเฉือนที่ใช้ในการดำเนินระบบที่ระดับ 100 200 300 และ 400 รอบต่อนาที ที่มีผลกระทบต่อฟลักซ์ และประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งเจือปนของระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยควบคุมพารามิเตอร์อื่นให้คงที่ (แสดงในรูปที่ 3.2)

3.5.5.2 ผลของคุณสมบัติสารละลาย (Solution Properties Effects)

ผลของพีเอชของสารละลาย ทำการทดสอบพีเอช ที่ระดับ พีเอช 4 7 และ 10 ที่มีผลกระทบต่อฟลักซ์ และประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งเจือปนของการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยควบคุมพารามิเตอร์อื่นให้คงที่ (แสดงในรูปที่ 3.2)

ทำการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ แปรผล และเปรียบเทียบผลการทดลอง เพื่อหาข้อสรุปถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ของระบบกรองแบบอัลตราฟิล-เตรชัน




**รูปที่ 3.2** แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

**3.6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน**

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์และการอุดตันของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

**ตารางที่ 3.2** สรุปการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

| ปัจจัยที่ศึกษา | ค่าที่ศึกษา | ปัจจัยควบคุม |
|---|---|---|
| พีเอช | 4 7 และ 10 | Pressure = 60 psi, Shear Rate = 300 RPM |
| ความดัน | 20 40 และ 60 psi | Shear Rate = 300 RPM, pH = 7 |
| อัตราแรงเฉือน | 100 200 300 และ 400 RPM | Pressure = 60 psi, pH = 7 |

**3.6.1 ผลของพีเอช**

3.6.1.1 ปรับพีเอช โดยแปรค่าพีเอช ที่ 4 7 และ 10 โดยใช้ HCl เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร หรือ NaOH เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

3.6.1.2 ทำการเดินระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่ความดัน 60 psi และ อัตราแรงเฉือนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที

3.6.1.3 นำน้ำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์คุณลักษณะทางด้านค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น และค่าของแข็งทั้งหมด เทียบกับค่าเริ่มต้น

**3.6.2 ผลของความดัน**

3.6.2.1 ปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 7 โดยการใช้ HCl ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อ-ลิตร หรือ NaOH ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

3.6.2.2 ปรับค่าความดันในการดำเนินระบบเป็น 20 40 และ 60 psi ตามลำดับ

3.5.2.3 ทำการเดินระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่อัตราแรงเฉือนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที

3.6.2.4 นำน้ำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์คุณลักษณะทางด้านค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น และค่าของแข็งทั้งหมด เทียบกับค่าเริ่มต้น

**3.6.3 ผลของอัตราแรงเฉือน**

3.6.3.1 ปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 7 โดยการใช้ HCl ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อ-ลิตร หรือ NaOH ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

3.6.3.2 ปรับค่าอัตราแรงเฉือนในการดำเนินระบบเป็น 100 200 300 และ 400 รอบต่อนาที (RPM)

3.6.3.3 ทำการเดินระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่ความดัน 60 psi

3.6.3.4 นำน้ำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์คุณลักษณะทางด้านค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซีโอดี ค่าทีเคเอ็น และค่าของแข็งทั้งหมด เทียบกับค่าเริ่มต้น

## 3.7 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

### 3.7.1 ตัวอย่างน้ำ

ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ จากการดำเนินระบบเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน นำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3** พารามิเตอร์ที่ศึกษาและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

| พารามิเตอร์ | เครื่องมือ |
|---|---|
| พีเอช | เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) |
| การนำไฟฟ้า | เครื่องวัด Conductivity |
| ค่าซีโอดี | วิธีย่อยสลายโดยโปตัสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion) |
| ค่าทีเคเอ็น | วิธีเจลดาห์ล (Kjeldahl) |
| ค่าของแข็งทั้งหมด | โดยวิธีระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 $^0$ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง |

### 3.7.2 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองความต้านทานแบบอนุกรม (Cho et al. 1999)

เพอร์มิเอทฟลักซ์ที่ได้มีค่าลดลง มีสาเหตุมาจากการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานรวมของเมมเบรนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นนี้มีหลายสาเหตุด้วยกัน คือ เกิดจาก Concentration Polarization และชั้นเค้ก ($r_c$), การดูดซับที่สามารถทำความสะอาดด้วยสารละลายเบสได้ ($r_{c2}$) และการดูดซับอย่างถาวร ($r_{irr}$) โดยความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ตามกฎของ Darcy และแบบจำลองความต้านทานแบบอนุกรม ดังนี้

