

ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน

Removal Performance of Phosphate and Natural Organic Matter Using

Nanofiltration Membrane

อภิญญา อ่อนสาร, สุพัฒน์พงษ์ มัตราจ*, วิภาดา เดชะปัญญา, กรรณิกา รัตนพงษ์เสนา, เทียมมะณีรัตน์วีระพันธ์ และ
สมภพ สนองราษฎร์¹

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมืองศรีโค ไวรินชำราบ อุบลราชธานี 34190
Apinya Onsarn, Supatpong Mattaraj*, Wipada Dechapanya, Karnika Ratanapongleka, Tiammanee Rattanaweerapan
and Sompop Sanongraj

Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Mueang Si Khai, Warin
Chamrap, Ubon Ratchathani, 34190, Thailand

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

Received: May 03, 2022; Revised: Sep 23, 2022; Accepted: Nov 11, 2022

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการหาประสิทธิภาพการกำจัดของฟอสเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน ซึ่งแผ่นเยื่อกรองเชิงการค้าที่ใช้ได้จาก GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040HM การทดลองเป็นการกรองภายใต้ชุดทดสอบการไหลปิดตายตามแนวตั้ง โดยฟอสเฟตที่ใช้ในงานวิจัยคือ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และ โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต น้ำตัวอย่างถูกเตรียมด้วยความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 mg/L ความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M และค่าสารละลายพีเอชเท่ากับ 7.04 ขณะที่ความดันของเยื่อกรองในการดำเนินระบบเท่ากับ 60 psig จากการศึกษาพบว่า ฟอสเฟตต่างชนิดกันที่มีความเข้มข้น 10 mg/L ให้ค่าการลดลงของฟลักซ์ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนผลร่วมระหว่างฟอสเฟตในสารละลายและสารอินทรีย์ธรรมชาติส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์สูงกว่าสารละลายฟอสเฟตเพียงอย่างเดียว ค่าการซึมผ่านของเยื่อกรองแบบนาโนก่อนการใช้งาน มีค่าเท่ากับ 0.378 LMH.psig⁻¹ ค่าการซึมผ่านของเยื่อกรองหลังจากการใช้งานพร้อมกับทำความสะอาดด้วยกรดซิตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.312 LMH.psig⁻¹ และ 0.357 LMH.psig⁻¹ สอดคล้องกับอัตราส่วนของค่าการซึมผ่านเยื่อกรองร้อยละ 82.5 และ 94.4 ตามลำดับ

คำสำคัญ: เยื่อกรองแบบนาโน, ฟอสเฟต, สารอินทรีย์ธรรมชาติ, การลดลงของฟลักซ์

Abstract

The objective of this research was to determine the removal performance of phosphate and natural organic matter (NOM) using nanofiltration 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. Phosphates applied in this research were disodium hydrogen phosphate and monopotassium phosphate. Water samples were prepared with NOM concentration of 10 mg/L, ionic strength of 0.01 M, and pH solution of 7.04, while the membrane pressure was operated at 60 psig. Experimental results found that the different phosphates in 10-mg/L solution provided similar flux declines. Combined phosphate and NOM solutions showed greater flux decline than those of phosphate solutions alone. The permeability (L_{p0}) of nanofiltration membrane prior to use

was 0.378 LMH.psig⁻¹. The membrane permeabilities (L_p) after used with acetic acid and NaOH cleaning were 0.312 LMH.psig⁻¹ and 0.357 LMH.psig⁻¹. This corresponded the ratio of membrane permeability (L_p/L_{p0}) about 82.5% and 94.4%, respectively.

Keywords: Nanofiltration Membrane, Phosphate, Natural Organic Matter, Flux decline

1. บทนำ

ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) จัดเป็นธาตุอาหารชนิดหนึ่งที่เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดมลพิษในแหล่งน้ำ เพราะเป็นส่วนสำคัญของจุดเริ่มต้นของสายใยอาหาร (Food webs) และเป็นแหล่งอาหารของพืชน้ำหลายชนิดตามธรรมชาติ โดยเฉพาะสาหร่าย (Algae) และแพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) แต่การเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่มากเกินไปจนเป็นในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ทำให้สูญเสียภาวะสมดุลของสิ่งมีชีวิตในน้ำที่เป็นสาเหตุของปัญหาน้ำเน่าเสียหรือมลพิษทางน้ำ ซึ่งตัวอย่างการปล่อยฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำที่มีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสในรูปเกลือฟอสเฟต (Phosphate; PO_4^{3-}) ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมหุบกเคลือบ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น นอกจากนี้ยังเกิดจากกิจกรรมในครัวเรือน เช่น จากการซักล้าง การใช้ปุ๋ยเคมีจากกลุ่มของเกษตรกร รวมถึงการทำฟาร์มปศุสัตว์ เป็นต้น [1] ซึ่งผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการผลิตและจากกิจกรรมที่ใช้ในครัวเรือนนี้ สารเคมีดังกล่าวจะถูกชะล้างและปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ส่งผลให้น้ำเกิดความกระด้างรวมทั้งคุณสมบัติของน้ำเป็นด่าง ส่งผลต่อการนำไปใช้ไม่เต็มที่เท่าที่ควร นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสภาพสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เช่น ทางทะเลทรายไม่เหมาะสมสำหรับพืชหลายชนิด รวมไปถึงการเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น [2] เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดผลกระทบดังกล่าว ทางสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. Environmental Protection Agency; U.S.EPA) ได้กำหนดให้มีฟอสฟอรัสได้สูงสุดไม่เกิน 0.05 mg/L (0.15 mg- PO_4^{3-} /L) [3]

การกำจัดฟอสเฟตออกจากน้ำเสีย โดยปกติแล้วจะมีอยู่ 2 วิธีการหลัก ได้แก่ การตกตะกอนทางกายภาพหรือเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งวิธีการทั้งสอง ยังคงมีข้อเสียหรือข้อจำกัดบางประการ เช่น ในการตกตะกอน

ของสารเคมี มีปริมาณสารเคมีที่สูงขึ้น มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ การบำรุงรักษา และปัญหาที่เกี่ยวกับการกำจัด เช่น กากตะกอนที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการกำจัด ส่วนกระบวนการทางชีวภาพ ใช้ระยะเวลาในการบำรุงรักษาที่สูง รวมถึงต้องการพื้นที่ขนาดใหญ่ และจากที่กล่าวมาวิธีการทั้งสองนั้น สามารถผลิตน้ำทิ้งได้ในปริมาณที่น้อยกว่า 0.5 mg/L P. [4] กระบวนการเยื่อกรอง (Membrane Process) เป็นอีกหนึ่งวิธีสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง ที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ใช้พื้นที่น้อย มีกระบวนการทำงานที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการควบคุม และมีกากตะกอนที่เกิดขึ้นน้อยหรือไม่มีเลย ดังนั้น กระบวนการเยื่อกรอง (Membrane Process) เป็นอีกหนึ่งวิธีสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง ที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงและสามารถปรับปรุงน้ำธรรมชาติที่ผ่านการบำบัดแล้วให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ [5] โดยที่เยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane) เป็นวิธีการกรองเพื่อใช้สำหรับผลิตน้ำสะอาด รวมถึงใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งสามารถกักกันสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก แบคทีเรีย จุลินทรีย์ รวมถึงเกลืออนินทรีย์บางชนิดได้ [6] น้ำที่ได้จึงเป็นน้ำที่มีคุณภาพดีสามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิต อุตสาหกรรมและการเกษตร รวมถึงการใช้เยื่อกรองแบบนาโนยังลดการใช้พลังงานและลดการใช้สารเคมีอินทรีย์ได้อีกด้วย [7] ซึ่งจากรายงานการศึกษา [8] พบว่าทางเลือกที่ดีอีกหนึ่งวิธีสำหรับกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำคือการใช้กระบวนการกรองผ่านเยื่อกรองแบบนาโน เนื่องจากพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงและได้ผลผลิตของน้ำสูง อีกทั้งยังมีข้อได้เปรียบในแง่ของการนำเยื่อกรองกลับมาใช้ซ้ำ รวมถึงสามารถดำเนินระบบได้ต่อเนื่อง มีอายุการใช้งานของเยื่อกรองที่ยาวนานและไม่ต้องควบคุมการปรับสภาพน้ำเสียก่อนเข้าระบบ หรือควบคุมเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีการใช้เยื่อกรองแบบนาโนในการกำจัดโมเลกุลขนาดใหญ่ รวมถึงไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากับ

2 และวาเลนซีตั้งแต่ 2 ขึ้นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาการใช้เยื่อกรองแบบนาโนกำจัดไอออนวาเลนซีเท่ากับ 2 พบว่า มีค่าการกำจัดมากกว่า 95% สำหรับการกำจัดสารจำพวก SO_4^{2-} , Ba^{2+} , Ca^{2+} และ Mg^{2+} [9] อย่างไรก็ตามในธรรมชาติโดยทั่วไปนอกจากพบการเจือปนของฟอสเฟตในรูปแบบต่างๆ ยังสามารถพบสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter; NOM) ที่เกิดจากซากผลิตภัณฑ์ของพืชในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ประกอบด้วย คาร์บอนออกซิเจน และไฮโดรเจนเป็นหลัก ซึ่งมีส่วนประกอบของสารลิกนิน (Lignin) เป็นส่วนประกอบในการย่อยสลายเกิดเป็นสารแทนนิน (Tannin) สารประกอบฮิวมิก (Humic) และฟลูวิก (Fulvic) ส่วนใหญ่พบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าไม่เกิน 10 mg/l และมีขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ (MWCO) ในช่วง 300 ถึง 30,000 ดาลตัน [10] โดยผลกระทบหลักที่เกิดจากสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีการเติมคลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อ (Disinfection) ซึ่งคลอรีนจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ธรรมชาติและเกิดสารพลอยได้จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection By-Products; DBPs) เช่น ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes; THMs) และกรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic acids; HAAs) จากข้อมูลนี้จึงทำให้ทาง U.S.PEA สรุปไว้ว่าสารดังกล่าวเป็นปัจจัยที่อาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ [11] จากงานวิจัยของ [12] เยื่อกรองแบบนาโนสามารถกำจัดอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon; TOC) ได้สูงถึง 90 ถึง 95% กำจัดไอออนประจุเดี่ยวได้ประมาณ 70% กำจัดสารไตรฮาโลมีเทน 91 ถึง 98% กำจัดความกระด้างของน้ำที่มีแคลเซียมกับแมกนีเซียม 85 ถึง 95% [13–15] สำหรับปัญหาหลัก ๆ ที่พบจากการใช้เยื่อกรองแบบนาโนกับสารอินทรีย์ธรรมชาติคือการอุดตันบนพื้นผิวของเยื่อกรอง (Membrane Fouling) โดยการอุดตันของเยื่อกรองสามารถเกิดได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การเกิดปรากฏการณ์คอนเซนตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization) การเกิดชั้นเค้ก (Cake Formation) การเกิดชั้นเจล (Gel Layer) เป็นต้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อกรองจากงานวิจัยของ [16] ศึกษาไอออนประจุบวก (+1 และ +2)

ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าเกิดการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโนส่งผลต่อการลดลงของอัตราการไหลของเยื่อกรอง จากผลการศึกษาข้างต้นจึงคาดว่าหากมีการรวมตัวกันระหว่างไอออนประจุบวก และสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งส่วนใหญ่มีประจุเป็นลบ อาจทำให้เกิดการรวมตัวกันของสารดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการอุดตันบนพื้นผิวเยื่อกรองแบบนาโนโดยสามารถเกิดการอุดตันได้ในหลากหลายลักษณะ เช่น การเกิดตะกอน ของสารอนินทรีย์บนพื้นผิวเยื่อกรอง หรือการทำหน้าที่เป็นสะพาน (Bridging effects) ระหว่างผิวเยื่อกรองและสารอินทรีย์ทำให้เกิดชั้นเค้กเกิดขึ้นที่ผิวเยื่อกรอง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจึงต้องทำการควบคุมความเข้มข้นของสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ของน้ำตัวอย่าง นอกจากนี้การล้างแผ่นเยื่อกรองหลังจากการใช้งานด้วยกรดและด่าง ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านเยื่อกรองกลับมาใกล้เคียงกับค่าการใช้งานเริ่มต้น ทำให้ยืดอายุการใช้งานของเยื่อกรองให้ยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฟอสเฟตโดยนาโนฟิลเตรชัน โดยส่วนใหญ่ศึกษาผลที่เกิดจากค่าพีเอช ความดัน ความเข้มข้นสารละลายรูปแบบการอุดตันที่เกิดขึ้น ตลอดจนเปรียบเทียบเยื่อกรองนาโนเกรดการค้าและการดัดแปลง ที่มีต่อการกำจัด แต่ยังคงขาดการวิจัยหรือมีส่วนน้อยที่วิจัยเกี่ยวข้องกับการรวมกันของฟอสเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ที่แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดและการลดลงของฟลักซ์จากการรวมตัวกันของสารดังกล่าว

งานวิจัยนี้จะเน้นการกำจัดสารฟอสเฟตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนที่พบค่อนข้างเยอะในปัจจุบัน ซึ่งปริมาณการปนเปื้อนที่เกิดจากอุตสาหกรรมคิดเป็นร้อยละ 30–50 ส่วนจากบ้านเรือน/กิจกรรมของเสียของมนุษย์ คิดเป็นร้อยละ 50–70 [17] และสารอินทรีย์ธรรมชาติที่สามารถพบได้ตามสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป ซึ่งมีความเข้มข้นในช่วง 10 mg/L

ดังนั้นการศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต และสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยเยื่อกรองแบบนาโน ภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษา ได้แก่ ผลของความเข้มข้นของฟอสเฟต ค่าความแรงประจุของฟอสเฟต

(ในรูปของ Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4) ผลของสารผสมร่วมระหว่างฟอสเฟต (ในรูปของ Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4) กับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ประสิทธิภาพของเยื่อกรองแบบนาโนวัดได้จากการกำจัดของฟอสเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติ รวมทั้งการลดลงของฟลักซ์ระหว่างการทดสอบ ผลการทดลองจะนำไปวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ รวมถึงการประยุกต์ใช้เยื่อกรองแบบนาโนให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น จากการอ้างอิงสถานะจริงที่อาจเป็นไปได้จากการเจือปนของสารต่างๆ ในสภาพแวดล้อมโดยทั่วไป พร้อมทั้งการประยุกต์หรือใช้เป็นแนวทางในการกำจัดในงานอื่นทางด้านสิ่งแวดล้อมต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. สารเคมี

สารเคมีที่ใช้เช่น สารที่เป็นตัวแทนกลุ่มฟอสเฟตมี 2 ชนิด ได้แก่ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) และ โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (KH_2PO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 36% (Analytical reagent, Ajax Finechem Pty Ltd.) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Analytical univar reagent, Ajax Finechem Pty Ltd.) โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (Analytical univar reagent, APS Finechem.) กรดซिटริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{H}_2\text{O}$) (Analytical reagent; BDH.)

2.2. การเตรียมสารประกอบฟอสเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติ

การเตรียมฟอสเฟตจาก Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 โดยทำการชั่ง Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 เท่ากับ 0.458 g และ 0.439 g ตามลำดับ จากนั้นละลายในน้ำปราศจากประจุและเจือจางให้เป็น 1000 mL ซึ่งสารละลายนี้มีความเข้มข้นของฟอสเฟตเท่ากับ 100 mg/L P.

สารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) ได้จากแหล่งน้ำผิวดินธรรมชาติบริเวณภายในมหาวิทยาลัย โดยมีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 4.45 mg/L ค่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่น 254 nm ที่ 0.185 1/cm ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ 31.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.04 โดยนำน้ำดังกล่าวมาปริมาตร 1,500 L ทำการแยกสารอินทรีย์คาร์บอนด้วยกระบวนการกรองแบบออสโมซิสผันกลับ

(Reverse Osmosis Membrane) จนได้สารอินทรีย์คาร์บอนเข้มข้นหรือส่วนที่ไม่ผ่านเยื่อกรองซึ่งเป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นปริมาตรเท่ากับ 30 L จากนั้นนำสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าวมาใส่ในภาชนะที่ปิดสนิทและแช่ภายใต้อุณหภูมิ 4°C เพื่อเก็บรักษาสภาพสารอินทรีย์คาร์บอนเข้มข้นให้อยู่ในสภาวะพร้อมใช้งานสำหรับเตรียมความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตัวอย่างในการทดสอบด้วยเยื่อกรองแบบนาโนในขั้นต่อไป

