บทที่ 4
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองครั้งนี้ เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์เมื่อดำเนินระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันด้วยอัตราแรงเฉือน ความดัน และพีเอช น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำตัวอย่างจากบ่อเก็บกักน้ำสุดท้าย (Final Pond) ภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี มาทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้น ก่อนจะนำมากรองผ่านเครื่องกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน แล้ววิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ได้อีกครั้ง เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้น จากนั้นทำการศึกษาระบบการทำงานของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน โดยวัดฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอทที่ผ่านเมมเบรนต่อหน่วยพื้นที่และความสามารถในการกักสารของเมมเบรนที่มีการดำเนินระบบการไหลตามแนวดิ่ง (Dead-End Operation) ศึกษาผลของพีเอช อัตราแรงเฉือน และผลของความดันที่ใช้ในการดำเนินระบบ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการลดลงของฟลักซ์และการอุดตันที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ

4.1 คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง

การทดลองครั้งนี้ใช้น้ำจากบ่อเก็บกักน้ำสุดท้าย ภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งเป็นบ่อเก็บกักน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีแบบสระเติมอากาศ และบ่อประดิษฐ์ (Aerated Lagoon and Constructed Wetland) ซึ่งมาจากน้ำเสียจากทุกๆ ส่วนภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยคุณลักษณะเบื้องต้นของน้ำตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 4.1 น้ำตัวอย่างถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนถูกนำมาทดสอบตามปัจจัยที่สนใจศึกษาต่อไป

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า น้ำมีความเป็นเบสสูง ค่า pH มีค่าเท่ากับ 9.57 ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง จากอาคารบางประเภทและบางขนาด ที่กำหนดค่ามาตรฐานความเป็นกรด-เบส (pH) อยู่ในช่วง 5-9 (ที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุม การระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภท และบางขนาด ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 111 ตอนพิเศษ 9ง ลงวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2537) ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างที่ 25 ^{0}ซ วัดได้ 121.97 μ S/cm ซึ่งค่าการนำไฟฟ้า เป็นการวัดความสามารถของน้ำในการนำกระแสไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของอิออนที่มีอยู่ในน้ำและอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะเบื้องต้นของน้ำตัวอย่างจากบ่อเก็บกักน้ำสุดท้าย มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ดัชนีบ่งชี้ (Parameter)	ค่าที่วัดได้
พีเอช (pH)	9.57 @ 26.8 ^{0}C
การนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่อุณหภูมิ 25 ^{0}C	125.00 µS/cm @ 26.3 ^{0}C 121.97 µS/cm @ 25.0 ^{0}C
ค่าซีโอดี	48.00 mg/L
ค่าบีโอดี	4.05 mg/L
ค่าทีเคเอ็น	3.00 mg/L
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	99.335 mg/L
ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	14.375 mg/L
ปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด	0-0-0, < 2
ปริมาณฟีคัลโคลิฟอร์ม	0-0-0, < 2

ขณะที่ทำการวัด แสดงว่าในน้ำตัวอย่างมีสารละลายอนินทรีย์ที่สามารถแตกตัวเป็นอิออนได้ และสารละลายอนินทรีย์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เพราะแตกตัวให้อิออนบวกและลบ แต่สารอินทรีย์จะไม่แตกตัวในน้ำ จึงไม่นำไฟฟ้า ค่าซีโอดีและค่าบีโอดีของน้ำตัวอย่างวัดได้ 48.00 mg/L และ 4.05 mg/L ตามลำดับ โดยปกติค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง จากอาคารบางประเภทและบางขนาดกำหนดค่ามาตรฐานบีโอดีและซีโอดี อยู่ในช่วงไม่เกิน 300.00 mg/L และ 30.00 mg/L ตามลำดับ ค่าที่วัดได้จากน้ำตัวอย่างมีค่าที่ต่ำมาก แสดงว่าสารอินทรีย์ในน้ำนั้นมีน้อย และน้ำตัวอย่างมีความสกปรกน้อย ค่าทีเคเอ็นของน้ำตัวอย่างวัดได้ 3.00 mg/L โดยปกติค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง จากอาคารบางประเภทและบางขนาดกำหนดค่ามาตรฐานทีเคเอ็น ไม่เกิน 35 mg/L แสดงว่าค่าทีเคเอ็นมีค่าน้อยกว่ามาตรฐานมาก ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของน้ำตัวอย่างวัดได้ 14.375 mg/L และปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำตัวอย่างวัดได้ 99.335 mg/L ซึ่งค่าที่วัดได้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด คือ 30.00 mg/L และ 500.00 mg/L ตามลำดับ ปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและฟีคัลโคลิฟอร์มของน้ำตัวอย่าง มีค่าน้อยกว่า 2 MPN/100 มล. แสดงว่าในน้ำตัวอย่างมีเชื้อโรคปนเปื้อนอยู่น้อยมาก

เชื้อโรคในแหล่งน้ำมีหลายชนิด การวิเคราะห์เชื้อโรคจะพิจารณาจากค่า Coliform Bacteria เพราะเชื้อโรคที่ออกมาจะมาพร้อมกับ Coliform Bacteria ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในลำไส้ของคน ฉะนั้น

หากพบว่ามี Coliform Bacteria อาจตั้งข้อสมมติฐานได้ว่า แหล่งน้ำนั้นมีการปนเปื้อนของอุจจาระ ปัจจุบันการป้องกันเชื้อโรคทำได้โดยการมีระบบบำบัดน้ำเสีย และระบบประปาที่มีการเติมคลอรีนฆ่าเชื้อโรค ฉะนั้นถ้าเติมคลอรีนในน้ำประปาแล้วจะตรวจไม่พบ Coliform Bacteria (ค่าน้อยกว่า 2 MPN/100 มล.) การตรวจวิเคราะห์ค่า Coliform มีสองชนิดคือ Fecal Coliform มาจากอุจจาระสัตว์เลือดอุ่น กับ Total Coliform ซึ่ง Total Coliform จะรวมเชื้อโรคจาก Fecal Coliform และเชื้อโรคที่มีอยู่ในดินตามธรรมชาติ น้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วๆ ไปจะมีค่า Fecal Coliform ทั่วไป 50 – 2,000 MPN/100 มล. จากการวิเคราะห์หา Coliform Bacteria ในน้ำตัวอย่าง พบว่ามีค่า Total Coliform และ Fecal Coliform น้อยกว่า 2 MPN/100 มล. ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำดิบที่นำมาผลิตน้ำประปา ซึ่งจะต้องมีค่า Fecal Coliform ไม่เกิน 4,000 MPN/100 มล. (การจัดการสิ่งแวดล้อม (น้ำเสียและขยะ), ผศ.ดร.เสนีย์ กาญจนวงศ์)

จากนั้นนำน้ำที่ผ่านการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้นมากรองผ่านเครื่องกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน โดยใช้เยื่อกรองที่มีขนาดรูพรุน 10 ไมครอน แล้วทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ผ่านเครื่องกรองไมโครฟิลเตรชัน เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้น ซึ่งผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ได้แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะเบื้องต้นของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองด้วยเครื่องกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน ด้วยเยื่อกรองขนาด 10 ไมครอน

ดัชนีบ่งชี้ (Parameter)	ค่าที่วัดได้
พีเอช (pH)	9.36 @ 26.6 ^{0}C
การนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่อุณหภูมิ 25 ^{0}C	112.00 µS/cm @ 22.9 ^{0}C 116.68 µS/cm @ 25.0 ^{0}C
ค่าซีโอดี	24.0 mg/L
ค่าทีเคเอ็น	0.75 mg/L
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	67.5 mg/L
ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	5.625 mg/L

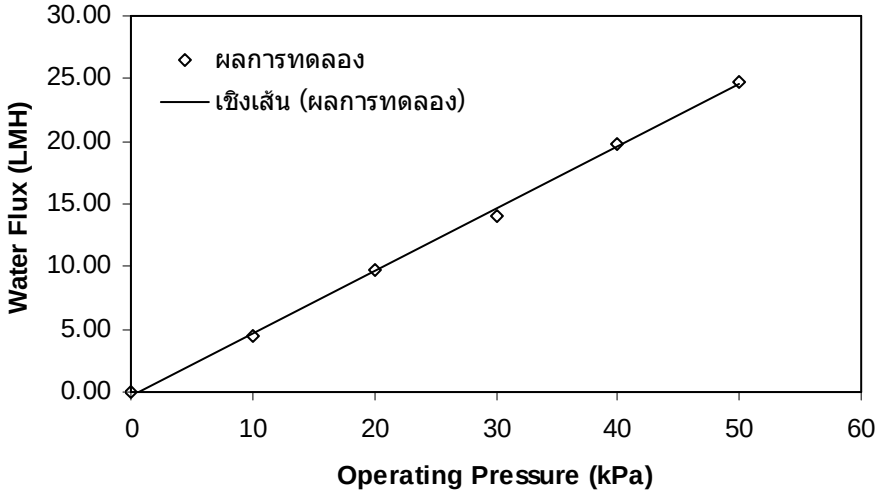
จากตารางที่ 4.2 เมื่อนำผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำตัวอย่างเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้น พบว่า ค่าสภาพความเป็นกรด-เบส (pH) ของน้ำตัวอย่างมีค่าลดลงน้อยมากประมาณ 2% ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 ^{0}ซ มีค่าลดลงประมาณ 4% ค่าซีโอดีมีค่าลดลง 50%

