



การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

Removal of Effluent Organic Matter (EfOM)

by Nanofiltration Membrane

Supatpong Mattaraj* and Sujeenun Suntikul**

สุพัฒน์พงษ์ มัตราจ* และ ศุจินันท์ สันติกุล**

*ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

**สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

*E-mail : supatpong.mj@gmail.com, s.sujeenun@gmail.com

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีเยื่อกรองเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีขั้นสูงที่สามารถผลิตน้ำให้มีคุณภาพสูง ได้ปริมาณน้ำมากโดยการดำเนินระบบสั้น และสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนจากน้ำทิ้ง ระบบนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำในกระบวนการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ การวิจัยนี้เป็นศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งด้วยเยื่อกรองแบบนาโน (HL4040FN, GE water and process technology) โดยใช้ชุดทดลองแบบไหลตามขวาง โดยได้นำน้ำทิ้งที่รวบรวมจากระบบบำบัดน้ำเสียภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและกรองผ่านเยื่อกรองต่อเนื่องขนาด 10, 5 และ 1 ไมครอน สารอินทรีย์ในน้ำจากการบำบัดขั้นต้นจะถูกแยกต่อมาด้วยระบบออสโมซิสผกผัน ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งส่งผลต่อการเพิ่มการลดลงของฟลักซ์ของสารละลาย อาจเนื่องมาจากสะสมสารอินทรีย์บนผิวเยื่อกรองทั้งยังส่งผลให้มีการกำจัดสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น การเพิ่มระดับพีเอชมากขึ้นเป็นผลให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์เมตมีค่าลดลง ขณะที่เยื่อกรองนาโนสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 94-98

คำสำคัญ : เยื่อกรองแบบนาโน; สารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง; การลดลงของฟลักซ์สารละลาย

Abstract

Membrane process is one of the advanced wastewater technologies, which provides high water quality, water quantities with short operation period, and removes contaminated effluent organic matter. This process is significantly useful to improve water quality for water reuse process. This research studied the removal efficiency of effluent organic matter (Efom) using cross flow nanofiltration membrane (HL4040FN, GE water and process technology). Wastewater effluents, collected from wastewater treatment plants in Ubon Ratchathani University, were pretreated with ion exchange resin and sequentially filtered through 10, 5 and 1 μm cartridge filters. The organic matter from pretreated water was subsequently separated by reverse osmosis. Experimental results revealed that increased Efom concentration caused an increase in solution flux decline, possibly due to organic matter

accumulation on membrane surface, thus increasing organic matter removal. Increase pH solution resulted in decreasing permeate flux, while nanofiltration membrane could remove relatively high effluent organic matter about 94-98%.

Keywords : Nanofiltration; Effluent Organic Matter; Solution Flux Decline

บทนำ

ในระยะเวลาที่ผ่านมาประเทศไทยได้เผชิญปัญหาเกี่ยวกับน้ำอย่างต่อเนื่อง เช่น สถานการณ์ภัยแล้งที่รุนแรง ปัญหาแหล่งน้ำที่เสื่อมโทรม และการปนเปื้อนสารพิษในแหล่งน้ำอันมีสาเหตุมาจากชุมชนเมือง ภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม ทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค วิธีการหนึ่งในการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำ คือ การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่สามารถประหยัดทรัพยากรน้ำที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ [1] จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งก่อให้เกิดปัญหาต่อแหล่งน้ำและการผลิตน้ำสะอาด โดยสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ สามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter) ซึ่งพบได้ตามแหล่งน้ำธรรมชาติ เป็นส่วนประกอบสำคัญในน้ำทิ้ง ที่ทำให้เกิดสีในแหล่งน้ำ อีกทั้งในกระบวนการผลิตน้ำประปาสารอินทรีย์ธรรมชาติที่กำจัดไม่หมดจะทำให้ปฏิกิริยากับคลอรีนที่ใส่ฆ่าเชื้อโรคเกิดเป็นสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งได้ [2] ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ สารประกอบอินทรีย์สังเคราะห์ (Synthetic Organic Compounds) และสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ (Soluble Microbial Products) ซึ่งเกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ และสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งเหล่านี้ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก [3] สารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด ตั้งแต่สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำไปจนถึงสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น โปรตีน โพลีแซคคาไรด์ กรดอะมิโน กรดนิวคลีอิก กรดฮิวมิก กรดฟัลวิก กรดอินทรีย์และส่วนประกอบของเซลล์ เป็นต้น [4]

