

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การกำจัดเอกสารวารณที่โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน



T107767



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 107767
วัน,เดือน,ปี 1.0.11.ค. 2553

b. 1221011b
i.....

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Removal of Hexavalent Chromium from Synthetic Wastewater
by Nanofiltration Membrane**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน
นักศึกษา นางสาวกนกรัตน์ เขมานวงค์
 นางสาวจิตติพันธ์ ชลชลา
 นายพรชัย อุ่นอุคมรัมย์
ภาควิชา เคมี
สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ชลอ จารุสุทธีรัมย์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน	
กรรมการ	ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรัมย์	
กรรมการ	ดร. ชลอ จารุสุทธีรัมย์	



(ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน	
นักศึกษา	นางสาว กนกรัตน์	เขมานูวงศ์
	นางสาว จิตติพันธุ์	ชลชลา
	นาย พรชัย	อุ๋นอุ๋นรัมย์
ภาควิชา	เคมี	คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม	
ปีการศึกษา	2548	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ชลอ	จารุสุทธิรักษ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน โดยการเดินระบบแบบ Dead-end Stirred Cell โดยศึกษาอิทธิพลของความดัน พีเอช และความเข้มข้นของ โครเมียมต่อการกักกันของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และการอุดตันของเยื่อกรองจากการทดลองพบว่า การเพิ่มความดันส่งผลให้อัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมลดลง โดยที่ความดัน 30, 50 และ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าการกักกันเท่ากับ 97.96, 18.79 และ 3.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้กลไกในการกักกันโครเมียมโดยเยื่อกรองนาโนเกิดจากแรงผลักรังสีประจุ (Electrostatic repulsion) ระหว่างโครเมียม และเยื่อกรอง การลดค่าพีเอชส่งผลให้อัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมลดลง โดยที่พีเอช 3 มีค่าการกักกันโครเมียมน้อยสุดเท่ากับ 44 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับที่พีเอชมากกว่าทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของความหนาของชั้น Double layer และประจุพื้นผิวของโครเมียม การเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมส่งผลให้เพิ่มอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ที่สภาวะความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และพีเอช 7 เยื่อกรองนาโนมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดประมาณ 94 – 99 เปอร์เซ็นต์ ผลการวิเคราะห์การอุดตันด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่งอิเล็กตรอนพบว่า ขนาดรูพรุนของเยื่อกรองนาโนลดลงเมื่อผ่านการกรองเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการสะสมตัวของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมบริเวณผิวหน้า หรือภายในรูพรุนของเยื่อกรอง การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยหลักการสมดุลมวลสารสามารถใช้ทำนายการกักกันเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยเยื่อกรองนาโน

คำสำคัญ : การกักกัน, การกำจัด, การลดลงของฟลักซ์, น้ำเสียสังเคราะห์, เยื่อกรองนาโน, เฮกซะวาเลนท์โครเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Removal of Hexavalent Chromium from Synthetic Wastewater by Nanofiltration Membrane
Name	Miss Kanokrat Khemanuwong Miss Jittipun Chonchalar Mr. Pornchai Ouanudomrak
Department	Chemistry
Program	Environmental Resource Chemistry
Academic Year	2005
Special Project Advisor	Dr. Chalor Jarusutthirak

ABSTRACT

This project studied on the removal of hexavalent chromium from synthetic wastewater using nanofiltration membrane (NF) on dead-end mode of operation. The effects of operating pressure, pH and chromium concentration on the rejection of hexavalent chromium and nanofiltration fouling were investigated. The results revealed that the increasing pressure caused a decrease of hexavalent chromium. At the pressure of 30, 50, and 70 psi, the percentage of hexavalent chromium rejection were found to be 97.96, 18.79, and 3.14 %, respectively. Rejection mechanism of NF membrane could be affected by electrostatic repulsion effect between chromium compounds and membrane surface. The decreasing pH led to a decrease of hexavalent chromium removal. At pH of 3, the rejection of hexavalent chromium was 44 %, less than that at higher pH. This phenomenon could be explained by the effect of double layer of membrane and surface ions of chromium compound. Higher concentration led to an increase hexavalent chromium removal efficiency. At the pressure of 30 psi and pH of 7, nanofiltration provided the removal efficiency up to 99 %. Membrane fouling was visually investigated using scanning electron microscope (SEM). The SEM pictures showed that molecular cutoff of NF membrane decreased when hexavalent chromium was filtered through the membrane, possibly due to an accumulation of hexavalent chromium on membrane surface or in membrane pores. Based on mass balance, mathematical model was developed for prediction of hexavalent chromium rejection by nanofiltration membrane.

Keywords : Flux decline, Hexavalent chromium, Nanofiltration, Rejection, Removal,

Synthetic wastewater

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลือของ ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ ข้อเสนอแนะต่างๆ ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่ในการแก้ปัญหาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ อาจารย์ อาทิตย์ แข็งธัญการ ที่ให้ความกระจ่างในด้านเนื้อหา รวมทั้งเทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อความสมบูรณ์ของโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ และ ดร. สุวรรณี จรรยาพูน ที่กรุณาเสนอแนะ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้โครงการพิเศษนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งยกระดับความสมารถนักเคมีสิ่งแวดล้อมให้มีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือด้านเครื่องมือวิเคราะห์เป็นอย่างดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความรัก ความห่วงใย และเป็นกำลังใจตลอดมา ทำให้โครงการพิเศษนี้มีคุณค่า และพัฒนาสิ่งแวดล้อมได้ไม่มากนักน้อย

นางสาว กนกรัตน์

เขมานุวงศ์

นางสาว จิตติพันธุ์

ชลชลา

นาย พรชัย

อุ้นอุดมรักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามคำศัพท์

A_m	= พื้นที่รับสัมผัสของเยื่อกรอง
$\text{atm} \cdot \text{L/mol} \cdot \text{K}$	= บรรยากาศ ลิตรต่อโมล เคลวิน
C	= ความเข้มข้น
CA	= เซลลูโลสอะซิเตต
C_r	= ความเข้มข้นของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
CP	= คอนเซนเตรชันโพลาริเซชัน
C_p	= ความเข้มข้นของสารในเฟอรัมมีเอท
Cr	= โครเมียม
Cr^{+2}	= ไดวาเลนต์โครเมียม
Cr^{+3}	= ไตรวาเลนต์โครเมียม
Cr^{+6}	= เฮกซะวาเลนต์โครเมียม
$CSTR$	= การปั่นกววนอย่างสมบูรณ์
Da	= ดาลตัน
gpm	= แกลลอนต่อนาที
J	= ฟลักซ์ของสารผ่านเยื่อกรอง
J_w	= ฟลักซ์ของน้ำผ่านเยื่อกรอง
K	= เคลวิน
k	= กิโล
kcal/mol	= กิโลแคลลอรี่ต่อ โมล
K_w	= สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน
LMH	= ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง
$\text{L/hr, L} \cdot \text{hr}^{-1}$	= ลิตรต่อชั่วโมง
m^3	= ตารางเมตร
m^3/d	= ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$	= ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อนาที
mg/L	= มิลลิกรัมต่อลิตร
MF	= ไมโครฟิลเตรชัน
$MEUF$	= กระบวนการไมเซลลาร์อัลตราฟิลเตรชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามคำศัพท์ (ต่อ)

mol/L	= โมลต่อลิตร
MSDS	= เอกสารข้อมูลความปลอดภัยด้านเคมีภัณฑ์
MWCO	= ขนาดน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคที่ถูกกักกันไว้โดยเยื่อกรอง
N	= จำนวนไอออนในสารประกอบ
NF	= นาโนฟิลเตรชัน
PA	= พอลิเอไมด์เชิงประกอบ
Pa	= ปาสคาล
PVA	= พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
ppm	= พีพีเอ็ม, ส่วนในล้านส่วน
PS	= พอลิซัลโฟน
psi	= ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
P_f	= ความดันที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
P_p	= ความดันที่เพอร์มิเอท
P_r	= ความดันที่รีเทนเทต
ΔP	= ความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง
Q_f	= อัตราการไหลของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
Q_p	= อัตราการไหลของสารผ่านเยื่อกรอง
R	= ค่าคงที่ของแก๊ส
RB5	= รีแอกทีฟแบดจ์ 5
RO	= รีเวอร์สออสโมซิส
R_f	= ความต้านทานทางชลศาสตร์จากการอุดตันของเยื่อกรอง
R_m	= ความต้านทานทางชลศาสตร์ของแผ่นเยื่อกรองที่สะอาด
%R	= ประสิทธิภาพการกักกันโดยเยื่อกรอง
%Re	= ประสิทธิภาพของเยื่อกรอง
SEM	= กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่งอิเล็กตรอน
T	= อุณหภูมิ
TMP	= ความดันที่ใช้เป็นแรงขับเคลื่อนผ่านเยื่อกรอง
TOABr	= เติตระออกทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามคำศัพท์ (ต่อ)

UF	= อัลตราฟิลเตรชัน
μ	= ค่าความหนืดของน้ำ
μm	= ไมโครเมตร
$^{\circ}\text{C}$	= องศาเซลเซียส
$^{\circ}\text{F}$	= องศาฟาเรนไฮต์
%	= เปอร์เซ็นต์
π_{feed}	= ความดันออสโมติกที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
π_{permeate}	= ความดันออสโมติกที่เพอร์มิเอท
$\Delta\pi$	= ความดันออสโมติก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
นิยามคำศัพท์	ง
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน	4
2.2 หลักการกรองผ่านเยื่อกรอง	5
2.2.1 การละลาย – การแพร่ (Solution-diffusion model)	6
2.2.2 การไหลผ่านรูพรุน (Pore-flow model)	6
2.2.3 ทฤษฎีการกรองผ่านเยื่อกรอง	7
2.3 กลไกการอุดตันเยื่อกรอง และการลดลงของฟลักซ์	9
2.3.1 ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Concentration polarization)	10
2.3.2 การเกิดชั้นเค้ก (Cake formation)	11
2.3.3 การอุดตันภายในรูพรุน (Interior pore blockage)	12
2.4 กลไกการกำจัดสารโดยเยื่อกรอง	12
2.4.1 กลไกการคัดแยกด้วยขนาด (Size exclusion)	12
2.4.2 กลไกการคัดแยกด้วยผลของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic effect)	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเยื่อกรอง	14
2.5.1 คุณสมบัติของเยื่อกรอง	14
2.5.2 คุณลักษณะของสารละลาย	14
2.5.3 สภาพการทำงานของระบบ	15
2.6 การประยุกต์ใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันสำหรับการกำจัดโลหะหนัก	16
2.7 โครเมียม	16
2.7.1 คุณลักษณะทั่วไปของโครเมียม	16
2.7.2 ประโยชน์ของโครเมียม	19
2.7.3 ความเป็นพิษของโครเมียม	21
2.7.4 การกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย	22
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	25
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	25
3.1.1 อุปกรณ์	25
3.1.2 สารเคมี	25
3.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนที่โครเมียม	26
3.2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนที่โครเมียม (Cr^{6+}) ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	26
3.2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโครเมียมทั้งหมด	26
3.2.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนที่โครเมียม	27
3.2.4 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนที่โครเมียม	27
3.3 การศึกษาการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโน	27
3.3.1 เยื่อกรองนาโน	27
3.3.2 การทำความสะอาดเยื่อกรอง	28
3.3.3 การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโน	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน	30
3.4.1 ผลของความดันต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน	30
3.4.2 ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน	31
3.4.3 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย สังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน	31
3.5 การวิเคราะห์ตัวอย่าง	31
3.5.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียม	31
3.5.2 การวิเคราะห์เยื่อกรอง	32
บทที่ 4 ผลการวิจัย และอภิปรายผล	33
4.1 ผลของความดันต่อฟลักซ์ของเยื่อกรองนาโน	33
4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน	34
4.2.1 ผลของความดันต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน	34
4.2.2 ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน	38
4.2.3 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน	43
4.3 การวิเคราะห์การอุดตันของเยื่อกรองนาโนโดยภาพถ่ายด้วย เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	47
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการกำจัดโครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุปผลการวิจัย	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก	60
ภาคผนวก ก ตารางแสดงลักษณะน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม	60
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	64
ภาคผนวก ค ตารางแสดงผลการทดลองการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการกักกันสารของเยื่อกรองประเภทต่างๆ	4
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบลักษณะการทำงานของเยื่อกรองชนิด RO, NF และ UF	5
ตารางที่ 2.3 ปริมาณการปล่อยโครเมียมจากแหล่งกำเนิดต่างๆ	20
ตารางที่ 2.4 ผลการวิเคราะห์เสกชะวาลนท์โครเมียมของตัวอย่างน้ำทิ้งใน โครงการนักรบสิ่งแวดล้อม	21
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเยื่อกรองนาโน รุ่น NF 90 - 4040 บริษัท Filmtech	28
ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เสกชะวาลนท์โครเมียม	31
ตาราง ก - 1 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงานในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล (พ.ศ. 2537-2541)	61
ตาราง ก - 1 ผลของความดันต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน (ตาราง ก-1.1 – ตาราง ก-1.6)	72
ตาราง ก - 2 ผลของพีเอชต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน (ตาราง ก-2.1 – ตาราง ก-2.4)	78
ตาราง ก - 3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพ การกักกันโครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน (ตาราง ก-3.1 – ตาราง ก-3.5)	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2.1	หลักการกรองของเยื่อกรอง	5
รูปที่ 2.2	โปรไฟล์ความเข้มข้นของสารจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน	10
รูปที่ 2.3	โปรไฟล์ความเข้มข้นที่ภาวะสถานะคงตัวกรณีมีการตกสะสมของสารกรอง	11
รูปที่ 2.4	การอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อกรอง	12
รูปที่ 2.5	กลไกการคัดแยกสารด้วยขนาดของอนุภาค	12
รูปที่ 2.6	กลไกการคัดแยกสารด้วยผลของไฟฟ้าสถิต	13
รูปที่ 2.7	ความสามารถในการละลายของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของไตรวาเลนท์โครเมียม	17
รูปที่ 3.1	การทำงานของระบบเยื่อกรองนาโนชนิด Dead-end stirred cell	29
รูปที่ 3.2	ระบบเยื่อกรองนาโน	30
รูปที่ 4.1	ผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ของเยื่อกรองนาโน	33
รูปที่ 4.2	ผลของความดันต่อประสิทธิภาพการกักกันโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน	34
รูปที่ 4.3	ผลของความดันต่อสภาพการนำไฟฟ้า	36
รูปที่ 4.4	แสดงผลของความดันต่อการลดลงของฟลักซ์	37
รูปที่ 4.5	ภาพแสดงผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเยื่อกรองนาโน	39
รูปที่ 4.6	ภาพแสดงผลของค่าพีเอชต่อสภาพการนำไฟฟ้า	40
รูปที่ 4.7	ภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงพีเอชระหว่างการเดินระบบ	41
รูปที่ 4.8	ภาพแสดงผลของพีเอชต่อเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์	42
รูปที่ 4.9	ภาพแสดงผลของความเข้มข้นโครเมียมต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน	44
รูปที่ 4.10	ภาพแสดงผลของความเข้มข้นโครเมียมต่อสภาพการนำไฟฟ้า	45
รูปที่ 4.11	ภาพแสดงผลของความเข้มข้นของโครเมียมต่อเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM แสดงการเปรียบเทียบการกักกันเฮกซะวาเลนท์โครเมียมบนเยื่อกรองนาโน (กำลังขยาย 20,000 เท่า)	47
รูปที่ 4.13 ภาพแสดงไดอะแกรมการเดินระบบของเยื่อกรองนาโน	48
รูปที่ 4.14 ภาพแสดงแสดงความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่รีเทนเตดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	52
รูปที่ 4.15 ภาพแสดงความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่รีเทนเตดของการทดลองเทียบแบบจำลอง	53