2.3. การเตรียมเยื่อกรองแบบนาโน

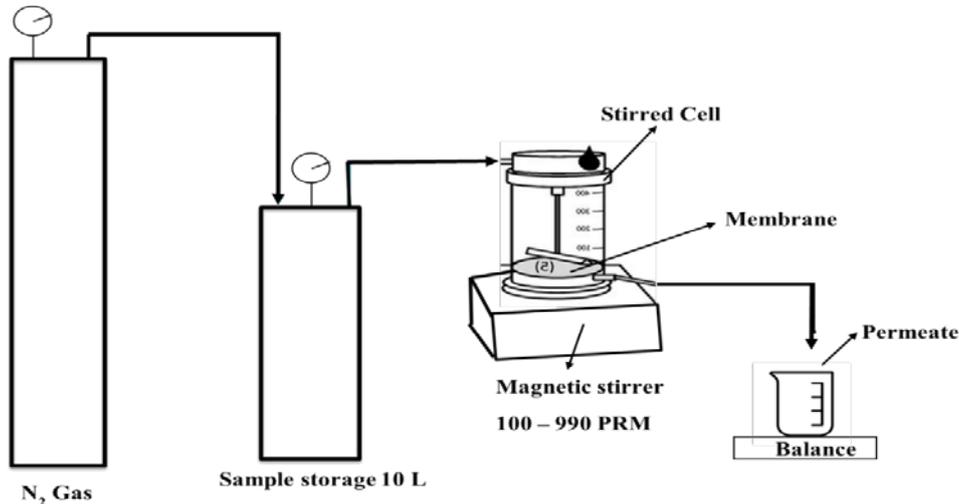
เยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration Membrane) จากบริษัท GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040FM ซึ่งเป็นเยื่อกรองเชิงการค้า มีคุณสมบัติคือ เป็นเยื่อกรองแบบ Thin Film Membrane ผลิตจาก Polyamide มีขนาดรูพรุนในช่วง 150–300 Da การกำจัดเกลือ MgSO_4 อยู่ที่ระดับ 98% ที่ 100 psig ช่วงพีเอชดำเนินการในช่วง 3–9 และช่วงพีเอชของการทำความสะอาดอยู่ที่ 2–10.5 มีความทนทานต่อคลอรีน <0.1 ppm ความดันของการดำเนินการอยู่ที่ 70–300 psig และความดันสูงสุดที่ทนได้คือ 600 psig สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้วจะถูกเก็บรักษาโดยการนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ความเข้มข้น 1% ที่ความเย็นอุณหภูมิ 4°C เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่จะทำลายพื้นผิวของแผ่นเยื่อกรอง

2.4. ชุดทดสอบเยื่อกรองแบบนาโน

รูปที่ 1 แสดงการทำงานชุดทดสอบเยื่อกรองแบบนาโน โดยการทดสอบเป็นแบบการไหลปิดตายตามแนวตั้ง (Dead-End Operation) เป็นชุดทดสอบที่มีการใช้งานมาก่อน โดย Wu et al. [16] โดยมี Stirred Cell ขนาด 400 mL ที่สามารถทนแรงดันได้สูงสุด 75 psig ซึ่งภายในบรรจุใบกวนติดตั้งอยู่บนแท่น โดยอาศัยการกวนแบบแม่เหล็กขับเคลื่อน (Magnetic stirrer) ที่มีความเร็วรอบ 100–990 rpm แผ่นเยื่อกรองแบบนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร ถูกติดตั้งอยู่ใน Stirred Cell ถังใส่น้ำตัวอย่างทำจากเหล็กสแตนเลสที่มีขนาด 10 L และมีเกจวัดความดันได้ตั้งแต่ 5–100 psig ต่อกับถังไนโตรเจนที่สามารถสร้างแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 100 psig เพื่อเพิ่มแรงดันให้กับชุดทดสอบการกรอง ขณะที่

ดำเนินระบบแรงดันจะดันน้ำตัวอย่างผ่านชุดการไหลปิดตาย ที่มีแผ่นเยื่อกรองภายใน และเกิดการไหลของน้ำซึมผ่านแผ่นเยื่อกรองจากชุดทดสอบไปยังภาชนะเก็บตัวอย่าง โดยใช้ปั๊ม

เกอร์ขนาด 500 mL ซึ่งตั้งอยู่บนเครื่องชั่ง Metler Teledo รุ่น PB3002-S ในการวัดค่าน้ำหนัก โดยเครื่องชั่งมีความละเอียดสองตำแหน่งหรืออ่านค่าความละเอียดได้ 0.01 g



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานชุดทดสอบเยื่อกรองแบบนาโน

2.5. ขั้นตอนการทดสอบ

แผ่นเยื่อกรองแบบนาโนถูกล้างด้วยน้ำกลั่นและทำการติดตั้งกับชุดทดสอบเยื่อกรองแบบนาโน จากนั้นทำการล้างเยื่อกรองผ่านระบบชุดทดสอบเยื่อกรอง โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.001 M เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น จากนั้นล้างต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.001 M เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างออกอีกครั้งด้วยน้ำกลั่นจนค่าพีเอชใกล้เคียงกับน้ำกลั่น หลังจากนั้นก็ล้างทำความสะอาดเยื่อกรองตามกระบวนการข้างต้นเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้เดินระบบด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 30 นาที เพื่อทดสอบการอุดตันของแผ่นกรองในระบบซึ่งเป็นการเตรียมความพร้อมก่อนการทดลองน้ำตัวอย่างจริง โดยในระหว่างนี้จะวัดค่าอัตราการไหลเทียบกับความดัน เพื่อคำนวณค่าฟลักซ์ตามความดันระดับต่าง ๆ เพื่อนำข้อมูลข้างต้นไปใช้สำหรับวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างค่าฟลักซ์ก่อนและหลังล้างเยื่อกรองที่ผ่านการกรองจากน้ำตัวอย่างมาแล้ว

น้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกฟีดสู่ระบบและเริ่มต้นการทดลอง ทำการเก็บน้ำตัวอย่างในส่วนที่ผ่านเยื่อกรอง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดของฟอสเฟตและค่า

การนำไฟฟ้าในทุกๆ 10 นาที จนครบ 60 นาที และทุกๆ 30 นาที จนครบ 240 นาที การวิเคราะห์ค่าการกำจัดฟอสเฟตโดยวัดค่าดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 420 nm และค่าการนำไฟฟ้า สำหรับการคำนวณค่าฟลักซ์สารละลายจากการเก็บปริมาตรตัวอย่างต่อนาทีในส่วนของน้ำที่ไหลผ่านเยื่อกรองหารด้วยพื้นที่การกรอง โดยจะวัดอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างตั้งแต่เวลาที่ 0 ถึง 240 นาที โดยแบ่งเป็นการเก็บน้ำตัวอย่างทุก 5 นาที จนครบ 60 นาที จากนั้นจะเก็บทุก 10 นาที จนครบ 180 นาที หลังจาก 180 นาทีเป็นต้นไปจะเก็บทุก 20 นาที จนถึง 240 นาที

2.6. สมการที่ใช้ในการศึกษา

ค่าฟลักซ์สารละลาย หรือ Solution Flux; J_v สามารถได้จากอัตราการไหลผ่านเยื่อกรอง (Q_p) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของเยื่อกรอง (A_m) แสดงในหน่วย LMH ($L/(m^2 \cdot h)$) ซึ่งถูกแสดงดังสมการที่ (1) และค่าการกักกัน (Rejection; R) แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดของฟอสเฟตและค่าการนำไฟฟ้า โดยสมการแสดงได้ดังสมการที่ (2) [18]

ฟลักซ์สารละลาย (Solution Flux; J_v) แสดงได้ดังนี้

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

เมื่อ L_p คือ ค่าการซึมผ่านของเยื่อกรอง (ความชันกราฟระหว่างฟลักซ์และความดัน) [$LHM.kPa^{-1}$, $LMH.psig^{-1}$]

ΔP คือ ความดันในการดำเนินระบบ kPa หรือ psig

σ คือ สัมประสิทธิ์แรงดันออสโมติก (-)

$\Delta \pi$ คือ แรงดันออสโมติก (kPa หรือ psig)

Q_p คือ อัตราการไหลในส่วนของเพอมีเอท (น้ำที่ผ่านเยื่อกรอง) (L/h)

A_m คือ พื้นที่หน้าตัดของเยื่อกรอง (m^2)

ค่าการกักกัน (Rejection; R) แสดงดังสมการที่ (2)

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

เมื่อ C_p คือ ความเข้มข้นของน้ำในส่วนเพอมีเอท (mg/L)

C_r คือ ความเข้มข้นในส่วนของน้ำรีเทนเทท (mg/L)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1. คุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของน้ำตัวอย่าง

น้ำตัวอย่างที่เก็บตัวอย่างจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี เป็นแหล่งน้ำดิบที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติอยู่ นำมาผ่านกระบวนการแยกสารอินทรีย์ด้วยเยื่อกรองแบบออสโมซิสผกกลับ (Reverse Osmosis System) เพื่อแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติจากแหล่งน้ำดิบทำให้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ตารางที่ 1 แสดงคุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของน้ำตัวอย่างที่ใช้แยกสารอินทรีย์ธรรมชาติ

ตารางที่ 1 คุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของน้ำตัวอย่างที่ใช้แยกสารอินทรีย์ธรรมชาติ

