



# ผลของพีเอชต่อการอุดตันเยื่อกรองแบบนาโน โดยสารคาร์บอนเนต ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ

## Effect of pH on Nanofiltration Fouling of Combined Carbonate Species and Natural Organic Matter

Charuepon Charoensuk\* and Supatpong Mattaraj\*\*

ชฤพนธ์ เจริญสุข\* และ สุพัฒน์พงษ์ มัตราจ\*\*

\*คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม 44150

\*\*ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

\*E-mail : knowenv@hotmail.com

### บทคัดย่อ

เยื่อกรองแบบนาโนเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดสาร และเคมีของสารละลาย ดังนั้นการศึกษานี้เป็นการศึกษาผลของพีเอชระหว่างการอุดตันเยื่อกรองแบบนาโนจากสารคาร์บอนเนตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยใช้ชุดทดลองแบบไหลตามขวางเยื่อกรองแบบนาโน (HL4040FN, GE water and process technology) โดยปรับค่าความแรงของประจุเป็น 0.01 โมล สารอินทรีย์ธรรมชาติความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับค่าพีเอชของสารละลายเป็น 4.3 ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), 6.3 ( $\text{pK}_{a1}$ ), 8.3 ( $\text{HCO}_3^-$ ), 10.3 ( $\text{pK}_{a2}$ ) and 11.3 ความแตกต่างของพีเอชทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสารคาร์บอนเนตให้อยู่ในรูปของกรดคาร์บอนิก ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) ที่พีเอช 4.3 เป็นไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) ที่เป็นสารประจุลบเดี่ยวที่พีเอช 6.3 และอยู่ในรูปของคาร์บอเนตที่เป็นสารประจุลบคู่ที่ระดับพีเอช 11.3 การเพิ่มขึ้นของพีเอชของสารละลายจาก 4.3, 6.3, 8.3, 10.3 และ 11.3 เป็นผลทำให้ลดค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทลงจากค่า 29.31, 27.38, 22.23, 21.90 และ 19.71 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ค่าการกำจัดของสารอินทรีย์ธรรมชาติตามช่วงค่าพีเอชสารละลายให้ค่าประมาณร้อยละ 96-98 ค่าการกำจัดโซเดียมคาร์บอเนตวัดโดยการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากผลของแรงผลักระหว่างประจุลบของเยื่อกรองแบบนาโนและประจุลบจากชนิดของคาร์บอเนต เกลือคาร์บอเนตจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตจากระดับพีเอช 4.3 ไป 10.3 ขณะที่รูปของคาร์บอเนตจะปรากฏที่พีเอชสูงที่พีเอชสารละลาย 11.3

คำสำคัญ : สารคาร์บอนเนต; เยื่อกรองแบบนาโน; สารอินทรีย์ธรรมชาติ

## Abstract

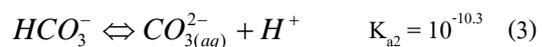
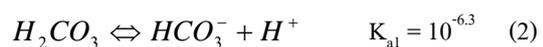
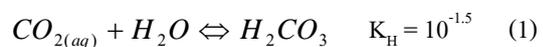
Nanofiltration is an efficient system for removing inorganic and organic compounds depending on solution types and solution chemistry. Therefore, this research studied the effect of pH during nanofiltration (NF) fouling of combined carbonate species and natural organic matter using crossflow nanofiltration (HL4040FN, GE water and process technology). Solution conditions were controlled with ionic strength of 0.01 M, NOM concentration of 10 mg/L and various solution pHs of pH 4.3 ( $H_2CO_3$  equiv. pt.), 6.3 ( $pK_{a1}$ ), 8.3 ( $HCO_3^-$  equiv. pt.), 10.3 ( $pK_{a2}$ ) and 11.3 ( $CO_3^{2-}$  equiv.pt). Different solution pHs could change carbonate species from carbonic acid ( $H_2CO_3$ ) at pH 4.3, to monovalent bicarbonate ( $HCO_3^-$ ) at pH 6.3, then form divalent carbonate ( $CO_3^{2-}$ ) at high solution pHs of 11.3. The increase in solution pHs from 4.3, 6.3, 8.3, 10.3 and 11.3 resulted in decreases of permeate fluxes of 29.31, 27.38, 22.23, 21.90 and 19.71 L/m<sup>2</sup>/h (LMH), respectively. The removal efficiencies of NOM for the range of solution pHs were approximately 96-98%. The sodium carbonate rejections measured by conductivity increased with increasing solution pHs, possibly caused by repulsion charge effects between negatively charged NF membrane and negatively charged carbonate species. Carbonate salt can form bicarbonate ions with increased solution pHs from 4.3 to 10.3, while carbonate species can dominate with high solution pHs of 11.3.