จึงมีการศึกษาการกำจัดโครเมียมด้วยเยื่อกรอง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังเป็นที่สนใจทั่วโลก เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดสูง ไม่สิ้นเปลืองพื้นที่ในการติดตั้งระบบ และการดำเนินการไม่ยุ่งยาก

เยื่อกรองนาโน (Nanofiltration membrane, NF) เป็นเยื่อกรองที่สามารถกักกันอนุภาค สารแขวนลอย สารอินทรีย์ต่างๆ แบคทีเรีย ไวรัส รวมไปถึงสารที่มีวาเลนซ์ตั้งแต่สองขึ้นไป ขนาดรูพรุนเล็กกว่าเยื่อกรองอัลตรา (Ultrafiltration membrane, UF) ทำให้กักกันสารได้มากกว่า และใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนต่ำกว่าเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO) มีอายุการใช้งานมากกว่า ซึ่งเหมาะกับการกำจัดโลหะหนัก เพราะโลหะหนักมีวาเลนซ์ตั้งแต่สองขึ้นไปเป็นส่วนใหญ่ แต่ในปัจจุบันยังไม่มีผู้ใดศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรม รวมไปถึงการทำนายการกำจัดโครเมียมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดและการลดลงของฟลักซ์ผ่านเยื่อกรอง รวมทั้งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำงาน และการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการกำจัดโครเมียมในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน

1.2.3 เพื่อศึกษาการอุดตันของเยื่อกรองนาโนเนื่องจากการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

1.2.4 เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการกำจัดโครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม โดยเตรียมจากโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)

1.3.2 เยื่อกรองนาโนเป็นแบบ Thin film composite membrane โดยวัสดุที่ใช้ทำเยื่อกรองคือ โพลีเอไมด์ (Polyamide)

1.3.3 การเดินระบบเยื่อกรองนาโนเป็นแบบ Dead-end stirred cell ที่สภาวะความดันคงที่ที่ 30, 50, 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพของเยื่อกรองนาโน จากค่าการกักกันสารของเยื่อกรอง (Rejection) และค่าการลดลงของอัตราการกรองผ่านเยื่อกรอง (Flux decline)

1.3.5 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้แก่

ความเข้มข้นของโครเมียม แปรค่าที่ 0, 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

พีเอช แปรค่าที่ 3, 5, 7 และ 9

ความดันขับเคลื่อนผ่านเยื่อกรอง แปรค่าที่ 30, 50 และ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

1.3.6 ศึกษาคุณลักษณะของสารอุดต้นบนผิวหน้าเยื่อกรองด้วยภาพถ่ายการอุดต้น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่งอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงประสิทธิภาพการกำจัดและปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมโดยเยื่อกรองนาโน

1.4.2 สามารถประยุกต์ใช้เยื่อกรองนาโนในการกำจัดโครเมียม และ/หรือ โลหะหนักประเภทอื่นๆ ในน้ำเสียอุตสาหกรรม

1.4.3 สามารถประยุกต์ใช้เยื่อกรองนาโนในการนำโครเมียมและ/หรือ โลหะหนักประเภทอื่นๆ ในน้ำเสียอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่ได้

1.4.4 สามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการกำจัดโครเมียมของเยื่อกรองนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และหลักการ

2.1 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) เป็นกระบวนการแยกสารด้วยเยื่อกรองเพื่อแยกอนุภาคคอลลอยด์ ของแข็งแขวนลอย จุลินทรีย์ รวมไปถึงสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลตั้งแต่สองขึ้นไป ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 0.001 - 0.01 ไมครอน (μm) ออกจากของเหลว หรือก๊าซ โดยที่เยื่อกรองนาโน (NF) สามารถกักกันไอออนมวลโมเลกุลหนึ่งได้ร้อยละ 50 - 90 แต่จะสามารถกักกันไอออนมวลโมเลกุลสองได้มากกว่าร้อยละ 99 ความสามารถในการทำงานของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน อยู่ระหว่างกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis, RO) และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการกักกันสารชนิดต่างๆ โดยเยื่อกรอง 3 ชนิดได้แก่ RO, NF และ UF

ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการกักกันสารของเยื่อกรองประเภทต่างๆ (มันลิน, 2538)

Species	RO	NF	UF
Sodium chloride, NaCl	99 %	0 - 50 %	0 %
Sodium sulfate, Na ₂ SO ₄	99 %	99 %	0 %
Calcium chloride, CaCl ₂	99 %	0 - 60 %	0 %
Magnesium sulfate, MgSO ₄	> 99 %	> 99%	0 %
Sulfuric acid, H ₂ SO ₄	98 %	0 %	0 %
Hydrochloric acid, HCl	90 %	0 %	0 %
Fructose, MW 180	> 99 %	> 99 %	0 %
Sucrose, MW 360	> 99 %	> 99 %	0 %
Humic acid	> 99 %	> 99 %	0 %
Virus	99.99 %	99.99 %	99 %
Protein	99.99 %	99.99 %	99 %
Bacteria	99.99 %	99.99 %	99 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคที่ถูกกักกันไว้โดยเยื่อกรองนาโน (Molecular Weight Cutoff, MWCO) อยู่ในช่วง 100 - 1,000 ดาลตัน (Da) ความดันที่ใช้เป็นแรงขับเคลื่อนผ่านเยื่อกรอง (Transmembrane pressure, TMP) อยู่ในช่วง 500 – 1400 กิโลปาสกาล (kPa) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

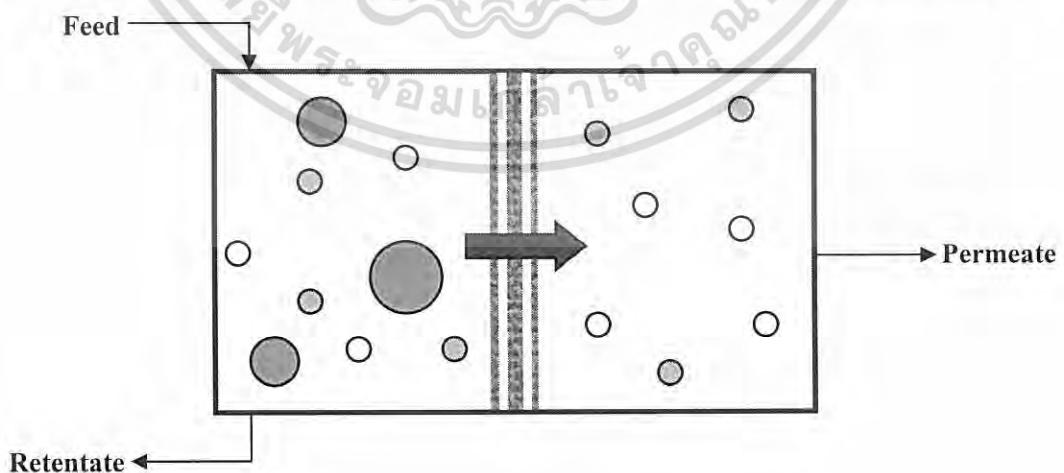
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบลักษณะการทำงานของเยื่อกรองชนิด RO, NF และ UF (จันทอง, 2547)

เยื่อกรอง	ขนาดอนุภาค (μm)	MWCO (Da)	TMP (kPa)
รีเวอร์สออสโมซิส (RO)	≤ 0.001	≤ 100	1,300 – 7,000
นาโนฟิลเตรชัน (NF)	0.001 – 0.01	100 – 1,000	500 – 1,400
อัลตราฟิลเตรชัน (UF)	0.01 - 0.1	1,000 – 500,000	200 – 1,400

พอลิเมอร์ที่มักใช้ทำเยื่อกรองนาโน ได้แก่ พอลิเอไมด์เชิงประกอบ (Thin film composite polyamide membrane, PA), เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate, CA), พอลิซัลโฟน (Polysulfone, PS), พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) และพอลิอะคริโลไนไตรด์ (Polyacrylonitrile) เป็นต้น (จันทอง, 2547)

2.2 หลักการกรองผ่านเยื่อกรอง

ระบบเยื่อกรองใช้เป็นตัวกลางขวางกั้นระหว่างเฟสของไหลสองเฟสที่มีสมบัติไม่ให้อาหารบางชนิดผ่านได้ หลักการกรองพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยมีสารป้อน (Feed) เข้าสู่ระบบทางด้านหนึ่ง แล้วผ่านเยื่อกรองออกไปเรียกว่า เพอร์มิเอต (Permeate) สารละลายที่ออกมาส่วนนี้มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนสารละลายที่ไม่สามารถผ่านไปได้เรียกว่า รีเทนเตต (Retentate) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงมาก



รูปที่ 2.1 หลักการกรองของเยื่อกรอง (จันทอง, 2547)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่สารละลายผ่านเยื่อกรองได้นั้นอาศัยหลักการ 2 ประการด้วยกัน (จันทอง, 2547) คือ

2.2.1 การละลาย – การแพร่ (Solution-diffusion model)

ในกรณีที่ความดันทุกๆจุดภายในระบบเยื่อกรองเท่ากันตลอด ตัวถูกละลายที่ละลายในตัวทำละลายทำให้สารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น เมื่อป้อนสารเข้าสู่ระบบตามปกติสารที่มีความเข้มข้นสูงกว่าจะแพร่ผ่านเยื่อกรองไปยังส่วนที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าจนกระทั่งความเข้มข้นทั้งสองส่วนมีค่าเท่ากัน เรียกว่า การออสโมซิส (Osmosis) แต่ในความเป็นจริงต้องการไม่ให้สารผ่านไปอีกด้านหนึ่งคือ โมเลกุลของน้ำจะสวนทางกับการออสโมซิสด้วยความดันที่ป้อนเข้าไปทางด้านสารป้อน กระบวนการนี้เรียกว่า รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) หลักการนี้สามารถใช้ได้กับเยื่อกรองนาโน (NF) และเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส (RO) ดังนั้นความดันที่ใช้ในการขับเคลื่อนสาร (Transmembrane pressure) จึงต้องมีค่าสูงกว่าความดันออสโมติกที่เกิดจากสารละลาย (Osmotic pressure) เพื่อให้ น้ำเพอร์มิเอทสามารถไหลผ่านเยื่อกรองได้

2.2.2 การไหลผ่านรูพรุน (Pore-flow model)

สมมติว่าความเข้มข้นของตัวทำละลายและตัวถูกละลายภายในเยื่อกรองเท่ากัน การที่สารละลายจะผ่านเยื่อกรองได้ส่วนหนึ่งต้องอาศัยขนาดรูพรุนของเยื่อกรองเป็นตัวกักกันสารละลาย หากสารละลายมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนจะสามารถไหลผ่านรูพรุนตามอัตราการไหล แต่หากสารละลายมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองจะไม่สามารถไหลผ่านเยื่อกรองได้ทำให้สารนั้นติดค้างบนผิวหน้าเยื่อกรอง หลักการนี้สามารถใช้ได้กับเยื่อกรองนาโน (NF), อัลตรา (UF) และไมโคร (MF)

หลักการทั้งสองประการดังกล่าวสามารถเกิดได้กับเยื่อกรองนาโน เนื่องจากเยื่อกรองนาโนสามารถกักกันไอออนวาเลนซ์สอง และสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าได้ แต่สามารถกักไอออนวาเลนซ์หนึ่งได้น้อยแม้ว่าเยื่อกรองเป็นแบบเนื้อแน่น (Solution-diffusion Membrane) ก็ตาม เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ไประหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ในเยื่อกรองเป็นที่เชื่อว่าจะทำให้บริเวณที่มีอนุภาคอยู่เกิดช่องว่างชั่วขณะหนึ่ง และจะหายไปเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านไป ต่างจากเยื่อกรองแบบรูพรุนที่เป็นรูถาวร ช่วงรอยต่อนี้ค่าฟลักซ์จะมีค่าสูงกว่าเยื่อกรองแบบเนื้อแน่น แต่ค่าการเลือกผ่านจะสูงกว่าเยื่อกรองแบบรูพรุน

2.2.3 ทฤษฎีการกรองผ่านเยื่อกรอง

ฟลักซ์ของสารผ่านเยื่อกรอง (Permeate flux)

เป็นค่าอัตราการไหลของสารผ่านเยื่อกรองมีหน่วยเป็น ปริมาตร/พื้นที่ เวลา สามารถคำนวณได้จากสมการของดาร์ซี (Darcy's Law) ดังสมการที่ 2.1 (Bessiere และคณะ, 2005)

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m)} \quad (2.1)$$

โดยที่ J = ฟลักซ์ของสารที่ผ่านเยื่อกรอง (Permeate flux) ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$)

ΔP = ความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง (psi)

μ = ค่าความหนืดของน้ำ (psi · min)

R_m = ความต้านทานทางชลศาสตร์ของแผ่นเยื่อกรองที่สะอาด (m^{-1})

โดยที่ค่าความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง (Transmembrane pressure, TMP) คำนวณได้จากสมการที่ 2.2 (Ahmad และคณะ, 2005)

$$\Delta P = \left(\frac{P_f + P_r}{2} \right) - P_p \quad (2.2)$$

โดยที่ ΔP = ความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง (psi)

P_f = ความดันที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (psi)

P_r = ความดันที่รีเทนเทด (psi)

P_p = ความดันที่เพอร์มิเอท (psi)

ฟลักซ์ของน้ำผ่านเยื่อกรอง (Water permeate flux)

เป็นค่าอัตราการไหลของน้ำผ่านเยื่อกรองโดยให้การซึมผ่านต่อ 1 หน่วยพื้นที่ เป็นอัตราการไหลของรีเวอร์สออสโมซิส ดังสมการที่ 2.3 (Stafie และคณะ, 2005)

$$J_w = K_w (\Delta P - \Delta \pi) \quad (2.3)$$

โดยที่ J_w = ฟลักซ์ของน้ำที่ผ่านเยื่อกรอง ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$)

K_w = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านเยื่อกรอง ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min} \cdot \text{psi}$)

ΔP = ความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง (psi)

$\Delta \pi$ = ผลต่างของความดันออสโมติก ($\pi_{\text{feed}} - \pi_{\text{permeate}}$) (psi) (Ranjan และคณะ, 2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ความดันออสโมติกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 (www.dbhs.wvusd.k12.ca.us; Tarleton และคณะ, 2005)

$$\pi = nCRT \quad (2.4)$$

โดยที่ π = ความดันออสโมติก (psi)
 n = จำนวนไอออนในสารประกอบ
 C = ความเข้มข้น (mol/L)
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas constant) (0.082 atm · L/mol · K)
 T = อุณหภูมิ (K)

ประสิทธิภาพของเยื่อกรอง (Recovery factor หรือ % Recovery)