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้
พีเอช	7.04
สารคาร์บอนทั้งหมด (Total Organic carbon)	4.54 mg.L ⁻¹
ค่าดูดกลืนแสง UV _{254 nm} (UV Absorbance)	0.185 cm ⁻¹
ค่าดูดกลืนแสงจำเพาะ (Specific UVA (UV ₂₅₄ /TOC))	4.07 L.mg ⁻¹ .m ⁻¹
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่อุณหภูมิ 25 °C	31.9 μS.cm ³
ความขุ่น (Turbidity)	6.58 NTU
ความกระด้าง (Hardness)	15 mg as CaCO ₃ /L
ความเป็นด่าง (Alkalinity) i.e. HCO ₃ ⁻	8 mg as CaCO ₃ /L

จากตารางที่ 1 พบว่าความเข้มข้นของอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) มีค่าเท่ากับ 4.54 mg.L⁻¹ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถพบได้ตามแหล่งน้ำในธรรมชาติโดยทั่วไป โดยค่าความเข้มข้นของอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดตามแหล่งน้ำนั้นๆ อยู่ในช่วงกว้างประมาณ 1–27 mg.L⁻¹ [19] ค่าดูดกลืนแสงยูวีที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 254 nm ซึ่งบอกถึงพันธะคู่ของคาร์บอนที่มีอยู่ภายในโครงสร้างของสารอินทรีย์ธรรมชาติ สำหรับค่าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 0.185 cm⁻¹ โดยที่ค่าดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่าของอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เมื่อนำมาทำการเปรียบเทียบกับค่าดูดกลืนแสงจำเพาะ (Specific Ultraviolet Absorbance; SUVA) ได้แก่อัตราส่วนระหว่าง

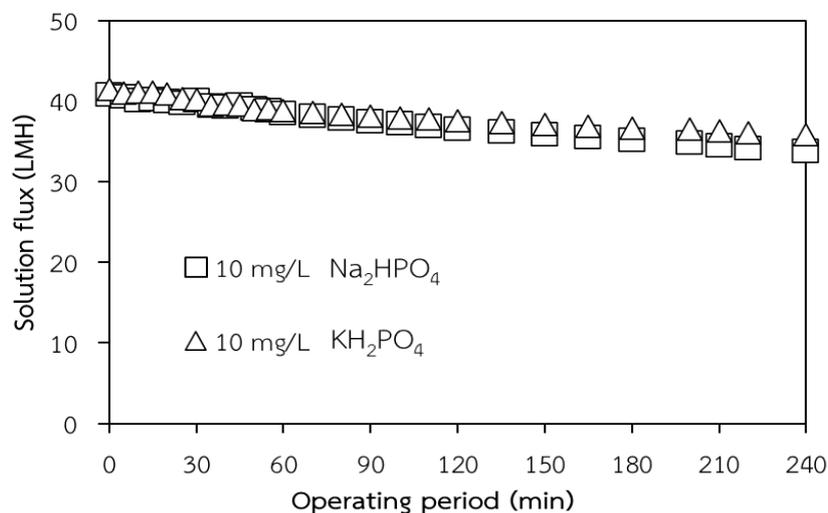
ค่าดูดกลืนแสงต่อปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (UV_{254 nm}/TOC) และค่า SUVA บ่งบอกถึงคุณสมบัติไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ของน้ำตัวอย่างนั้นๆ โดยที่ค่า SUVA ที่สูงแสดงถึงสภาพแหล่งน้ำธรรมชาติ นั้นมีสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) มาก [20] ค่าที่วัดได้จากแหล่งน้ำธรรมชาติที่ใช้ในการทดลองมีค่า SUVA เท่ากับ 4.07 L.mg⁻¹.m⁻¹ แสดงให้เห็นว่าน้ำตัวอย่างมีปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ค่อนข้างสูง ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างวัดได้เท่ากับ 31.9 μS.cm⁻¹ แสดงถึงองค์ประกอบของไอออนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำธรรมชาติที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่าต่ำ สอดคล้องกับค่า

ความกระด้างที่วัดได้มีค่าน้อย คือ 15 mg as CaCO_3/L และมีค่าความเป็นด่างอยู่ที่ 8 mg as CaCO_3/L และค่าความขุ่นของน้ำที่สามารถวัดได้มีค่า 6.58 NTU ซึ่งน้ำที่ใสจะมีค่าความขุ่นไม่เกิน 25 NTU ส่วนค่าพีเอชของแหล่งน้ำที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 7.04 ซึ่งโดยปกติแล้วในแหล่งน้ำตามธรรมชาติทั่วไป จะพบค่าพีเอชที่เป็นกลางและส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 6.5–8.5

3.2.ผลของไอออนบวก

ไอออนประจุบวกที่พบได้โดยทั่วไปในแหล่งน้ำคือ โซเดียม (Na^+) และโพแทสเซียม (K^+) ซึ่งจะมีผลต่อการลดลงของฟลักซ์สำหรับการกรองน้ำด้วยระบบเยื่อกรองแบบนาโน ในรูปที่ 2 แสดงถึงผลของประจุบวกต่างชนิดกันที่รวมตัวกับฟอสเฟตส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ ได้แก่ Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ที่ความเข้มข้น 10 mg/L มีความแรงของประจุอยู่ในช่วง 0.01 M พีเอชเป็น 7.04 ดินระบบที่ความดัน 60 psig พบว่าค่าฟลักซ์สารละลายมีแนวโน้มลดลงระหว่างการกรอง อย่างไรก็ตามตลอดการทดลองสารละลายฟอสเฟตจาก Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 มีค่าการลดลงของฟลักซ์ที่แตกต่างกันเล็กน้อย และสาเหตุที่

ทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มลดลงเมื่อระยะเวลาการกรองที่เพิ่มขึ้น โดยอาจเกิดจากการทดลองที่เป็นแบบ Dead-end ซึ่งโดยปกติแล้ว เมื่อดำเนินระบบจนถึงช่วงเวลาหนึ่ง ความเข้มข้นของสารละลายต่างๆจะเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ จึงส่งผลให้ค่าฟลักซ์และประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งโซเดียมและโพแทสเซียมที่ถูกกักกันโดยเยื่อกรองแบบนาโน ทำให้ความเข้มข้นโซเดียมและโพแทสเซียมถูกสะสมบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยปรากฏการณ์ Concentration polarization; CP ซึ่งการสะสมความเข้มข้นที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เพิ่มความต้านทานของระบบส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ [21] และนอกจากนี้สารที่อยู่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองส่งผลให้ความต้านทานการไหลเพิ่มและทำให้ค่าแรงดันออสโมติก ($\Delta\pi$) เพิ่มสูงขึ้น แต่ในระบบมีการควบคุมความดันดำเนินงานระบบ (ΔP) ให้คงที่ตลอดการทดลอง จึงทำให้ค่าของแรงดันที่สามารถเอาชนะแรงดันออสโมติก ($\Delta P - \sigma\Delta\pi$) ที่เกิดจากการสะสมตัวของสารละลายฟอสเฟตมีค่าที่ต่ำลง จึงทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายที่ได้มีค่าลดลงไปด้วย



รูปที่ 2 ผลจากไอออนบวกของสารต่างชนิดกันต่อการลดลงของฟลักซ์ที่ความเข้มข้นฟอสเฟต 10 mg/L ค่าความแรงประจุในช่วง 0.01 M ที่พีเอช 7.04 ความดันในระบบ 60 psig

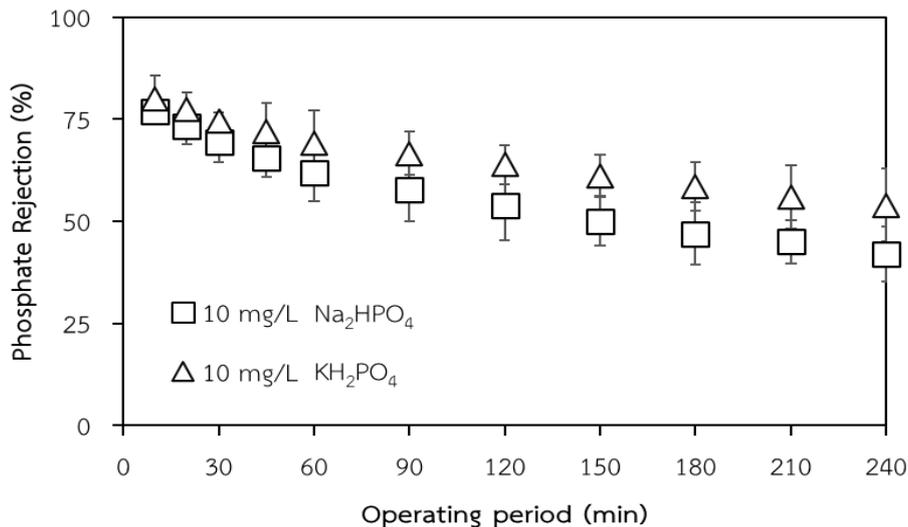
จากรูปที่ 3 แสดงถึงความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของไอออนบวกระหว่างสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 และแสดงค่าการกำจัดฟอสเฟตด้วยค่าดูดกลืนแสง

อัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 420 nm พบว่าค่าการกำจัดของสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการกรองที่เพิ่มขึ้น และพบว่าค่าการกำจัดฟอสเฟต

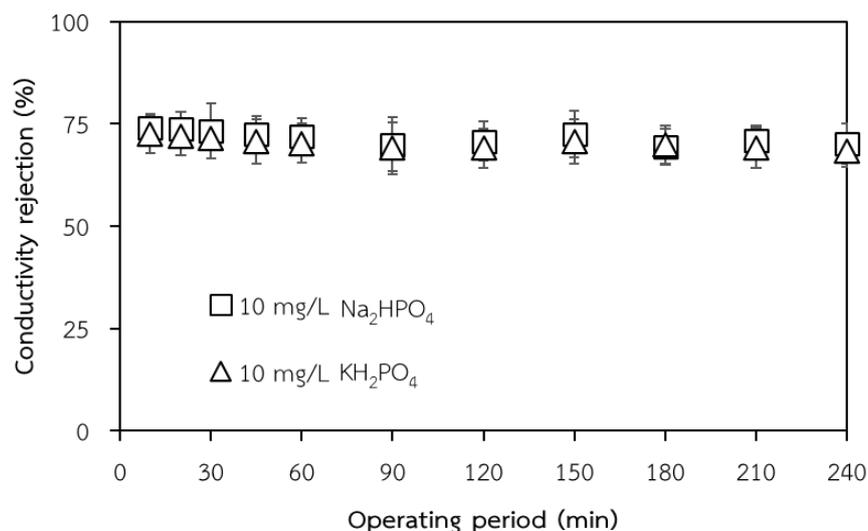
ระหว่างสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ให้ค่ากำจัดสูงสุดที่เวลา 10 นาทีแรกของการทดสอบ ซึ่งมีค่าการกำจัดฟอสเฟตร้อยละ 77.35 ± 3.41 และ 80.77 ± 2.28 ตามลำดับ และที่เวลา 240 นาที พบค่าการกำจัดฟอสเฟตคงเหลืออยู่ที่ร้อยละ 45.01 ± 3.95 และ 53.77 ± 2.27 ตามลำดับ เนื่องจากผลของความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นบนผิวเยื่อกรองทำให้สามารถซึมผ่านเยื่อกรองได้มากขึ้นและส่งผลให้ค่าการกำจัดลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการกำจัดฟอสเฟตของสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 พบว่าสารละลาย KH_2PO_4 ให้ค่าการกำจัดที่สูงกว่า Na_2HPO_4 เพียงเล็กน้อย (ไม่เกินร้อยละ 10) แนวโน้มที่ทำให้ค่าการกำจัดต่างกันไม่มากนัก อาจเป็นเพราะโซเดียมไอออนและโพแทสเซียมไอออนเป็นประจุบวกที่มีประจุไอออนเท่ากับบวกหนึ่ง (Monovalent Cation) เหมือนกัน โดยมีการควบคุมค่าความแรงประจุเท่ากัน จากงานวิจัยของ [22] ศึกษาสภาวะที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตโดยใช้สารละลาย H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} เยื่อกรองที่ใช้เป็นชนิดนาโนรุ่น NF200 มีรัศมีรูพรุนประมาณ 0.5 นาโนเมตร จากการศึกษาพบว่า เยื่อกรองนาโนมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตเท่ากับ 85% และ 96% ของ H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} ตามลำดับ และจากงานวิจัยของ [23] ได้ศึกษาการใช้เยื่อกรองชนิดนาโนเชิงการค้า ชนิด NF90

และแบบดัดแปลงโดยใช้ Polyelectrolyte เคลือบบนพื้นผิวในการกักสาร H_2PO_4^- พบว่าเยื่อกรองแบบนาโนที่มีการดัดแปลงมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึง 98% ฟลักซ์ของสารละลายเท่ากับ $2.4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ ที่ความดัน 4.8 bar ในขณะที่เยื่อกรองเชิงการค้า ให้ประสิทธิภาพการกำจัด 97% ฟลักซ์ของสารละลายเท่ากับ $1.2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ ที่ความดัน 4.8 bar

รูปที่ 4 แสดงถึงความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตที่ความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M และแสดงค่าการกำจัดสารละลายฟอสเฟตด้วยค่าการนำไฟฟ้าพบว่าที่เวลา 240 นาที มีค่าการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 70.19 ± 0.78 และ 68.41 ± 1.62 ของสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ตามลำดับ ซึ่งการกำจัดเกิดขึ้นเนื่องจากกลไกการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าที่เกิดจากแรงผลัทางไฟฟ้าของประจุที่ผิวหน้าเยื่อกรอง (Electrostatic repulsion) ไอออนประจุลบจากฟอสเฟตสามารถกำจัดได้โดยแรงผลัประจุลบจากเยื่อกรองแบบนาโน ส่วนไอออนประจุบวกสามารถถูกกำจัดจากแผ่นกรองโดยการรักษาสสมดุลประจุระหว่างประจุบวกกับประจุบนผิวของเยื่อกรองจึงทำให้สามารถกำจัดไอออนประจุบวกได้ ค่าการกำจัดการนำไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ไม่ลดลงมากระหว่างการกรองเมื่อเทียบกับค่าการกำจัดฟอสเฟต



รูปที่ 3 ผลจากไอออนบวกของสารต่างชนิดกันต่อการกำจัดฟอสเฟต โดยพิจารณาจากค่าดูกลืนแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 420 nm โดยมีความเข้มข้นฟอสเฟต 10 mg/L มีความแรงประจุในช่วง 0.01 M พีเอช 7.04 ความดันในระบบ 60 psig



รูปที่ 4 ผลจากไอออนบวกของสารต่างชนิดกันต่อการกำจัดฟอสเฟต โดยพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นฟอสเฟต 10 mg/L ความแรงประจุในช่วง 0.01 M พีเอช 7.04 ความดันในระบบ 60 psig

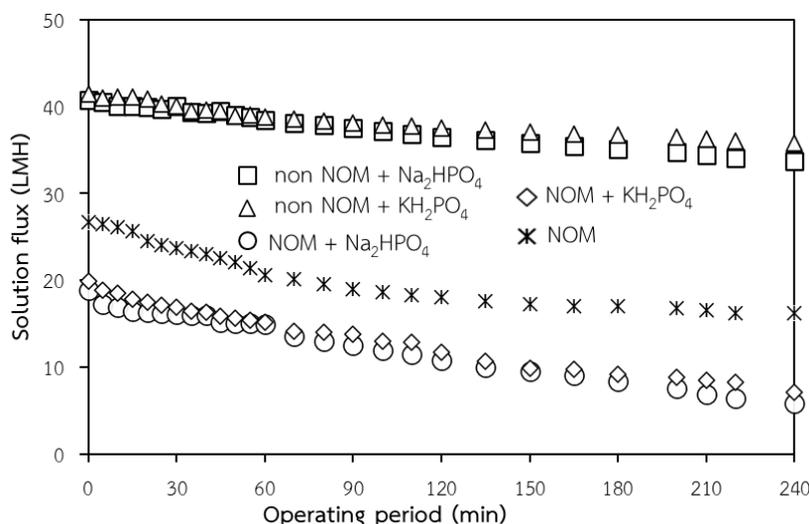
3.3.ผลร่วมของฟอสเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติ

รูปที่ 5 แสดงผลของฟอสเฟตต่างชนิดกันร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ โดยใช้ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติเท่ากับ 10 mg/L พีเอช อยู่ที่ 7.04 การใช้สารละลายฟอสเฟต Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ปรับให้ได้ค่าความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M การดำเนินระบบภายใต้ความดัน 60 psig จากผลการทดสอบพบว่าค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการกรองที่เพิ่มขึ้น กรณีที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยการใช้สารละลายฟอสเฟตต่างชนิดกันพบว่าให้ค่าฟลักซ์สารละลายที่ต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบที่เวลา 0 ถึง 240 นาที พบว่าสารละลายฟอสเฟตจาก Na_2HPO_4 ให้ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 41.50 LMH และที่เวลา 240 นาที ให้ค่าฟลักซ์สารละลายเท่ากับ 35.3 LMH ส่วนสารละลายฟอสเฟตจาก KH_2PO_4 ให้ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 40.80 LMH และที่เวลา 240 นาที ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าเท่ากับ 35.54 LMH ส่วนในกรณีที่มีเฉพาะสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 26.75 LMH และที่เวลา 240 นาที ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าเท่ากับ 16.21 LMH และในกรณีที่มีผลร่วมของฟอสเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติในระบบ พบว่าผลร่วมของสารละลาย Na_2HPO_4 กับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ให้ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 18.85 LMH