ค่าทีเคเอ็นมีค่าลดลง 75% ปริมาณของแข็งทั้งหมดมีค่าลดลงประมาณ 32% และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีค่าลดลงประมาณ 61% แสดงว่าคุณภาพน้ำที่ได้จากการกรองผ่านเครื่องกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน ด้วยเยื่อกรองที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 10 ไมครอน มีสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำน้อย ทำให้น้ำมีความสกปรกน้อยลงกว่าเดิมถึง 50% และเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชันที่มีขนาดรูพรุน 10 ไมครอน สามารถกำจัดของแข็งที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ และของแข็งแขวนลอยได้ประมาณ 32% และ 61% ตามลำดับ แต่ไม่สามารถกำจัดสีของน้ำตัวอย่างที่มาจากบ่อเก็บกักน้ำสุดท้าย (Final Pond) ได้

4.2 ผลการทดสอบระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

4.2.1 ผลของความดันที่มีต่อฟลักซ์ของระบบอัลตราฟิลเตรชัน

ทำการศึกษาระบบที่ใช้สำหรับการทดลองครั้งนี้ ก่อนทำการศึกษาเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์เนื่องจากปัจจัยต่างๆ โดยทำการทดสอบผลของความดันที่มีผลต่อฟลักซ์ของเพอร์มิเอทที่ผลิตได้ โดยใช้น้ำปราศจากประจุ (Deionized Water, DI Water) เป็นน้ำตัวอย่างในการทดสอบ วัดฟลักซ์ของเพอร์มิเอทที่ผ่านเมมเบรนต่อพื้นที่กรองด้วยการดำเนินระบบแบบการไหลตามแนวดิ่ง (Dead-End Operated) หรือเรียกว่า ค่าฟลักซ์ของน้ำ (Water Flux) ที่ระดับความดัน 0-50 psi พบว่า เพอร์มิเอทฟลักซ์มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับความดันที่ใช้กับระบบอัลตราฟิลเตรชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ตาราง ข.1 ภาคผนวก ข)



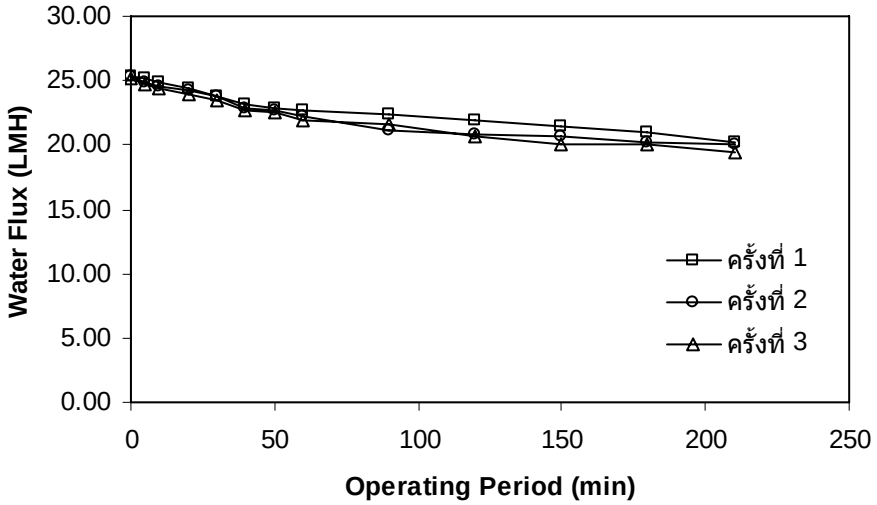
รูปที่ 4.1 ผลของความดันต่อฟลักซ์ของระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration membrane)

จากการทดลองพบว่า เพอร์มิเอทฟลักซ์แปรผันตรงกับความดันที่เพิ่มขึ้น ค่าความสัมพันธ์ความถูกต้อง (Correction, R^2) เท่ากับ 0.9988

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ให้กับระบบซึ่งมีหน่วยเป็น kPa กับค่าฟลักซ์ของน้ำซึ่งมีหน่วยเป็น $L/m^2/h$ แล้วจากสมการที่ (2.34) สามารถทราบค่าการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำได้จากความชันของกราฟ ซึ่งเป็นค่าของอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ต่อความดันในการดำเนินระบบ โดยไม่คิดค่าแรงดันออสโมติก เนื่องจากน้ำปราศจากประจุที่ใช้ในการทดลองมีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 3 $\mu S / cm$ ซึ่งถือว่ามีค่าต่ำ และนำไปใช้ในการปรับเทียบกับค่าฟลักซ์ที่ได้จากการทดลองในแต่ละกรณี สำหรับค่าความต้านทานการอุดตันของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่คอมแพกชันแล้วมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $7.06 \times 10^{13} m^{-1}$ ดังแสดงรายการคำนวณในภาคผนวก ง ซึ่งในการคำนวณหาความต้านทานของเมมเบรนได้ใช้กฎของดาร์ซีตามสมการที่ (2.16)

4.2.2 การทดสอบความแม่นยำของระบบ (System Reproducibility)

การทดสอบความแม่นยำของระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อตรวจสอบความแม่นยำและความเที่ยงตรงของระบบ โดยทำการทดสอบที่พีเอช 7 อัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที และแรงดัน 60 psi ทดสอบกับระบบเมมเบรนในระบบที่มีการหมุน โดยทำการทดสอบด้วยสภาวะเช่นเดียวกัน 3 ครั้ง และนำผลที่ได้มาคำนวณความแม่นยำของระบบทางสถิติ จากรูปที่ 4.2 แสดงฟลักซ์ของน้ำเพอร์มิเอทในช่วงเวลาต่างๆ พบว่า การทดลองครั้งที่ 1 2 และ 3 (ตารางที่ ข.2 ภาคผนวก ข) ให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ผลการทดลองที่ได้ให้ค่าความถูกต้องและเชื่อถือได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

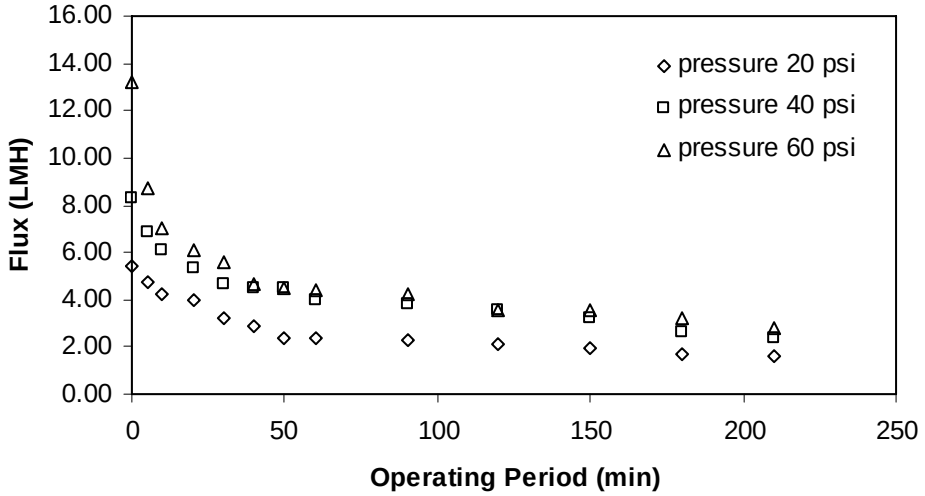


รูปที่ 4.2 ฟลักซ์ของเพอร์มิเอทช่วงเวลาต่างๆ กรณีระบบมีการหมุน อัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที พีเอช 7 และความดัน 60 psi

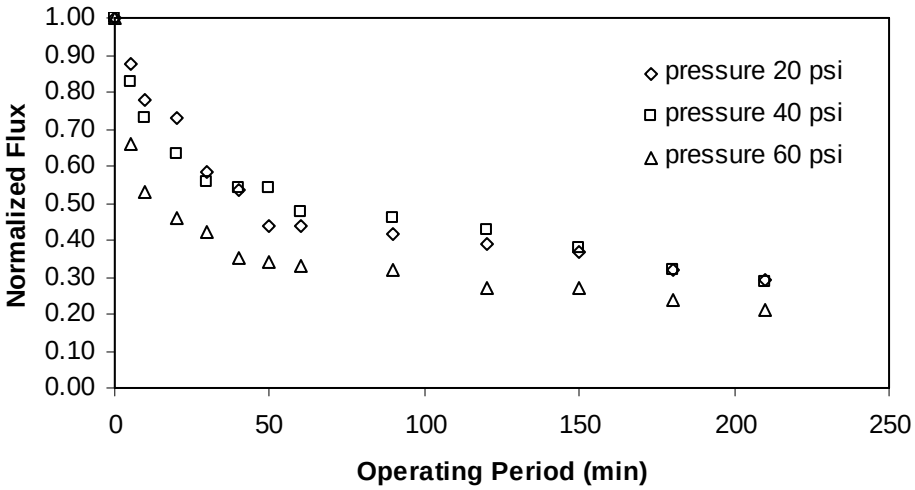
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าฟลักซ์