ได้แก่อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของสารที่ผ่านเยื่อกรอง ต่อปริมาตรของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ดังสมการที่ 2.5 (Chellam และ Taylor, 2001)

$$\% Re = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100 \quad (2.5)$$

โดยที่ % Re = ประสิทธิภาพของเยื่อกรอง
 Q_p = อัตราการไหลของสารที่ผ่านเยื่อกรอง (m³/d)
 Q_f = อัตราการไหลของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (m³/d)

ประสิทธิภาพการกักกันโดยเยื่อกรอง (% Rejection)

การกรองผ่านเยื่อกรองสามารถกักกันสารต่างๆ ออกจากน้ำได้โดยการหาประสิทธิภาพการกักกันโดยเยื่อกรอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 (Yang และคณะ, 2005)

$$\% R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f} \right) \times 100 \quad (2.6)$$

โดยที่ % R = ประสิทธิภาพการกักกันโดยเยื่อกรอง (%)
 C_p = ความเข้มข้นของสารที่เพอร์มิเอท (mol/L)
 C_f = ความเข้มข้นของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (mol/L)

จากประสิทธิภาพของเยื่อกรองนาโน ส่วนใหญ่คำนึงถึงการกำจัดสารละลายออกจากน้ำและระบบโดยทำการวิจัยแบบต่อเนื่อง (Continuous cell) ความเข้มข้นของสารบนผิวของเยื่อกรองจะมีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีการป้อนน้ำเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องสารละลายจะถูกกักกันไว้ที่ผิวหน้าเยื่อกรอง ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดลดลง ส่วนนี้กำหนดให้การเกิดปฏิกิริยาอยู่ในสภาวะสมดุล

$$\begin{aligned} Mass_{in} - Mass_{out} &= Accumulation \\ Q_f C_f - Q_p C_p &= V_r \frac{dC_r}{dt} \end{aligned} \quad (2.7)$$

จากสมการมวลสาร (Thorsen, 1998) กำหนดการเดินระบบที่ความดันคงที่ $\Delta P = \text{Constant}$ และความเข้มข้นของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบคงที่ $C_f = \text{Constant}$ เมื่อเวลาใดๆ

ส่วนของเพอร์มิเอทความเข้มข้นจะมีค่าลดลง ส่วนฟลักซ์จะลดลงเนื่องจากการอุดตันของเยื่อกรอง

ส่วนของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบความเข้มข้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนฟลักซ์จะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ขณะที่ปริมาตรของถังคงที่

2.3 กลไกการอุดตันเยื่อกรอง และการลดลงของฟลักซ์

การอุดตันคือ การสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคของสารไม่สามารถกรองผ่านเยื่อกรองได้ และไม่สามารถกลับสู่สารละลายได้อีก เป็นผลให้ตัวถูกละลายสาร โมเลกุลใหญ่ สารแขวนลอย รวมไปถึงสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กระดับเซลล์สะสมอยู่บนผิวหน้าของเยื่อกรอง และทำให้ความต้านทานของเยื่อกรองเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากความต้านทานที่เกิดจากการอุดตัน ดังสมการที่ 2.8 (Bessiere และคณะ, 2005)

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_f)} \quad (2.8)$$

โดยที่ J = ฟลักซ์ของน้ำผ่านเยื่อกรองที่ 25 °C ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)

ΔP = ความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง (psi)

μ = ค่าความหนืดของน้ำที่ 25 °C (psi·s)

R_m = ความต้านทานทางชลศาสตร์ของแผ่นเยื่อกรองที่สะอาด (m^{-1})

R_f = ความต้านทานทางชลศาสตร์จากการอุดตันของเยื่อกรอง (m^{-1})

จากสมการการลดลงของฟลักซ์เป็นผลมาจากการอุดตันของเยื่อกรอง ทำให้เยื่อกรองมีความต้านทานเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการสะสมตัวของสารปนเปื้อนบนผิวหน้าเยื่อกรอง ไม่ว่าจะเป็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ หรือจุลินทรีย์ต่างๆ ที่ปิดกั้นการไหลของสารละลายทำให้ค่าฟลักซ์ของการไหลผ่านเยื่อกรองลดลง

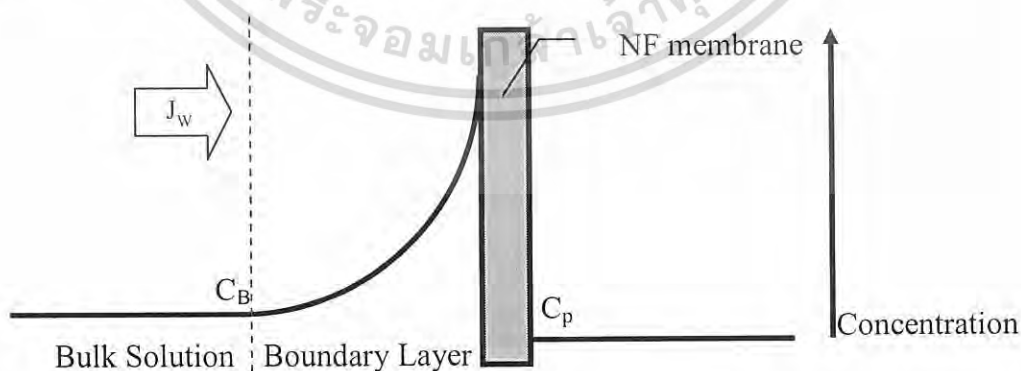
สาเหตุของการลดลงของฟลักซ์ (Flux decline)

2.3.1 ปฏิกิริยาการก่อกองคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (Concentration polarization)

เป็นปรากฏการณ์ที่ตัวถูกละลายหรือสารที่ต้องการกรองสะสมอยู่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง โดยเมื่อน้ำผ่านเข้ามามากขึ้น สารที่ถูกกักกันมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นบนผิวหน้าเยื่อกรอง ทำให้ความเข้มข้นบริเวณด้านหน้าเยื่อกรองสูงขึ้นตามระยะห่างระหว่างน้ำและเยื่อกรอง

จากรูปเมื่อน้ำเข้าสู่ชั้น Boundary Layer มากขึ้นทำให้สารที่ต้องการกรองคุดติดอยู่บนผิวหน้าเยื่อกรอง และเมื่อเพิ่มความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง ทำให้ความเข้มข้นของสารที่ต้องการกรองเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ (การสะสมของสารกรอง) เนื่องจากไม่มีการแพร่ย้อนกลับ ทำให้ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันเป็นสาเหตุของการอุดตันของเยื่อกรอง (Fouling) ส่งผลให้ความสามารถในการแพร่ผ่าน (Flux) และความสามารถในการเลือกสาร (Selectivity) ลดลง โดยความเข้มข้นของสารกรองจะลดลงตามประสิทธิภาพของเยื่อกรองหลังจากน้ำผ่านเยื่อกรองไปแล้ว ทำให้ได้น้ำสะอาดเช่นเดิม

ชั้นทอง (2547) กล่าวว่า ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีชั้นฟิล์ม (Film model) กรณีที่ไม่มีการตกสะสมของสารที่ต้องการกรองจะเกิดขึ้นขอบบนผิวหน้าเยื่อกรองเพื่อถ่ายโอนมวลสารในทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้าเยื่อกรองเท่านั้น (Dead end) ที่สภาวะคงตัว (Steady state) การเคลื่อนที่แบบการพา (Convection) ของสารกรองไปยังผิวหน้าเยื่อกรองจะเกิด Counterbalance กับฟลักซ์ของสารซึ่งค้างอยู่บนผิวหน้าเยื่อกรองกลับเข้าสู่เนื้อสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.2

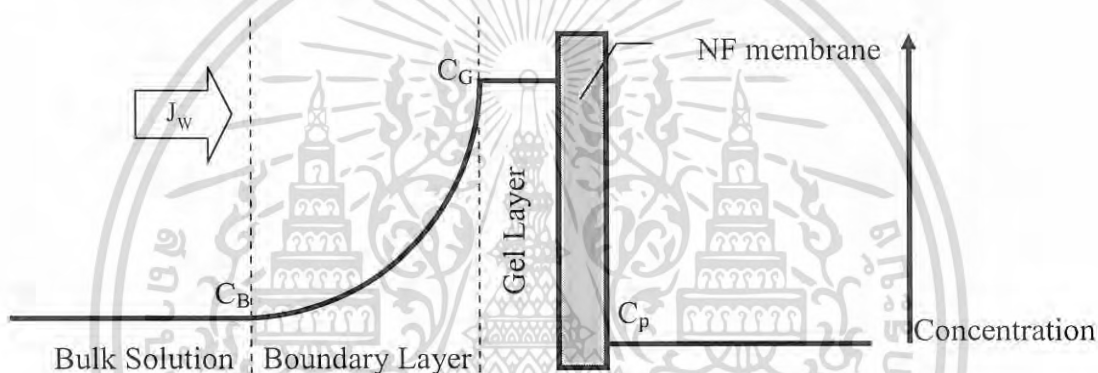


รูปที่ 2.2 โพรไฟล์ความเข้มข้นของสารจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (รัตนา, 2543)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การเกิดชั้นเค้ก (Cake formation)

จากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน กำหนดให้มีการตกสะสมของสารที่ต้องการกรอง ในสภาวะคงตัว เนื่องจากอนุภาคแขวนลอย (Macromolecule) มีสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายค่อนข้างต่ำ ทำให้การเคลื่อนที่มวลสารแบบการแพร่ (Diffusion) จากผิวหน้าเยื่อกรองกลับสู่เนื้อสารละลายอยู่ในระดับต่ำไม่สามารถเอาชนะการเคลื่อนที่มวลสารแบบการพา (Convection) เข้าสู่เยื่อกรองได้ จนความเข้มข้นของสารกรองเกินค่าการละลาย (Solubility) ทำให้การตกสะสมของสารกรองกลายเป็นชั้นเนื้อสารบนผิวหน้าเยื่อกรองปิดกั้นการไหลของสารผ่านเยื่อกรอง (Broeckmann, 2005) หากชั้นเนื้อสารดังกล่าวเป็นสารประกอบอินทรีย์ จะเกิดโครงสร้างแบบโครงข่ายสามมิติพองตัวมาก เรียกว่า ชั้นเจล (Gel Layer) (Dissertations.ub.rug.nl) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โพรไฟล์ความเข้มข้นที่ภาวะสถานะคงตัวกรณีที่มีการตกสะสมของสารกรอง (Dissertations.ub.rug.nl)

การตกสะสมบนผิวหน้าเยื่อกรองของอนุภาคแขวนลอยจะค้ำึงถึงการเคลื่อนที่มวลสารแบบการแพร่กลับสู่เนื้อสารละลายและการพาเข้าสู่เยื่อกรอง แต่การเคลื่อนที่มวลสารแบบการแพร่ยังไม่สามารถเอาชนะการพาได้ การแก้ไขสามารถทำได้โดยเพิ่มความดันที่ป้อนให้กับระบบ แต่ให้ฟลักซ์ที่ผ่านเยื่อกรองเพิ่มขึ้นชั่วคราวเท่านั้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มความดันจนกระทั่งฟลักซ์คงที่ในระดับหนึ่ง ความดันจะพาสารกรองไปตกค้างบนผิวหน้าเยื่อกรอง ส่วนนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายไม่มีผลต่อระบบ แต่เมื่อการอุดตันของชั้นเค้กบนเยื่อกรองเพิ่มสูงขึ้น ความต้านทานการไหลที่เกิดจากการอุดตันในชั้นเค้ก (R_c) จะเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งฟลักซ์ลดลงกลับมาเท่าเดิม ดังนั้นชั้นเค้กไม่เพียงแต่ทำให้การอุดตันเยื่อกรองลดความสามารถของฟลักซ์ลง ยังมีผลต่อคุณสมบัติการแยกผ่านเยื่อกรองโดยมีชั้นเค้กเป็นเยื่อกรองชั้นที่สอง ซึ่งมีหน้าที่กั้นสารกรองที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อกรอง ทำให้การแยกองค์ประกอบของสารกรองคลาดเคลื่อนไปจากเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การอุดตันภายในรูพรุน (Interior pore blockage)

จากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน กำหนดให้มีการตกสะสมของสารที่ต้องการกรอง ในสภาวะคงตัว สารกรองซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กอาทิเช่น สารที่มีขนาดระดับไอออน มีความเป็นขั้วสูง (มีแรงดึงดูดระหว่างไอออนสูง) และส่วนใหญ่เป็นไอออนประจุบวก และเนื่องจากเยื่อกรองส่วนใหญ่เป็นประเภทชอบน้ำ (Hydrophilic) มีประจุบนผิวเป็นประจุลบทำให้สารกรองประเภติดังกล่าวเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับผิวของเยื่อกรอง และเข้าไปแทรกอยู่ในระหว่างรูของเยื่อกรอง จุดติดที่ผิวด้านใน (Electrostatic attraction) ทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง สูญเสียคุณสมบัติการแยกสาร กีดขวางการไหล และล้างทำความสะอาดได้ยาก ดังรูปที่ 2.4

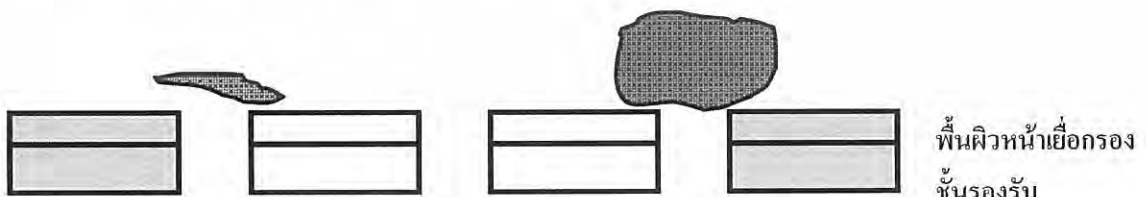


รูปที่ 2.4 การอุดตันภายในรูพรุนของเยื่อกรอง

2.4 กลไกการกำจัดสารโดยเยื่อกรอง

2.4.1 กลไกการคัดแยกด้วยขนาด (Size exclusion)

การคัดแยกอนุภาคของเยื่อกรอง โดยอาศัยขนาดและรูปร่างของสารกรองที่สามารถผ่านเข้าสู่เยื่อกรอง มีปัจจัยสำคัญในการคัดขนาดคือ ระดับน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคที่ถูกกักไว้ไม่ให้ผ่านรูพรุนของเยื่อกรอง (Molecular Weight Cutoff, MWCO) ซึ่งหากขนาดอนุภาคของสารปนเปื้อนมีมวลโมเลกุลมากกว่าระดับน้ำหนักโมเลกุลดังกล่าวจะไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ ส่วนสารที่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่าจะพิจารณารูปร่างและการกระจายอนุภาคของสารกรองอีกครั้งหนึ่ง หากสารกรองนั้นมีลักษณะกว้างหรือมีการกระจายอนุภาคค่อนข้างต่ำ เมื่อสารนั้นเคลื่อนผ่านเยื่อกรองจะไม่สามารถผ่านออกไปได้ และตกค้างอยู่ภายในรูพรุน ดังรูปที่ 2.5