และที่เวลา 240 นาที ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าเท่ากับ 5.85 LMH ในขณะที่ผลร่วมของ KH_2PO_4 กับสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 19.82 LMH และที่เวลา 240 นาที ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าเท่ากับ 7.1 LMH จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ ค่าฟลักซ์สารละลายลดลงมากกว่าในกรณีที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติ เพราะนอกจากชนิดของสารละลายฟอสเฟตจะมีส่วนทำให้ค่าความดันออสโมติกของระบบสูงขึ้นระหว่างการกรอง และอาจจะมีการอุดตันรูพรุนของเยื่อกรองจากสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำร่วมอยู่ด้วย ทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายลดลงอย่างมาก โดยสารอินทรีย์ธรรมชาติมีส่วนทำให้เกิดการสะสมตัวของสารอินทรีย์บนผิวหน้าเยื่อกรอง และผลการทดสอบนี้สามารถอธิบายการยึดจับกันระหว่างประจุลบของสารฟอสเฟตกับประจุลบของสารอินทรีย์ธรรมชาติกับไอออนประจุบวก ซึ่งไอออนบวกนี้สามารถที่จะเกิดเป็นตัวเชื่อมระหว่างสารอินทรีย์ธรรมชาติกับเยื่อกรองแบบนาโนที่มีประจุเป็นลบที่เรียกว่ากลไกสะพานเชื่อม (Bridging Effect) โดยเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสะสมของสารอินทรีย์ธรรมชาติบนผิวหน้าเยื่อกรองน้ำ ทำให้การไหลผ่านเยื่อกรองได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าฟลักซ์สารละลายลดลงด้วยเช่นกัน จากงานวิจัยของ [24] ได้ศึกษาการรูปแบบการอุดตันด้วยเยื่อกรองชนิดนาโน ซึ่งศึกษาสาร

หลายชนิด เช่น CaCl_2 , CaCO_3 , CaSO_4 และ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L จากผลการศึกษาการลดลงของฟลักซ์ เมื่อเทียบกับฟลักซ์ตั้งต้น $(1 - J/J_0)$ มีค่าประมาณ 33.6%, 40%, 43% และ 51.1%

ของ Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} และ PO_4^{3-} ตามลำดับ การวิเคราะห์รูปแบบการอุดตันพบว่า CO_3^{2-} , SO_4^{2-} และ PO_4^{3-} มีการอุดตันเป็นแบบ Pore blocking ส่วน Cl^- มีการอุดตันเป็นแบบ Cake formation



รูปที่ 5 ผลของสารฟอสเฟตต่างชนิดกันร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการลดลงของฟลักซ์ ปรับค่าความแรงประจุด้วยฟอสเฟต เท่ากับ 0.01 M ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติเท่ากับ 10 mg/L พีเอช 7.04 ความดันในระบบ 60 psi

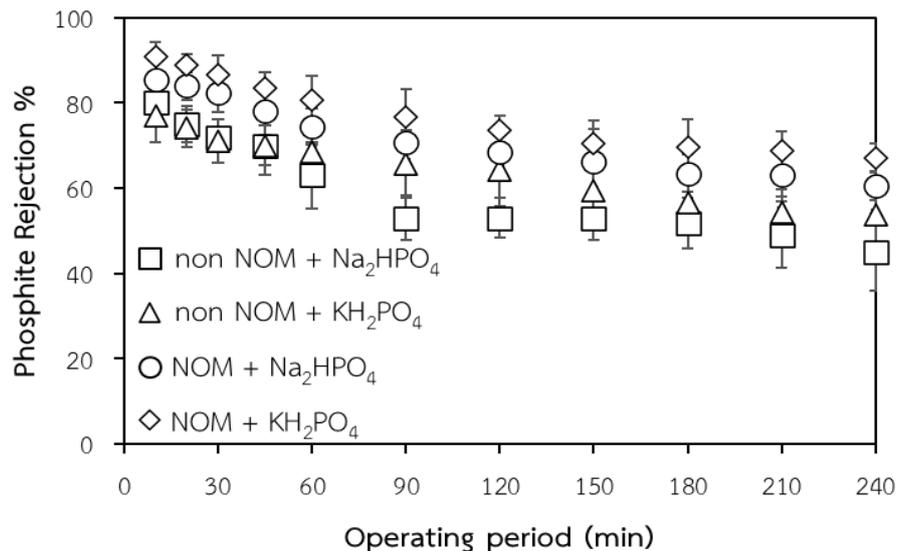
จากรูปที่ 6 แสดงถึงค่าการกำจัดฟอสเฟตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยความเข้มข้นของฟอสเฟตถูกปรับด้วย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ผลการทดสอบพบว่าในกรณีที่ไม่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติให้ค่าการกำจัดฟอสเฟตต่ำกว่าในกรณีที่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติในระบบ และเมื่อพิจารณาในกรณีที่ใช้เฉพาะสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ที่เวลา 240 นาที พบค่าการกำจัดฟอสเฟตร้อยละ 45.01 ± 3.97 และ 53.77 ± 3.21 ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่มีการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติพบว่าที่เวลา 240 นาที มีค่าการกำจัดฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60.92 ± 1.08 และ 67.07 ± 1.26 ของสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 ที่ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ตามลำดับ จากข้อมูลเบื้องต้นนอกจากจะทำให้ทราบเกี่ยวกับชนิดของสารละลายฟอสเฟตมีผลต่างกันเล็กน้อยต่อการกำจัดด้วยเยื่อกรองแบบนาโนแล้ว อาจเกิดการจับกันหรือรวมตัวกันระหว่างสารละลายฟอสเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ เนื่องจาก Na^+ และ K^+ มีไอออนประจุเป็นบวก ซึ่งสามารถจับกับ

สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ส่วนใหญ่มีประจุเป็นลบได้ ด้วยมูลเหตุข้างต้นจึงทำให้มีขนาดของอนุภาคสารใหญ่ขึ้น จนทำให้เยื่อกรองแบบนาโนสามารถกักสารดังกล่าวไว้ได้มากกว่าในกรณีที่มีเฉพาะสารละลาย Na_2HPO_4 และ KH_2PO_4 นั้นเอง ซึ่งโดยปกติแล้วการกำจัดของเยื่อกรองแบบนาโนเกิดจากกลไกการผลักกันของประจุและหลักการคัดขนาด (Size Exclusion) การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ด้วยเยื่อกรองแบบนาโนจะอาศัยหลักการคัดขนาดมากกว่ากลไกการผลักกันของประจุ (Chang Repulsion) [25] โดยที่ขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 6.5–22.6 kDa ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองทำให้สารอินทรีย์ธรรมชาติถูกกักกันโดยเยื่อกรองแบบนาโนได้ [26]

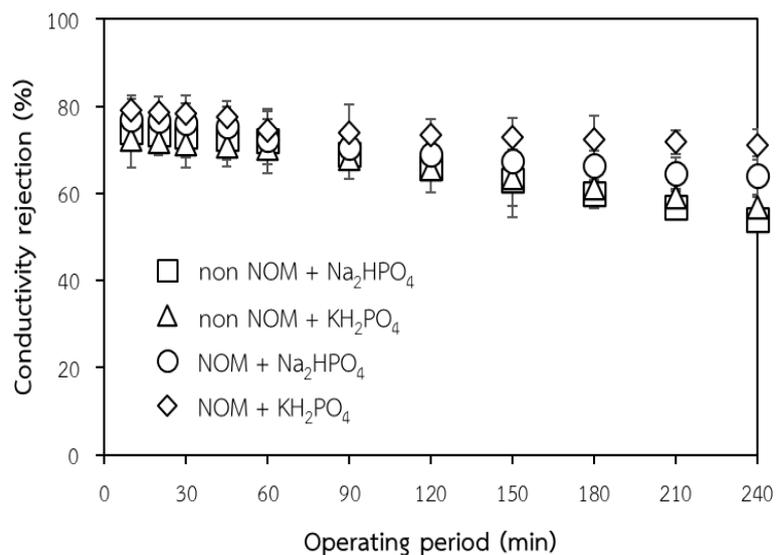
จากรูปที่ 7 แสดงถึงความสามารถในการกำจัด โดยพิจารณาค่าการกำจัดด้วยค่าการนำไฟฟ้า ความแรงประจุด้วยฟอสเฟตเท่ากับ 0.01 M ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ 10 mg/L พีเอช อยู่ที่ 7.04 ความดันในระบบ 60

psig ผลการทดสอบพบว่าค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้าในกรณีที่ไม่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติ และในกรณีที่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติพบว่าการใช้สารละลาย Na_2HPO_4 ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติให้ค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่าสารละลาย KH_2PO_4 ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยที่เวลา 240 นาที พบค่าการกำจัดร้อยละ 64.08 ± 2.46

