

การกำจัดแคลเซียม แมกนีเซียมและสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยเยื่อกรองนาโนฟิลเตรชัน
Removal of Calcium, Magnesium and Natural Organic Matter
by Nanofiltration Membrane

สุพัฒน์พงษ์ มัตราช^{1*} จันจิรา ดวงบุตร¹ และ สุภาพร เนืองเนตร²
Supatpong Mattaraj^{1*}, Janjira Duangbut¹ and Supaphorn Nueangnet²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

²สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

^{1*}Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

²Environmental Engineering Program, Department of Chemical Engineering, Ubon Ratchathani University

*E-mail: supatpong.m@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดของผลรวมของแคลเซียม แมกนีเซียม และสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองนาโน ซึ่งแผ่นเยื่อกรองเชิงการค้าที่ใช้ได้จาก GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040HM การทดลองเป็นการกรองโดยใช้ชุดทดสอบการไหลปิดตายตามแนวตั้ง โดยสารประกอบของ แคลเซียม และแมกนีเซียมที่ใช้ในงานวิจัย คือ แคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมซัลเฟต โดยน้ำตัวอย่างถูกเตรียมด้วยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ 10 mg/L ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 ความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M ขณะที่ความดันที่ใช้ในการดำเนินระบบคงที่เท่ากับ 60 PSIG ตลอดการทดสอบผ่านการกรอง จากการศึกษาพบว่า สารละลาย $\text{CaSO}_4 + \text{NOM}$ และ $\text{MgSO}_4 + \text{NOM}$ แสดงค่าฟลักซ์สารละลายต่ำกว่าสาร $\text{CaCl}_2 + \text{NOM}$ และ $\text{MgCl}_2 + \text{NOM}$ สำหรับค่าการกำจัดของค่าการนำไฟฟ้าสำหรับ $\text{CaCl}_2 + \text{NOM}$, $\text{CaSO}_4 + \text{NOM}$, $\text{MgCl}_2 + \text{NOM}$ และ $\text{MgSO}_4 + \text{NOM}$ แสดงค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 83.14-83.99, 79.62-80.66, 83.70-84.52 และ 86.67-87.37 ตามลำดับ การกำจัด แคลเซียม และแมกนีเซียม มีค่าการกำจัดโดยเฉลี่ยร้อยละ 90 แสดงค่าที่สูงกว่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้า

คำสำคัญ: แคลเซียม แมกนีเซียม สารอินทรีย์ธรรมชาติ เยื่อกรองนาโน

Abstract

The objective of this research was to study the factors affecting removal efficiency of combined calcium, magnesium and natural organic matter (NOM) by nanofiltration (NF) membrane. The commercial membrane sheets used were obtained from GE Water & Process Technologies (model HL4040HM). The filtration experiments were tested under a dead-end filtration test cell. Calcium and magnesium compounds applied in this research were calcium chloride, calcium sulfate, magnesium chloride and magnesium sulfate. Water samples were prepared with NOM concentration of 10 mg/L, pH solution of 7, and ionic strength of 0.01 M, while the pressure was operated constant at 60 PSIG throughout filtration experiments. Experimental results revealed that the solution of $\text{CaSO}_4 + \text{NOM}$ and $\text{MgSO}_4 + \text{NOM}$ showed lower solution flux than $\text{CaCl}_2 + \text{NOM}$ and $\text{MgCl}_2 + \text{NOM}$. The conductivity removals for $\text{CaCl}_2 + \text{NOM}$, $\text{CaSO}_4 + \text{NOM}$,

$MgCl_2 + NOM$ and $MgSO_4 + NOM$ resulted in the range of 83.14%-83.99%, 79.62%-80.66%, 83.70%-84.52% and 86.67%-87.37%, respectively. The calcium and magnesium removal had an average removal value of 90%, indicating higher than conductivity removal.

Keywords: Calcium, Magnesium, Natural Organic Matter, Nanofiltration Membrane

บทนำ

น้ำเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับมนุษย์ พืชและสัตว์บนผิวโลก ถึงแม้ว่าน้ำจะเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่หมุนเวียนแต่ร้อยละ 97 ของน้ำในโลกเป็นน้ำทะเลในมหาสมุทร มีเพียงร้อยละ 3 เท่านั้นที่เป็นน้ำจืด ถึงอย่างไรก็ตามก็ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำจืดทั้งหมดได้ น้ำจำนวนหนึ่งระเหยกลับไปในบรรยากาศ ส่วนหนึ่งกระจายอยู่ตามโพรง ตามช่องว่างของหิน และดิน มีน้ำเพียงบางส่วนที่ไหลรวมลงสู่แหล่งน้ำทั้งบนดินและใต้ดิน ปริมาณน้ำที่ใช้ได้ดังกล่าวยังถูกปนเปื้อนตามกระบวนการตามธรรมชาติ และจากของเสียต่าง ๆ ที่มีมนุษย์ก่อขึ้น เช่น การปนเปื้อนของมลสารโลหะหนัก และความกระด้างในน้ำ (Harper, and Snowden, 2017)

แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุโลหะที่มีประจุบวกสอง แคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำเป็นต้นเหตุทำให้เกิดความกระด้างของน้ำ (Hardness) โดยส่วนมากจะเกิดขึ้นตามธรรมชาติในแหล่งน้ำใต้ดินจากการแปรสภาพของชั้นหินที่เป็นต่าง โดยเฉพาะชั้นหินปูนซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) เป็นองค์ประกอบหลักจะละลายหินปูนมากับน้ำทำให้มีปริมาณ Ca^{2+} และ Mg^{2+} มากขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดจากการปนเปื้อนของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมเหมืองแร่ และด้านเกษตรกรรม แคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำจืดเป็นปัญหาที่สำคัญทางน้ำอย่างหนึ่ง ซึ่งทำให้คุณสมบัติของน้ำนั้นเป็นต่าง จึงไม่สามารถนำมาใช้งานได้ดีเท่าที่ควร ทำให้เกิดปัญหาสำหรับผู้บริโภคน้ำ อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดคราบสกปรกบนเครื่องสุขภัณฑ์ เกิดการอุดตันในระบบกรองน้ำได้ (Gabrielli et al., 2006) ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา (Listiarini et al., 2009) อีกทั้งสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter: NOM) ยังเป็นต้นเหตุที่สำคัญที่พบในแหล่งน้ำผิวดินที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา ซึ่งสารอินทรีย์ธรรมชาติเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสี กลิ่น การกัดกร่อน และการรวมตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติกับคลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อสามารถก่อให้เกิดสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by Products: DBPs) (Marhaba et al., 2003) ซึ่งส่งต่อการเกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ได้เช่นกัน จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการบำบัดน้ำดิบตามแหล่งน้ำธรรมชาติให้มีความสะอาดเพียงพอก่อนที่จะนำไปใช้ได้

เยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration) เป็นกระบวนการที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตน้ำดื่ม การทำน้ำอ่อน และบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ โดยมีข้อได้เปรียบคือ การใช้ความดันที่น้อยกว่าในการดำเนินระบบ และปริมาณน้ำที่ผลิตได้มีปริมาณสูง และยังสามารถใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ที่ปนมากับน้ำได้เป็นอย่างดี (De-Bruggen and Vandecasteele, 2003; Contreras et al., 2009) เยื่อกรองแบบนาโนยังสามารถใช้กำจัดคอลลอยด์ สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ๆ รวมทั้งประจุของสารอินทรีย์จากน้ำผิวดินและใต้ดินได้เป็นอย่างดี (Siddiqui et al., 2000) ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกรองของผลรวมของแคลเซียม แมกนีเซียมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน จากการทดลองนี้จะได้นำผลการทดสอบไปวิเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้เยื่อกรองนาโนในการผลิตน้ำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น พร้อมทั้งการประยุกต์การใช้เยื่อกรองนาโนในงานวิจัยอื่น ๆ ทางด้านสิ่งแวดล้อมต่อไป

วิธีการวิจัย

1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ 1) Calcium chloride (CaCl_2) Analytical reagent, Ajax Finechem Pty Ltd. 2) Calcium sulfate (CaSO_4) Analytical reagent, Ajax Finechem Pty Ltd. 3) Magnesium chloride (MgCl_2) Analytical reagent, Ajax Finechem Pty Ltd. 4) Magnesium sulfate (MgSO_4) Analytical reagent, Ajax Finechem Pty Ltd. 5) Sodium hydroxide (NaOH) Analytical reagent, Ajax Finechem Pty Ltd. 6) Citric acid ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{H}_2\text{O}$) Analytical reagent, LobaChemie Pty Ltd. 7) Hydrochloric (HCl) 36%, Analytical reagent, Ajax Finechem Pty Ltd.

2. การเตรียมสารละลายแคลเซียม แมกนีเซียมและสารอินทรีย์ธรรมชาติ

แคลเซียมและแมกนีเซียมที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ CaCl_2 , CaSO_4 , MgCl_2 และ MgSO_4 โดยปรับความแรงประจุของน้ำตัวอย่างให้มีความแรงของประจุเป็น 0.01 M ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 7 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3. สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter, NOM) ที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้านี้ได้มาจากแหล่งน้ำผิวดินที่อยู่ภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งใช้ผลิตน้ำอุปโภค และบริโภคภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีโดยมีคุณสมบัติ ดังนี้ สารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด 4.27 mg/L มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 nm เท่ากับ 0.178 cm^{-1} ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ $44 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ค่าพีเอชเท่ากับ 7.1 และค่าความขุ่น 7.4 NTU โดยนำน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมาจำนวน 1,000 L จากนั้นส่งผ่านระบบปั๊มเข้าเยื่อกรองแบบออสโมซิสผกกลับ (Reverse Osmosis Membrane) ทำการกรองเพื่อแยกส่วนที่ไม่ผ่านการกรองหรือส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้น ประมาณ 25-30 L จากนั้นนำสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นบรรจุใส่ในภาชนะที่ปิดสนิทและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อเป็นการรักษาสารอินทรีย์ธรรมชาติให้อยู่ในสภาวะพร้อมใช้งาน สำหรับเตรียมความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตัวอย่างในการทดสอบด้วยเยื่อกรองแบบนาโนในขั้นต่อไป