4.3.1 ผลของความดัน

ความดันที่ใช้ในการดำเนินระบบอยู่ในช่วงการดำเนินระบบอัลตราฟิลเตรชัน คือ 0-60 psi โดยแปรค่าความดันที่ 20 40 และ 60 psi ควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 4.3 แสดงผลของความดันที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์ (ตารางที่ ข.6-ข.8 ภาคผนวก ข) จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความดัน ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอทมีค่าเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อใช้ความดันในการดำเนินระบบสูงจะเกิดแรงขับดันให้เกิดการไหลของสารละลายผ่านเมมเบรนมากขึ้น เนื่องจากระบบที่ใช้ความดันสูง สารอินทรีย์ธรรมชาติจะถูกกักและมีการสะสมภายในรูพรุนหรือผิวหน้าของเมมเบรนได้น้อย ทำให้เกิดการอุดตันขึ้นในลักษณะต่างๆ เนื่องจากการเพิ่มความดันของระบบเป็นการลดความสามารถในการกีดกันทางไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic repulsion) และการกีดกันเนื่องจากขนาดของสารละลายและรูพรุนของเมมเบรน (size exclusion) (Hong and Elimelech, 1997) ทำให้ค่าความต้านทานของเมมเบรนลดลงและฟลักซ์ของเพอร์มิเอทมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับกฎของ Darcy ดังสมการที่ (2.16)



รูปที่ 4.3 ฟลักซ์ของเพอร์มิเอทในเวลาต่างๆ เมื่อใช้ความดันในการดำเนินระบบเป็น 20 40 และ 60 psi โดยควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที



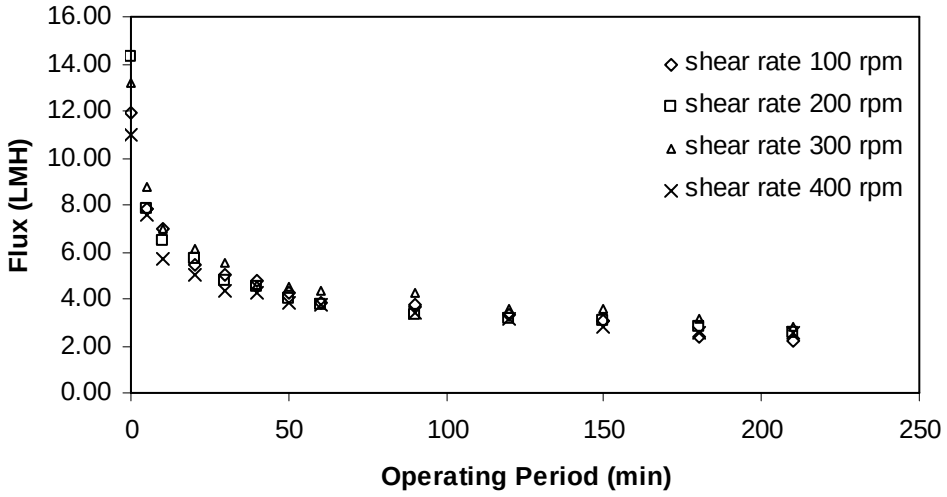
รูปที่ 4.4 นอร์มาไลซ์ฟลักซ์เนื่องจากผลของความดัน เมื่อใช้ความดันในการดำเนินระบบเป็น 20 40 และ 60 psi โดยควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที

จากการนอร์มาไลซ์ (Normalize) ฟลักซ์เนื่องจากผลของความดัน เมื่อใช้ความดันในการดำเนินระบบเป็น 20 40 และ 60 psi โดยควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 4.4 แสดงผลของฟลักซ์เนื่องจากผลของความดัน (ตารางที่ ข.1-1 – ข.12-1 ภาคผนวก ข) พบว่าเมื่อเพิ่มความดัน ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอทมีค่าลดลง กล่าวคือ เมื่อใช้ความดันในการดำเนินระบบสูงจะเกิดแรงขับดันให้เกิดการไหลของสารละลายผ่านเมมเบรนมากขึ้น เนื่องจากระบบที่ใช้ความดันสูง สารอินทรีย์ธรรมชาติจะถูกกักและมีการสะสมภายในรูพรุนหรือผิวหน้าของเมมเบรนได้น้อย ทำให้เกิดการอุดตันในลักษณะต่างๆ ขึ้นได้ง่าย

4.3.2 ผลของอัตราแรงเฉือน

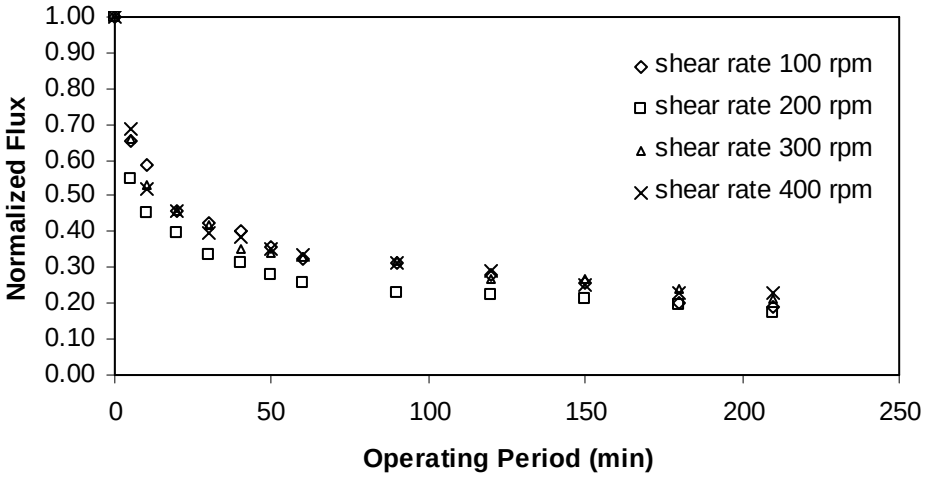
การศึกษาผลของอัตราแรงเฉือนที่ใช้ในการดำเนินระบบ โดยการแปรค่าอัตราแรงเฉือนที่ 100 200 300 และ 400 รอบต่อนาที ควบคุมพีเอช 7 และความดัน 60 psi ดังรูปที่ 4.5 แสดงผลของอัตราแรงเฉือนที่มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์ (ตารางที่ ข.9-1 - ข.12-1 ภาคผนวก ข) จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการดำเนินระบบโดยการเพิ่มอัตราแรงเฉือน ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอทจะมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากอัตราแรงเฉือนจะไปรบกวนทิศทางการจมตัวลงของอนุภาคด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ทำให้สารอินทรีย์ธรรมชาติถูกกักบนเมมเบรนได้น้อยลง ทำให้การสะสมของอนุภาคภายในรูพรุนหรือผิวหน้าของเมมเบรนในลักษณะการอุดตันในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การกีดขวางรูพรุน (Pore blocking) การหดตัวของรูพรุน (Pore constriction) ผลที่เกิดจากการ

ปิดกั้น (Intermediate blocking) และการเกิดเค้ก (Cake formation) (Kilduff *et al.*, 2004) เกิดได้น้อย ซึ่งจากการทดลองพบว่า ลักษณะการอุดตันที่เกิดขึ้นเป็นการอุดตันแบบการเกิดเค้ก (Cake formation) การเพิ่มอัตราแรงเฉือนของระบบเป็นการลดเสถียรภาพของชั้นเค้กและชั้นเจล (Gel layer) ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของเมมเบรน และเป็นการลดปริมาณมวลสารที่สามารถถูกกักไว้ได้ การอุดตันดังกล่าวทำให้ค่าความต้านทานของเมมเบรนน้อย ลงทำให้ฟลักซ์ของเพอร์มิเอทเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับกฎของ Darcy ดังสมการที่ (2.16)



รูปที่ 4.5 ฟลักซ์ของเพอร์มิเอทช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราแรงเฉือนในการดำเนินระบบที่ 100 200 300 และ 400 รอบต่อนาที โดยควบคุมพีเอช 7 และความดัน 60 psi

เมื่อดำเนินระบบการกรองโดยเพิ่มอัตราแรงเฉือนที่ 100 200 300 และ 400 รอบต่อนาที โดยควบคุมพีเอช 7 และความดัน 60 psi ทำให้ระบบถูกรบกวนสมดุล และความสามารถในการกักสารอินทรีย์ธรรมชาติหรือเกลือมีค่าลดลง ทำให้การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติหรือเกลือของระบบที่มีการใช้อัตราแรงเฉือนสูงมีค่าน้อยกว่าระบบที่ใช้อัตราแรงเฉือนต่ำ เนื่องจากใบพัด (Spacer) ที่ใช้จะลดเสถียรภาพของชั้นเค้กบนผิวหน้าของเมมเบรน (natural convection instability on depolarization) และการขนถ่ายมวลของสารอินทรีย์ธรรมชาติในระบบ (K.H. Youm et al., 1996) ส่งผลให้สารอินทรีย์ธรรมชาติมีโอกาสเกิดการอุดตันได้ลดลง ทำให้ขนาดรูพรุนของเมมเบรนถูกลดขนาดลง เกิดการอุดตันและสารอินทรีย์ธรรมชาติถูกกักได้น้อยลง เมื่อระบบมีการใช้อัตราแรงเฉือนที่อัตราสูง และการกำจัดเกลือหรือสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าต่ำ อาจเป็นผลเนื่องจากขนาดรูพรุนของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่ใช้ในการดำเนินระบบการกรอง