และ 73.18 ± 2.17 ตามลำดับ และพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกับการกำจัดฟอสเฟต อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของโซเดียมจากสารละลาย Na_2HPO_4 ที่แตกตัวให้ความเข้มข้นของโมลของโซเดียม (Na^+) สามารถจับตัวกับประจุลบกับฟอสเฟตจากการรักษาประจุสมดุลประจุ ส่งผลให้เกิดความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองทำให้สามารถซึมผ่านเยื่อกรองได้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าการกำจัดลดลง



รูปที่ 6 ผลของสารฟอสเฟตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการกำจัดฟอสเฟตต่างชนิดกัน โดยพิจารณาจากค่าดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 420 nm ความแรงประจุฟอสเฟตที่ 0.01 M ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ 10 mg/L ค่าพีเอช 7.04 ความดันในระบบ 60 psig

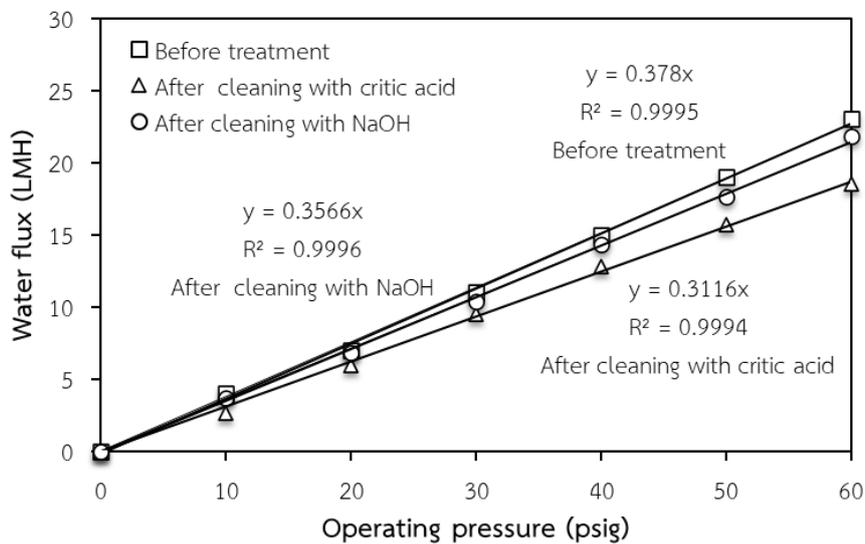


รูปที่ 7 ผลของสารฟอสเฟตต่างชนิดกันร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการกำจัดโดยพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า ที่ความแรงประจุฟอสเฟต 0.01 M ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ 10mg/L ค่าพีเอช 7.04 ความดันในระบบ 60 psig

3.4.ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และความดันก่อนและหลังทำความสะอาด

จากรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับความดันในการดำเนินระบบทั้งก่อนและหลังทำความสะอาด โดยที่เยื่อกรองแบบนาโนถูกทดสอบเพื่อหาฟลักซ์ของน้ำ Deionized water (DI) ซึ่งความดันที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 30 ถึง 60 psig สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่นำมาทดสอบเป็นแผ่นที่ใช้ทดสอบในสภาวะที่ศึกษาผลการกำจัดฟอสเฟตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยใช้สารละลาย Na_2HPO_4 เป็นตัวแทนของสารละลายฟอสเฟต จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มความดันในระบบสูงขึ้น ส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าสูงขึ้นตามความดัน ผลการวิเคราะห์หาค่าการซึมผ่านเยื่อกรองแบบนาโนก่อนการใช้งาน พบว่าค่าการซึมผ่านของเยื่อกรองเท่ากับ $0.378 \text{ LMH}\cdot\text{psig}^{-1}$ และหลังจากการใช้งานแผ่นเยื่อกรองที่ถูกล้างด้วยกรดซัลฟูริก โดยค่าการซึมผ่านของเยื่อกรองที่ได้หลังทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกมีค่าเท่ากับ $0.312 \text{ LMH}\cdot\text{psig}^{-1}$ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนของการซึมผ่านของเยื่อกรองเมื่อเทียบกับค่าการซึมผ่านของแผ่นกรอง

ก่อนใช้งานได้เท่ากับร้อยละ 82.5 หลังจากทำความสะอาดด้วย NaOH มีค่าสัดส่วนการซึมผ่านของเยื่อกรองเพิ่มขึ้นเท่ากับ $0.357 \text{ LMH}\cdot\text{psig}^{-1}$ คิดเป็นสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าการซึมผ่านของแผ่นกรองก่อนใช้งานได้เท่ากับร้อยละ 94.4 จากข้อมูลเบื้องต้นทำให้ทราบถึงการล้างเยื่อกรองด้วยกรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถกู้คืนประสิทธิภาพของเยื่อกรอง เนื่องจากฟลักซ์ที่ได้กลับมาใกล้เคียงกับฟลักซ์ก่อนใช้งาน และแสดงถึงความสามารถในการขจัดสารหรืออนุภาคที่เกาะติดบริเวณพื้นผิวของเยื่อกรองแบบนาโนได้ โดยสามารถนำแผ่นเยื่อกรองที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาล้างด้วยกรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วนำกลับมาใช้ในระบบได้เรื่อยๆ จนกว่าประสิทธิภาพการกรองหรือการซึมผ่านจะลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากสัดส่วนของการสะสมของสารหรืออนุภาคบางส่วนที่ดูดซับติดผิวและ/หรือในรูของเยื่อกรองทำให้ไม่สามารถล้างออกได้ทั้งหมด การใช้เยื่อกรองแบบนาโนจึงยังสามารถใช้ได้จนกระทั่งไม่สามารถล้างสารหรืออนุภาคที่ติดบนพื้นผิวเยื่อกรองออกได้



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับความดันในการดำเนินระบบของเยื่อกรองก่อนและหลังทำความสะอาด

4. สรุป

สารละลายฟอสเฟตต่างชนิดกันที่ใช้ทดสอบโดยเยื่อกรองแบบนาโนให้ค่าฟลักซ์สารละลายต่างกันเพียงเล็กน้อย และพบว่าในกรณีที่เป็นผลร่วมระหว่างสารละลาย

ฟอสเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ให้ค่าการลดลงของฟลักซ์มากกว่าในกรณีที่ไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ ซึ่งการลดลงของฟลักซ์อาจเกิดจากการรวมกันของไอออนประจุบวกกับไอออนประจุลบจากฟอสเฟตและจากสารอินทรีย์

ธรรมชาติทำให้เกิดการสะสมสารอินทรีย์ธรรมชาติบนพื้นผิวของเยื่อกรอง น้ำจึงไหลผ่านได้น้อยลงส่งผลให้ค่าฟลักซ์สารละลายที่ได้มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาค่าการกำจัดฟอสเฟตในกรณีที่ไม่เติมและไม่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติให้ค่าการกำจัดฟอสเฟตมากกว่าในกรณีที่ไม่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยที่สารละลาย Na_2HPO_4 ร่วมกับ NOM และสารละลาย KH_2PO_4 ร่วมกับ NOM ให้ค่าการกำจัดที่เวลา 240 นาที มีค่าการกำจัดร้อยละ 60.92 ± 1.08 และ 67.07 ± 1.26 ตามลำดับ ส่วนการพิจารณาค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้า พบว่าการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าในกรณีที่ไม่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติเช่นเดียวกัน โดยพบค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้าที่เวลา 240 นาที มีค่าการกำจัดร้อยละ 64.08 ± 2.46 และ 73.18 ± 2.17 ของสารละลาย Na_2HPO_4 ร่วมกับ NOM และสารละลาย KH_2PO_4 ร่วมกับ NOM ตามลำดับ สำหรับการซึมผ่านของเยื่อกรองแบบนาโนก่อนการใช้งาน มีค่าการซึมผ่านเท่ากับ $0.378 \text{ LMH}\cdot\text{psig}^{-1}$ และหลังจากการใช้งานแผ่นเยื่อกรองที่ถูกล้างด้วยกรดซิตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ฟลักซ์ที่ได้หลังจากการทำความสะอาดมีค่าการซึมผ่านเท่ากับ $0.312 \text{ LMH}\cdot\text{psig}^{-1}$ และ $0.357 \text{ LMH}\cdot\text{psig}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนของอัตราการซึมผ่านเยื่อกรองเมื่อเทียบกับค่าอัตราการซึมผ่านเยื่อกรองก่อนการใช้งานเท่ากับร้อยละ 82.5 และ 94.4 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าสามารถกู้คืนค่าฟลักซ์ที่ใกล้เคียงกับฟลักซ์ก่อนการใช้งาน สำหรับการนำผลการศึกษาข้างต้นไปใช้งานจริงในด้านการบำบัดหรือกำจัดสารฟอสเฟตร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองนาโน ผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถนำข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้จากข้างต้นไปเป็นแนวทางหรือนำไปปรับใช้ให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของแหล่งน้ำเสียปนเปื้อนสารต่างๆ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ศึกษาเพื่อพัฒนาเยื่อกรองแบบนาโนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในอนาคตต่อไปได้