อย่างไรก็ตาม การนำน้ำทิ้งมาใช้ในการกิจกรรมต่างๆ นั้นจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เหมาะสมก่อนที่จะนำกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นสูง เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ การดูดซับด้วยคาร์บอน การเติมโอโซน และการใช้เทคโนโลยีการกรองแบบนาโน

ซึ่งเป็นกระบวนการกรองผ่านเยื่อกรองที่ใช้ความดันอยู่ระหว่างอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) และออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) โดยเทคโนโลยีการกรองแบบนาโนมีข้อได้เปรียบคือการใช้ความดันที่น้อยกว่าในการดำเนินระบบ ปริมาณน้ำที่ผลิตได้มีปริมาณที่มากกว่า [5] ซึ่งเป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ได้รับความนิยมและมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ เพราะเป็นกระบวนการที่ลดการใช้สารเคมี และสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเยื่อกรองแบบนาโนในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

คุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ใช้ในงานวิจัย

การศึกษาจะนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี มาทดสอบคุณภาพน้ำเพื่อต้องการนำกลับมาใช้ใหม่หรือปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ดังแสดงในตารางที่ 1

สารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง

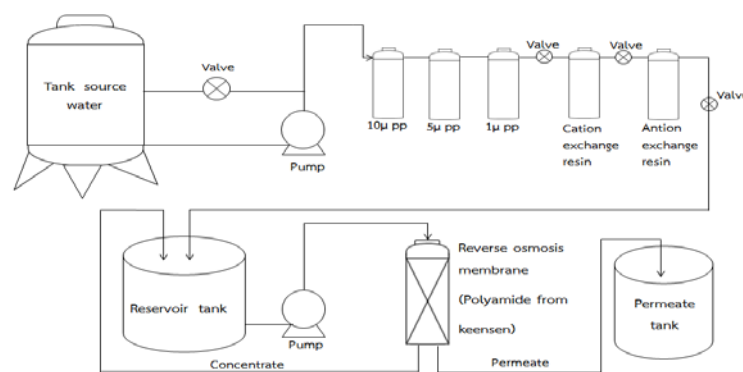
สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ได้มาจากระบบบำบัดน้ำเสียภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งเป็นระบบบำบัดแบบสระเติมอากาศ โดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียในบริเวณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จำนวน 200 ลิตรเก็บไว้ภายในถัง ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการแยกความเข้มข้นของสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการแบบออสโมซิสผันกลับ ทำการกรองจนเหลือเฉพาะน้ำที่ไม่ผ่านการกรอง ประมาณ 6 ลิตร ซึ่งคุณลักษณะของน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการทำให้เพิ่มความเข้มข้นได้แสดงดังตารางที่ 2 จากนั้นนำสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งเข้มข้นใส่ภาชนะที่ปิดสนิทแล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการรักษาสารอินทรีย์ให้อยู่ในสภาวะพร้อมใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 1 คุณลักษณะน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

พารามิเตอร์	น้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย
พีเอช	8.15
ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	382.49
ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/L)	9.5
UV_{254} ($1/\text{cm}$)	0.05
ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (mg/L)	16.19

ตารางที่ 2 คุณลักษณะน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการแยกความเข้มข้นด้วยกระบวนการแบบออสโมซิสผัน

พารามิเตอร์	น้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย
พีเอช	6.37
ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	6431.77
ค่าของแข็งละลายน้ำ (TSS) (mg/L)	8
UV_{254} ($1/\text{cm}$)	0.061
ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (mg/L)	35.94