4. เยื่อกรองแบบนาโน

เยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane) ผลิตจากโพลีเอไมด์ รุ่น HL4040FM จากบริษัท GE Water & Process Technologies ซึ่งเป็นเยื่อกรองเชิงการค้า มีคุณสมบัติคือเป็นเยื่อกรองแบบ Thin Film Membrane ผลิตจาก Polyamide มีขนาดรูพรุนในช่วง 150-300 Da การกำจัดเกลือ MgSO_4 อยู่ที่ระดับ 98% ที่ 100 PSIG ช่วงพีเอชที่ใช้ในการดำเนินการอยู่ระหว่าง 3-9 และช่วงพีเอชของการทำความสะอาดอยู่ที่ 2-10.5 มีความสามารถในการทนคลอรีนที่ระดับความเข้มข้น 0.1 ppm ความดันที่ใช้ในการดำเนินการอยู่ที่ 70-300 PSIG และความดันสูงสุดที่ทนได้ คือ 600 PSIG สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่นำมาตัดให้เป็นแผ่นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 cm เพื่อให้สามารถใส่ลงในชุดทดลองเยื่อกรองได้ สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ได้ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำเก็บรักษาโดยแช่ไว้ในสารละลาย Sodium metabisulphite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) ความเข้มข้น 1% ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่จะทำลายผิวหน้ากรองแบบนาโน

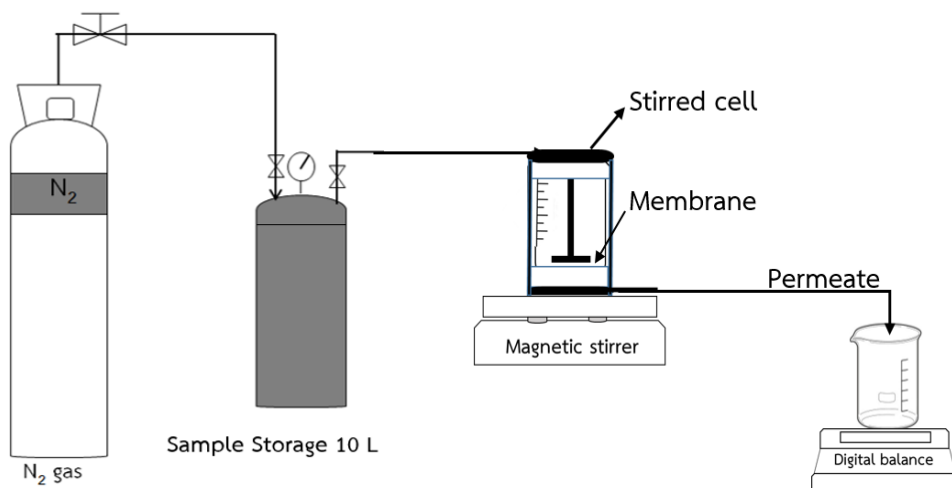
5. ขั้นตอนการทดสอบ

แผ่นเยื่อกรองแบบนาโนถูกล้างด้วยน้ำกลั่นและทำการติดตั้งกับชุดทดสอบเยื่อกรองแบบนาโน จากนั้นทำการล้างเยื่อกรองผ่านระบบชุดทดสอบเยื่อกรอง โดยใช้สารละลายกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.001 M เป็นเวลา 30 min แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น จากนั้นล้างต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.001 M เป็นเวลา 30 min แล้วล้างออกอีกครั้งด้วยน้ำกลั่น จนค่าพีเอชใกล้เคียงกับน้ำกลั่น หลังจากนั้นก็ล้างทำความสะอาดเยื่อกรองตามกระบวนการข้างต้นเสร็จเรียบร้อยแล้วให้เดินระบบด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 30 min เพื่อทดสอบการอัดตัวของแผ่นกรองในระบบ ซึ่งเป็นการเตรียมความพร้อม

ก่อนการทดลองน้ำตัวอย่างจริง โดยในระหว่างการล้างด้วยน้ำกลั่นทุกครั้งจะวัดค่าอัตราการไหลเทียบกับความดัน 0-60 PSIG เพื่อคำนวณค่าฟลักซ์ตามความดันระดับต่าง ๆ แล้วนำข้อมูลข้างต้นไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างค่าฟลักซ์ก่อนและหลังล้างเยื่อกรองที่ผ่านการกรองจากน้ำตัวอย่างมาแล้ว จากนั้นน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกฟีดสู่ระบบ และเริ่มต้นการทดลอง ทำการเก็บน้ำตัวอย่างในส่วนที่ผ่านเยื่อกรองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดของแคลเซียม และแมกนีเซียม ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ และค่าการนำไฟฟ้าในทุก ๆ 10 min จนครบ 60 min และทุก ๆ 30 min จนครบ 240 min สำหรับการคำนวณค่าฟลักซ์สารละลายจากการเก็บปริมาตรตัวอย่างที่ผ่านการกรองต่อเวลาที่หารด้วยพื้นที่การกรอง โดยจะวัดอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างตั้งแต่เวลาที่ 0-240 min โดยแบ่งเป็นการเก็บน้ำตัวอย่างทุก 5 min จนครบ 60 min จากนั้นจะเก็บทุก 10 min จนครบ 180 min หลังจาก 180 min เป็นต้นไปจะเก็บทุก 20 min จนถึง 240 min