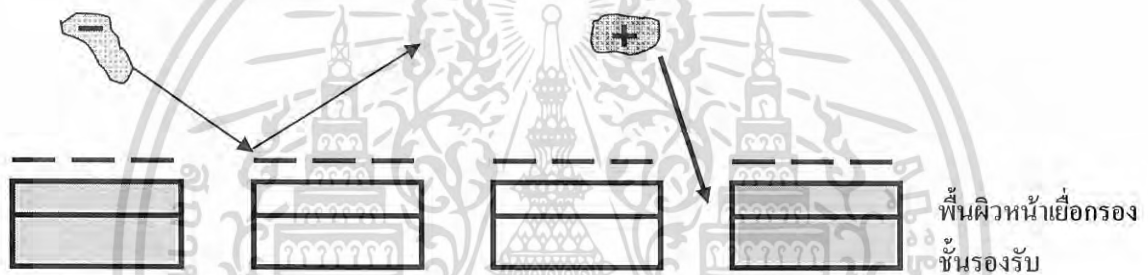


รูปที่ 2.5 กลไกการคัดแยกสารด้วยขนาดของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 กลไกการคัดแยกด้วยผลของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic effect)

สารปนเปื้อนที่มีขนาดอนุภาคเล็กซึ่งสามารถผ่านรูพรุนของเยื่อกรองได้ทำให้คุณภาพของน้ำหลังการบำบัดลดลง โดยเฉพาะสารที่มีขนาดอนุภาคระดับไมออนสามารถแพร่ผ่านเยื่อกรองได้ในปริมาณมาก และสารที่สามารถละลายน้ำได้ดีจะใช้อนุภาคของน้ำพาเข้าสู่เยื่อกรองและผ่านออกไปได้เช่นเดียวกัน การคัดแยกอนุภาคด้วยวิธีนี้อาศัยผลของไฟฟ้าสถิต และลักษณะขั้วของสารกรองและผิวเยื่อกรอง หากสารกรองมีประจุเดียวกันกับผิวเยื่อกรอง อนุภาคของสารกรองจะถูกผลักออกด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตระหว่างขั้วของอนุภาคและผิวเยื่อกรอง เรียกว่า Electrostatic repulsion แต่หากสารกรองมีประจุตรงกันข้ามกับประจุของผิวเยื่อกรอง จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วทำให้อนุภาคของสารกรองดูดติดผิวเยื่อกรอง และไม่สามารถผ่านเข้าไปพร้อมกับน้ำได้ เรียกว่า Electrostatic attraction (Dissertations.ub.rug.nl) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกการคัดแยกสารด้วยผลของไฟฟ้าสถิต

ผลของไฟฟ้าสถิตทั้งสองแบบสามารถกักกันสารที่ไม่ต้องการได้ แต่กระบวนการ Electrostatic attraction นั้นมีข้อเสียซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเยื่อกรองลดลง เนื่องจากสารที่ไม่ต้องการจะดูดติดอยู่บนผิวหรือภายในรูพรุนของเยื่อกรองทำให้เกิดการอุดตัน ถึงแม้ว่าสามารถทำความสะอาดได้ แต่ประสิทธิภาพของเยื่อกรองจะน้อยกว่ากระบวนการ Electrostatic repulsion เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวทำให้สารถูกผลักออกจากผิวเยื่อกรอง จึงลดการอุดตันและเพิ่มประสิทธิภาพการกักกันสารโดยเยื่อกรองได้ (Dissertations.ub.rug.nl)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเยื่อกรอง

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเยื่อกรองสามารถสรุปได้ 3 ปัจจัยหลักคือ

2.5.1 คุณสมบัติของเยื่อกรอง

- *ขนาดรูพรุน* สามารถอธิบายได้ด้วยระดับน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคที่ถูกกักกัน (Molecular Weight Cutoff, MWCO) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการบอกประเภทและความสามารถของเยื่อกรองในการกักกันสารซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่ารูพรุนที่กำหนด

- *ประจุบนผิวเยื่อกรอง* โดยทั่วไปผิวเยื่อกรองจะมีประจุบวกหรือประจุลบขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการทำเยื่อกรอง ไม่ว่าจะเป็นเยื่อกรองอินทรีย์ หรือเยื่อกรองอนินทรีย์ตามหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเยื่อกรอง โดยส่วนใหญ่เยื่อกรองนาโนมีองค์ประกอบเป็นประจุลบทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนที่มีประจุชนิดเดียวกัน (www.pall.com)

2.5.2 คุณลักษณะของสารละลาย

- *ความเข้มข้นของสารละลาย* การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือในสารละลาย ทำให้แรงดันออสโมติกของสารละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้ความดันในการแพร่ผ่านสูงขึ้น แต่หากกำหนดให้ความดันที่แพร่ผ่านเยื่อกรองมีค่าคงที่ จะทำให้ฟลักซ์ลดลงตามสมการ 2.3 และกรณีที่ความเข้มข้นสูงจะทำให้ไอออนประจุเดี่ยว เช่น โซเดียมไอออน (Na^+) ทะลุผ่านเยื่อกรองสูงขึ้น และประสิทธิภาพการกักกันจะลดลง (Frares และคณะ, 2005)

- *พีเอช (pH)* ความเป็นกรดด่างของสารละลายมีผลต่อการแตกตัวของสารอิเล็กโทรไลต์ (อาจเป็นสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพพีเอช) หรือสัดส่วนระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนและไฮโดรเนียมไอออน รวมไปถึงการมีชั้น Double Layer ของเยื่อกรอง ตลอดจนอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกละลายกับเยื่อกรอง โดยที่ปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมีผลต่อการฟอร์มตัวของตัวถูกละลายเพื่อให้เกิดเป็นสารที่ไม่มีประจุสำหรับตัวถูกละลายที่เกี่ยวข้องกับประจุ (Manttari และคณะ, 2006)

- *ความแรงของประจุ (Ionic strength)* สามารถอธิบายได้จากผลของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic effect) เมื่อความแรงของประจุสูงขึ้น ความสามารถในการดึงดูด (Electrostatic attraction) หรือการผลัก (Electrostatic repulsion) ระหว่างตัวถูกละลายกับเยื่อกรองจะเพิ่มมากขึ้น รวมไปถึงจะทำให้ประจุที่อยู่บนผิวเยื่อกรองลดลงเนื่องจากชั้น Double Layer ถูกบีบอัดจนแน่น ส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์และการยอมให้ผ่านของเยื่อกรองด้วย (Gzara และ Dhahbj, 2001)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- *ประจุของสาร* หากสารปนเปื้อนมีประจุลบจะเกิดแรงผลักกับเยื่อกรองนาโนที่มีประจุบนผิวส่วนใหญ่เป็นประจุลบเนื่องจากผลของไฟฟ้าสถิต (www.pall.com) ซึ่งช่วยลดการอุดตันของ เยื่อกรอง ทำให้การกักกันของสารเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของเพอร์มิเอทลดลง

2.5.3 สภาพการทำงานของระบบ

- *ความดัน* จากสมการที่ 2.1 และ 2.3 ในระบบจะมีแรงดันออสโมติกอยู่ค่าหนึ่งซึ่งทำให้สารที่ต้องการกรองมีปริมาณเพิ่มขึ้น พลังค์ของสารที่ไหลออกจากระบบจะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน แต่การเพิ่มความดันทำให้เยื่อกรองอุดตันเร็วขึ้นและอัดตัวเข้าหากัน (Compaction) มากขึ้น (Peeva และคณะ, 2004)

- *อัตราการไหลของสารละลาย* เมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มมากขึ้นความเร็วของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะมีค่าสูงขึ้นทำให้การอุดตันของเยื่อกรองลดลง (Concentration polarization) หรือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีค่าสูงขึ้น แต่ต้องเสียพลังงานมากขึ้น เนื่องจากระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น (จันทอง, 2547)

- *อุณหภูมิ* ที่อุณหภูมิสูงความหนืดของสารละลายลดลง สัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้น จะทำให้ทั้งน้ำและตัวถูกละลายแพร่ผ่านเยื่อกรองได้ดีค่าการกักกันจึงลดลง ทำให้สิ่งอุดตันสามารถหลุดออกจากผิวเยื่อกรองกลายเป็นการทำความสะอาดภายในตัว (รัตนา, 2543)

- *ประเภทของการไหลผ่านเยื่อกรอง* สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

ก) *Dead-end* สารปนเปื้อนจะไหลเข้าสู่ระบบในทิศทางตั้งฉากกับเยื่อกรอง ในระบบนี้จะมีการตกสะสมของสารปนเปื้อนที่ถูกกักกันบนผิวเยื่อกรองอย่างต่อเนื่อง ทำให้พลังค์ของสารที่ผ่านเยื่อกรองลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งถ้าสารปนเปื้อนมีขนาดใหญ่จะเรียกการสะสมดังกล่าวว่า “เค้ก” (Cake) ทำให้เยื่อกรองหมดประสิทธิภาพอย่างรวดเร็วจึงต้องมีการทำความสะอาดโดยการล้างแบบย้อนกลับ (Backwash) เพื่อลดการเกิดการอุดตันและการเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน

ข) *Crossflow* สารปนเปื้อนไหลเข้าสู่ระบบในทิศทางขนานกับเยื่อกรองหรือตั้งฉากกับเพอร์มิเอททำให้เกิดการเฉือนระหว่างของไหลกับผิวเยื่อกรอง ซึ่งจะพาสารปนเปื้อนที่อุดตันบนผิวเยื่อกรองหลุดออกไปด้วย ช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (CP) และการอุดตัน (Fouling) ของเยื่อกรอง

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ระบบ Dead-end ซึ่งแตกต่างจากระบบ Crossflow โดยระบบ Dead-end จะไม่มีส่วนรีเทนเตดในระหว่างการเดินทางจึงไม่มีสารปนเปื้อนย้อนกลับ ซึ่งมีลักษณะการไหลเป็นแบบตั้งฉากกับเยื่อกรอง ทำให้การกักกันและการลดลงของพลังค์ขึ้นกับความดันเป็นส่วนใหญ่ ส่วน Crossflow จะมีส่วนรีเทนเตด ในระหว่างเดินทางจึงสามารถนำสารปนเปื้อนกลับมาใช้ใหม่ได้และมีลักษณะการไหลแบบตั้งฉากกับส่วนเพอร์มิเอท ทำให้เกิดแรงเฉือนลดการเกิดการอุดตันและปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ระบบเป็นแบบ Dead-end Stirred Cell คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีลักษณะแบบ Dead-end ในหน่วยของระบบจะมีการปั่นกววนของสารทำให้กระจายสารปนเปื้อนที่ผ่านเข้ามาไปในระบบอย่างทั่วถึง (Continuous flow stirred reactor, CSTR) โดยสาเหตุที่เลือกระบบนี้เนื่องจากตัวระบบสะดวกต่อการติดตั้ง มีการใช้งานและบำรุงรักษาไม่ยุ่งยาก ทนต่อการเกิดการชำรุดเสียหาย และมีรูปแบบในการศึกษาที่เข้าใจง่าย

2.6 การประยุกต์ใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันสำหรับการกำจัดโลหะหนัก

ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกักกันสารได้ดี โดยความดันที่ใช้ในการแพร่ผ่านต่ำ และสามารถใช้ร่วมกับกระบวนการอื่นๆ เป็นกระบวนการแบบผสมได้ (Hybrid process) การประยุกต์ใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันส่วนใหญ่ได้แก่ การบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเคลือบโลหะ น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ เป็นน้ำทิ้งที่เจือปนด้วยโลหะหนักและก่อปัญหาทางสิ่งแวดล้อม ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องแยกออกและถ้าสามารถนำกลับไปใช้ได้ก็จะช่วยให้กระบวนการมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ยิ่งขึ้น ได้มีการนำกระบวนการออสโมซิสผันกลับไปใช้แทนวิธีบำบัดเดิมที่ใช้อยู่ (ตัวอย่างเช่น การตกตะกอน การใช้เรซิน และการดูดซับ เป็นต้น) และพบว่าสามารถแยก/เพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักโดยมีค่าการกักกันสูงถึง 95 – 97% และเพอร์มิเอทเป็นน้ำสะอาดที่สามารถนำกลับไปใช้ได้ มีรายงานการประยุกต์ใช้อยู่หลายแห่ง ซึ่งผลงานวิจัยมีการนำไปใช้ในประเทศไทยด้วย (รัตนา, 2543)

2.7 โครเมียม

โครเมียม (Chromium, Cr) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 24 เกิดตามธรรมชาติในรูปของโครไมต์หรือสินแร่ประมาณ 0.037 % ของเปลือกโลก ความเข้มข้นของโครเมียมในดินจะพบตั้งแต่ปริมาณน้อยมากจนถึง 2.4 % ขณะที่ในบรรยากาศจะมีอยู่ในช่วง 0.001 – 0.007 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เลขออกซิเดชันของโครเมียมมีตั้งแต่ -2 ถึง +6

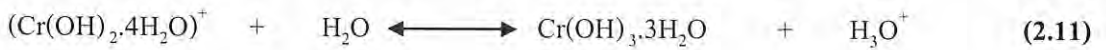
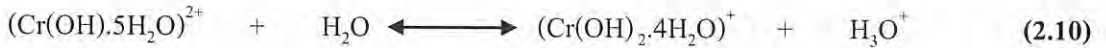
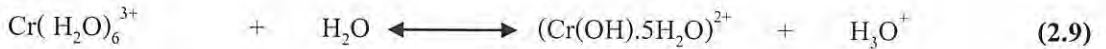
2.7.1 คุณสมบัติทั่วไปของโครเมียม (การะเกด และเกรียงศักดิ์, 2538) สามารถสรุปได้ดังนี้

- โครเมียม (-2 ถึง 0) พบมากในคาร์บอนิล และสารประกอบโลหะอินทรีย์
- ไตรวาเลนต์โครเมียม (Divalent Chromium, Cr^{2+}) เป็นตัวรีดิวซ์ที่แรง และถูกออกซิไดซ์เป็นไตรวาเลนต์โครเมียม โดยอากาศ
- ไตรวาเลนต์โครเมียม (Trivalent Chromium, Cr^{3+}) เป็นวาเลนต์ที่เสถียรพบมากในธรรมชาติ เมื่อละลายน้ำจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยมีโมเลกุลของน้ำเป็นลิแกนด์ในสภาวะกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.11 (พิชิต, 2544) และในสภาวะต่างสามารถรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH) เกิดเป็นสารประกอบโครเมียมไฮดรอกไซด์ซึ่งไม่ละลายน้ำดังสมการที่ 2.12 (ยุพา, 2547)