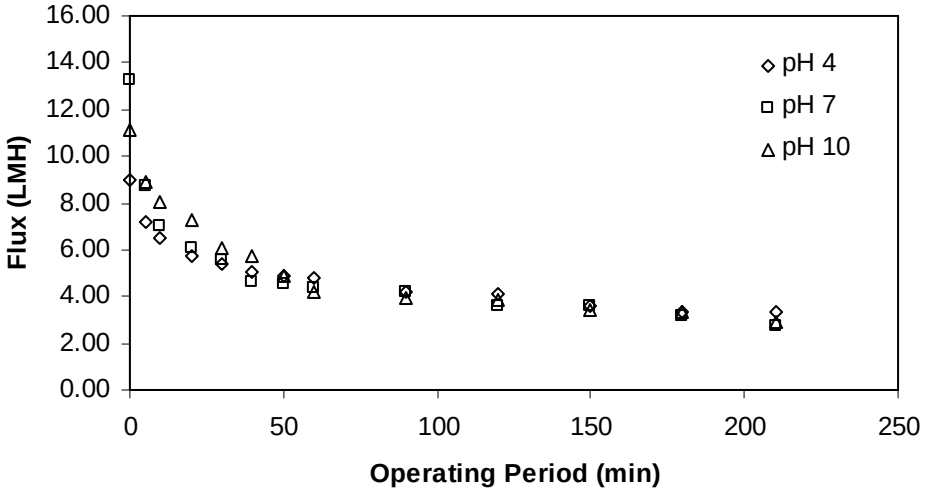
รูปที่ 4.6 นอร์มาไลซ์ฟลักซ์เนื่องจากผลของอัตราแรงเฉือน เมื่อใช้อัตราแรงเฉือนในการดำเนินระบบที่ 100 200 300 และ 400 รอบต่อนาที โดยควบคุมพีเอช 7 และความดัน 60 psi

จากการนอร์มาไลซ์ (Normalize) ฟลักซ์เนื่องจากผลของอัตราแรงเฉือน เมื่อใช้อัตราแรงเฉือนในการดำเนินระบบเป็น 100 200 300 และ 400 รอบต่อนาที โดยควบคุมพีเอช 7 และความดัน 60 psi ดังรูปที่ 4.6 แสดงผลของฟลักซ์เนื่องจากผลของอัตราแรงเฉือน (ตารางที่ ข.9-1 – ข.12-1 ภาคผนวก ข) พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราแรงเฉือน ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอทมีค่าลดลง แต่ค่าฟลักซ์ที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มคงที่ แสดงว่าการกำจัดเกลือหรือสารอินทรีย์ธรรมชาติของระบบที่มีการใช้อัตราแรงเฉือนสูงมีค่าน้อยกว่าระบบที่ใช้อัตราแรงเฉือนต่ำ เนื่องจากใบพัด (Spacer) ที่ใช้จะลดเสถียรภาพของชั้นเค้กบนผิวหน้าของเมมเบรน ส่งผลให้สารอินทรีย์ธรรมชาติมีโอกาสเกิดการอุดตันในลักษณะต่างๆ ได้ลดน้อยลง

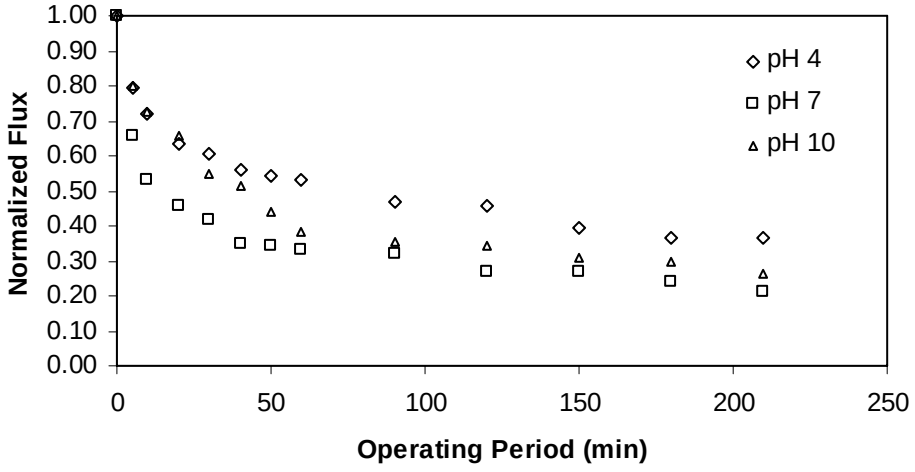
4.3.3 ผลของพีเอช

การศึกษาผลของพีเอชที่ใช้ในการดำเนินระบบ จะมีผลต่อค่าการลดลงของฟลักซ์ โดยแปรค่าพีเอชที่ 4 7 และ 10 ควบคุมความดัน 60 psi และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 4.7 แสดงผลของพีเอชที่มีต่อการลดลงของฟลักซ์ (ตารางที่ ข.3-ข.5 ภาคผนวก ข) จากการทดลอง พบว่า การดำเนินระบบการทดลองในช่วง 60 นาทีแรก ค่าฟลักซ์ที่พีเอช 7 และ 10 จะมีค่าสูงกว่าที่ค่าพีเอช 4 จากนั้น ฟลักซ์ที่ได้จะค่อยๆ ลดลงจนมีแนวโน้มคงที่ จนถึงเวลาที่ 210 นาที ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากที่พีเอช 4 มีปริมาณของไฮโดรเจนไอออนในน้ำตัวอย่างมีปริมาณสูงกว่าที่พีเอช 7 และ10 ซึ่งไฮโดรเจนไอออนนี้ มีผลทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติรวมตัวกันได้มากขึ้น และทำให้

ความหนาของชั้น Double layer ที่ผิวหน้าของเมมเบรนเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดการซึมผ่านออกมาได้ยากกว่า และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนจึงมีความเข้มข้นมากกว่าที่พีเอช 7 และ10 จึงทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ด้วยอัตราที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.7 ฟลักซ์ของเพอร์มิเอทช่วงเวลาต่างๆ เมื่อใช้ค่าพีเอชในการดำเนินระบบเป็น 4 7 และ 10 โดยควบคุมอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที และความดัน 60 psi



รูปที่ 4.8 นอร์มาไลซ์ฟลักซ์เนื่องจากผลของพีเอช เมื่อใช้ค่าพีเอชในการดำเนินระบบเป็น 4 7 และ 10โดยควบคุมอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที และความดัน 60 psi

จากการนอร์มาไลซ์ (Normalize) ฟลักซ์เนื่องจากผลของพีเอช เมื่อใช้ค่าพีเอชในการดำเนินระบบเป็น 4 7 และ 10 โดยควบคุมอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที และความดัน 60 psi ดังรูปที่ 4.8

แสดงผลของฟลักซ์เนื่องจากผลของพีเอช (ตารางที่ ข.3-ข.5 ภาคผนวก ข) พบว่า ที่พีเอช 7 และ 10 ฟลักซ์ที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าที่ค่าพีเอช 4 ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากที่พีเอช 4 ปริมาณของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในน้ำตัวอย่างมีปริมาณสูงกว่า พีเอช 7 และ 10 ซึ่งไฮโดรเจนไอออนมีผลทำให้ความหนาของชั้น Double layer บนผิวหน้าของเมมเบรนลดลง โซเดียมคลอไรด์ที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนสามารถเลื่อนเข้าใกล้เมมเบรนได้มากขึ้น ทำให้เกิดการซึมผ่านออกมาได้ง่ายกว่า ดังนั้นโซเดียมคลอไรด์บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนมีความเข้มข้นน้อยกว่าพีเอช 7 และ 10 พีเอช 4 ค่าความดันออสโมติกเหนือผิวหน้าของเมมเบรนมีค่าต่ำกว่าพีเอช 7 และ 10 ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ด้วยอัตราสูงกว่า (Kilduff *et al*, 2004) ทำให้ที่พีเอช 4 มีการอุดตันของสารอินทรีย์ธรรมชาติมากกว่าที่พีเอช 7 และ10

4.4 ผลของการทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน

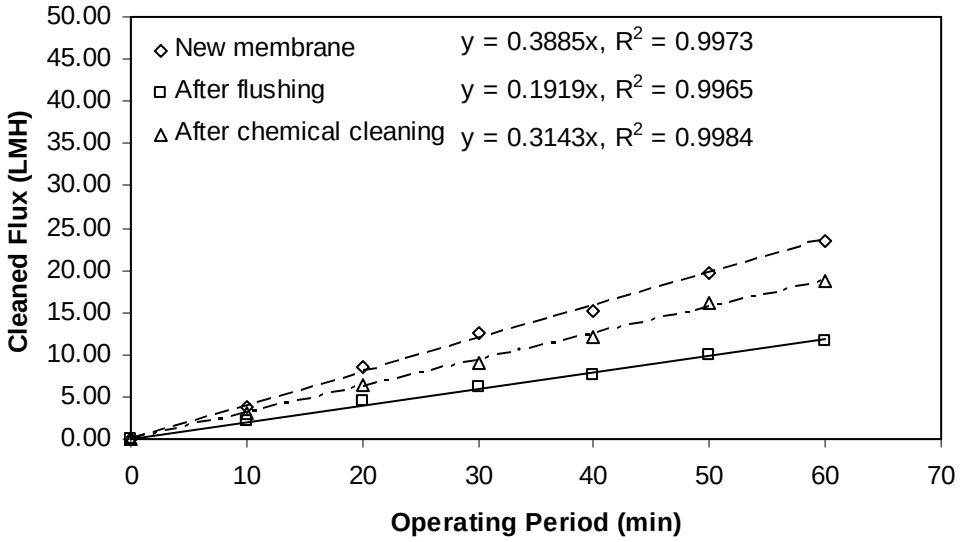
การทำความสะอาดเมมเบรน เริ่มจากการนำเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่เก็บไว้มาล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ ติดตั้งเมมเบรนในชุดทดลอง การล้างด้วยเบส โดยแช่แผ่นเมมเบรนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) พีเอช 10 เป็นเวลา 30 นาที ล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ ล้างด้วยกรด โดยแช่แผ่นเมมเบรนในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) พีเอช 4 เป็นเวลา 30 นาที ล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ นำแผ่นเมมเบรนเข้าระบบวัดฟลักซ์ที่ความดัน 0 10 20 30 40 และ 50 psi ดำเนินระบบด้วยน้ำปราศจากประจุเป็นเวลา 30 นาที วัดฟลักซ์อีกครั้งก่อนเดินระบบด้วยน้ำตัวอย่างทดสอบปัจจัยที่ต้องการศึกษา หลังจากทำการศึกษาปัจจัยที่ต้องการทราบเสร็จสิ้นแล้ว ให้วัดค่าฟลักซ์ที่ความดัน 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