Keywords : Carbonate species; Nanofiltration; Natural Organic Matter

## บทนำ

ระบบคาร์บอเนตเป็นระบบที่เกิดขึ้นได้โดยทั่วไปตามธรรมชาติ โดยเป็นการเกิดการถ่ายเทมวลสารระหว่างแหล่งน้ำกับอากาศ ซึ่งเกิดการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศลงสู่แหล่งน้ำและการปล่อยก๊าซจากแหล่งน้ำคืนสู่อากาศในสภาวะที่มีการอิ่มตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงในน้ำ การถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นเป็นการรักษาความสมดุลของแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ในการวัดค่าของคาร์บอเนตนิยมวัดในรูปของค่าความเป็นกรด (Acidity) และค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) โดยแหล่งน้ำผิวดินที่มีสารคาร์บอเนตในปริมาณสูง มีสาเหตุมาจากมีสาหร่ายจำนวนมากที่เจริญเติบโตในแหล่งน้ำ เมื่อเกิดการสังเคราะห์แสงจะมีการดึงคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งน้ำไปใช้ในการ

สังเคราะห์แสง เป็นผลให้พีเอชของน้ำมีค่าที่สูงขึ้น โดยสารคาร์บอนในน้ำจะเกิดการเปลี่ยนรูปตามระดับ pH ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยสารคาร์บอนในแหล่งน้ำสามารถเปลี่ยนไปได้เป็น 3 รูป คือ กรดคาร์บอนิก ( $H_2CO_3$ ) ไบคาร์บอเนต ( $HCO_3^-$ ) และ คาร์บอเนต ( $CO_3^{2-}$ ) ตามลำดับ เมื่อมีระดับพีเอชที่สูงขึ้น [1] และเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับน้ำได้ ดังนี้ [2]



การปรากฏไอออนลบของคาร์บอเนตยังสามารถจับตัวกับประจุบวกในน้ำธรรมชาติ เช่น  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับ  $\text{Ca}^{2+}$  กับ  $\text{Mg}^{2+}$  ทำให้เกิดตะกอน และสารคาร์บอเนตสามารถพบร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติตามแหล่งน้ำผิวดิน อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเยื่อกรองได้ง่ายขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตน้ำลดลง

เยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration, NF) เป็นกระบวนการที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตน้ำดื่ม การทำน้ำอ่อน และบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ โดยมีข้อได้เปรียบคือการใช้ความดันที่น้อยกว่าในการดำเนินระบบ ปริมาณน้ำที่ผลิตได้มีปริมาณที่มาก และยังสามารถใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ปนมากับน้ำได้เป็นอย่างดี [3-5] และกระบวนการนาโนยังสามารถใช้กำจัดคลอไรด์ รวมทั้งประจุของสารอนินทรีย์จากน้ำผิวดินและใต้ดินได้เป็นอย่างดี [6] ซึ่งปัญหาที่พบมากของกระบวนการเยื่อกรอง คือการลดลงของอัตราการไหล โดยมีสาเหตุมาจากการเกิด Concentration Polarization (CP) โดยการอุดตันที่เกิดขึ้นสามารถเกิดได้ใน 2 แหล่ง คือ เกิดการอุดตันบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง (Surface fouling) ซึ่งสามารถที่จะทำความสะอาดได้ และการอุดตันที่เกิดภายในรูพรุนของเยื่อกรอง (Internal pore fouling) ซึ่งการเกิดในอย่างหลังนี้สามารถที่จะทำความสะอาดได้บางส่วนหรือไม่สามารถที่จะทำความสะอาดได้เลย [7] เมื่อเยื่อกรองเกิดการอุดตันจะเป็นผลให้ค่าดำเนินระบบเพิ่มมากขึ้น ต้องทำความสะอาดบ่อยครั้งขึ้น และทำให้อายุการใช้งานของเยื่อกรองสั้นลง [8]