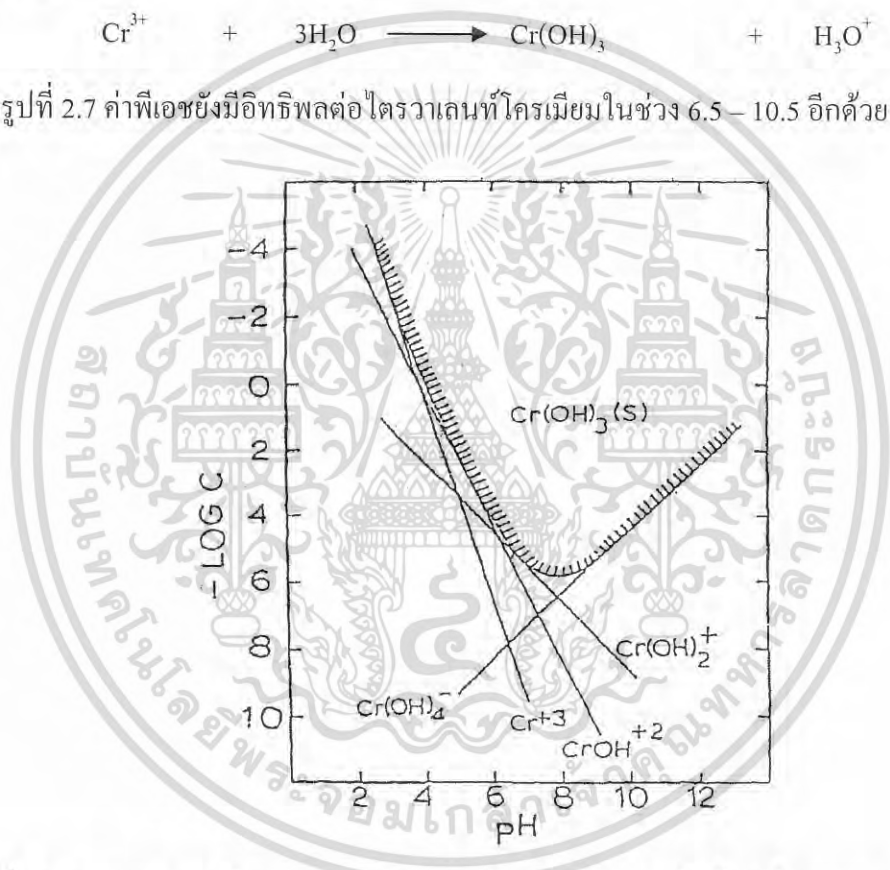
ในสภาวะกรด



ในสภาวะด่าง



และจากรูปที่ 2.7 ค่าพีเอชยังมีอิทธิพลต่อไตรวาเลนต์โครเมียมในช่วง 6.5 – 10.5 อีกด้วย



รูปที่ 2.7 ความสามารถในการละลายของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของไตรวาเลนต์โครเมียม (Kim, 1976)

- เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent Chromium, Cr^{6+}) พบมากในธรรมชาติพอกๆกับ ไตรวาเลนต์โครเมียม (Trivalent Chromium, Cr^{3+}) แต่จะพบในรูปของสารประกอบร่วมกับออกซิเจน (ยุพา, 2547) ได้แก่

Chromium VI oxide (CrO_3) หรือ Chromic anhydride

Sodium dichromate ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Potassium dichromate ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ammonium dichromate $[(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7]$

Chromic acid (สารละลายผสมของเฮกซะวาเลนที่โครเมียม ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น)

สารประกอบเฮกซะวาเลนที่โครเมียมเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง ในสภาวะกรดเมื่อเกิดปฏิกิริยาสามารถถูกรีดิวซ์เป็นไตรวาเลนที่โครเมียม โดยตัวให้อิเล็กตรอนเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ดังสมการที่ 2.13 (ยูพา, 2547)



- โครเมียมสามารถต้านการกัดกร่อนของโลหะได้ เนื่องจากโลหะโครเมียมสามารถทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์เกิดออกไซด์ชั้นบางๆเคลือบที่ผิวของโลหะ ส่งผลให้โลหะที่ถูกเคลือบไม่สามารถถูกออกซิไดซ์กับกรดอ่อนภายนอกได้

- คุณสมบัติทางกายภาพของโครเมียมที่สำคัญ จุดหลอมเหลว 1,875 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$), จุดเดือด 2,199 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$), ความหนาแน่น 7.19 กรัมต่อมิลลิกรัม (g/mL) (ที่อุณหภูมิ 20°C), ความร้อนของการหลอมเหลว 3.2 – 3.5 กิโลแคลอรีต่อโมล (kcal/mol), ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่จุดเดือด 76.635 กิโลแคลอรีต่อโมล (kcal/mol), และความร้อนจำเพาะ 5.55 กิโลแคลอรีต่อโมล (kcal/mol) เป็นต้น (www.scescape.net)

รายชื่อโครเมียมที่พบในเอกสารข้อมูลความปลอดภัยด้านเคมีภัณฑ์ (Material Safety Data Sheets, MSDS) มีดังนี้ (www.pcd.go.th)

Basic chromium sulfate	Chromium (iii) sulphate
Chromium (VI) Oxide	Chromium (VI) Oxide (1:3)
Chromium (VI) trioxide	Chromium, dichlorodioxo-, (T-4)-
Chromium anhydride	Chromium Chloride Oxide
Chromium dioxide alchloride	Chromium oxide
Chromium Oxide (Chromic Anhydride)	Chromium trioxide
Chromium trioxide (CrO_3)	Chromium yellow
Dichlorodioxochromium	Dioxodichlorochromium
Monochromium Oxide	Monochromium trioxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 ประโยชน์ของโครเมียม (นิตยา และคณะ, 2544)

ในอุตสาหกรรมหลายประเภทได้มีการนำโครเมียมมาใช้อย่างกว้างขวางเป็นเวลากว่า 10 ปี และมีความเป็นไปได้ว่าในระยะยาวจะมีการสะสม และกระจายตัวของโครเมียมในระบบนิเวศเพิ่มมากขึ้น

1. โครเมียมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับโลหะผสม หรือการเคลือบโลหะ พลาสติก และเหล็ก เรียกว่า การชุบโลหะ หรือการเคลือบโลหะทำให้แข็ง มีความเหนียว และทนทาน ป้องกันโลหะไม่ให้เป็นสนิม และคงทนต่อการผุกร่อน
2. โลหะโครเมียมบริสุทธิ์ใช้ในการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า
3. สารประกอบโครเมตของตะกั่ว สังกะสี และแบเรียม ซึ่งเรียกว่า “Chromo pigment” ใช้ในการทำสีต่างๆ ทำพรมน้ำมัน ทำยาง และใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา
4. สารประกอบโครเมียมยังใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมฟอกหนัง การย้อมสีขนสัตว์ ไหม และหนังสัตว์ เป็นต้น ซึ่งสารประกอบของโครเมียมที่มีสี เช่น Cr_2O_3 ทำให้เกิดสีเขียว, $\text{Cr}(\text{SO}_4)_3$ ทำให้เกิดสีม่วงแดง และ $\text{CrF}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ทำให้เกิดสีเขียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ปริมาณการปล่อยโครเมียมจากแหล่งกำเนิดต่างๆ (วุฒิชัย, 2545)

ลำดับที่	ลักษณะกิจการ	วันที่เก็บ ตัวอย่างน้ำทิ้ง	pH	ความเข้มข้นของ โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	โรงงานชุบโครเมียม	30 สค. 2539	8.4	26.40
2	โรงงานทำไฟแช็ค	27 มค. 2537	4.6	0.20
3	โรงงานผลิตล้อจักรยาน	10 มีค. 2537	6.1	60.00
4	โรงงานทำผลิตภัณฑ์โลหะแปรรูป	30 เมย. 2540	8.6	1.11
5	โรงงานผลิตรถจักรยาน	4 กค. 2539	7.6	0.02
6	โรงงานผลิตรถจักรยานยนต์	16 ธค. 2540	8.0	0.19
7	โรงงานชุบโลหะ	4 สค. 2541	7.0	50.00
8	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	2 กค. 2541	7.0	0.75
9	โรงงานผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า	8 กย. 2537	8.1	0.80
10	โรงงานผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี	30 พค. 2540	8.8	0.21
11	โรงงานผลิตน็อต, ดอกสว่าน	7 มีย. 2537	5.1	6.27
12	โรงงานผลิตกลอนประตูชุบโครเมียม	28 ธค. 2538	2.7	0.04
13	โรงงานเครื่องประดับชุบ	10 เมย. 2539	12.0	1.17
14	โรงงานผลิตเครื่องเรือนจากโลหะ	19 มีย. 2539	8.5	4.80
15	โรงงานหลอมรีดและชุบอลูมิเนียม	30 สค. 2539	6.7	0.04
ค่าเฉลี่ย			6.76	26.25
ช่วงความเข้มข้น			1.8-12.5	0.02-556.00
ค่ามาตรฐานสำหรับเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม			-	ไม่เกิน 0.25*
ค่ามาตรฐานสำหรับไตรวาเลนซ์โครเมียม			-	ไม่เกิน 0.75*

หมายเหตุ : รายละเอียดแสดงตามภาคผนวก ค

* มาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้ง (www.pcd.go.th)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ห้เฮกชะวาเลนที่โครเมียมของตัวอย่างน้ำทิ้งในโครงการน้กรบ
สิ่งแวดล้อม (www.pcd.go.th)

ประเภทโรงงาน	ปริมาณเฮกชะวาเลนที่โครเมียม (มก./ล.)*
โรงงานฟอกย้อม และสิ่งทอ	0.0114 – 0.112
โรงงานถักผ้า หรือเครื่องนุ่งห่มด้วยด้าย หรือ เส้นใยฟอกย้อมสี	0.0012 – 0.39
โรงงานผลิต ประกอบค้ดแปลง หรือซ่อมแซม เครื่องจักร เครื่องยนต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อ แปลง	0.0067 – 0.0122

*จากจำนวน โรงงานที่เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งทั้งหมด 243 แห่ง ขณะนี้ได้รับผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
ทิ้งจากสถาบันการศึกษาแล้ว 102 แห่ง ซึ่งเปรียบเทียบกับมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำ

จากตารางที่ 2.3 - 2.4 แสดงปริมาณการปล่อยโครเมียมจากแหล่งกำเนิดต่างๆ จะสังเกตได้ว่า
จากแหล่งกำเนิดต่างๆ มีการปล่อยน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อนอยู่เกินมาตรฐานที่กฎหมายกำหนด
เนื่องจากขาดการดูแลอย่างทั่วถึงของหน่วยงานราชการ และผู้ประกอบการไม่คำนึงถึงผลเสียที่เกิดขึ้น
ต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อมบริเวณใกล้เคียง ทำให้เกิดปัญหามลพิษและผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย
(รายละเอียดในหัวข้อ 2.7.3) โดยโรงงานชุบโลหะมีปริมาณการปล่อยโครเมียมสูงสุดถึง 50 มิลลิกรัมต่อ
ลิตร ซึ่งเป็น โรงงานที่มีการปล่อยโครเมียมเกินมาตรฐานมากที่สุด

2.7.3 ความเป็นพิษของโครเมียม

เฮกชะวาเลนที่โครเมียมจะมีความเป็นพิษมากกว่าไตรวาเลนที่โครเมียมประมาณ 100 เท่า
เนื่องจากเฮกชะวาเลนที่โครเมียมจะทำให้โปรตีนในร่างกายตกตะกอน เกิดการระคายเคืองที่ไต ทำให้
ไตอักเสบ ส่วนไตรวาเลนที่โครเมียมสามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีนในร่างกายเกิดเป็นสารแอนติเจน
แอนติบอดีเชิงซ้อน ทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง (dermatitis) (กิตติพร และสุนันท์, 2544)

ความเป็นพิษของโครเมียมมีผลกระทบต่อทั้งแบบเฉียบพลัน เรื้อรัง และกลายพันธุ์ ซึ่งสรุปได้ดังนี้
(www.msds.pcd.go.th ; www.epa.gov)

1. ความเป็นพิษเมื่อได้รับทางการหายใจ เนื่องจากโครเมียมมีฤทธิ์กัดกร่อน เมื่อหายใจเข้าไป
จะทำให้เกิดอันตรายในระบบทางเดินหายใจส่วนบน โดยเฮกชะวาเลนที่โครเมียมจะเข้าไปทำลายเยื่อ
ของผนังกันโพรงจมูกทำให้เกิดเป็นแผลพุพองและรูพุน ลำคออักเสบ มีอาการไอ หายใจถี่เร็ว และ
หายใจลำบาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความเป็นพิษเมื่อได้รับทางปาก เฮกซะวาเลนที่โครเมียมจะทำให้เกิดแผลไหม้บริเวณปาก ลำคอ และกระเพาะอาหาร ทำให้ผู้ที่ได้รับสารมีอาการเจ็บคอ อาเจียน ท้องร่วง ลำไส้อักเสบ เส้นเลือดหดตัว วิงเวียนศีรษะ กระจายน้ำ เกิดตะคริว หมดสติ เป็นไข้ การไหลเวียนเลือดผิดปกติ มีอาการโคม่า อาจทำให้เสียชีวิตได้ นอกจากนี้เฮกซะวาเลนที่โครเมียมยังมีพิษต่อตับ โดยจะเข้าไปทำลายเนื้อเยื่อตับ และทำให้เกิดไตวายเฉียบพลัน

3. ความเป็นพิษเมื่อได้รับทางผิวหนัง การสัมผัสทางผิวหนังจะทำให้เกิดอาการปวดแสบปวดร้อน มีผื่นแดง และแผลไหม้อย่างรุนแรง โดยฝุ่นและสารละลายเข้มข้นของเฮกซะวาเลนที่โครเมียมจะทำให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรง และเมื่อสัมผัสกับผิวหนังที่แตกหรือเป็นแผลจะทำให้เกิดแผลพุพอง (Chrome sores) หากซึมเข้าสู่รูปร่างกายจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อการทำงานของไต และตับ เป็นเหตุให้ผิวหนังไวต่อสิ่งกระตุ้น

4. ความเป็นพิษเมื่อได้รับทางตา เนื่องจากโครเมียมมีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้ตาพล่ามัว มองไม่ชัด ตาแดง ปวดตา และเกิดแผลไหม้อย่างรุนแรง อาจก่อให้เกิดบาดเจ็บต่อกระจกตาหรือตาบอดได้

5. การก่อมะเร็ง การสัมผัสโครเมียมเรื้อรัง การสัมผัสซ้ำ ๆ กัน หรือเป็นเวลานาน จะทำให้เป็นแผลพุพอง และผนังแบ่งกัน โพรงงมูกเกิดรู ทำให้ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ตับและไต ถูกทำลาย ผิวหนังเป็นแผลพุพอง การเป็นแผลพุพองเริ่มแรกจะไม่มีอาการเจ็บปวด แต่จะทะลุเข้าไปถึงกระดูกทำให้เกิดรูพรุน (Chrome holes) สารนี้เป็นสารมะเร็งก่อมนุษย์ปอด หรืออาการภูมิแพ้จากโรคหืด การสัมผัสกับโครเมียมในปริมาณมาก อาจทำให้เกิดอาการน้ำท่วมปอดได้

2.7.4 การกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย (การะเกด และเกรียงศักดิ์, 2538)

1. การรีดักชัน

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด ซึ่งเทคนิคนี้คือ ปรับพีเอชของน้ำเสียให้เป็น ≤ 3.0 ด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) แล้วเปลี่ยนเฮกซะวาเลนที่โครเมียมไปเป็นไตรวาเลนที่โครเมียมโดยใช้สารเคมี (Reducing agent) ยกตัวอย่างเช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2), โซเดียมโบซัลไฟต์ (NaS_2) หรือเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) แล้วกำจัดไตรวาเลนที่โครเมียมออกไป โดยทำให้ตกตะกอนด้วยปูนขาว การรีดิวซ์เฮกซะวาเลนที่โครเมียมนี้จะไม่ได้ผล 100 % โดยจำนวนของเฮกซะวาเลนที่โครเมียมที่ไม่ถูกรีดิวซ์จะขึ้นกับเวลาที่ทำปฏิกิริยา, พีเอช, ของผสม, ความเข้มข้น และชนิดของสารเคมีที่ใช้ ปกติสารที่นิยมมากที่สุดคือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การแลกเปลี่ยนประจุ