6. ชุดทดสอบเยื่อกรองนาโน

ภาพที่ 1 แสดงแผนภาพการทำงานของชุดทดสอบเยื่อกรองนาโน โดยการทดสอบเป็นชุดทดสอบการไหลตามแนวตั้ง (Dead-End Operation) โดยจะอาศัยแรงดันจากก๊าซไนโตรเจนป้อนสารละลายเข้าในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นเยื่อกรองแบบนาโนที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบ น้ำตัวอย่างจะถูกส่งผ่านมายังชุด Stirred cell ขนาด 400 mL ที่สามารถทนแรงดันได้สูงสุด 75 PSIG ซึ่งภายในบรรจุใบกวนติดตั้งอยู่บนแท่น โดยอาศัยการกวนแบบแม่เหล็กขับเคลื่อน (Magnetic stirrer) ที่มีความเร็วรอบ 100-990 rpm แผ่นเยื่อกรองนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 cm ถูกติดตั้งอยู่ภายใน Stirred Cell ดังใส่น้ำตัวอย่างทำจากเหล็กสแตนเลสที่มีขนาด 10 L และมีเกจวัดความดันได้ตั้งแต่ 5-100 PSIG ต่อกับถังไนโตรเจนที่สามารถสร้างแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 100 PSIG เพื่อเพิ่มแรงดันให้กับชุดทดสอบการกรอง ขณะที่ดำเนินระบบแรงดันจะดันน้ำตัวอย่างผ่านชุดการไหลปิดตายที่มีแผ่นเยื่อกรองภายใน และเกิดการไหลของน้ำซึมผ่านแผ่นเยื่อกรองจากชุดทดสอบไปยังบีกเกอร์ขนาด 500 mL ซึ่งตั้งอยู่บนเครื่องชั่งในการวัดค่าน้ำหนัก โดยเครื่องชั่งที่ใช้ยี่ห้อ Zepper รุ่น EPS-302 ซึ่งมีความละเอียดสองตำแหน่งหรืออ่านค่าความละเอียดได้ 0.01 g



ภาพที่ 1 แผนภาพการทำงานของชุดทดสอบเยื่อกรองแบบนาโน

7. การตรวจวิเคราะห์ผล

น้ำส่วนที่ผ่านเยื่อกรองที่เก็บแต่ละช่วงเวลาจะนำมาวิเคราะห์ผลของค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (model: UV mini-1240, Shimadzu Corporation, Japan) ที่ความยาวคลื่น 254 nm เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ การวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า และการวัดหาความเข้มข้นของแคลเซียม และแมกนีเซียมโดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (PerkinElmer AAnalyst 200, USA)

8. สมการที่ใช้ในการศึกษา

ค่าฟลักซ์สารละลาย (Solution Flux, J_v) คำนวณได้จากอัตราการไหลผ่านเยื่อกรอง (Q_p) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของเยื่อกรอง (A_m) แสดงในหน่วย LMH (L/(m².h) ซึ่งถูกแสดงดังสมการที่ (1) (Mattaraj and Kilduff, 2003).

$$J_v = L_p(\Delta P - \sigma\Delta\pi) = \frac{Q_p}{A_m} \quad (1)$$

เมื่อ J_v คือ ฟลักซ์สารละลาย (L.m⁻².h⁻¹)

L_p คือ ค่าการซึมผ่านของเยื่อกรอง (ความชันกราฟระหว่างฟลักซ์และความดัน) (LHM.kPa⁻¹)

ΔP คือ ความดันในการดำเนินระบบ (kPa)

σ คือ สัมประสิทธิ์แรงดันออสโมติก (-), $\Delta\pi$ คือ แรงดันออสโมติก (kPa)

Q_p คือ อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านการกรอง(L.h⁻¹),

A_m คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นกรอง (m²)

ค่าการกักกัน (Rejection, R) แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดของแคลเซียมและแมกนีเซียมและค่าการนำไฟฟ้า โดยสมการแสดงดังสมการที่ (2)

$$\%R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ R คือ ร้อยละการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ

C_p คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการกรอง(mg.L⁻¹)

C_f คือ ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเข้าสู่เยื่อกรอง (mg.L⁻¹)