จากผลการทดลองพบว่า ในการดำเนินระบบการกรองแต่ละครั้งใช้เวลาในการเดินระบบนาน ทำให้เกิดการอุดตันบนผิวของเมมเบรน ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ในการดำเนินระบบการกรองลดลง ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเมมเบรน จึงได้นำเอาเมมเบรนที่ผ่านการกรองแล้วมาทำความสะอาดและนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ซึ่งการทำความสะอาดเมมเบรนสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การทำความสะอาดแบบ Hydrodynamic และการทำความสะอาดแบบ Chemical ซึ่งการทำความสะอาดเมมเบรนแบบ Hydrodynamic เป็นการทำความสะอาดเมมเบรนทางกายภาพเพื่อเป็นการกำจัดอนุภาคที่อยู่บนผิวของเมมเบรนให้หลุดออกไปกับสารละลาย ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำปราศจากประจุในการทำความสะอาด ส่วนการทำความสะอาดแบบ Chemical เป็นการทำความ

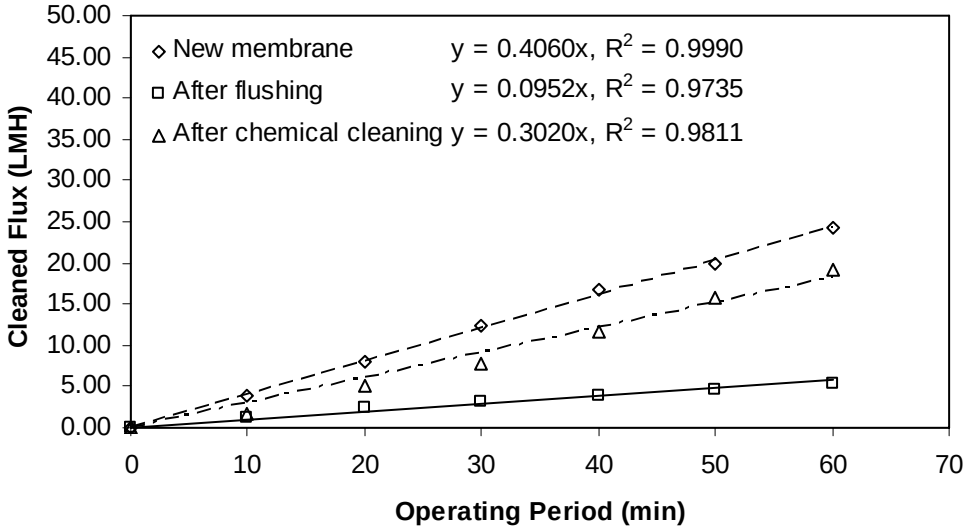
สะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมี เพื่อกำจัดการดูดซับทางเคมีบนผิวของเมมเบรน (Nilson and DiGiano, 1996) สารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดเมมเบรนมี 2 ชนิด คือ สารละลายที่มีสภาพเป็นกรด และสารละลายที่มีสภาพเป็นเบส ในการทดลองครั้งนี้ใช้สารละลาย HCl และ NaOH ในการทำความสะอาดเมมเบรน สาเหตุที่ต้องใช้สารละลายที่มีสภาพเป็นกรดและสารละลายที่มีสภาพเป็นเบสทำความสะอาดเมมเบรน เนื่องจากสารแต่ละชนิดที่ดูดซับบนผิวของเมมเบรนจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน สารบางชนิดสามารถละลายได้ดีในสภาพที่เป็นกรด และสารละลายบางชนิดสามารถละลายได้ดีในสภาพที่เป็นเบส ดังนั้น เพื่อให้การทำความสะอาดมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดและเบส ลักษณะการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการดำเนินระบบ ซึ่งจะส่งผลให้ลักษณะการอุดตันของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่อุดตันบนผิวและรูพรุนของเมมเบรนแตกต่างกัน ลักษณะการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์หลังจากการทำความสะอาดเมมเบรนครั้งนี้ แสดงดังรูปที่ 4.9 - 4.18

4.4.1 ผลของความดัน

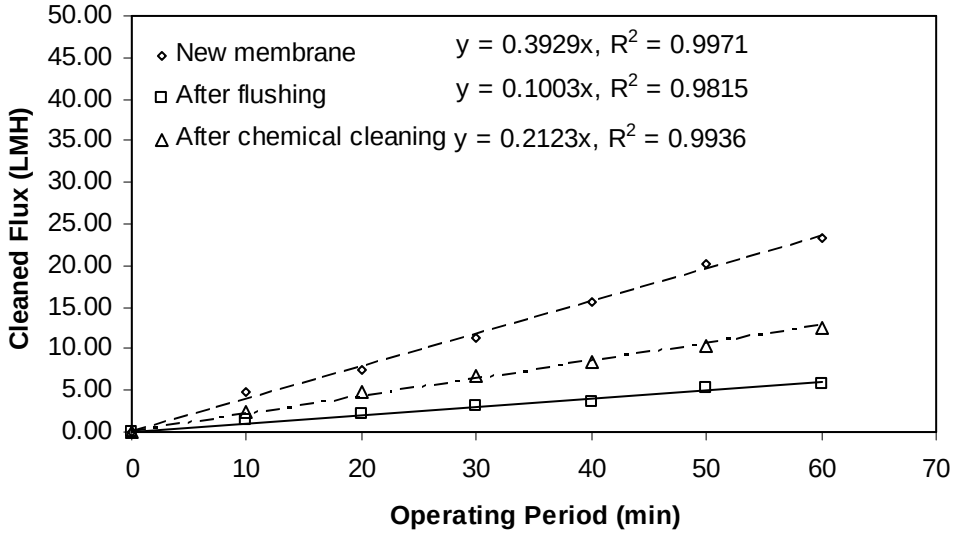
จากการศึกษา Crozes et al. (1993) พบว่า การอุดตันของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันเป็นผลมาจากการลดจำนวนและขนาดรูพรุนของเมมเบรน ทำให้น้ำไหลไม่สะดวก ก่อให้เกิดความต้านทานสูง ส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าลดลง และขนาดของสารอินทรีย์ธรรมชาติมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรน ยิ่งทำให้เกิดการอุดตันได้สูง ยากแก่การทำความสะอาด เมื่อมีการใช้งานไปเป็นเวลานาน ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเมมเบรนได้ง่าย ดังรูปที่ 4.9 4.10 และ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าความดันในการดำเนินระบบ ที่ความดัน 20 40 และ 60 psi โดยควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที (ตารางที่ ข.6-2 – ข.8-2 ภาคผนวก ข) พบว่า ที่ความดัน 20 40 และ 60 psi ค่าฟลักซ์ของการทำความสะอาดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะอยู่ระหว่างค่าฟลักซ์ของเมมเบรนใหม่กับค่าฟลักซ์ของการทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากประจุ อาจเป็นผลมาจากการเกิดก้อนของแข็งบนผิวของเมมเบรน เนื่องจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีค่ามากขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง เกิดการสะสมและการอุดตันบนเมมเบรนแบบชั้นเค้ก เมื่อทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากประจุจะทำให้ชั้นของเจลที่เกิดขึ้นหลุดออกมาด้วย จากนั้นทำความสะอาดด้วยสารละลายเบส (NaOH) ซึ่งเบสสามารถล้างอนุภาคที่เกิดจากการดูดซับที่บริเวณผิวของเมมเบรนให้หลุดออกมาได้ และก่อให้เกิดค่าความต้านทานประเภทต่างๆ ขึ้น ดังสมการที่ (2.17)



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าความดันในการดำเนินระบบ ที่ความดัน 60 psi โดยควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าความดันในการดำเนินระบบ ที่ความดัน 40 psi โดยควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที

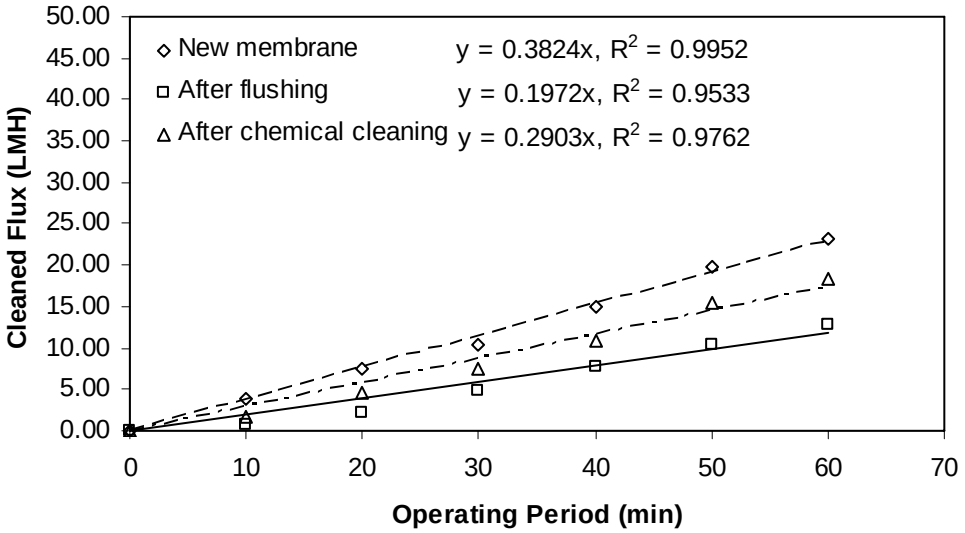


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าความดันในการดำเนินระบบ ที่ความดัน 20 psi โดยควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที

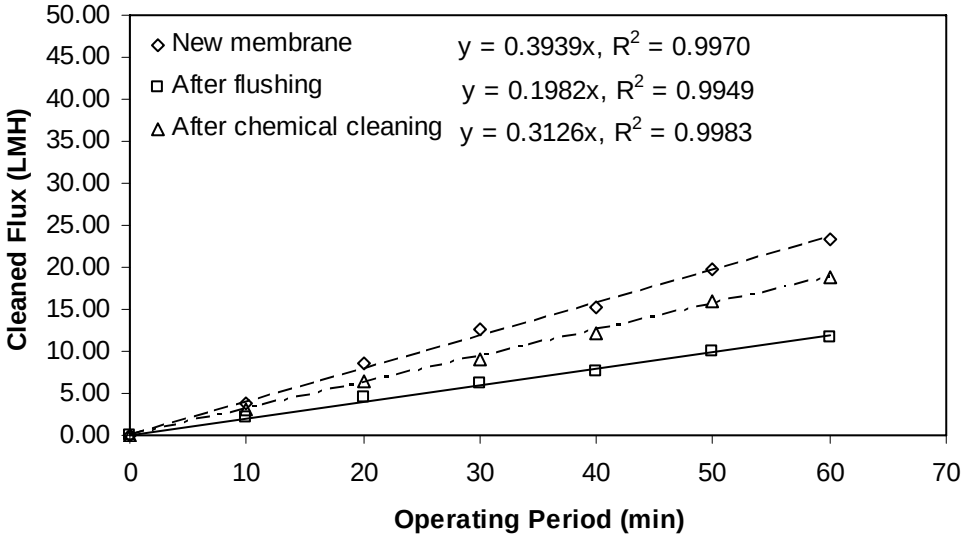
4.4.2 ผลของอัตราแรงเฉือน

การศึกษาผลของอัตราแรงเฉือนที่ใช้ในการดำเนินระบบ จะมีผลต่อค่าการลดลงของฟลักซ์ โดยแปรค่าอัตราแรงเฉือน 100 200 300 และ 400 รอบต่อนาที ควบคุมความดัน 60 psi และพีเอช 7 ดังรูปที่ 4.12 4.13 4.14 และ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าอัตราแรงเฉือนในการดำเนินระบบ (ตารางที่ ข.9-2 – ข.12-2 ภาคผนวก ข) พบว่า ที่อัตราแรงเฉือน 200 300 และ 400 รอบต่อนาที ค่าฟลักซ์ของการทำความสะอาดด้วยเบส มีค่าอยู่ระหว่างค่าฟลักซ์ของเมมเบรนที่สะอาด (New membrane) กับค่าฟลักซ์ของการทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากประจุ นั่นคือ อาจมีการสะสมของอนุภาคสารอินทรีย์และมีการอุดตันบนผิวของเมมเบรน เมื่อทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากประจุ สามารถล้างอนุภาคของสารอินทรีย์ออกได้เล็กน้อย จากนั้นทำการล้างเมมเบรนด้วยเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้สามารถล้างอนุภาคของสารอินทรีย์ได้มากขึ้นบางส่วน ส่งผลให้ค่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับที่อัตราแรงเฉือน 100 รอบต่อนาที พบว่าค่าฟลักซ์ของการทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากประจุและการทำความสะอาดด้วยเบส มีค่าฟลักซ์ใกล้เคียงกัน เป็นผลมาจากการอุดตันและสารอินทรีย์ธรรมชาติถูกกักได้มากขึ้น ซึ่งเป็นการอุดตันแบบถาวร เมื่อทำการล้างด้วยน้ำปราศจากประจุและเบสแล้ว ไม่สามารถล้างออกได้และไม่สามารถเพิ่มค่าฟลักซ์ได้ ดังนั้นเมื่อระบบมีการใช้อัตราแรงเฉือนที่อัตราสูง สารอินทรีย์ธรรมชาติจะถูกกักได้น้อยลง และการกำจัดเกลือหรือสารอินทรีย์ธรรมชาติจะมีค่าต่ำ เพราะอัตราแรงเฉือนที่เพิ่มมากขึ้น

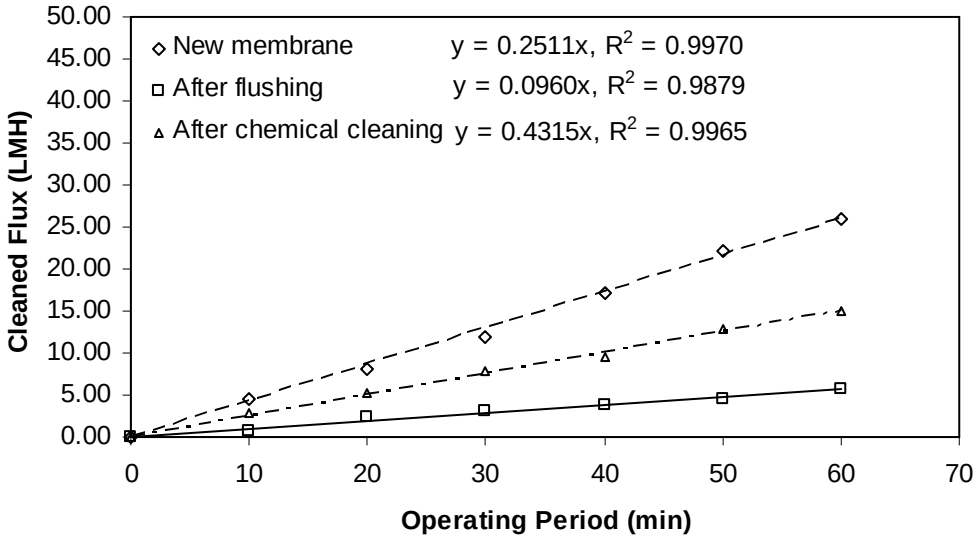
จะไปรบกวนการจมตัวของอนุภาคทำให้การสะสมของอนุภาคภายในรูพรุน หรือผิวหน้าของเมมเบรนลดน้อยลง และการอุดตันส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นบนผิวของเมมเบรนจะเกิดจากความต้านทานที่เกิดจากชั้นของสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่าสาเหตุอื่นๆ



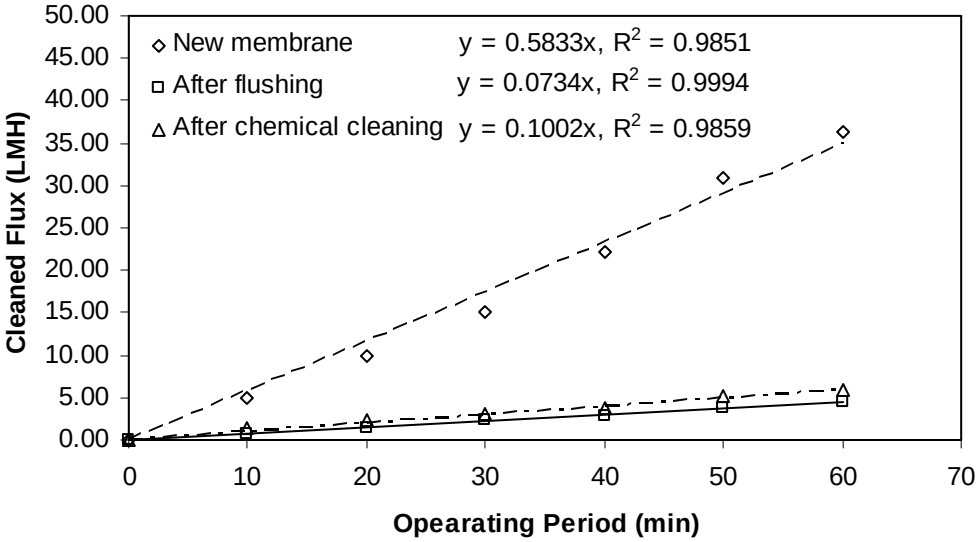
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าอัตราแรงเฉือนในการดำเนินระบบที่ความดัน 60 psi โดยควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 400 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าอัตราแรงเฉือนในการดำเนินระบบที่ความดัน 60 psi โดยควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าอัตราแรงเฉือนในการดำเนินระบบที่ความดัน 60 psi โดยควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 200 รอบต่อนาที