ใช้การแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange) ในการกำจัดไตรวาเลนท์โครเมียม และจะใช้การแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion exchange) ในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม เนื่องจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมมักพบเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในรูปโครเมต (CrO_4^{2-}) เมื่อเรซินที่แลกเปลี่ยนประจุลบอิ่มตัวก็จะทำการกลับมากำเนิดใหม่ (ปกติใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)) เพื่อนำกรดโครมิกกลับมาใช้ใหม่ หรือกำจัดโดยการรีดิวซ์ให้เป็นไตรวาเลนท์โครเมียม แล้วตกตะกอนด้วยปูนขาว การบำบัดด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้

3. การระเหย

นำน้ำที่มีโครเมียมปนเปื้อนมาผ่านกระบวนการระเหยน้ำออก จากนั้นนำไอน้ำไปผ่านการหล่อเย็น เพื่อนำไปใช้ใหม่ วิธีนี้นิยมใช้กับการบำบัดน้ำหล่อเย็น

4. การตกตะกอนด้วยสารเคมี

การตกตะกอนไตรวาเลนท์โครเมียมโดยใช้สารเคมี เช่น แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3), ปูนขาว (Ca(OH)_2), และ โซดาไฟ (NaOH) ตะกอนที่ได้นำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบ

5. การสกัดด้วยตัวทำละลาย

นำสารสกัดแม่พิมพ์ที่ใช้แล้ว (มีโครมิกเป็นองค์ประกอบ) มาทำการสกัดด้วยตัวทำละลาย เพื่อแยกเอากรดโครมิก (Chromic acid) ออกจากสารอื่น และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ตัวทำละลายที่ใช้ได้แก่ อะซีโตน (Acetone)

6. รีเวอร์สออสโมซิส

นำน้ำเสียที่มีเฮกซะวาเลนท์โครเมียม มาผ่านกระบวนการทำให้เข้มข้นขึ้นก่อน แล้วนำน้ำไปผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ทำให้ได้น้ำอ่อนที่มีไอออนของไดโครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) ซึ่งสามารถนำไปหมุนเวียนใช้ใหม่ได้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ahmed และคณะ (2002) ศึกษาอิทธิพลของปฏิกิริยาไอออนิกสำหรับการกักกันไอออนในการบำบัดสารละลายสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยเกลือโครเมียมโดยเยื่อกรองนาโน โดยแบ่งสารละลายสังเคราะห์ออกเป็น 2 ชนิด คือ สารละลายสังเคราะห์โครเมียมไตรคลอไรด์ (CrCl_3) และโพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ผลการศึกษาพบว่าในสารละลายไตรวาเลนท์โครเมียม (Cr^{3+}) มีความแปรปรวนของการกักกันอยู่ในช่วง 99.5 – 99.9% และไอออนประจุเดี่ยวไม่มีอิทธิพลในการกักกันไตรวาเลนท์โครเมียม ส่วนในสารละลายเฮกซะวาเลนท์โครเมียม พบว่าการกักกันจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน และที่ความเข้มข้นระหว่าง 2.5 และ 10 มิลลิโมลต่อลิตร การกักกันจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และจะคงที่ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการบำบัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำเสียที่ประกอบด้วยไตรวาเลนท์โครเมียมและเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยใช้เยื่อกรองนาโนให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดี

Ahmed และคณะ (2004) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังโดยเยื่อกรองนาโน โดยศึกษาเปรียบเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการกักกันของโครเมียมจากน้ำเสียสองชนิด และคำนวณขนาดรูพรุนของเยื่อกรอง จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นและความดันไม่มีผลต่อการศึกษา อัตราการกักกันไตรวาเลนท์โครเมียมไม่เปลี่ยนแปลง และพบว่าประสิทธิภาพการกักกันโครเมียมโดยเยื่อกรองนาโนสำหรับน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังคือ ร้อยละ 60 และ 30 ในสภาวะกรดและด่างตามลำดับ

Gzara และ Dhahbi (2001) ทำการศึกษาการกำจัดโครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) ด้วยไอออนประจุบวก และสารลดแรงตึงผิวในกระบวนการไมเซลล์าร์อัลตราฟิลเตรชัน (Micellar-enhanced ultrafiltration, MEUF) ซึ่งกระบวนการนี้ศึกษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้ สารลดแรงตึงผิว 2 ชนิดด้วยกัน คือ เซททิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethylammonium bromide) และ เซททิลไพริดีเนียมคลอไรด์ (Cetylpyridinium chloride) ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) เยื่อกรองที่ใช้มีขนาดรูพรุนเล็กเพื่อกั้น ไมเซลล์ (Micelle) ที่ดึงดูดกับไอออน พบว่าประสิทธิภาพของระบบมีค่าสูงกว่า 99% ประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อกรองขึ้นอยู่กับความแรงของประจุ และพีเอช เมื่อเพิ่มความแรงของประจุทำให้ความเข้มข้นของโครเมตไอออนและสารลดแรงตึงผิวในเพอร์มิเอทลดลง

Hafiane และคณะ (2000) ทำการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน จากการศึกษาพบว่าอัตราการกักกันของสารออกจากน้ำประมาณ 77 % ที่พีเอช 7 และที่พีเอชมากกว่า 7 จะทำให้ค่าการกักกันที่ได้จากการบำบัดด้วยเยื่อกรอง Thin film composite membrane Nanofiltration (TFCS NF) คือ $R(\text{Na}_2\text{SO}_4) > R(\text{NaCl}) > R(\text{CaCl}_2)$

Ortega และคณะ (2005) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกหนังโดยเยื่อกรองนาโน 4 ชนิด ได้แก่ DS_5, CA, DS_5* และ BQ_01 โดยศึกษาแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ ทำการประเมินค่าความแตกต่างของความดัน, อัตราการไหล และความเข้มข้นเพื่อเสนอแนะประสิทธิภาพและพฤติกรรมของแต่ละเยื่อกรอง จากการศึกษาพบว่าลักษณะของเยื่อกรองนาโน DS_5 มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 99 % ที่พีเอช 2.8 – 3.5 ส่วนชนิด DA มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. เยื่อกรองนาโน รุ่น NF 90 - 4040 บริษัท Filmtech ประเภท Thin film composite membrane ชนิด Polyamide
2. ชุดเยื่อกรอง ประกอบด้วย ถังก๊าซ ไนโตรเจน (N_2), Dead-end stirred cells filtration unit รุ่น 8200 ยี่ห้อ Amicon, Pressure Gage และถังเก็บน้ำป้อนระบบ (Feed Reservoir) ความจุ 10 ลิตร
3. เครื่องปั่นกวน (Stirred plate)
4. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)
5. เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter)
6. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
7. กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่งอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น 1455VP บริษัท Leo ประเทศอังกฤษ
8. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV – Visible Spectrophotometer) รุ่น 6405 บริษัท Jenway ประเทศอังกฤษ
9. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) รุ่น AA - 680 บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
10. เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.2 สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagenti
2. สารละลายมาตรฐาน โครเมียม 1000 ppm เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagenti
3. สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($NaHSO_3$) 1 % เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagenti
4. สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) เข้มข้น 0.0001 โมลาร์ เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagenti

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.001 โมลาร์ เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagenti
6. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.01 โมลาร์ เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagenti
7. สารละลายกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) เข้มข้น 2.0 นอร์มอล เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagenti
8. สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น (conc. HNO₃) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagenti
9. สารละลายไดฟีนีลคาร์บาไซด์ (1,5-Diphenylcarbazide) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagenti
10. สารละลายอะซิโตน (C(CH₃)₂O) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagenti
11. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) 30 % เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagenti
12. สารละลายกรดฟอสฟอริก (H₃PO₃) (1 + 1) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagenti
13. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
14. ก๊าซไนโตรเจน เกรดการค้า บริษัท Praxair ประเทศไทย

3.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์แอสซัวเลนที่โครเมียม

3.2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแอสซัวเลนที่โครเมียม (Cr⁶⁺) ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. นำโพแทสเซียมไดโครเมต (K₂Cr₂O₇) มาอบที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
2. นำโพแทสเซียมไดโครเมต (K₂Cr₂O₇) ที่เย็นแล้วมาชั่งให้ได้น้ำหนัก 2.828 กรัม
3. ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน และใส่ในขวดวัดปริมาตร 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนอีกครั้ง จะได้สารละลายมาตรฐานแอสซัวเลนที่โครเมียม เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโครเมียมทั้งหมด

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโครเมียม 1,000 ppm มา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานโครเมียม 10 ppm
2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโครเมียม 10 ppm มา 5, 10, 15, 20, 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานโครเมียม 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนท์โครเมียม

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนท์โครเมียม 1,000 ppm มา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนท์โครเมียม 10 ppm
2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนท์โครเมียม 10 ppm มา 0, 2, 4, 6, 8, 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนท์โครเมียม 0, 2, 4, 6, 8, 10 ppm

3.2.4 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียม

1. จากการวิจัยกำหนดให้ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากสารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนท์โครเมียม เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนท์โครเมียม เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 0, 10, 20, 30 และ 40 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายเฮกซะวาเลนท์โครเมียม เข้มข้น 0, 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.3 การศึกษาการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโน

3.3.1 เยื่อกรองนาโน

การวิจัยนี้ใช้เยื่อกรองนาโนรุ่น NF 90 - 4040 บริษัท Filmtech โดยนำมาตัดให้เป็นแผ่นวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตร พื้นผิวที่เยื่อกรองรับสัมผัส 28.7 ตารางเซนติเมตร เพื่อสามารถนำมาใส่ลงในชุดเยื่อกรอง สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ตัดแล้วและยังไม่ได้นำมาใช้งานในทันที ควรเก็บรักษาโดยแช่ในสารละลาย Sodium metabisulphite ความเข้มข้น 1% เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และนำไปเก็บในตู้เย็นเพื่อลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่มีผลต่อผิวหน้าเยื่อกรอง โดยเยื่อกรองนาโนที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเยื่อกรองนาโน รุ่น NF 90 - 4040 บริษัท Filmtech

คุณลักษณะ	ค่า
ประเภทของเยื่อกรอง	Thin film membrane
วัสดุที่ใช้ทำเยื่อกรอง	Polyamide
การกำจัดเกลือ $MgSO_4$	99 %
ช่วงพีเอชของการดำเนินการ	2 – 11
ช่วงพีเอชของการทำความสะอาด	1 – 12
ความดันสูงสุดที่ทนได้	600 psi (4,136 kPa)
อัตราการไหลสูงสุดที่ทนได้	3.6 m ³ /hr (16 gpm)
อุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้	40°C (104°F)

ที่มา www.h2ofilter.net

3.3.2 การทำความสะอาดเยื่อกรอง

- ล้างเยื่อกรองนาโนด้วยน้ำปราศจากไอออน
- ติดตั้งเยื่อกรองในชุดทดลองเยื่อกรอง
- ล้างเยื่อกรองด้วยกรด โดยผ่านสารละลายกรดซิตริก (Citric acid) เข้มข้น 0.0001 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 30 นาที
- ล้างออกด้วยน้ำปราศจากไอออน ปริมาณ 500 มิลลิลิตร เข้าสู่ระบบ
- ล้างเยื่อกรองด้วยเบส โดยผ่านสารละลายเบส โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 30 นาที
- ล้างออกด้วยน้ำปราศจากไอออน ปริมาณ 500 มิลลิลิตร เข้าสู่ระบบก่อนการเดินระบบด้วยน้ำตัวอย่าง

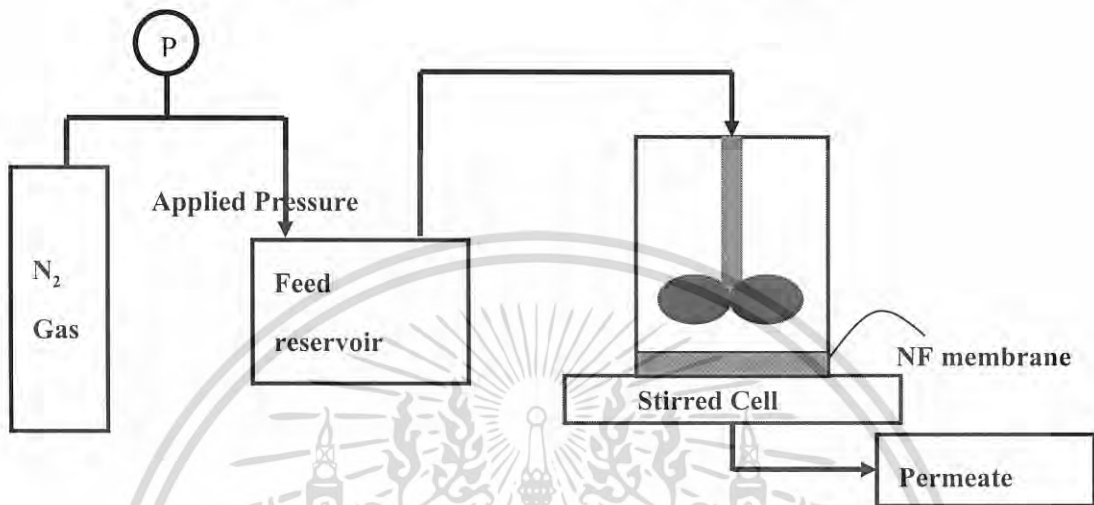
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทดสอบการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโน

ควบคุมการทำงาน โดยใช้สภาวะจากการศึกษาดังนี้

เวลาที่ใช้ในการเดินระบบ

510 นาที (min)



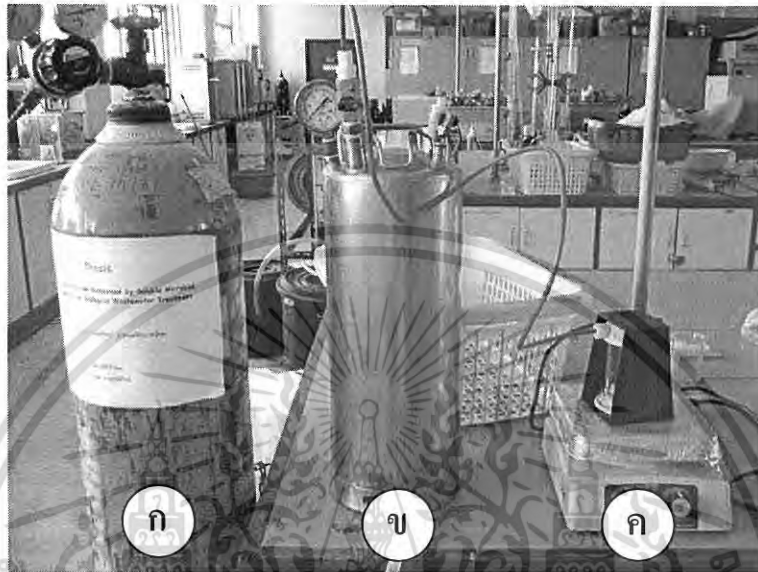
รูปที่ 3.1 การทำงานของระบบเยื่อกรองนาโนชนิด Dead-end stirred cell