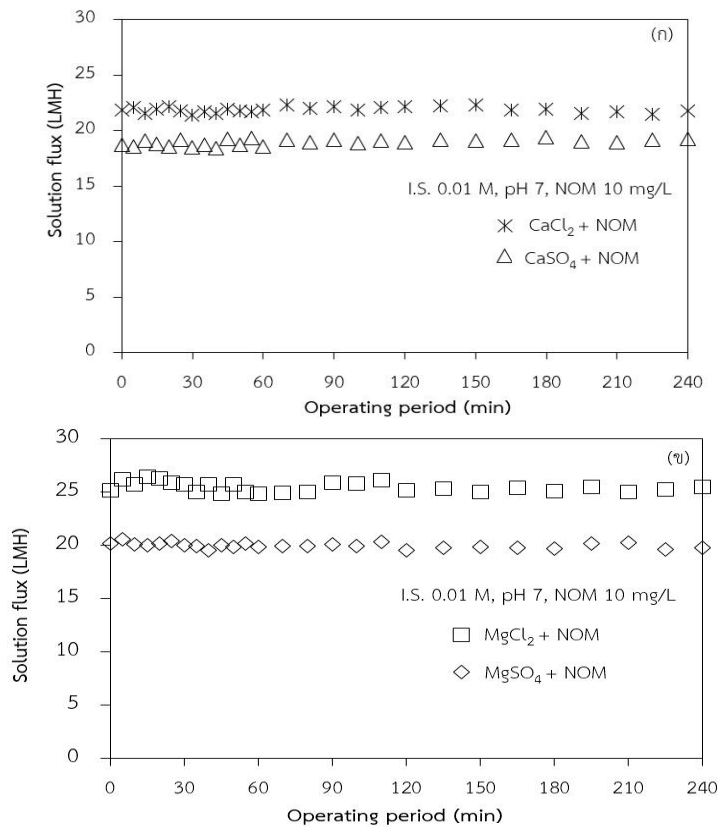
ผลการวิจัย

1. ผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการลดลงของค่าฟลักซ์

การศึกษาผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ จากภาพที่ 2(ก) แสดงผลของแคลเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) ที่มีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ โดยแคลเซียมที่ใช้ คือ แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ใช้ความเข้มข้นเท่ากับ 10 mg/L พีเอช 7 ปรับความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M และควบคุมความดันในการดำเนินระบบ 60 PSIG ระยะเวลาการดำเนินระบบ 240 min พบว่าค่าฟลักซ์ของสารละลาย CaSO₄ + NOM มีค่าลดลงมากกว่าสารละลาย CaCl₂ + NOM เมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่องจนถึงเวลาที่ 240 ค่าฟลักซ์ของสารละลายทั้ง 2 ชนิด มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดผลการทดลอง

จากภาพที่ 2(ข) แสดงผลของแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) ที่มีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์โดยแมกนีเซียมที่ใช้คือ แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) โดยใช้ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติเท่ากับ 10 mg/L พีเอช 7 ปรับความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M และควบคุมความดันในการดำเนินระบบ 60 PSIG เมื่อการดำเนินระบบครบ 240 min พบว่า ค่าฟลักซ์ของสารละลาย MgSO₄ + NOM มีค่าลดลงมากกว่า MgCl₂ + NOM จากการศึกษา ทั้งผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ค่าฟลักซ์สารละลายที่ลดลงมากที่สุดคือ CaSO₄ + NOM และ MgSO₄ + NOM เนื่องจากประจุสองลบของซัลเฟต SO₄ สามารถผลักจากประจุลบของแผ่นเยื่อกรองแบบนาโน

ทำให้เยื่อกรองแบบนาโนสามารถกักกันสารทั้งสองชนิดได้มากกว่าส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายที่บริเวณใกล้ผิวหน้าเยื่อกรองมีค่าสูงขึ้นอาจทำให้เกิดการสะสมสารและเกิดลักษณะคล้ายชั้นเจลของอนุภาคที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง ส่งผลให้ค่าความดันออสโมติกของสารมีค่าสูง และนอกจากนี้ชนิดของสารละลายแคลเซียม และแมกนีเซียมจะมีส่วนทำให้ค่าความดันออสโมติกของสารสูงซึ่งมีผลต่อค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้น สอดคล้องกับสมการที่ (1) ส่วนสารอินทรีย์ธรรมชาติที่รวมอยู่ด้วยขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติอยู่ในช่วง 6.5-22.6 kDa (Lin et al., 2000) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองทำให้สารอินทรีย์ธรรมชาติถูกกักกันโดยเยื่อกรองแบบนาโน เมื่อเกิดการสะสมตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติบนผิวหน้าเยื่อกรองหรืออาจจะปิดรูพรุนของเยื่อกรองน้ำจึงไหลผ่านได้น้อยลง ส่งผลให้การลดลงของค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้น