การศึกษานี้จะทำการศึกษาผลของพีเอชระหว่างการอุดตันเยื่อกรองแบบนาโนจากสารคาร์บอเนตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ค่าพีเอชของสารละลาย รวมทั้งชนิดของสารคาร์บอเนตที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง โดยมุ่งศึกษาปัจจัย

ของการอุดตันของเยื่อกรองที่เกิดสารคาร์บอเนตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ระบบเยื่อกรองในการผลิตน้ำให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## อุปกรณ์และวิธีการ

### เกลือคาร์บอเนต

เกลือคาร์บอเนตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ปรับความแรงประจุของน้ำตัวอย่างให้มีความแรงของประจุเป็น 0.01 โมลต่อลิตร และปรับพีเอชเป็น 4.3 6.3 8.3 10.3 และ 11.3 ตามลำดับด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

### การเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้น

สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้มาจากแหล่งน้ำผิวดินที่อยู่ภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งใช้ผลิตน้ำอุปโภคและบริโภคภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยมีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 4.45 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร เท่ากับ 0.185 ต่อเซนติเมตร มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 31.9 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร มีพีเอชอยู่ที่ 7.04 โดยทำการเตรียมสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นได้โดยการนำน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จำนวน 1,000 ลิตร ผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้นเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่ และกำจัดไอออนที่ส่งผลต่อการเกิดตะกอนบนผิวของเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ ทำการกรองจนเหลือเฉพาะน้ำที่ไม่ผ่านการกรองหรือส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้น ประมาณ 25-30 ลิตร จากนั้นนำสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นใส่ภาชนะที่ปิดสนิทแล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการเก็บสารอินทรีย์ธรรมชาติให้อยู่ในสภาวะพร้อมใช้งาน

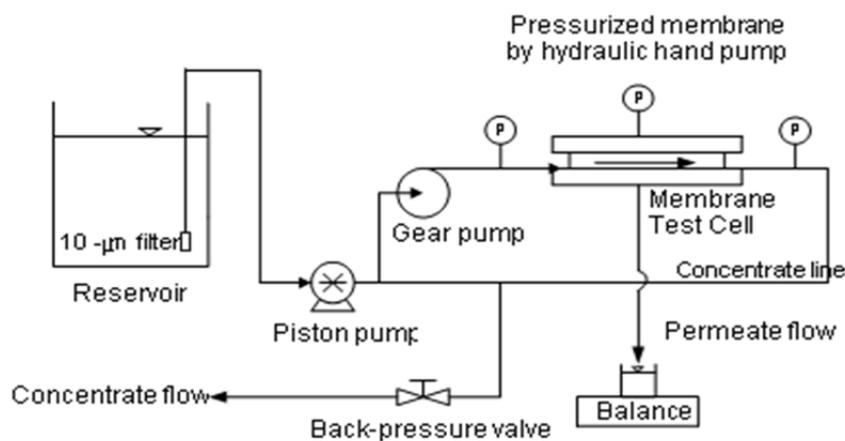
### เยื่อกรองแบบนาโน

การวิจัยครั้งนี้ใช้เยื่อกรองแบบนาโนของ GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040FM ผลิตจากโพลีเอไมด์ มีคุณสมบัติของเยื่อกรองเป็นดังนี้ มีความสามารถในการกำจัดสารที่มีขนาดโมเลกุล 150-300 ดาลตัน โดยทำการทดสอบกับน้ำตาลกลูโคส พิเอชที่ใช้ในการดำเนินระบบอยู่ระหว่าง 3-9 และค่าพิเอชของสารที่ใช้ในการทำความสะอาดมีค่าอยู่ระหว่าง 2-10.5 มีความสามารถในการทนต่อค่าคลอรีนที่ระดับความเข้มข้น 0.1 ppm อุณหภูมิที่สามารถทนได้สูงสุดที่ 50 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้ในการดำเนินงานอยู่ที่ 70-300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเยื่อกรองชนิดเดียวกันนี้ รุ่น HL จะมีประจุที่เป็นลบเล็กน้อยที่พิเอช 4 [9] ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกัน และเมื่อมีค่าพิเอชที่สูงขึ้นผิวหน้าเยื่อกรองก็จะแสดงประจุลบมากขึ้นและทำให้ประจุลบเกิดแรงผลักรวมขึ้น นำมาตัดให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 4 x 6 นิ้ว เพื่อให้สามารถนำมาใส่ลงในชุดทดลองเยื่อกรอง สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ได้ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำเก็บรักษาโดยแช่ไว้ในสารละลาย Sodium metabisulphite ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 1 เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับ

ออกซิเจน แล้วนำไปแช่ไว้ในตู้เย็นเพื่อลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่มีผลต่อผิวหน้าของเยื่อกรองแบบนาโน

### ชุดทดลองแบบไหลตามขวาง

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน [10] ระบบนี้ใช้ในเป็นชุดทดสอบแบบไหลตามขวาง รุ่น SEPA ของ Osmonics ที่มีพื้นที่ได้แผ่นเยื่อกรองขนาด 0.014 ตารางเมตร โดยคำนวณตามพื้นที่ของชุดทดสอบ โดยควบคุมการทดลองด้วยระบบเยื่อกรองแบบนาโนดังนี้ การปรับความดันให้มีอัตราการไหลเริ่มต้น 45 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง และควบคุมความดันคงที่ตลอดการทดลอง ความสามารถในการผลิตน้ำอยู่ที่ร้อยละ 85 อัตราเร็วที่ไหลตามขวางอยู่ที่ 0.1 เมตรต่อวินาที [11] และใช้เวลาในการทดลอง 500 นาที การทดลองจะแยกเก็บตัวอย่างน้ำทั้งสองส่วน ได้แก่ น้ำที่ผ่านการกรองและไม่ผ่านการกรอง โดยไม่มีการเวียนน้ำกลับเข้าสู่ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 1 และในแต่ละชุดการทดลองจะเตรียมน้ำตัวอย่างใหม่ทุกครั้งให้ได้คุณสมบัติของน้ำตัวอย่างตามที่กำหนดก่อนเริ่มการทดลอง



รูปที่ 1 ภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน [10]

สมการที่ใช้ในการศึกษา

จากการศึกษาของ Mattaraj and Kilduff [12] เกี่ยวข้องกับการดูดซับของเยื่อกรองอันเป็นผลมาจากสารอินทรีย์ธรรมชาติในการกรองแบบนาโนซึ่งมีความสอดคล้องกับแผนการวิจัยในครั้งนี้ ค่าอัตราการกรองแสดงได้ในสมการที่ (4)

$$J_v = \frac{Q_{perm}}{A_m} \quad (4)$$

โดย  $J_v$  คืออัตราการกรองผ่านเยื่อกรอง ( $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ),  $Q_{perm}$  คืออัตราการไหลของน้ำที่กรองได้ ( $L \cdot h^{-1}$ ),  $A_m$  คือ พื้นที่ที่ใช้ในการกรอง ( $m^2$ ) ส่วนการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ (Rejection) โดยการกรองผ่านเยื่อกรองจะแยกสารละลายต่างๆ ออกจากน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$R = 1 - \frac{C_{perm}}{C_{reten}} \quad (5)$$

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

### ผลการทดลองและวิจารณ์

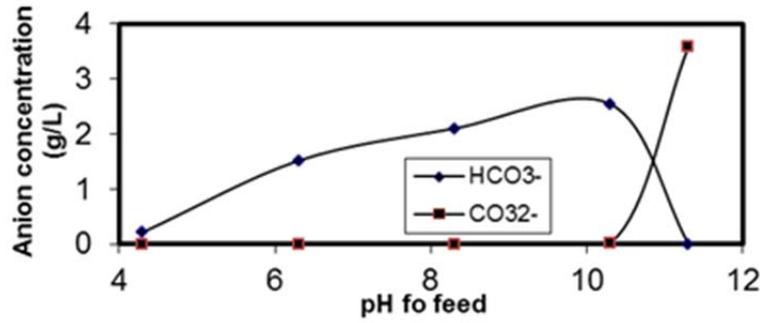
ผลการศึกษาชนิดของเกลือคาร์บอเนตในแต่ละระดับพีเอช

จากการทดสอบโดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตในการปรับค่าความแรงประจุเป็น 0.01 โมลต่อลิตร ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชให้มีค่าเป็น 4.3, 6.3, 8.3, 10.3 และ 11.3 แล้วทำการหาปริมาณของไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตที่อยู่ในสารละลาย พบว่าในระดับพีเอชที่ 4.3, 6.3, 8.3

