



ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจาก  
น้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ  
ด้วยเยื่อกรองนาโน

Performance of Nanofiltration Membrane on  
Removal of Hexavalent Chromium from Synthetic  
Wastewater and Natural Organic Matter

Jatupon Jaisin\* and Supatpong Mattaraj\*\*

จตุพล จัยสิน\* และ สุพัฒน์พงษ์ มัตราจ\*\*

\*สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

\*\*ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

E-mail : supatpong.mj@gmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยใช้ชุดทดลองแบบไหลตายตัวเยื่อกรองแบบนาโน (HL4040FN, GE water and process technology) โดยปรับค่าความแรงประจุของสารละลายเป็น 0.01 โมลต่อลิตร ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับค่าพีเอชของสารละลายเป็น 7 ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ปรับใช้ประมาณ 10 20 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความดันในการดำเนินระบบคงที่ 30 psi ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟลักซ์สารละลายระหว่างการกรองลดลงและค่าการกำจัดโครเมียมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ประสิทธิภาพการกำจัดของสารอินทรีย์ธรรมชาติให้ค่าค่อนข้างสูง ขณะที่สารละลายที่มีผลร่วมระหว่างเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ แสดงค่าการลดลงของฟลักซ์สารละลายและการกำจัดของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมมากกว่าสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์เพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ : เฮกซะวาเลนต์โครเมียม; เยื่อกรองแบบนาโน; สารอินทรีย์ธรรมชาติ

## Abstract

This objective of this research was to study the removal performance of hexavalent chromium from synthetic wastewater and natural organic matter (NOM) using dead-end nanofiltration (HL4040FN, GE water and process technology). Solution conditions were controlled with ionic strength of 0.01 M and 10 mg/L NOM, and solution pH of 7. The concentrations of hexavalent chromium were adjusted about 10, 20 and 30 mg/L with constant operating pressure of 30 psi. Experimental results found that increased concentrations of hexavalent chromium decreased solution flux during filtration and slightly increased chromium rejection. The removal efficiency of NOM was relatively high, while solutions having hexavalent chromium from synthetic wastewater and NOM inhibited greater flux decline and removal efficiency of hexavalent chromium than those having only hexavalent chromium from synthetic wastewater.

**Keywords :** Hexavalent Chromium; Nanofiltration; Natural Organic Matter

## บทนำ

ปัจจุบันการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและความก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เกษตรกรรม รวมทั้งการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ทำให้เกิดการขยายตัวทางด้านการผลิต ส่งผลให้เกิดของเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก รวมทั้งการปล่อยของเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม โลหะหนักเป็นสารคงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ง่ายในกระบวนการตามธรรมชาติ จึงเกิดการสะสมอยู่ในดิน ตะกอนดินที่อยู่ในน้ำและในสัตว์น้ำ ทำให้มนุษย์มีความเสี่ยงหากมีการนำโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายทั้งทางตรงและทางอ้อม

โครเมียมและสารประกอบโครเมียมซึ่งเป็นโลหะหนักได้ถูกใช้ในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเคลือบโลหะ การชุบโลหะ สีย้อม สีทาอาคาร สิ่งทอ เครื่องหนัง การพิมพ์ อุตสาหกรรมไม้ และปิโตรเลียม กระบวนการกำจัดโครเมียมมีหลายวิธี เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และแก้วลอย [1] การดูดซับด้วยสาหร่ายเซลล์เดียว แต่มีข้อจำกัดคือมีต้นทุนสูงและต้องการพื้นที่มาก [2] การใช้กระบวนการกรองแบบนาโนสามารถที่จะแยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติออกจากน้ำได้ [3] และสามารถที่จะกรองสารอินทรีย์ที่มีไอออนบวกแบบประจุนคู่ได้ และสามารถแยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติออกจากน้ำได้ด้วย [4] โดยมีความต้องการพื้นที่น้อยและค่าบำรุงรักษาต่ำ [5] ดังนั้นกระบวนการกรองแบบนาโนจึงสามารถที่จะแยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติออกจากน้ำและเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียได้ การรวมตัว

ระหว่างเฮกซะวาเลนทีโครเมียมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic matter, NOM) ซึ่งพบได้โดยทั่วไปตามแหล่งน้ำผิวดิน จะส่งผลทำให้เกิดการอุดตันของเยื่อกรองได้ง่ายขึ้นซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของระบบเยื่อกรองที่ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตน้ำลดลง

เยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration, NF) เป็นกระบวนการที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตน้ำดื่ม การทำน้ำอ่อนและบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ความดันอยู่ระหว่างอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) และออสโมซิสแบบผันกลับ (reverse osmosis) ซึ่งเยื่อกรองแบบนาโนมีข้อได้เปรียบ คือ การใช้ความดันที่น้อยกว่าในการดำเนินระบบแบบออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) และปริมาณน้ำที่ผลิตได้มีปริมาณมาก และยังสามารถใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ปนมากับน้ำได้เป็นอย่างดี [6, 7] ทั้งนี้ปัญหาของกระบวนการเยื่อกรอง คือ การลดลงของอัตราการไหล โดยมีสาเหตุมาจากการเกิด Concentration Polarization (CP) ทำให้เกิดการอุดตันที่ผิวของเยื่อกรอง โดยการอุดตันที่เกิดขึ้นสามารถเกิดได้ใน 2 ลักษณะ คือ เกิดการอุดตันบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง (surface fouling) และการอุดตันที่เกิดภายในรูพรุนของเยื่อกรอง (internal pore fouling) [8] เมื่อเยื่อกรองเกิดการอุดตันจะส่งผลให้ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าลดลง ต้องทำความสะอาดบ่อยครั้งขึ้น และทำให้อายุการใช้งานของเยื่อกรองสั้นลง [9] ซึ่งวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพการลดลงของฟลักซ์สารละลายและการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน

## อุปกรณ์และวิธีการ

### สารเคมีที่ใช้และเครื่องมือวิเคราะห์

สารเคมีที่ใช้มีดังนี้ คือ Potassium dichromate ( $K_2Cr_2O_7$ ), Hydrochloric acid 36% (HCl), Sodium hydroxide (NaOH), Sodium metabisulphite ( $Na_2S_2O_5$ ), Citric acid ( $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ ), เยื่อกรองแบบนาโน รุ่น HL4040FM การตรวจวิเคราะห์ผลความเข้มข้นด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAanlyst 200) และเครื่อง UV-visible spectrophotometer ใช้วัดค่า TOC โดยการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

### สารอินทรีย์ธรรมชาติ

สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้ได้มาจากแหล่งน้ำผิวดินที่อยู่ภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งใช้ผลิตน้ำอุปโภคและบริโภคภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี คุณสมบัติของน้ำผิวดินมีดังนี้ สารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด 4.27 mg/L มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร เท่ากับ 0.178 1/cm ค่าการนำไฟฟ้า อยู่ที่ 44  $\mu S \cdot cm^{-1}$  พีเอชอยู่ที่ 7.1 และค่าความขุ่น 7.4 NTU การเตรียมสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยการนำน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมาจำนวน 1,000 ลิตร ผ่านระบบเยื่อกรองแบบไมโครฟิลเตรชันขนาด 5 ไมครอน และ 1 ไมครอน ตามลำดับ เพื่อบำบัดเบื้องต้นก่อนเข้าเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ เพื่อแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติในส่วนคอนเซนเตรทที่เหลือปริมาตรสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นประมาณ 30 ลิตร นำสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นบรรจุในภาชนะที่ปิดสนิทและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการรักษาสารอินทรีย์ธรรมชาติให้อยู่ในสภาวะพร้อมใช้งานในการทดลอง

### เยื่อกรองแบบนาโน

การศึกษาคั้งนี้ใช้เยื่อกรองแบบนาโนของ GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040FM ผลิตจากโพลีเอไมด์ มีความสามารถในการกำจัดสารที่มีขนาดโมเลกุล 150-300 ดาลตัน พีเอชที่ใช้ในการดำเนินระบบอยู่ระหว่าง 3-9 และพีเอชของสารที่ใช้ในการทำ ความสะอาดมีค่าอยู่ระหว่าง 2-10.5 ความดันที่ใช้ในการ

ดำเนินงานอยู่ที่ 70-300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นำมาตัดเป็นแผ่นวงกลมขนาดพอดีกับชุดทดลอง สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ได้ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำเก็บรักษาโดยแช่ไว้ในสารละลาย sodium metabisulphite ( $Na_2S_2O_5$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 1 เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจน แล้วนำไปแช่ไว้ในตู้เย็นเพื่อลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่มีผลต่อผิวหน้าเยื่อกรอง

### ชุดทดลองการไหลแบบตายตัว

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน ระบบนี้ใช้เป็นชุดทดสอบการไหลแบบตายตัว พื้นที่ใส่แผ่นเยื่อกรองขนาด 0.0044 ตารางเมตรโดยคำนวณตามพื้นที่ของชุดทดสอบ โดยควบคุมการทดลองด้วยระบบเยื่อกรองนาโน ด้วยความดันให้คงที่ตลอดการทดลองที่ 30 psi และใช้เวลาในการทดลอง 240 นาที วัดอัตราการไหลของเพอร์มิเอทและเก็บตัวอย่างตามช่วงเวลา