ขั้นตอนการเดินระบบ

1. ติดตั้งเยื่อกรองในระบบ และทำความสะอาดเยื่อกรองตามหัวข้อ 3.3.2
2. เดินระบบด้วยน้ำปราศจากไอออน และวัดอัตราการไหลผ่านเยื่อกรอง เพื่อทราบค่าฟลักซ์เริ่มต้น โดยวัดอัตราการไหลทุกๆ 5 นาที เริ่มนับในนาทีที่ 25 โดยใช้บีกเกอร์รองน้ำที่ผ่านออกมาทางเพอร์มิเอทเป็นเวลา 1 นาที แล้ววัดปริมาตร และชั่งน้ำหนัก (เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของเพอร์มิเอท) จนกว่าค่า ฟลักซ์คงที่ จะได้ค่า Initial Flux หรือ Flux decline นาทีที่ 0
3. ผ่านตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เสกชะวาเลนท์โครเมียม และจับเวลาตั้งแต่ตัวอย่างเข้าสู่ระบบ
4. ศึกษาการลดลงของฟลักซ์จากการอุดตัน โดยวัดอัตราการไหลทุกๆ 10 นาที ในช่วงแรก และทุกๆ 20 นาทีในช่วงถัดไปจนครบ 510 นาที โดยใช้บีกเกอร์รองน้ำที่ผ่านออกมาทางเพอร์มิเอทเป็นเวลา 10 นาที แล้ววัดปริมาตร และชั่งน้ำหนัก (เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของเพอร์มิเอท)
5. ศึกษาความสามารถของเยื่อกรองในการกักกันสาร โดยเก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ พีเอช, สภาพการนำไฟฟ้า, ปริมาณ โครเมียมทั้งหมด และปริมาณเสกชะวาเลนท์โครเมียม โดยเก็บตัวอย่างที่เวลา 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 190, 250, 310, 410 และ 510 นาที ในส่วนเพอร์มิเอท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ตั้งเก็บอุปกรณ์แล้วแช่เครื่อง Stirred cell และ Feed reservoir ด้วยน้ำกลั่นเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารที่ปน ส่วนเยื่อกรองที่ใช้งานแล้วจัดเก็บลงกล่องพลาสติก แช่เย็น เตรียมวิเคราะห์ลักษณะการอุดตันของเยื่อกรอง และผิวเยื่อกรอง (รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ข)



รูปที่ 3.2 ระบบเยื่อกรองนาโนประเภท Dead-end filtration unit

(ก) ถังกักน้ำไนโตรเจน (ข) ถังเก็บน้ำป้อนระบบ (ค) Dead-end stirred cells filtration unit

3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

3.4.1 ผลของความดันต่อการกำจัด โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

1. ใช้ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนต์โครเมียม 0, 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากข้อมูลปริมาณการปล่อยโครเมียมจากแหล่งกำเนิดต่างๆ โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 26 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

2. ปรับพีเอชเท่ากับ 7 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 โมลาร์ หรือเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1 โมลาร์ เนื่องจากข้อมูลปริมาณการปล่อยโครเมียมจากแหล่งกำเนิดต่างๆ โดยเฉลี่ยมีค่าพีเอชประมาณ 6.76 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

3. ทำการเดินระบบเยื่อกรองนาโนตามหัวข้อ 3.3.3 โดยแปรค่าความดันที่ 30, 50 และ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว วัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มิเอท และเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อทำการวัดค่าพีเอช, สภาพการนำไฟฟ้า, ปริมาณโครเมียมทั้งหมด และปริมาณเฮกซะวาเลนต์โครเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

1. ใช้ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ปรับความดันให้เท่ากับ 30 และ 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
3. ทำการเดินระบบเยื่อกรองนาโนตามหัวข้อ 3.3.3 โดยแปรค่าพีเอชที่ 3, 5, 7 และ 9 วัดอัตราการไหลของน้ำเพอร์มิเอท และเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อทำการวัดค่าพีเอช, สภาพการนำไฟฟ้า, ปริมาณโครเมียมทั้งหมด, ปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียม

3.4.3 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

1. ปรับความดันเท่ากับ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
2. ปรับพีเอชเท่ากับ 7 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 โมลาร์ และ/หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1 โมลาร์
3. ทำการเดินระบบเยื่อกรองนาโนตามหัวข้อ 3.3.3 โดยแปรค่าความเข้มข้นของโครเมียมที่ 0, 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อทำการวัดค่าพีเอช, สภาพการนำไฟฟ้า, ปริมาณโครเมียมทั้งหมด, ปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียม, ลักษณะการอุดตันของเยื่อกรอง และผิวเยื่อกรอง

3.5 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.5.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียม

ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโนนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียม

พารามิเตอร์	การวิเคราะห์
ค่าพีเอช	pH – meter
ค่าสภาพการนำไฟฟ้า	Conductivity meter
ปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+})	UV – Vis Spectrophotometer
ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (Total Cr)	Atomic Absorption Spectrophotometer

หมายเหตุ : วิธีการวิเคราะห์ดังแสดงตามภาคผนวก ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การวิเคราะห์เยื่อกรอง

นำเยื่อกรองก่อน และหลังผ่านการกรองมาศึกษาสภาพการอุดตันที่อยู่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่งอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลของความดันต่อฟลักซ์ของเยื่อกรองนาโน

ก่อนการแยกสาร โดยเยื่อกรองนาโน น้ำบริสุทธิ์ถูกใช้ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของเยื่อกรองนาโน โดยการทดสอบฟลักซ์ของเยื่อกรองนาโนที่ความดันค่าต่างๆ โดยนำค่าจากการเดินระบบน้ำบริสุทธิ์ที่ความดัน 30, 40, 50, 60 และ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยที่ความดัน 50, 60 และ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้วจะแปรค่าตามข้อกำหนดในคุณสมบัติของเยื่อกรอง และที่ความดัน 30 และ 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้วจะแปรค่าตามปัจจัยที่ใช้ในการเดินระบบ รูปที่ 4.1 แสดงค่า ฟลักซ์ของระบบเยื่อกรองนาโน โดยผลของความดัน โดยแกน Y แสดงค่าฟลักซ์ของน้ำผ่าน เยื่อกรอง ซึ่งมีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient) คูณด้วยความดันในการดำเนินระบบตามทฤษฎีของระบบอาร์โอ (Reverse osmosis theory) ดังแสดงได้ดังสมการ 4.1

$$J_w = K_w(\Delta P - \Delta\pi) = \frac{Q_p}{A_m} \quad (4.1)$$

โดยที่ค่า J_w เท่ากับฟลักซ์ของน้ำผ่านเยื่อกรอง (LMH, $L/m^2 \cdot hr$), K_w เท่ากับสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ($L/m^2 \cdot hr \cdot psi$), ΔP เท่ากับความดันในการแพร่ผ่านเยื่อกรอง, $\Delta\pi$ เท่ากับความดันออสโมติก, Q_p เท่ากับอัตราการไหลของเพอร์มิเอท ($L \cdot hr^{-1}$), A_m เท่ากับพื้นที่รับสัมผัสของเยื่อกรอง (m^2)



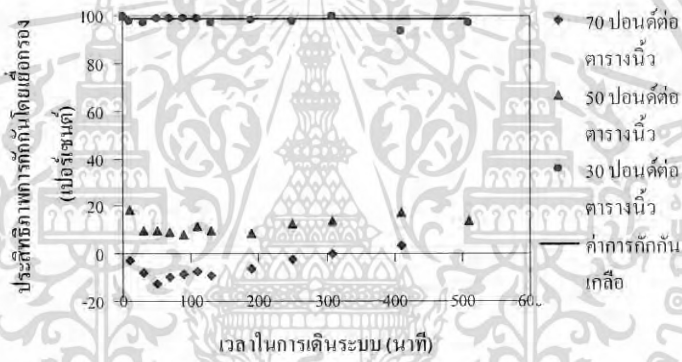
รูปที่ 4.1 ผลของความดันต่อค่าฟลักซ์ของเยื่อกรองนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

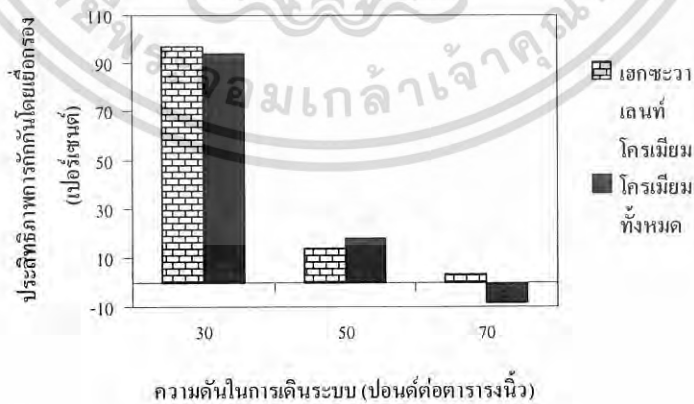
4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนที่โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

4.2.1 ผลของความดันต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนที่โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

ความดันของระบบที่ต่างกันมีผลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน ระหว่างการเดินระบบ ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ความดันที่ใช้ทดสอบคือ 30, 50 และ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-1.4 ถึง ก-1.6 ภาคผนวก ก) แสดงผลของความดันต่อประสิทธิภาพการกักกันโครเมียมในน้ำเสียเฮกซะวาเลนที่โครเมียมสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน



(ก) การกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมที่เวลาต่างๆ



(ข) ผลของความดันต่อการกำจัดโครเมียม

รูปที่ 4.2 ผลของความดันต่อประสิทธิภาพการกักกันโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนที่โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

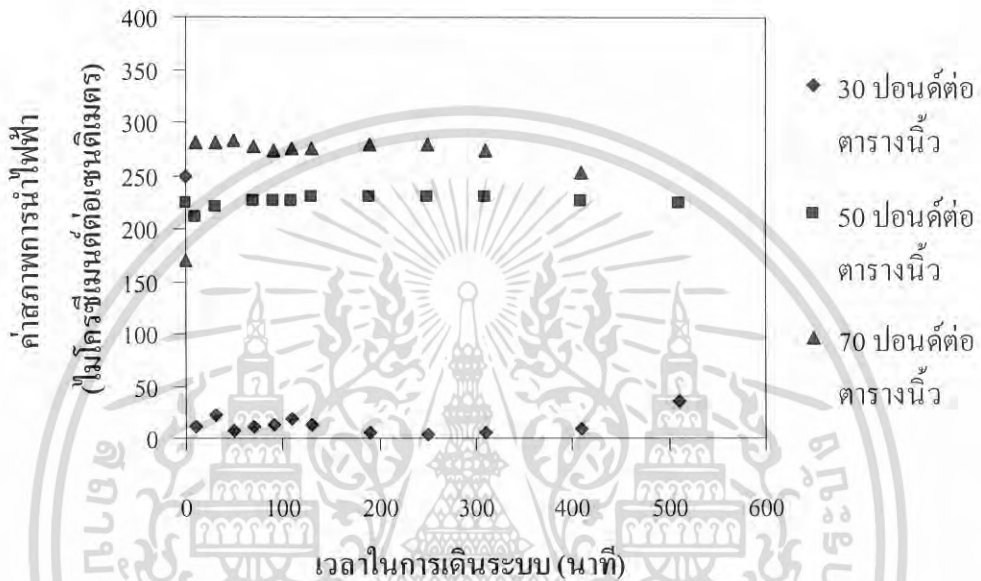
เมื่อความดันเพิ่มขึ้นอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจะลดลง จากกราฟที่ 4.2 (ก) ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีประสิทธิภาพการกักกันเฮกซะวาเลนท์โครเมียมมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่ความดัน 50 และ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว คือ ประมาณ 98% ซึ่งใกล้เคียงกับค่าการกำจัดเกลือตามคุณสมบัติของเยื่อกรองที่ประมาณ 99% ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยปกติการกักกันเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในรูปไดโครเมตไอออนจะใช้กระบวนการคัดแยกขนาด คือ ใช้ค่าขนาดน้ำหนักรโมเลกุลของอนุภาคที่ถูกกักกันไว้โดยเยื่อกรอง (MWCO) คัดแยกสารออกจากเยื่อกรอง และผลของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic effect) แต่ทั้งนี้ มวลโมเลกุลของไดโครเมตไอออนมีค่า 215.98 คาลตัน ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าช่วงของขนาดน้ำหนักรโมเลกุลของอนุภาคที่ถูกกักกันไว้โดยเยื่อกรองนาโน ดังนั้นกลไกในหลักที่ช่วยในการคัดแยกน่าจะเป็นกระบวนการ Electrostatic effect ซึ่งต่างจากการวิจัยของ Ahmed และคณะ (2002) ที่ว่าอิทธิพลของปฏิกิริยาไอออนิกต่อการกักกันเฮกซะวาเลนท์โครเมียม จะมีประสิทธิภาพการกักกันเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน

เมื่อความดันเพิ่มขึ้นพบว่าประสิทธิภาพการกักกันเฮกซะวาเลนท์โครเมียมลดลง เนื่องจากความดันที่ให้กับระบบมีผลมากกว่าแรงผลักของ Electrostatic repulsion ส่วนเมื่อลดความดันพบว่าประสิทธิภาพการกักกันเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันที่ให้กับระบบมีผลน้อยกว่าแรงผลักของ Electrostatic repulsion สังเกตได้จากผลของความดันต่อสภาพการนำไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-1.4 ถึง ก-1.6 ภาคผนวก ก)

จากกราฟที่ 4.2 (ก) แสดงผลของความดันต่อประสิทธิภาพการกักกันโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโนที่เวลาต่างๆ พบว่าที่ความดัน 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อาจส่งผลให้เฮกซะวาเลนท์โครเมียมผ่านเยื่อกรองออกมาในส่วนเพอร์มิเอทมากขึ้น ความเข้มข้นของโครเมียมที่เพอร์มิเอท (C_p) จึงมีค่าสูงขึ้น ซึ่งทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีประสิทธิภาพการกักกันโดยเยื่อกรอง (สมการที่ 2.6) มีค่าน้อยกว่าศูนย์

จากกราฟที่ 4.2 (ข) แสดงผลของความดันต่อการกำจัดโครเมียมทั้งหมดเทียบกับเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ปรากฏว่าประสิทธิภาพการกักกันเฮกซะวาเลนท์โครเมียมมากกว่าโครเมียมทั้งหมดทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขีดจำกัดของความสามารถในการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีการมีความแตกต่างกัน(ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข) ทำให้อาจมีความเบี่ยงเบนของค่าอยู่บ้าง