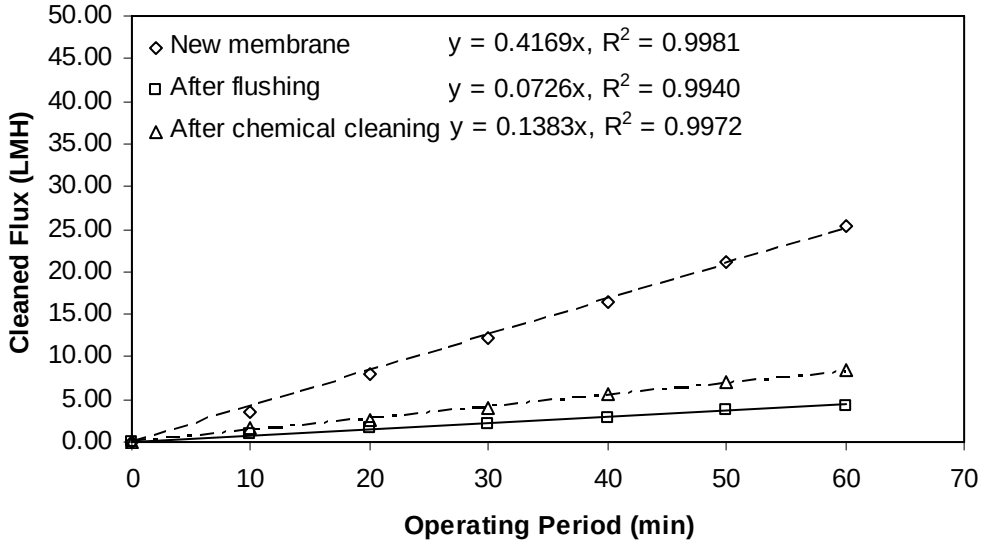


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าอัตราแรงเฉือนในการดำเนินระบบที่ความดัน 60 psi โดยควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 100 รอบต่อนาที

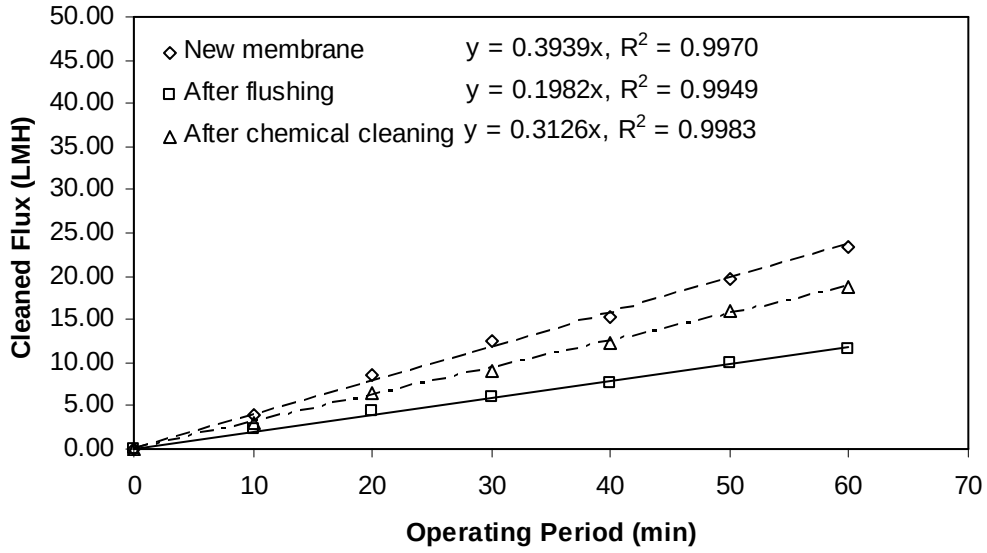
4.4.3 ผลของพีเอช

การศึกษาผลของพีเอชที่ใช้ในการดำเนินระบบ จะมีผลต่อค่าการลดลงของฟลักซ์ โดยแปรค่าพีเอชที่ 4 7 และ 10 ควบคุมความดัน 60 psi และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 4.16

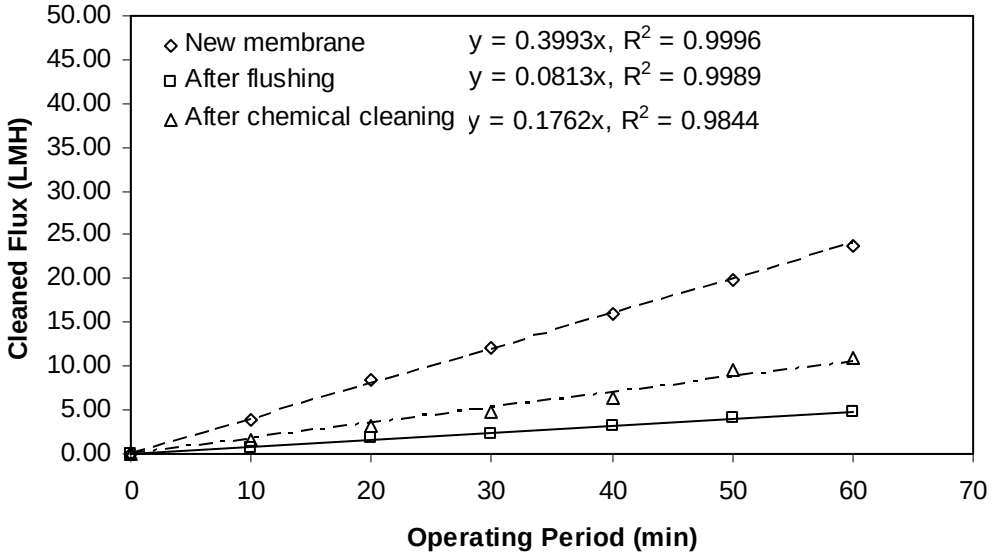
4.17 และ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าพีเอชในการดำเนินระบบ (ตารางที่ ข.3-2 – ข.5-2 ภาคผนวก ข) พบว่า ค่าฟลักซ์ของการทำความสะอาดด้วยเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์จะอยู่ระหว่างค่าฟลักซ์ของเมมเบรนสะอาดกับค่าฟลักซ์ของการทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากประจุ แสดงว่ามีการสะสมของสารอินทรีย์ธรรมชาติบนเมมเบรนที่ยังสามารถล้างออกได้ ซึ่งการสะสมของอนุภาคอาจอยู่ในรูปของชั้นเจลหรือชั้นเค้ก เมื่อทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากประจุและล้างด้วยเบสแล้วสามารถกำจัดอนุภาคสารอินทรีย์ที่อยู่บนผิวของเมมเบรนออกได้บางส่วน ทำให้ค่าฟลักซ์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น จากการศึกษาของ Mattaraj et al. (1997) เมื่อปรับค่าพีเอช 4 7 และ 10 พบว่าค่าระดับพีเอชสูงจะทำให้ฟลักซ์ผ่านเมมเบรนมีค่าลดลงมากกว่าระดับพีเอชต่ำ การที่ได้ผลการทดสอบที่แตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากสภาพของการทดสอบหรือเมมเบรนที่ใช้มีขนาดที่ไม่เหมือนกัน หรืออาจเนื่องมาจากกลไกการอุดตันบนผิวของระบบกรองที่แตกต่างกัน หรือค่าของการกำจัดอาจส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ของเมมเบรน



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าพีเอชในการดำเนินระบบ ที่พีเอช 10 โดยควบคุมความดัน 60 psi และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าพีเอชในการดำเนินระบบ ที่พีเอช 7 โดยควบคุมความดัน 60 psi และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านเมมเบรนกับค่าพีเอชในการดำเนินระบบ ที่พีเอช 4 โดยควบคุมความดัน 60 psi และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที

4.5 แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (Resistance in – series model)

จากการคำนวณค่าความต้านทานของเมมเบรน ตามกฎของ Darcy โดยใช้สมการที่ 2.17 พบว่า ค่าความต้านทานที่เกิดจากเมมเบรนสะอาดมีค่าโดยเฉลี่ย 6.65 x 10^{13} m^{-1} เนื่องจากการอุดตันบนเมมเบรนทำให้ความต้านทานของเมมเบรนเพิ่มสูงขึ้น

จากสมการ $$J_v = \frac{\Delta P}{\mu R_m}$$

และจากสมการ $$J_v = \frac{\Delta P}{\mu R_T} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_{c1} + R_{c2} + R_{irr})}$$

$$R_T = R_m + R_{c1} + R_{c2} + R_{irr}$$

โดยที่

J_v คือ ค่าอัตราการไหล (ฟลักซ์)(L.m^{-2}.h^{-1}.kPa^{-1})

ΔP คือ ค่าความดันที่ลดลง (kPa)

μ คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s)