### สมการที่ใช้ในการศึกษา

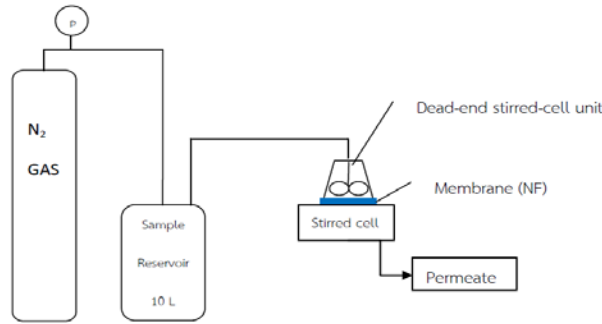
ในการศึกษาเกี่ยวกับการอุดตันของเยื่อกรองซึ่งมีผลมาจากสารอินทรีย์ธรรมชาติในกระบวนการกรองแบบนาโนซึ่งมีค่าอัตราการกรองแสดงได้ในสมการที่ (1)

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

เมื่อ ค่า  $J_v$  คือ อัตราการกรองผ่านเยื่อกรองหรือฟลักซ์สารละลาย ( $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ , LMH),  $Q_{perm}$  คือ อัตราการไหลของน้ำที่กรอง ( $L \cdot h^{-1}$ ),  $A_m$  คือ พื้นที่ที่ใช้ในการกรอง ( $m^2$ ), ส่วนการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ (Rejection) โดยการกรองผ่านเยื่อกรองจะแยกสารละลายต่างๆ ออกจากน้ำซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

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

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



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองแบบนาโน

**ผลการทดลองและวิจารณ์**

**ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อค่าฟลักซ์**

รูปที่ 2 แสดงผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ต่อฟลักซ์สารละลายทำการทดลองด้วยการปรับค่าความแรงประจุ (ionic strength) 0.01 โมลต่อลิตร ค่าพีเอชประมาณ 7 โดยใช้ความดันคงที่ 30 psi ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ต่างกันส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์แตกต่างกัน โดยเมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่องจนถึงนาที่ที่ 240 จะเห็นว่าค่าฟลักซ์ของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 mg/L มีค่าการลดลงของฟลักซ์เท่ากับร้อยละ 33.63, 39.41 และ 48.77 ตามลำดับ โดยค่าฟลักซ์สารละลายของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 30 mg/L ลดลงมากที่สุด อาจเนื่องจากผลของความเข้มข้นสะสมที่ผิวของเยื่อกรองส่งผลทำให้ฟลักซ์สารละลายลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มมากขึ้น

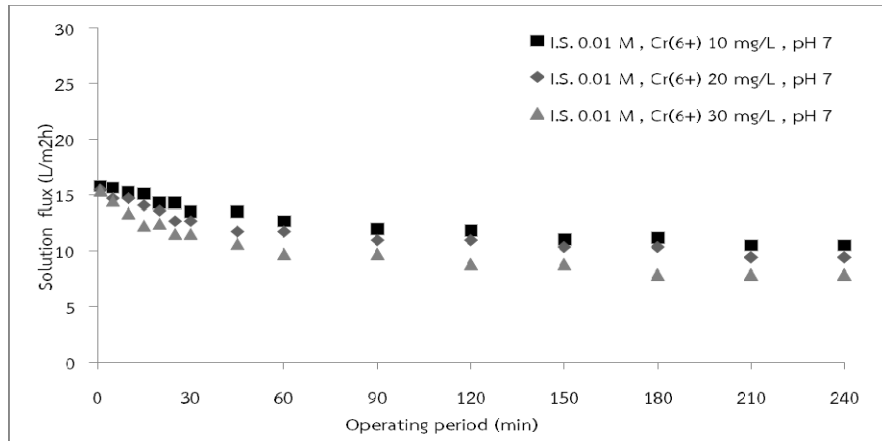
รูปที่ 3 แสดงผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีต่อฟลักซ์สารละลาย ที่ความเข้มข้น Cr<sup>6+</sup> 10 mg/L + 10 mg/L NOM , Cr<sup>6+</sup> 20 mg/L + 10 mg/L NOM และ Cr<sup>6+</sup> 30 mg/L + 10 mg/L NOM ที่ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้ความดันคงที่ 30 psi มีค่าการลดลงของฟลักซ์สารละลายเท่ากับร้อยละ 44.61, 54.47 และ 53.99 ตามลำดับ ฟลักซ์ของสารละลายที่มีน้ำตัวอย่างด้วยสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าลดลง