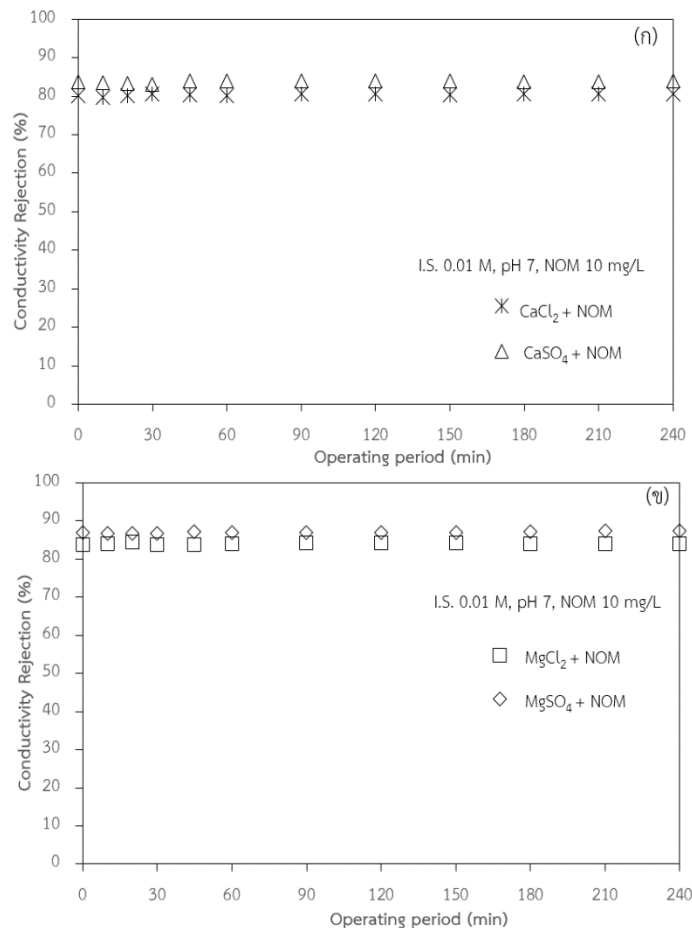
ภาพที่ 2 ผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการลดลงของค่าฟลักซ์
 (ก) CaCl₂ และ CaSO₄ และ(ข) MgCl₂ และ MgSO₄

2. ผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อประสิทธิภาพการกำจัด

ผลการศึกษาผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด จากภาพที่ 3(ก) แสดงผลของแคลเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อประสิทธิภาพการกำจัด พิจารณาต่อค่าการนำไฟฟ้า โดยแคลเซียมที่ใช้ คือ CaCl₂ และ CaSO₄ ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ใช้เท่ากับ 10 mg/L พีเอช 7 ปรับความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M และควบคุมความดันในการดำเนินระบบ 60 PSIG เมื่อการดำเนินระบบครบ 240 min จากผลการทดลองพบว่า ร้อยละการกำจัดของค่าการนำไฟฟ้าของ CaSO₄ + NOM (83.14-83.99) มีค่ามากกว่า CaCl₂ + NOM (79.62-80.66) และในกรณีผลการศึกษาของแมกนีเซียม จากภาพที่ 3(ข) แสดงผลของแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อประสิทธิภาพการกำจัด พิจารณาต่อค่าการนำไฟฟ้า โดยแมกนีเซียมที่ใช้คือ MgCl₂ และ MgSO₄ ความเข้มข้น

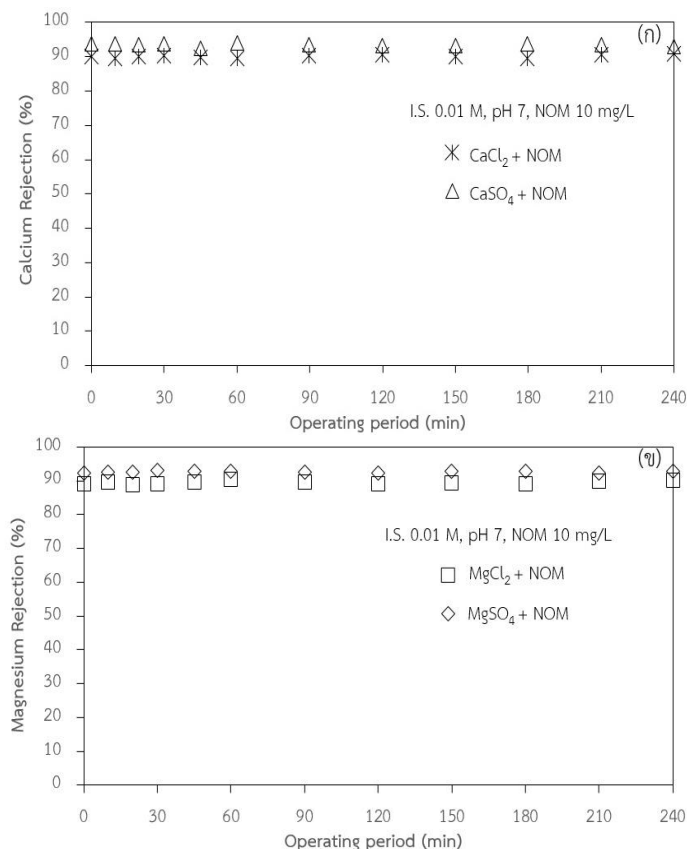
สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ใช้เท่ากับ 10 mg/L พีเอช 7 ปรับความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M และควบคุมความดันในการดำเนินระบบ 60 PSIG เมื่อการดำเนินระบบครบ 240 min พบว่า ร้อยละการกำจัดของค่าการนำไฟฟ้าของ $MgSO_4 + NOM$ (86.67-87.37) มากกว่าสาร $MgCl_2 + NOM$ (83.70-84.52) ผลการทดลองมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันเมื่อเทียบกับผลของแคลเซียม