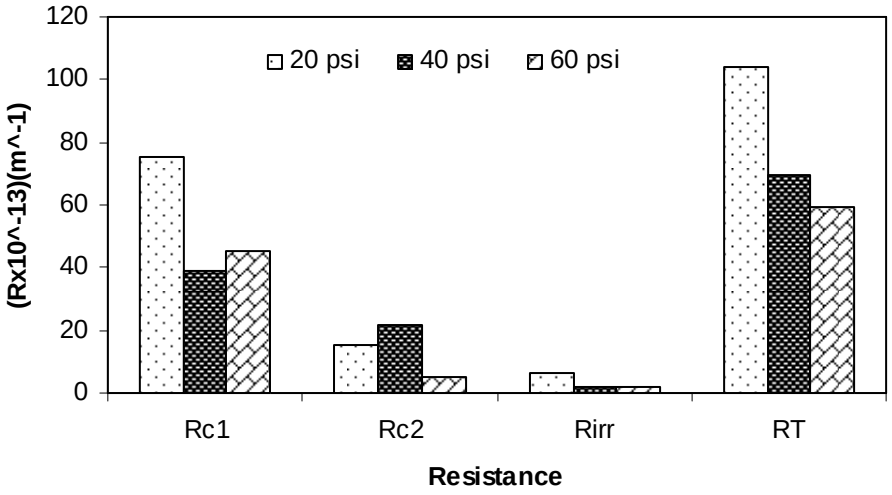
R_m คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากเมมเบรน (m^{-1})

R_{c1} คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของสารละลายที่มีความเข้มข้น (m^{-1})

R_{c2} คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของเค้ก (m^{-1})

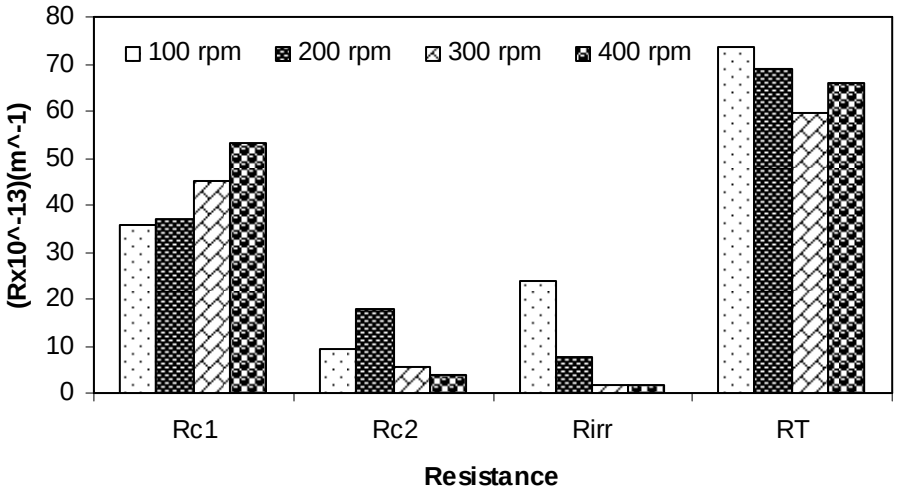
R_{irr} คือ ค่าความต้านที่การดูดซับที่ไม่สามารถล้างออกได้ (m^{-1})

R_T คือ ค่าความต้านทานรวมที่เกิดจากการอุดตันทั้งหมด (m^{-1})



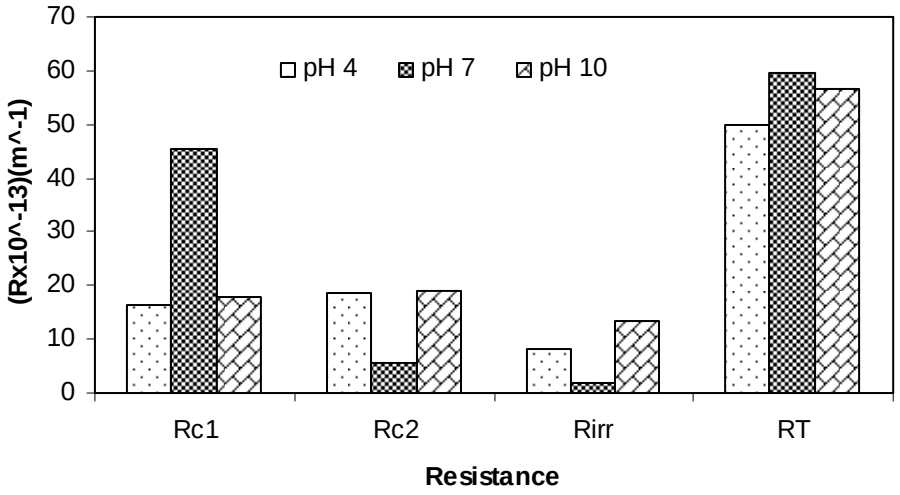
รูปที่ 4.19 แบบจำลองการอุดตัน เนื่องจากความดันที่ใช้ในการดำเนินระบบ ที่ความดัน 20 40 และ 60 psi โดยควบคุมพีเอช 7 และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที

ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานด้วยแบบจำลองความต้านทานของการอุดตันแบบอนุกรม ดังรูปที่ 4.19 (ตารางที่ ค.1 ภาคผนวก ค) ซึ่งแสดงผลการอุดตันแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยการปรับค่าความดัน พบว่า เมื่อมีการเพิ่มความดันในการดำเนินระบบสูงขึ้น ความต้านทานที่เกิดจากชั้นเค้ก (R_{c2}) มีความสัมพันธ์ต่อการลดลงของเพอร์มิเอทฟลักซ์ เนื่องจากความดันที่เพิ่มขึ้นทำให้เสถียรภาพในการจมตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติเกิดการสะสมของสารอินทรีย์ธรรมชาติลดลง ส่งผลให้ความต้านทานของระบบลดลงด้วย เนื่องจากเมื่อเพิ่มความดันของระบบทำให้ลดเสถียรภาพของสารอินทรีย์ธรรมชาติและลดการอุดตันที่เกิดขึ้นบนผิวของเมมเบรน ทำให้ค่าการอุดตันที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง ส่งผลต่ออัตราการไหลของฟลักซ์และหลังจากการล้างเมมเบรนด้วยน้ำปราศจากไอออน (R_{c2}) มีประสิทธิภาพในการล้างได้ดี กล่าวคือ ความต้านทานของการอุดตันมีค่าน้อยลงและการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยการใช้เบส คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ไม่สามารถที่จะล้างตะกอนและตะกรันที่อยู่บนผิวและรูพรุนของเมมเบรนออกได้หมด ทำให้ค่าความต้านทานของการอุดตันที่ไม่สามารถล้างออกได้ (R_{irr}) มีค่ามากที่สุดที่ความดัน 20 psi เป็นผลเนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติเป็นเบสไม่สามารถละลายตะกรันได้



รูปที่ 4.20 แบบจำลองการอุดตัน เนื่องจากอัตราแรงเฉือนที่ใช้ในการดำเนินระบบ ที่อัตราแรงเฉือน 100 200 300 และ 400 รอบต่อนาที โดยควบคุมพีเอช 7 และความดัน 60 psi

จากรูปที่ 4.20 (ตารางที่ ค.2 ภาคผนวก ค) แสดงถึง การสะสมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติบริเวณผิวของเมมเบรน การเกิดชั้นเจลบนผิวของเมมเบรนปิดกั้นรูพรุนลดการซึมผ่านของน้ำเพอร์มิเอท ทำให้ความสามารถในการละลายต่ำลงเกิดการตกตะกอนบนผิวหน้าของเมมเบรนมากขึ้น ทำให้เกิดความต้านทานของการอุดตันมากขึ้น ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ และหลังจากการล้างเมมเบรน ด้วยน้ำปราศจากไอออน (R_{c2}) มีประสิทธิภาพในการล้างได้ลดลง กล่าวคือ ความต้านทานของการอุดตันมีค่ามากขึ้นและการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยการใช้เบส (NaOH) ไม่สามารถที่จะล้างตะกอนและตะกรันที่อยู่บนผิวและรูพรุนของเมมเบรนออกได้หมด ทำให้ค่าความต้านทานของการอุดตันที่ไม่สามารถล้างออกได้ (R_{irr}) มีค่ามากที่สุดที่อัตราแรงเฉือน 100 รอบต่อนาที เพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติเป็นเบสไม่สามารถละลายตะกรันได้



รูปที่ 4.21 แบบจำลองการอุดตัน เนื่องจากผลของพีเอช ที่พีเอช 4 7 และ 10 โดยควบคุมความดัน 60 psi และอัตราแรงเฉือน 300 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 4.21 (ตารางที่ ค. 3 ภาคผนวก ค) แสดงถึงค่าความต้านทานของการอุดตันรวม (R_T) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรดมีค่าลดลง (pH สูงขึ้น) เป็นผลมาจากปรากฏการณ์คอนเซนเตร-ชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization, CP) ซึ่งเกิดจากการสะสมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติบริเวณผิวของเมมเบรน เมื่อแคลเซียมไอออนมีค่าพีเอชมากขึ้น ความสามารถในการละลายจะต่ำลง ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนบนผิวของเมมเบรนมากขึ้น ทำให้เกิดความต้านทานแบบอนุกรมของการอุดตันมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อการลดลงของฟลักซ์และหลังจากการล้างเมมเบรนด้วยน้ำปราศจากประจุ (R_{c2}) มีประสิทธิภาพในการล้างได้น้อยลง กล่าวคือ ความต้านทานของการอุดตันมีค่ามากขึ้นและการทำความสะอาดเมมเบรน ด้วยการใช้เบส คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ไม่สามารถที่จะล้างตะกอนและตะกรันที่อยู่บนผิวและรูพรุนของเมมเบรนออกได้หมด ทำให้ค่าความต้านทานของการอุดตันที่ไม่สามารถล้างออกได้ (R_{irr}) มีค่ามากที่สุดที่พีเอช 10 เพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติเป็นเบสไม่สามารถละลายตะกรันได้