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ

เยื่อกรองแบบนาโน

การวิจัยครั้งนี้ใช้เยื่อกรองแบบนาโนของ GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040FM ผลิตจากโพลีเอไมด์ มีคุณสมบัติของเยื่อกรองเป็นดังนี้ มีความสามารถในการกำจัดสารที่มีขนาดโมเลกุล 150-300 ดาลตัน พีเอชที่ใช้ในการดำเนินระบบอยู่ระหว่าง 3-9 และพีเอชของสารที่ใช้ในการทำความสะดวกมีค่าอยู่ระหว่าง 2-10.5 อุณหภูมิที่สามารถทนได้สูงสุดที่ 50 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้ในการดำเนินงานอยู่ที่ 70-300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นำมาตัดให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 4 x 6 นิ้ว เพื่อให้สามารถนำมาใส่ลงในชุดทดลองเยื่อกรอง สำหรับ

แผ่นเยื่อกรองที่ได้ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำเก็บรักษาโดยแช่ไว้ในสารละลาย Sodium metabisulphite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) ความเข้มข้นร้อยละ 1 เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แล้วนำไปแช่ไว้ในตู้เย็นเพื่อลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่มีผลต่อผิวหน้าเยื่อกรอง

ชุดทดลองแบบไหลตามขวาง

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน ระบบนี้ใช้เป็นชุดทดสอบแบบไหลตามขวาง รุ่น SEPA ของ Osmonics มีพื้นที่ใส่แผ่นเยื่อกรองขนาด 0.014 ตารางเมตรโดยคำนวณตามพื้นที่ของ

ชุดทดสอบ ซึ่งควบคุมการทดลองด้วยระบบเยื่อกรองแบบนาโนโดยการปรับความดันให้มีอัตราการไหลเริ่มต้น 45 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ให้ความสามารถในการผลิตน้ำอยู่ที่ร้อยละ 85 อัตราเร็วที่ไหลตามขวางอยู่ที่ 0.1 เมตรต่อวินาที และใช้เวลาในการทดลอง 500 นาที [7]

สมการที่ใช้ในการศึกษา

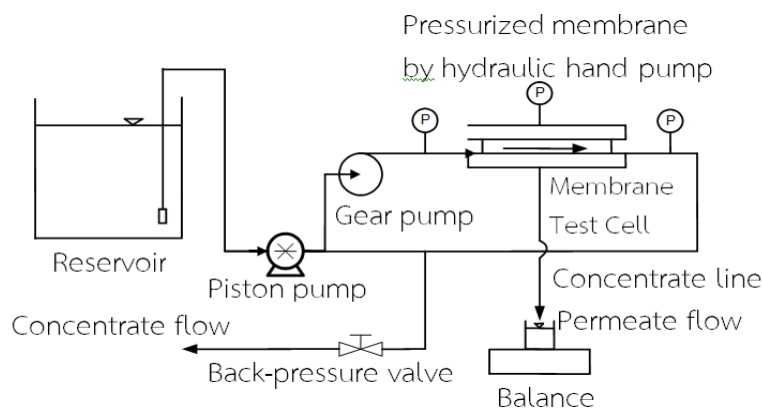
จากการศึกษาของ Mattaraj and Kilduff [9] เกี่ยวข้องกับการอุดตันของเยื่อกรองอันเป็นผลมาจากสารอินทรีย์ในการกรองแบบนาโนซึ่งมีความสอดคล้องกับแผนการวิจัยในครั้งนี้ ค่าอัตราการกรองแสดงได้ในสมการ (1)

$$J_v = \frac{Q_{perm}}{A_m} \quad (1)$$

โดย J_v คือ อัตราการกรองผ่านเยื่อกรอง ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$), Q_{perm} คือ อัตราการไหลของน้ำที่กรองได้ ($L \cdot h^{-1}$), A_m คือ พื้นที่ที่ใช้ในการกรอง (m^2) ส่วนการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ (Rejection) โดยการกรองผ่านเยื่อกรองจะแยกสารละลายต่างๆ ออกจากน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$R = 1 - \frac{C_{perm}}{C_{reten}} \quad (2)$$