มากกว่าฟลักซ์สารละลายของน้ำตัวอย่างที่ไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ อาจเนื่องจากความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติเกิดการสะสมตัวที่ผิวหน้าของเยื่อกรองเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าลดลงมากกว่าความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเพียงอย่างเดียว

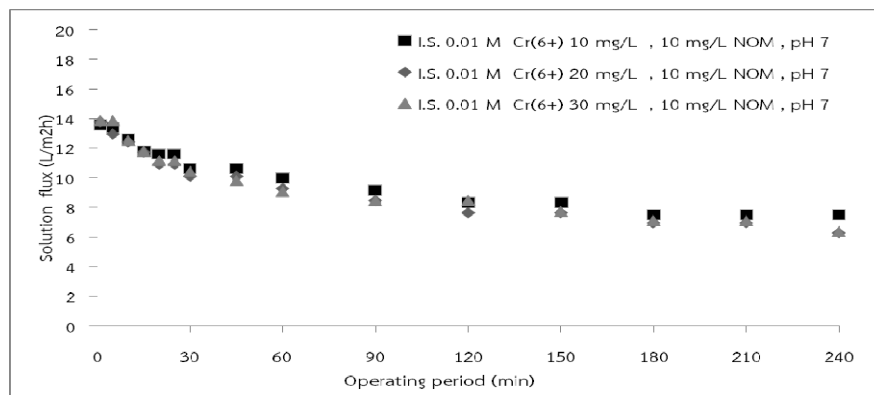
**ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการกำจัด**

รูปที่ 4 แสดงผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดทำการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของเยื่อกรองนาโนต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 mg/L เท่ากับ 76.01±5.08, 81.53±3.31 และ 81.69±7.93 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นทำให้ลดแรงผลึกของประจุจากการรวมตัวของประจุบวกและประจุลบของเยื่อกรองนาโน จึงทำให้เกิดการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรองเพิ่มมากขึ้น [10]

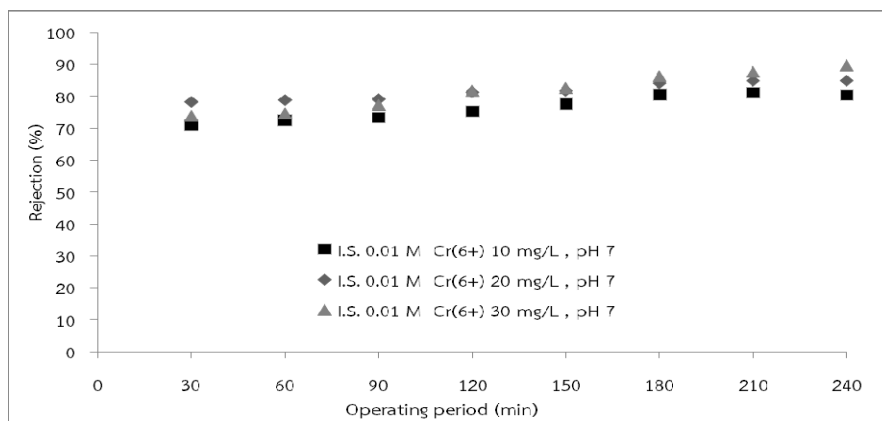
รูปที่ 5 แสดงการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากผลรวมของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์กับสารอินทรีย์ธรรมชาติทำการทดลองพบว่าเยื่อกรองนาโนสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ที่ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม 10, 20 และ 30 mg/L เท่ากับ 90.35±1.95, 89.56±5.15 และ 92.60±2.59 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับ [11] พบว่าเมื่อเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำเสียตัวอย่างสังเคราะห์ ส่งผลให้สารอินทรีย์ธรรมชาติสะสมบนผิวหน้าเยื่อกรองทำให้เกิดการอุดตันจากการกักกันสารได้มากขึ้น จึงทำให้ค่าการกำจัดสูงขึ้น