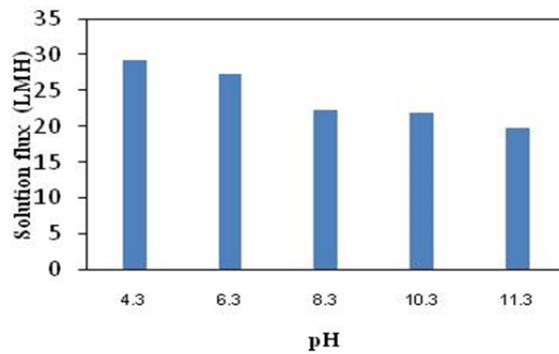
และ 10.3 จะพบว่าสารคาร์บอเนตจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต โดยมีความเข้มข้นเป็น 0.21, 1.51, 2.09 และ 2.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าถ้าค่าพีเอชมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นในช่วงพีเอช 4.3-10.3 จะปรากฏปริมาณของไบคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้น ขณะที่คาร์บอเนตปรากฏในน้ำในปริมาณที่น้อย และเมื่อทำการปรับค่าพีเอชให้เป็น 11.3 จะปรากฏค่าไบคาร์บอเนตปริมาณที่น้อย แต่ตรวจพบปริมาณคาร์บอเนตที่เปลี่ยนรูปในระดับพีเอช 11.3 แทนรูปของไบคาร์บอเนต โดยพบว่ามีประมาณเท่ากับ 3.58 กรัมต่อลิตร จากการทดลองนี้จะพบว่าเกลือคาร์บอเนตสามารถที่จะเปลี่ยนรูปได้ตามระดับพีเอชที่เปลี่ยนแปลง ตามค่า  $K_a$  ในสมการที่ (1) – (3) โดยสามารถอยู่ในรูปของกรดคาร์บอนิกในระดับพีเอชที่ต่ำประมาณ 4.3 และเมื่อเพิ่มพีเอชให้อยู่ในช่วง 4.3-10.3 เกลือคาร์บอเนตจะเปลี่ยนรูปจากกรดคาร์บอนิกไปเป็นไบคาร์บอเนต และเมื่อมีพีเอชเป็น 11.3 ไฮดรอกไซด์ไบคาร์บอเนตจะเปลี่ยนรูปไปเป็นคาร์บอเนต ดังแสดงในรูปที่ 2 แสดงความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตที่ระดับพีเอชต่างๆ

ผลการศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์

รูปที่ 3 แสดงผลของพีเอชที่มีต่อการลดลงของฟลักซ์ของเพอร์มีเอท การทดลองผลของค่าพีเอชต่อการลดลงของ ฟลักซ์ของเพอร์มีเอท ใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชที่ใช้ในการทดลองเป็น 4.3, 6.3, 8.3, 10.3 และ 11.3 ปรับค่าความแรงประจุเป็น 0.01 โมลต่อลิตร ด้วยโซเดียมคาร์บอเนต จากผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทมีลักษณะการลดลงเป็นดังนี้ คือที่ระดับพีเอชที่เพิ่มมากขึ้นจะเป็นผลทำให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทที่ได้มีค่าที่ลดลง โดยค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 4.3, 6.3, 8.3, 10.3 และ 11.3 มีค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทที่ลดลงเป็น 29.31, 27.38, 22.23, 21.90 และ 19.71 ตามลำดับ ซึ่งการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Kilduff และคณะ (2000) [13]



รูปที่ 2 ความเข้มข้นของ ไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตที่ระดับพีเอชต่างๆ



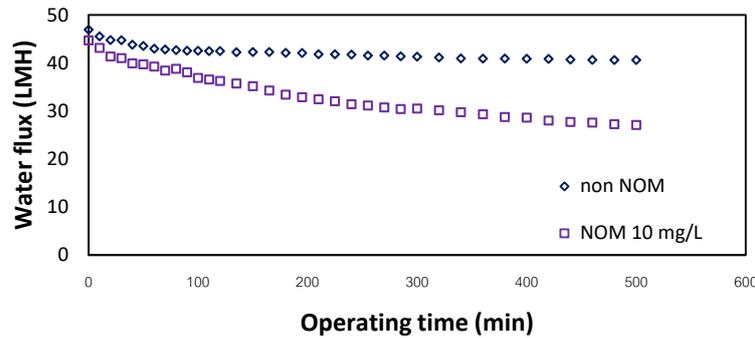
รูปที่ 3 ผลของพีเอชต่อการลดลงของฟลักซ์ของสารละลาย

ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากที่พีเอช 4.3 มีประจุบวกของไฮโดรเจนไอออนในน้ำตัวอย่างมีปริมาณสูงกว่าที่พีเอช 6.3, 8.3 และ 10.3 ซึ่งประจุบวกของไฮโดรเจนไอออนนี้ มีผลทำให้ความหนาของชั้น Double layer ของผิวหน้าเยื่อกรองลดลงทำให้น้ำสามารถเข้าใกล้เยื่อกรองได้มากขึ้น เป็นผลให้สารที่อยู่ผิวหน้าเยื่อกรองเกิดการซึมผ่านออกมาได้ง่ายกว่า

ผลการศึกษาปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์

รูปที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบตัวอย่างที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรกับตัวอย่างที่ไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยปรับค่าพีเอช

เป็น 6.3 และค่าความแรงของประจุเป็น 0.01 โมลต่อลิตรด้วยโซเดียมคาร์บอเนต จากผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ มีค่าลดลงมากกว่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทที่ไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ สารโซเดียมคาร์บอเนตมีส่วนให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มีเอทลดลงจากความเข้มข้นของคาร์บอเนตสะสมที่ผิวของเยื่อกรองระหว่างการกรอง ขณะที่สารอินทรีย์ธรรมชาติที่อยู่ในสารละลายมีส่วนร่วมต่อการเกิดการอุดตันเยื่อกรองแบบนาโน ดังนั้น ผลของการลดลงของอัตราการไหลของเพอร์มีเอทเพิ่มขึ้นจากผลร่วมระหว่างการอุดตันของสารอินทรีย์ธรรมชาติและค่าความแรงของประจุจากโซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4 ผลของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการลดลงของฟลักซ์ของสารละลาย

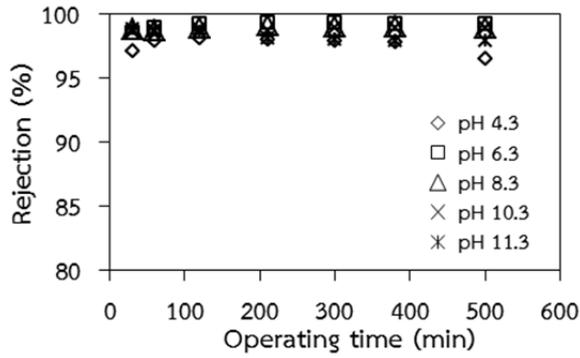
ผลการศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ

รูปที่ 5(ก) แสดงผลของค่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติของสารละลายวัดโดยค่าการดูดกลืนแสง โดยวัดค่าการกำจัดตามฟังก์ชันของพีเอชจาก 4.3, 6.3, 8.3, 10.3 และ 11.3 โดยพิจารณาจากการวัดค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ที่ค่าระดับความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร โดยสารโซเดียมคาร์บอเนต พบว่า เยื่อกรองแบบนาโนมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติประมาณร้อยละ 96-98 รูปที่ 5(ข) แสดงผลของการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติของสารละลายวัดโดยค่าปริมาณคาร์บอนสารอินทรีย์ ที่ค่าความแรงของประจุ 0.01 โมลต่อลิตรของโซเดียมคาร์บอเนต พบว่า เยื่อกรองแบบนาโนมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติประมาณร้อยละ 96-98 ซึ่งผลจากการทดลองที่ได้ พบว่าในทุกระดับค่าพีเอชให้ค่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ใกล้เคียงกันทั้งการวัดค่าด้วยแสง UV 254 และการวิเคราะห์โดยปริมาณคาร์บอนสารอินทรีย์ มีค่าการกำจัดที่อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน จากผลที่ได้ดังกล่าว ทำให้ทราบว่าพีเอชที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติอาจเนื่องจากผลการแยกขนาดสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ ขณะที่อัตราการไหลที่ลดลงเนื่องจากการเกิดสะสมความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติ การเพิ่มพีเอชส่งผลน้อยจากกลไก