โดย R คือ อัตราการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ, C_{perm} คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการกรอง ($mg \cdot L^{-1}$), C_{reten} คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่ไม่ผ่านการกรอง ($mg \cdot L^{-1}$)



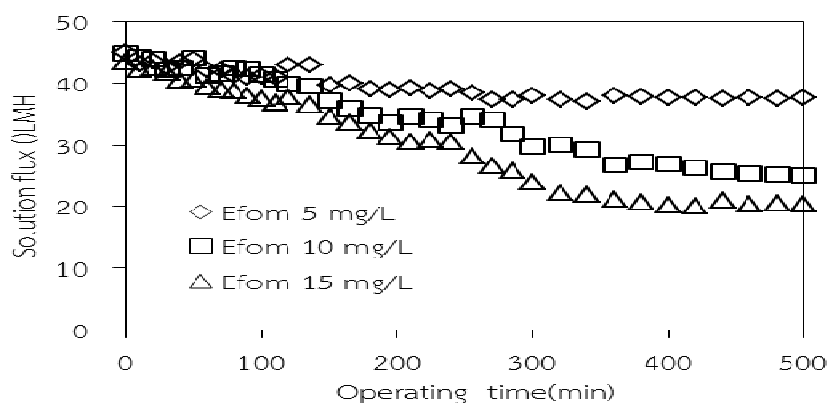
รูปที่ 2 แผนภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน [8]

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์

การทดลองผลของค่าความเข้มข้นต่อการลดลงของเพอร์มิเอตฟลักซ์ ใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชที่ใช้เป็น 7 ปรับค่าความแรงประจุเป็น 0.01 โมลต่อลิตรด้วยโซเดียมคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 3 จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลของค่าความเข้มข้นของ

สารอินทรีย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงมีผลต่อการลดลงของฟลักซ์ จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้นจะเป็นผลทำให้เพิ่มค่าการลดลงของฟลักซ์สารละลาย เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์เป็นการเพิ่มมวลของสารที่ถูกกักกันในระบบเยื่อกรอง และเกิดการสะสมตัวของสารอินทรีย์ที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง [10] จะเห็นได้ชัดว่าค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์มากที่สุด



รูปที่ 3 ผลของค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีผลต่อค่าฟลักซ์สารละลาย

ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีผลต่อการกำจัด

ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งของสารละลายที่มีค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ 5 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปที่ 4 แสดงผลของค่าการกำจัดสารอินทรีย์ที่ใช้ทดลอง ที่ระดับความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร โดยสารโซเดียมคลอไรด์ การทดลองพบว่าเยื่อกรองแบบนาโนมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งประมาณร้อยละ 94-98 จากผลการทดลองดังกล่าวมีผลการทดลองที่สอดคล้องกับ [11] ที่พบว่าการกำจัดสารอินทรีย์จะใช้กลไกในการคัดขนาด (Size Exclusion) เนื่องจากอนุภาคของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองนาโน

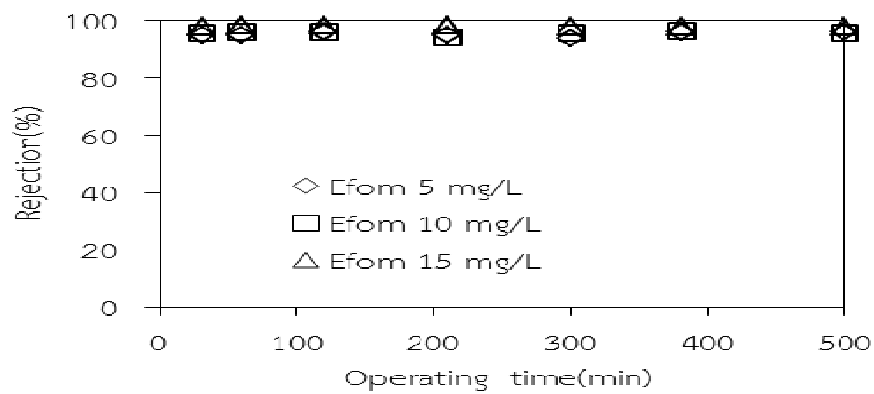
ผลการศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์