การทดสอบการกำจัดฟอสเฟตควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ผลความเข้มข้นของเกลือฟอสเฟต ผลความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ตลอดจนผลการกำจัด

ของสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยเยื่อกรองแบบนาโนร่วมกับสารละลายฟอสเฟต รวมถึงการศึกษาค่าความต้านทานของเยื่อกรอง ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของเยื่อกรองก่อน-หลัง และวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันบนผิวหน้าเยื่อกรอง เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับอธิบายกลไกการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโนในรูปแบบที่แตกต่างกัน และนำไปสู่องค์ความรู้ที่สามารถนำไปขยายผล เพื่อศึกษาและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

- [1.] G. V. Haute, E. Caberlon, E. Squizani, F. C. Mesquita, L. Pedrazza, B. A. Martha and J. R. Oliveira, "Gallic acid reduces the effect of LPS on apoptosis and inhibits the formation of neutrophil extracellular traps," *Toxicology In Vitro*, vol. 30, no. 1, pp. 309–317, 2015, doi: 10.1016/j.tiv.2015.10.005.
- [2.] N. M. Al-Bastaki, "Performance of advanced methods for treatment of wastewater: UV/TiO₂, RO and UF," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 43, no. 7, pp. 935–940, 2004, doi: 10.1016/j.cep.2003.08.003.
- [3.] K. Y. Koh, S. Zhang, and J. P. Chen, "Improvement of ultrafiltration for treatment of phosphorus-containing water by a lanthanum-modified aminated polyacrylonitrile membrane," *ACS Omega*, vol. 5, no. 13, pp. 7170–7181, 2020, doi: 10.1021/acsomega.9b03573.
- [4.] K. Parameshwaran and C. Visvanathan, "Recent developments in membrane technology for wastewater reuse," in *2nd International Conference on Advanced Wastewater Treatment recycling and Reuse*, Milan, Italy, Sep. 14–16, 1998, pp. 312–322.

- [5.] H. Huang, J. Liu, P. Zhang, D. Zhang and F. Gao, "Investigation on the simultaneous removal of fluoride, ammonia nitrogen and phosphate from semiconductor wastewater using chemical precipitation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 307, pp. 696–706, 2017, doi: 10.1016/j.cej.2016.08.134.
- [6.] V. Uyak, I. Koyuncu, I. Oktem, M. Cakmakci and I. Toroz, "Removal of trihalomethanes from drinking water by nanofiltration membranes." *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152, no. 2, pp.789–794, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.082.
- [7.] T. Moritz, S. Benfer, P. Arki and G. Tomandl, "Influence of the surface charge on the permeate flux in the dead-end filtration with ceramic membranes," *Separation and Purification Technology*, vol. 25, no. 1–3, pp. 501–508, 2001, doi: 10.1016/S1383-5866(01)00080-6.
- [8.] B. Van der Bruggen, and C. Vandecasteele, "Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry," *Environmental pollution*, vol. 122, no. 3, pp. 435–445, 2003, doi: 10.1016/S0269-7491(02)00308-1.
- [9.] C. A., Erickson and R. Perris, "The role of cell-cell and cell-matrix interactions in the morphogenesis of the neural crest," *Developmental Biology*, vol. 159, no. 1, pp. 60–74, 1993, doi: 10.1006/dbio.1993.1221.
- [10.]C. Pelekani, G. Newcombe, V. L. Snoeyink, C. Hepplewhite, S. Assemi and R. Beckett, "Characterization of natural organic matter using high performance size exclusion chromatography," *Environmental Science & Technology*, vol. 33, no. 16, pp. 2807–2813, 1999, doi: 10.1021/es9901314.
- [11.]M. S. Islam, R. Sadiq, M. J. Rodriguez, H. Najjaran, A. Francisque and M. Hoorfar, "Evaluating water quality failure potential in water distribution systems: a fuzzy-TOPSIS-OWA-based methodology," *Water Resources Management*, vol. 27, pp. 2195–2216, 2013, doi: 10.1007/s11269-013-0283-6.
- [12.]S. Crittenden, R. Reifemberger, J. Hillebrecht, R. Birge, D. Inerowicz and F. Regnier, "Soft lithography based micron-scale electrophoretic patterning of purple membrane," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. 8, pp. 1494–1497, 2005, doi: 10.1088/0960-1317/15/8/016.
- [13.]J. S. Vrouwenvelder, J. WKappelhof, S. G. Heijrman, J. C. Schippers and D. Van der Kooija, "Tools for fouling diagnosis of NF and RO membranes and assessment of the fouling potential of feed water," *Desalination*, vol. 157, no. 1–3, pp. 361–365, 2003, doi: 10.1016/S0011-9164(03)00417-X.
- [14.]B. M. Watson and C. D. Hornburg, "Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies," *Desalination*, vol. 72, no. 1–2, pp. 11–22, 1989, doi: 10.1016/0011-9164(89)80024-4.
- [15.]I. C. Escobar and A. A. Randall, "Influence of NF on distribution system biostability," *Journal-American Water Works Association*, vol. 91, no. 6, pp. 76–89, 1999, doi: 10.1002/j.1551-8833.1999.tb08650.x.
- [16.]S. J. Duranceau, J. S. Taylor and L. A. Mulford, "SOC removal in a membrane softening process," *Journal-American Water Works Association*, vol. 84, no. 1, pp. 68–78, 1992, doi: 10.1002/j.1551-8833.1992.tb07287.x.
- [17.]R. Pritish Kumar, "Nanofiltration as a tertiary treatment for phosphate removal from wastewater," M.Eng. Thesis, Dept. Energy, Environment, and Climate Change, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1995.
- [18.]P. Wu and M. Imai, "Novel biopolymer composite membrane involved with selective mass transfer and excellent water permeability," in *Advancing Desalination*, London, UK: IntechOpen Limited, 2012, ch. 3, pp. 57–81.

- [19.]J. E. Kilduff, S. Mattaraj and G.Belfort, "Flux decline during nanofiltration of naturally-occurring dissolved organic matter: effects of osmotic pressure membrane permeability and cake formation," *Journal of membrane science*, vol. 239, no. 1, pp.39–53, 2004, doi: 10.1016/j.memsci.2003.12.030.
- [20.]T. Tseng and M. Edwards, "Predicting full-scale TOC removal," *Journal-American Water Works Association*, vol. 91, no. 4, pp. 159–170, 1999, doi: 10.1002/j.1551-8833.1999.tb08622.x.
- [21.]J. E. Kilduff, S. Mattaraj, J. Sensibaugh, J. P. Pieracci, Y. Yuan and G. Belfort, "Modeling flux decline during nanofiltration of NOM with poly (arylsulfone) membranes modified using UV-assisted graft polymerization," *Environmental engineering science*, vol. 19, no. 6, pp. 477–495, 2002, doi: 10.1089/109287502320963454.
- [22.]G. T. Ballet, A. Hafiane, and M. Dhahbi, "Influence of operating conditions on the retention of phosphate in water by nanofiltration," *Journal of membrane science*, vol. 290, no.1–2, pp. 164–172, 2007, doi: 10.1016/j.memsci.2006.12.046.
- [23.]S. U. Hong, L. Ouyang and M. L. Bruening, "Recovery of phosphate using multilayer polyelectrolyte nanofiltration membranes," *Journal of Membrane Science*, vol.327, no. 1–2, pp. 2–5, 2009, doi: 10.1016/j.memsci.2008.11.035.
- [24.]C. Jarusutthirak, S. Mattaraj and R. Jiratananon. "Influence of inorganic scalants and natural organic matter on nanofiltration membrane fouling," *Journal of Membrane Science*, vol. 287, no. 1, pp. 138–145, 2007, doi: 10.1016/j.memsci.2006.10.034.
- [25.]L. Joseph, J.R. Flora, Y.G. Park, M. Badawy, H. Saleh and Y. Yoon, "Removal of natural organic matter from potential drinking water sources by combined coagulation and adsorption using carbon nanomaterials," *Separation and purification technology*, vol.91, pp. 64–72, 2012, doi: 10.1016/j.seppur.2012.04.033.
- [26.]S. Mattaraj, and J. E. Kilduff, "Using reverse osmosis to remove natural organic matter from power plant makeup water," *Power plant Chemistry*, vol. 5, no. 1, pp. 31–35, 2003.