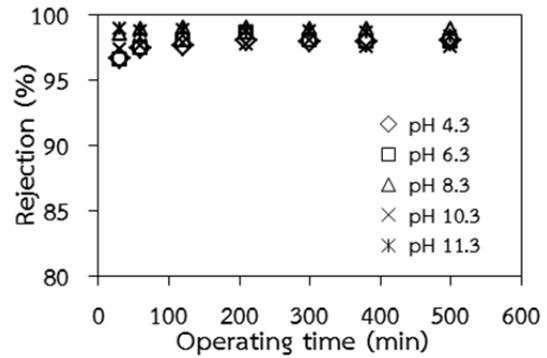
การผลัดกันของประจุจากสารอินทรีย์ธรรมชาติ จากผลการทดลองดังกล่าวมีผลการทดลองที่คล้ายกับการทดลองของ Cho และคณะ (2000) [14] ที่พบว่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติจะใช้กลไกในการคัดขนาด (Size Exclusion) มากกว่ากลไกการผลัดกันของประจุ (Charge Repulsion) เนื่องจากขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองแบบนาโน

ผลการศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการกำจัดสารโซเดียมคาร์บอเนต

จากรูปที่ 6 แสดงการกำจัดสารโซเดียมคาร์บอเนตของเยื่อกรองแบบนาโนซึ่งวัดจากค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย น้ำตัวอย่างมีสารอินทรีย์ธรรมชาติเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนตความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 4.3, 6.3, 8.3, 10.3 และ 11.3 ในที่ระดับพีเอชต่างๆ พบว่า เมื่อเพิ่มพีเอชให้สูงขึ้นค่าการกำจัดโซเดียมคาร์บอเนตวัดโดยค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 18.84, 33.38, 56.40, 80.93 และ 89.13 ตามลำดับ อาจเนื่องจากเกลือคาร์บอเนตจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต (ประจุเดียว) ที่ระดับพีเอช 4.3-10.3 และอยู่ในรูปของคาร์บอเนต (ประจุคู่) ที่พีเอช 11.3 การเพิ่มจากประจุลบเดี่ยวเป็นประจุลบคู่ทำให้ค่าความเป็นประจุสูงขึ้น ทำให้

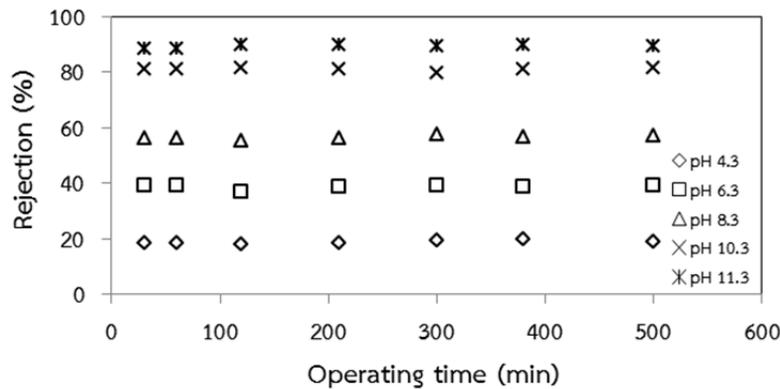


(ก) วัด โดยการใช้ค่าการดูดกลืนแสง UV 254



(ข) วัด โดยการใช้วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

รูปที่ 5 ผลของพีเอชต่อการกำจัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ



รูปที่ 6 การกำจัดสารโชนีเยียมคาร์บอนเนตของเยื่อกรองแบบนาโนที่ระดับพีเอชต่างๆ

เกิดแรงผลักดันระหว่างประจุลบของสารคาร์บอนเนตกับผิวหน้าเยื่อกรองที่มีประจุลบเพิ่มขึ้น เมื่อระดับพีเอชเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารโชนีเยียมคาร์บอนเนตวัดโดยค่าการนำไฟฟ้าสูงเพิ่มขึ้น

สรุปผลการทดลอง

ผลของค่าพีเอชส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบเยื่อกรองนาโนทั้งค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอทและค่าการกำจัด การเพิ่มค่าพีเอชให้สูงขึ้นในน้ำตัวอย่างที่ทดสอบส่งผลทำให้ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์มีค่าที่ลดลง