การทดลองผลของค่าพีเอชต่อการลดลงของเพอร์มิเอทฟลักซ์ โดยใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชที่ใช้ในการทดลองเป็น 5, 7 และ 9 ปรับค่าความแรงประจุเป็น 0.01 โมลต่อลิตร ด้วยโซเดียมคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 5 จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าพีเอชที่มีการเปลี่ยนแปลงมีผลต่อการลดลงของฟลักซ์ จากผลการทดลองพบว่า ที่ระดับพีเอชที่เพิ่มมากขึ้นจะเป็นผลทำให้

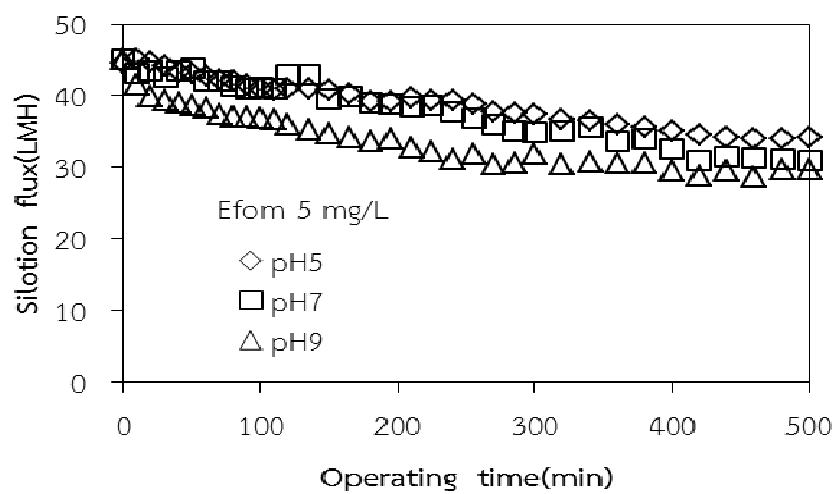
ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอทที่วัดได้มีค่าที่ลดลง โดยที่เวลา 500 นาที ที่ค่าพีเอช 5, 7 และ 9 มีค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอทเป็น 34.11, 31.02 และ 29.65 ตามลำดับ

ผลการศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง

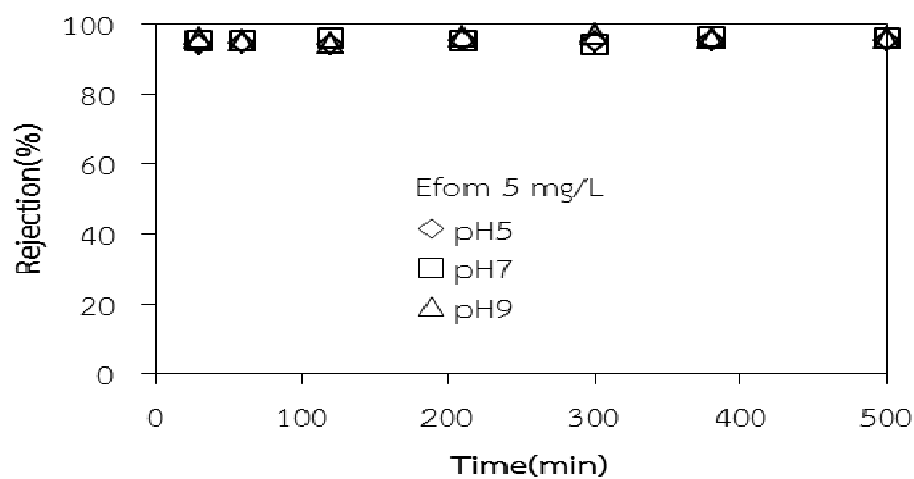
ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งของสารละลายที่มีค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชที่ใช้ในการทดลองเป็น 5, 7 และ 9 ปรับค่าความแรงประจุเป็น 0.01 โมลต่อลิตรด้วยโซเดียมคลอไรด์ ในรูปที่ 6 แสดงผลของค่าการกำจัดสารอินทรีย์ที่ใช้ทดลอง พบว่า เยื่อกรองแบบนาโนมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งประมาณร้อยละ 94-96 ซึ่งในทุกะดับค่าพีเอชให้ค่าการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเยื่อกรองแบบนาโนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งด้วยหลายกลไก จากการทดลองผลของค่าพีเอชที่แตกต่างกันพบว่าผลของขนาดโมเลกุล (Size Exclusion) น่าจะเป็นกลไกสำคัญในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งมากกว่า กลไกของแรงกระทำของไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic forces) และกลไกแรงกระทำระหว่างประจุบวก และประจุลบของสารละลายกับประจุบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง (Electrostatic repulsion)