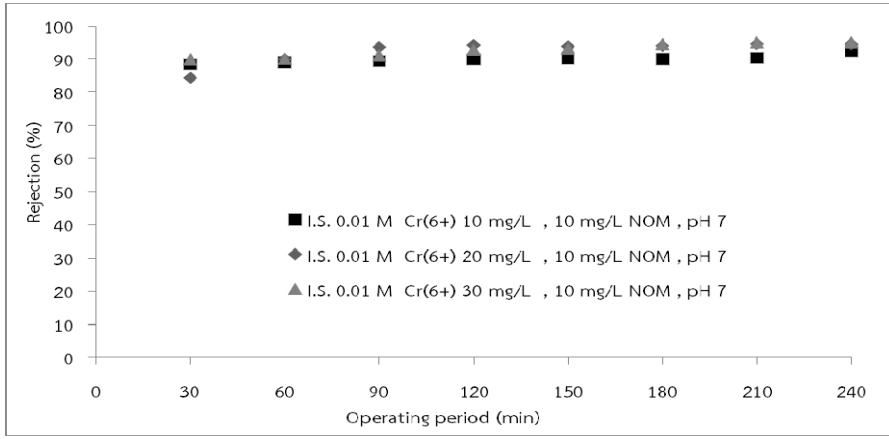
รูปที่ 2 ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการลดลงของฟลักซ์



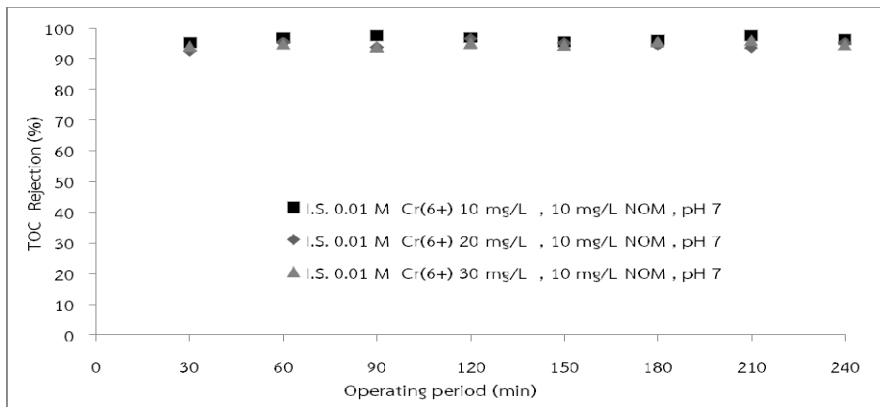
รูปที่ 3 ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อฟลักซ์



รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการกำจัด



รูปที่ 5 การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมจากผลรวมของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์กับสารอินทรีย์ธรรมชาติ



รูปที่ 6 การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติจากผลรวมของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์กับสารอินทรีย์ธรรมชาติ

รูปที่ 6 แสดงการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติจากผลรวมของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์กับสารอินทรีย์ธรรมชาติ การทดลองพบว่า การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติให้ค่าร้อยละการกำจัดสูงเท่ากับ 92.6-97.5 อาจเนื่องมาจากกลไกการแยกโดยขนาดโมเลกุล (size exclusion) ซึ่งเป็นผลจากขนาดของสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเยื่อกรองแบบนาโน

**สรุป**

ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเยื่อกรองนาโนให้ผลตามค่าความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

การใช้เฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์สารละลายและการกำจัดของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำเสียด้วยเทคโนโลยีเยื่อกรองแบบนาโน สำหรับวิธีการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง

**เอกสารอ้างอิง**

[1] Sawangyutitum, P., Chaidan, S. and Khongsujareon, S. 2543. Asorption of

- lead (II) and chromium (VI) on activated carbon and fly ash. Bachelor Thesis of Science. Faculty of Industrial Education King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [2] Jaiyong, S., Ajsakorn, O. and Rimwatthana, A. 2540. Absorption of Hexavalent Chromium by *Chlorella* sp. Bachelor Thesis of Science. Faculty of Industrial Education King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [3] Kilduff, J.E., Mattaraj, S. and Belfort, G. Flux decline during nanofiltration of naturally occurring dissolved organic matter: effect of osmotic pressure, membrane permeability, and cake formation. *J. Membrane Sci.* 239(1): 39-53.
- [4] Conlon, W., and McClellan, S., 1989. Membrane Softening: A Treatment Process Comes of Age. *Journal AWWA.* 81(11): 47-51.
- [5] Yildiz, E. Nuhoglu, A. Keskinler, B. Akay, G. and Farizoglu, B. 2003. Water softening in a crossflow membrane reactor. *Desalination.* 159(2): 139-152.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Vrouwenvelder, J.S., Kappelhof, J.W.N.M., Heijrnan, S.G.J., Schippers, J.C., van der Kooija D. 2003. Tools for fouling diagnosis of NF and RO membranes and assessment of the fouling potential of feed water. *Desalination.* 157: 361-365.
- [10] Kilduff, J. E., Mattaraj, S., Pieracci, J. P. and 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.
- [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: 283-298.