จากการศึกษาดังกล่าวข้างต้นนี้ ประสิทธิภาพการกำจัดเกิดขึ้นจากกลไกของประจุลบของสาร และอาศัยแรงผลักทางไฟฟ้าของประจุที่ผิวหน้าเยื่อกรอง (Electrostatic repulsion) ทำให้เกิดการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้า และประจุบวกสามารถถูกกำจัดโดยประจุสมดุล (Charge balance) ระหว่างประจุบวกกับประจุลบ กล่าวคือเนื่องจากประจุลบของไอออนลบอาศัยสมดุลกับประจุบวกของไอออนบวกทำให้สามารถกำจัดไอออนบวกได้ (Lhassani et al., 2001) ซึ่งประจุสองลบซัลเฟต (SO_4^{2-}) มีไอออนประจุลบสอง (Divalent anion) จะถูกผลักโดยเยื่อกรองที่มีประจุลบที่มีความเสถียรมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับประจุหนึ่งลบคลอไรด์ (Cl^-) ซึ่งเป็นไอออนที่มีประจุลบหนึ่ง (Monovalent anion) (Charoensuk et al., 2015) นอกจากนี้ไอออนประจุบวกคู่ (Divalent cation) ของแมกนีเซียม (Mg^{2+}) และแคลเซียม (Ca^{2+}) จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างประจุลบของสารอินทรีย์ธรรมชาติกับเยื่อกรองแบบนาโนซึ่งมีประจุลบด้วยกลไกที่เรียกว่า สะพานเชื่อม (Bridging effect) (Luo and Wan, 2013; Schafer et al., 1998) ทำให้สารอินทรีย์ธรรมชาติติดอยู่ที่ผิวของดเยื่อกรองอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำจัดประจุบวกของแคลเซียมและแมกนีเซียมได้ จึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าการกำจัดสูงขึ้น



ภาพที่ 3 ผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีต่อค่าการกำจัด
 พิจารณาจากค่าความนำไฟฟ้า (ก) $CaCl_2$ และ $CaSO_4$ และ (ข) $MgCl_2$ และ $MgSO_4$

ผลการศึกษาผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโดยวัดจากค่าความเข้มข้นของแคลเซียม และแมกนีเซียม โดยแคลเซียม และแมกนีเซียมที่ใช้คือ CaCl_2 , CaSO_4 , MgCl_2 และ MgSO_4 ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ใช้เท่ากับ 10 mg/L พีเอช 7 ปรับความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M และควบคุมความดันในการดำเนินระบบ 60 PSIG เมื่อการดำเนินระบบครบ 240 min จากภาพที่ 4(ก) แสดงผลของแคลเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อค่าการกำจัดประจุบวกแคลเซียมพบว่า เมื่อเดินระบบครบ 240 นาที ประสิทธิภาพของเยื่อกรองแบบนาโนต่อการกำจัดแคลเซียมของสารละลาย $\text{CaCl}_2 + \text{NOM}$ และ $\text{CaSO}_4 + \text{NOM}$ มีค่าการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 89.44-90.83 และ 92.38-94.11 ตามลำดับ และในกรณีศึกษาแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำต่อค่าการกำจัดประจุบวกแมกนีเซียมพบว่า ประสิทธิภาพของเยื่อกรองแบบนาโนต่อการกำจัดแมกนีเซียมของสารละลาย $\text{MgCl}_2 + \text{NOM}$ และ $\text{MgSO}_4 + \text{NOM}$ มีค่าการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 88.87-90.47 และ 92.19-93.13 ตามลำดับ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการกำจัดของประจุบวกแคลเซียมกับแมกนีเซียมสูงกว่าค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) และการกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียมจะให้ค่าสูงขึ้นจากการรวมตัวของประจุสองลบจากซัลเฟต (SO_4^{2-}) เมื่อเทียบกับประจุหนึ่งลบจากคลอไรด์ (Cl) อาจเนื่องจากกรณีแรกจากผลของประจุสมดุลจากการที่ประจุบวกแคลเซียมและแมกนีเซียมกับประจุสองลบจากซัลเฟต (SO_4^{2-}) และกรณีที่สองอาจเนื่องจากสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีประจุลบสามารถจับตัวกับไอออนประจุสองบวก (Ca^{2+} และ Mg^{2+}) ทำให้เกิดสะพานเชื่อมระหว่างประจุลบของสารอินทรีย์ธรรมชาติและประจุบวกของไอออนทั้งสองจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดประจุบวกของแคลเซียมและแมกนีเซียมมีค่าสูง โดยทั่วไปการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดเยื่อกรองนาโน เกิดจากกลไกการแยกขนาด Size Exclusion จึงส่งผลทำให้ค่าการกำจัดประจุสองบวกมีค่าสูง โดยเฉพาะผลของการกำจัดแคลเซียมแสดงค่าที่สูงกว่าแมกนีเซียม



ภาพที่ 4 ผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีต่อค่าการกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียม (ก) CaCl_2 และ CaSO_4 และ (ข) MgCl_2 และ MgSO_4