รูปที่ 4 ผลของค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีผลต่อการกำจัด



รูปที่ 5 ผลของค่าพีเอชต่อค่าฟลักซ์สารละลาย



รูปที่ 6 ผลของค่าพีเอชที่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง

สรุปผล

การกรองด้วยเยื่อกรองนาโนสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งได้โดยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีเยื่อกรองแบบนาโนในการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้วยการนำทรัพยากรน้ำที่มีอยู่กลับมาใช้ใหม่

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี เครื่องมือในการทดลอง สถานที่วิจัย ตลอดจนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Van der Bruggen, B. 2010. The global water recycling situation. *Sustainability Science and Engineering*. 2: 41-62.
- [2] Marhaba, T.F., Pu, Y. and Bengraïne, K. 2003. Modified dissolved organic matter fraction technique for natural water. *J. Hazard. Mater.* 101: 43-53.
- [3] Shon, H. K., Vigneswaran, S., Kandasamy, J. and Cho, J. 2007. Characteristics of effluent organic matter in wastewater. *Eolss, Oxford*.
- [4] Barker, D. J., Salvi, S. M., Langenhoff, A. A. and Stuckey, D. C. 2000. Soluble microbial products in ABR treating low-strength wastewater. *J. Environ. Eng.* 126(3): 239-249.
- [5] Bruggen, B.V. and Vandecasteele, C. "Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry", *Environmental Pollution*. 122(3): 435-445; April, 2003.
- [6] Uyak, V., Koyuncu, I., Oktem, I., Cakmakci, M. and Toroz, I. 2008. Removal of trihalomethanes from drinking water by nanofiltration membranes. *J. Hazard. Mater.* 152(2): 789-794.
- [7] Mattaraj, S., Phimpha, W., Hongthong, P. and Jiratananon, R. 2010. Effect of operating conditions and solution chemistry on model parameters in crossflow reverse osmosis of natural organic matter. *Desalination*. 253(1-3): 38-45.
- [8] Jarusutthirak, C., Mattaraj, S. and Jiratananon, R. 2007. Factors affecting nanofiltration performances in natural organic matter rejection and flux decline. *Sep. Purif. Technol.* 58: 68-75.
- [9] Mattaraj, S. and Kilduff, J. E. Effect of natural organic matter properties on nanofiltration fouling. *RSID 4th. Proceeding of the forth Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering, Bangkok, Thailand, on April 3-5, 2003.*
- [10] Kilduff, J. E., Mattaraj, S. and Belfort, G. 2004. Flux decline during nanofiltration of naturally-occurring dissolved organic matter: effects of osmotic pressure, membrane permeability, and cake formation. *J. Membrane Sci.* 239(1): 39-53.
- [11] Cho, J., Amy, G. and Pellegrino, J. 2000. Membrane filtration of natural organic matter: comparison of flux decline, NOM rejection, and foulants during filtration with three UF membranes. *Desalination*. 127(3): 283-298.