สอดคล้องกับค่าการกำจัดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของประจุของชนิดของคาร์บอนเนตที่เปลี่ยนจากกรดคาร์บอนิก (พีเอช 4.3) ไบคาร์บอนเนต (ประจุลบเดี่ยว) (พีเอช 6.3 ถึง 10.3) และคาร์บอนเนต (ประจุลบคู่) (พีเอช 11.3) การกำจัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการสะสมความเข้มข้นที่สูงขึ้นบนผิวของเยื่อกรองทำให้เกิดการไหลผ่านเยื่อกรองได้น้อยลง ทำให้ค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอทลดลง ผลการทดสอบยังพบว่าผลของประจุที่เปลี่ยนรูปของชนิดคาร์บอนิกส่งผลต่อประจุลบของเยื่อกรองแบบนาโนโดยอาศัยแรงผลักดันของประจุบนผิวของเยื่อกรอง ส่วนสารอินทรีย์ธรรมชาติให้ค่าการกำจัดที่สูงมากกว่า

ร้อยละ 96 และไม่ส่งผลที่แตกต่างตามผลของพีเอช ผลการทดลองสะท้อนถึงสถานการณ์จริงในแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงในช่วงเวลากลางคืนทำให้ค่าพีเอชต่ำลง ขณะที่การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการสังเคราะห์แสงในช่วงเวลากลางวันทำให้ค่าพีเอชปรับสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของพีเอชต่อประสิทธิภาพการใช้เยื่อกรองแบบนาโน

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Kannika Sirisinha. 2001. Chemistry of Water, Wastewater and Analysis. Prayoonwong Printing CO., LTD, Bangkok. (in Thai)
- [2] Supatpong Mattaraj. 2007. Water Chemistry. Printing House Ubon Ratchathani University, Ubonratchathani. (in Thai)
- [3] Bruggen, Bart Van der and Carlo Vandecasteele. 2003. Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry. Environ Pollut. 122: 435-44.
- [4] Conteras, A.E., Albert Kimb and Qilin lia. 2009. Combined fouling of nanofiltration membranes: Mechanisms and effect of organic matter. J Membrane Sci. 327: 87-95.
- [5] Listiarini, K., Darren, D. S. and James, O. L. 2009. Organic fouling of nanofiltration membranes: Evaluating the effects of humic acid, calcium, alum coagulant and their combinations on the specific cake resistance. J Membrane Sci. 332: 56-62.
- [6] Siddiqui, M., Amy, G.L., Ryan, J. and Odem, W. 2000. Membranes for the control of natural organic matter from surface waters. Water Res. 34: 3355-3370.
- [7] Tu, S., Varadarajan, R. and Massoud, P. 2005. A pore diffusion transport model for forecasting the performance of membrane processes. J Membrane Sci. 265: 29-50.
- [8] Vrouwenvelder, J. and et al. 2003. Tools for fouling diagnosis of NF and RO membranes and assessment of the fouling potential of feed water. Desalination. 157: 361-365.
- [9] Vrijenhoek, E.M., Hong, S. and Elimelech, M. 2001. Influence of membrane surface properties on initial rate of colloidal fouling of reverse osmosis and nanofiltration membranes. J Membrane Sci. 188: 115-128.
- [10] Jarusutthirak, C., Mattaraj, S. and Jiraratananon, R. 2007. Factors affecting nanofiltration performances in natural organic matter rejection and flux decline. Sep Purif Technol. 58: 68-75.
- [11] Allgeier, S.C. and Summers, R.S. 1996. Evaluating NF for BDP control with the RBSMT. J AWWA. 87: 87-99.
- [12] Mattaraj, S. and Kilduff, J. E. Effect of natural organic matter properties on nanofiltration fouling. RSID 4<sup>th</sup>. Proceeding of the forth Regional Symposium on Infrastructure

- Development in Civil Engineering, Bangkok, Thailand, on April 3-5, 2003.
- [13] Kilduff, J.E., Mattaraj, S. and Pieracci, J.P., Belfort, G. 2000. Photochemical modification of polyether sulfone and sulfonated polysulfone nanofiltration membranes for control of fouling by natural organic matter. *Desalination*. 132: 133-142.
- [14] 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: 283-298.