สำหรับเมมเบรนที่สะอาด $$J_v = \frac{\Delta P}{\mu r_m} \qquad (2.16)$$

เมมเบรนที่มีการอุดตัน

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu(r_t)} = \frac{\Delta P}{\mu(r_m + r_c + r_g + r_a)} \qquad (2.17)$$

โดยที่ $J_v$ คือ ค่าฟลักซ์ของสารละลาย ($L.m^{-2}.h^{-1}$)

$\Delta P$ คือ ค่าความดันที่ลดลง (kPa)

$\mu$ คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s)

$r_m$ คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากเมมเบรน ($m^{-1}$)

$r_c$ คือ ค่าความต้านทานของ Concentration Polarization และชั้นเค้ก ($m^{-1}$)

$r_{c2}$ คือ ค่าความต้านทานของชั้นเจลการดูดซับที่สามารถล้างออกได้ ($m^{-1}$)

$r_{irr}$ คือ ค่าความต้านทานของการดูดซับอย่างถาวร ($m^{-1}$)

ในการทดลองเพื่อหาความต้านทานแบบอนุกรม มีขั้นตอนปฏิบัติดังนี้

(1) ทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารละลายกรดและสารละลายเบส แล้วทำการเดินระบบด้วยน้ำปราศจากประจุเป็นเวลา 30 นาที

(2) วัดเพอร์มิเอทฟลักซ์ ที่ความดัน 0 10 20 30 40 และ 50 psi เพื่อใช้หาความต้านทานของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ($r_m$, Compacted Membrane)

(3) เดินระบบด้วยน้ำตัวอย่างที่เตรียมไว้เป็นเวลา 210 นาที รักษาความดันให้คงที่ตั้งแต่เริ่มการทดลองจนสิ้นสุดการทดลอง ฟลักซ์ที่ลดลงในช่วงเวลาสิ้นสุดการทดลองเกิดจากความต้านทานประเภทต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว บันทึกค่าความดันและฟลักซ์เมื่อสิ้นสุดการทดลอง หาความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันบนเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ($r_m + r_{c1} + r_{c2} + r_{irr}$)

(4) ป้อนน้ำปราศจากประจุเข้าในระบบ วัดฟลักซ์ของน้ำ ที่ความดัน 0 10 20 30 40 และ 50 psi ความต้านทานของเมมเบรนที่หายไปจากการดำเนินการขั้นตอนนี้ ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดจากปรากฏการณ์ คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และเค้ก ($r_{c1}$)

(5) ล้างเมมเบรนด้วยสารละลาย NaOH พีเอช 10 เป็นเวลา 30 นาที ตามด้วยน้ำปราศจากประจุ วัดฟลักซ์ที่ความดัน 0 10 20 30 40 และ 50 psi ความต้านทานที่หายไปจากการดำเนินการขั้นนี้ ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดจากชั้นเจล ($r_{c2}$) และความต้านทานที่ยังคงติดค้างบนเมมเบรน ($r_{irr}$)

จากขั้นตอนดังกล่าว สามารถทราบความต้านทานที่เกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆ และถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การอุดตันบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน

### 3.7.3 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการอุดตัน

การวิเคราะห์การอุดตันที่เกิดจากการดำเนินระบบแบบการไหลตามแนวดิ่ง (Dead-End Operation) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.12)-(2.15) โดยนำค่าฟลักซ์ที่ได้จากการศึกษาในแต่ละปัจจัยแทนค่าในสมการ ใช้โปรแกรมโซลเวอร์ (Solver) ช่วยในการทายผลและคำนวณหาค่าผลรวมกำลังสอง (Sum Squre Error, SSE) ของค่าความถูกต้องที่ใกล้เคียงและให้ค่าต่ำสุด แสดงว่าการอุดตันที่เกิดขึ้นในปัจจัยนั้นใกล้เคียงกับแบบจำลองชนิดนั้นและอาจให้ค่าการอุดตันเป็นแบบจำลองนั้น