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาของแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อค่าฟลักซ์สารละลายพบว่า ค่าฟลักซ์ของสารละลาย $\text{CaSO}_4 + \text{NOM}$ มีค่าลดลงมากกว่าสารละลาย $\text{CaCl}_2 + \text{NOM}$ และผลของแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) พบว่า ค่าฟลักซ์ของสารละลาย $\text{MgSO}_4 + \text{NOM}$ มีค่าลดลงมากกว่า $\text{MgCl}_2 + \text{NOM}$

ผลการศึกษาผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดพิจารณาต่อค่าการนำไฟฟ้า พบว่าร้อยละค่าการกำจัด $\text{CaSO}_4 + \text{NOM}$ (83.14-83.99) มีค่ามากกว่า $\text{CaCl}_2 + \text{NOM}$ (79.62-80.66) และในกรณีผลการศึกษาของแมกนีเซียม พบว่าร้อยละค่าการกำจัดของ $\text{MgSO}_4 + \text{NOM}$ (86.67-87.37) มากกว่าสาร $\text{MgCl}_2 + \text{NOM}$ (83.70-84.52)

ผลการศึกษาผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโดยวัดจากค่าความเข้มข้นของแคลเซียม และแมกนีเซียม พบว่าร้อยละการกำจัดแคลเซียมของสารละลาย $\text{CaCl}_2 + \text{NOM}$ และ $\text{CaSO}_4 + \text{NOM}$ มีค่าการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 89.44-90.83 และ 92.38-94.11 ตามลำดับ และประสิทธิภาพของเยื่อกรองนาโนต่อการกำจัดแมกนีเซียมของสารละลาย $\text{MgCl}_2 + \text{NOM}$ และ $\text{MgSO}_4 + \text{NOM}$ มีค่าการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 88.87-90.47 และ 92.19-93.13 ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ ควรที่จะศึกษาเยื่อกรองประเภทอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น เยื่อกรองไมโครฟิวเตรชัน เยื่อกรองอัลตราฟิวชัน เป็นต้น และทำการศึกษาการทดลองการไหลแบบแนวขวางด้วย เพื่อที่จะได้เรียนรู้วิธีการทดลองเพิ่มอีกนอกเหนือจากการทดลองแบบไหลตายตัว ผลการทดลองที่ได้นำไปวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์รวมถึงการประยุกต์ใช้เยื่อกรองในการผลิตน้ำดื่ม น้ำประปาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น พร้อมทั้งการประยุกต์การใช้เยื่อกรองในงานอื่นทางด้านสิ่งแวดล้อมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี เครื่องมือในการทดลอง สถานที่วิจัย ตลอดจนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Charoenssuk, C., Mattaraj, S., Ratanapongleka, K., and Jarusutthirak, C. (2015). Effects of natural organic matter and carbonate salts on the operation of nanofiltration membrane, *Journal of Industrial Technology of Thailand*, 5(2), 26-37.
- Contreras, A. E., Kim, A. and Li, Q. (2009). Combined fouling of nanofiltration membranes: mechanisms and effect of organic matter, *Journal of Membrane Science*, 327(1-2), 87-95.
- Gabrielli, C., Maurin, G., Francy-Chausson, H., They, P., Tran, T. T. M. and Tlili, M. (2006). Electrochemical water softening: principle and application. *Desalination*, 201(1-3), 150-163.
- Harper, C. and Snowden, M. (2017). *Environment and society: Human perspectives on environmental* (5ed). New York: Routledge.
- Lhassani, A., Rumeau, M., Benjelloun, D. and Pontie, M. (2001). Selective demineralization of water by nanofiltration application to the defluorination of brackish water, *Water Research*, 35(13), 3260-3264.

- Lin, C. F., Lin, T. Y. and Hao, O. J. (2000). Effect of humic substances characteristics on uf performance. *Water Research*, 34(4), 1097-1106.
- Listiarini, K., Sun, D. D. and Leckie, J. O. (2009). Organic fouling of nanofiltration membranes: evaluating the effects of humic acid, calcium, alum coagulant and their combinations on the specific cake resistance. *Journal of membrane science*, 332(1-2), 56-62.
- Luo, J. and Wan, Y. (2013). Effects of pH and salt on nanofiltration-a critical review. *Journal of Membrane Science*, 438(1), 18-28.
- Marhaba, T. F., Pu, Y. and Bengraïne, K. (2003). Modified dissolved organic matter fraction technique for natural water. *Journal of Hazardous Materials*, 101(1), 43-53.
- Mattaraj, S. and Kilduff, J. E. (2003). Effect of natural organic matter properties on nanofiltration fouling. *RSID 4th Proceeding of the forth Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering*.
- Schafer, A. I., Fane, A. G. and Waite, T. D. (1998). Nanofiltration of natural organic matter: removal, fouling and the influence of multivalent ions. *Desalination*, 118(1-3), 109-122.
- Siddiqui, M., Amy, G., Ryan, J. and Odem, W. (2000). Membranes for the control of natural organic matter from surface water. *Water Research*, 34(13), 3355-3370.
- De-Bruggen B.V. and Vandecasteele, C. (2003). 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.