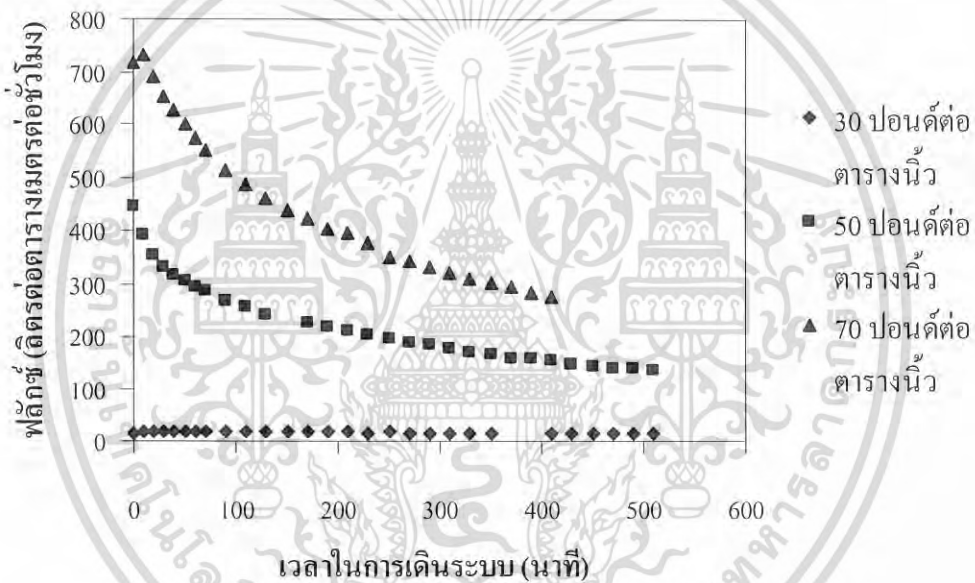
ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของเพอร์มิเอทแสดงถึงปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเพอร์มิเอท จากรูปที่ 4.3 พบว่าที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่าสภาพการนำไฟฟ้าในเพอร์มิเอทมีค่าต่ำกว่าที่ความดัน 50 และ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้วมาก และการเพิ่มความดันทำให้ประสิทธิภาพการกักกันลดลง ทำให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าออกมาในเพอร์มิเอทมากขึ้น ซึ่งผลการทดสอบนี้แสดงถึงผลของความดันที่มีต่อการกักกันเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยเยื่อกรองนาโน



รูปที่ 4.3 ผลของความดันต่อสภาพการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความดันที่ให้ระบบเพิ่มขึ้น อัตราการลดลงของฟลักซ์จะมากขึ้น ปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลงเมื่อเพิ่มความดันอาจเนื่องจากการอัดตัวของเยื่อกรอง (Compaction) ที่เกิดจากความดัน คือ เมื่อเยื่อกรองได้รับความดันสูง เยื่อกรองจะมีการบีบอัดตัวตามแรงดันของสารที่ต้องการจะผ่านออกไป เป็นผลให้อัตราการแพร่ของโมเลกุลน้ำ และไอออนลดลง ประสิทธิภาพการกักกันมากขึ้น ค่าฟลักซ์ของการไหลจึงลดลง ดังรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-1.4 ถึง ก-1.6 ภาคผนวก ค) ที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีอัตราการลดลงของฟลักซ์มากกว่าที่ความดัน 50 และ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อาจเกิดจากการสะสมตัวของ ไคโตรเมตไอออนบริเวณผิวหน้า และ/หรือรูพรุนของเยื่อกรอง ทำให้ขนาดช่องว่างเล็กลงจนค่าความต้านทานทางชลศาสตร์ของเยื่อกรองสูงขึ้นมีผลสอดคล้องกับค่าการกักกันของเยื่อกรองดังรูปที่ 4.2



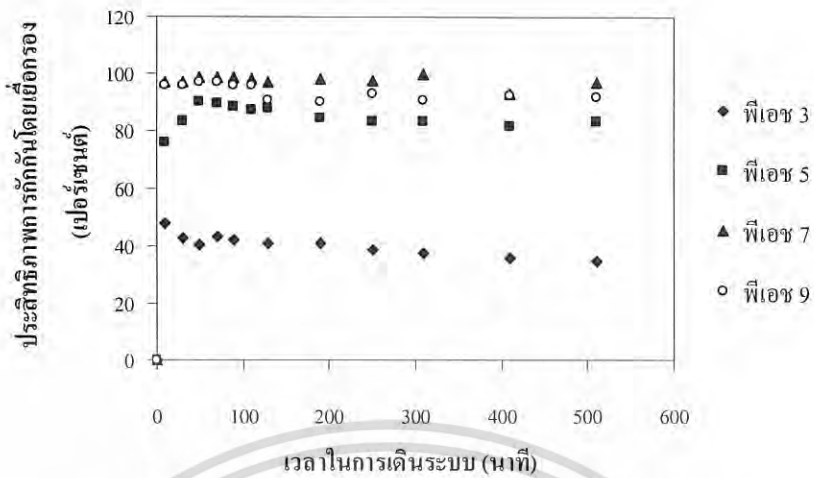
รูปที่ 4.4 ผลของความดันต่อการลดลงของฟลักซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

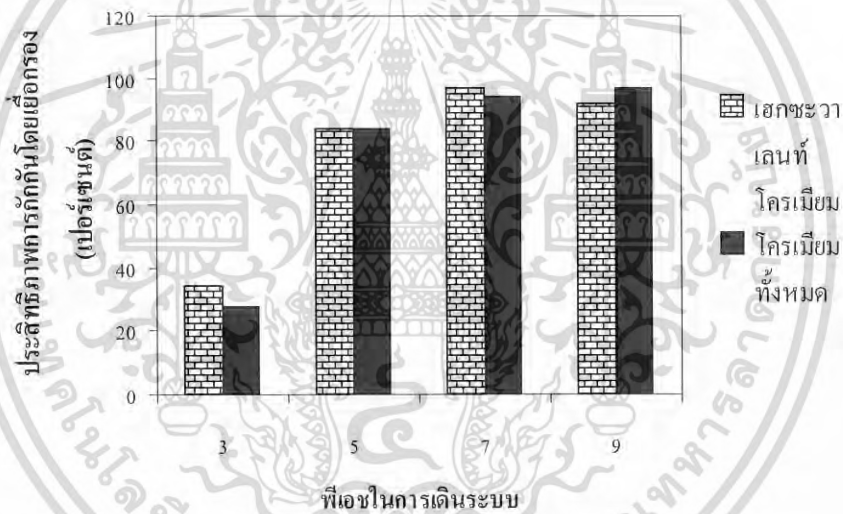
4.2.2 ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

ค่าพีเอชของการดำเนินการมีผลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน รูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2 ภาคผนวก ค) แสดงผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน โดยค่าพีเอชในการดำเนินการเท่ากับ 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และความดันที่ใช้คือ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากกราฟ ที่พีเอช 3 มีประสิทธิภาพการกักกันต่ำที่สุด เมื่อปรับพีเอชให้สูงขึ้นเท่ากับ 7 และ 9 จะทำให้ประสิทธิภาพการกักกันดีขึ้น โดยที่พีเอช 3 มีความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน (H^+) สูง ไปทำให้ประจุลบที่บริเวณผิวของเยื่อกรองส่งผลต่อความหนาของชั้น Double Layer ส่งผลให้แรงผลัก (Electrostatic repulsion) ระหว่างเฮกซะวาเลนต์โครเมียมกับผิวเยื่อกรองต่ำลง ทำให้เฮกซะวาเลนต์โครเมียมมีโอกาสที่จะเข้าไปใกล้ผิวเยื่อกรองสูงขึ้น และใช้ความดันของระบบเพื่อผ่านไปสู่ออกซิเจน นอกจากนี้การลดลงของค่าพีเอชอาจส่งผลให้ไดโครเมตไอออน ($Cr_2O_7^{2-}$) เปลี่ยนรูปเป็นกรดไดโครมิก ($H_2Cr_2O_7$) ซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่มีประจุ ดังนั้น Electrostatic repulsion จึงไม่มีผลต่อการกักกัน ทำให้เฮกซะวาเลนต์โครเมียมออกมามากขึ้น ค่าประสิทธิภาพการกักกันจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Manttari และคณะ (2006) โดยพบว่าเมื่อลดค่าพีเอชจาก 7 ถึง 4 พบว่าไอออนที่รีเทนเทตมีค่าความชอบน้ำสูงขึ้น คือมีความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนสูงแล้วส่งผลต่อชั้น Double Layer มากขึ้น

Lapointe และคณะ (2005) ศึกษาการแยกเปปไทด์ด้วยเยื่อกรองรุ่น G-10 ระหว่างเปปไทด์ธรรมชาติซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่มีประจุ กับเบสเปปไทด์ที่เป็นไอออนลบที่พีเอช 9 และ 5 พบว่ามีผลของ Electrostatic repulsion เกิดขึ้นที่พีเอช 9 กับเบสเปปไทด์ และที่พีเอช 5 กับเปปไทด์ธรรมชาติซึ่งสอดคล้องกับผลของพีเอชต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม



(ก) การกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมที่เวลาต่างๆ



(ข) ผลของฟิชต่อการกำจัดโครเมียม

รูปที่ 4.5 ผลของค่าฟิชต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของเพอร์มิเอทแสดงถึงปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเพอร์มิเอท จากรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2 ภาคผนวก ค) พบว่าที่พีเอช 3 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าในเพอร์มิเอทมีค่าสูงกว่าที่พีเอช 5 – 9 มาก และการปรับพีเอชให้สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกักกันสูงขึ้น ค่าสภาพการนำไฟฟ้าออกมาในเพอร์มิเอทมากขึ้น ซึ่งผลการทดสอบนี้แสดงถึงผลของพีเอชที่มีต่อการกักกันเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยเยื่อกรองนาโน โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Urase และคณะ (1998) ว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าของเยื่อกรองโดยทั่วไปสูงขึ้นเมื่อค่าการกักกันของอาเนนิกสูงขึ้น

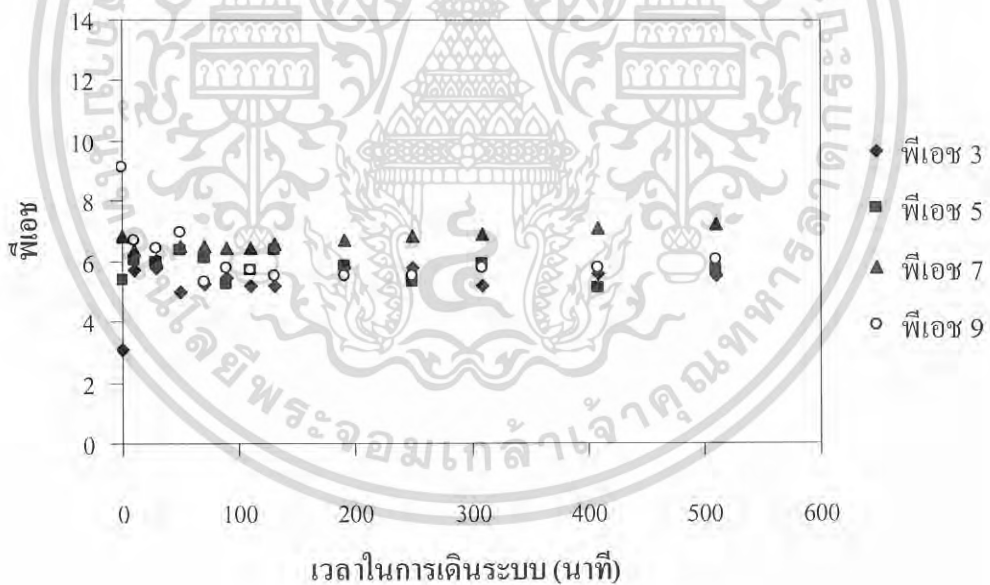


รูปที่ 4.6 ผลของค่าพีเอชต่อสภาพการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีเอชมีผลให้ระบบมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2 ภาคผนวก ค) ที่พีเอช 3 และ 5 ขณะเดินระบบ พีเอชเพิ่มขึ้นประมาณ 7 อาจเนื่องจากความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน (H^+) ที่ถูกใช้ไปจากการส่งผลต่อความหนาของชั้น Double Layer และการทำปฏิกิริยากับไดโครเมตไอออนเป็นกรดไดโครมิก ส่วนที่พีเอช 9 ขณะเดินระบบ พีเอชจะลดลงประมาณ 7 อาจเนื่องจากมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนสูง แต่ถูกผลักด้วยแรง Electrostatic repulsion ทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออนไม่สามารถผ่านเยื่อกรองออกมาได้

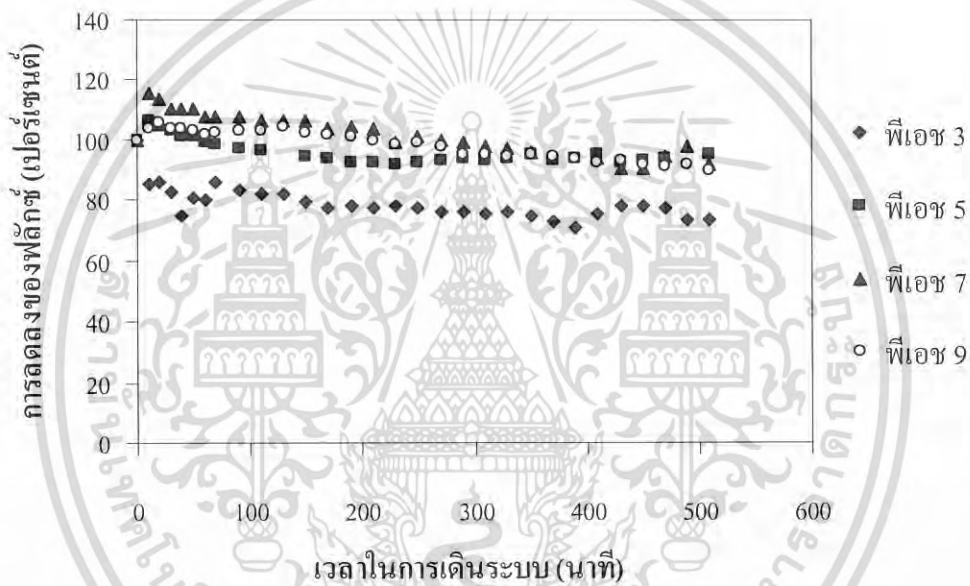
การเลือกที่พีเอช 7 เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเดินระบบอาจเนื่องจากขณะเดินระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชให้มีค่าเข้าใกล้พีเอช 7 ดังรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2 ภาคผนวก ค) โดยที่พีเอช 7 อาจจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสารระหว่างการเดินระบบ รวมไปถึงข้อมูลปริมาณการปล่อยโครเมียมจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2.3 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก) พบว่าค่าพีเอชที่ตรวจวัดได้มีค่าเป็นกลาง และเบสจึงไม่จำเป็นต้องปรับพีเอชก่อนการบำบัด และสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไปได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Hafiane และคณะ (2000) ที่ว่าอัตราการกักกันของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่พีเอช 7 มีค่าสูงประมาณ 77 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงพีเอชระหว่างการเดินระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพีเอชในการเดินระบบที่ต่างกัน สามารถส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์ของเฮกซะวาเลนที่โคโรเนียมที่ผ่านเยื่อกรองนาโน รูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2 ภาคผนวก ค) แสดงผลของพีเอชต่อเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์ กราฟที่ได้เกิดจากการคำนวณฟลักซ์ของสารเพอร์มิเอท เทียบกับฟลักซ์เริ่มต้นของสารสังเกตได้ว่าเมื่อปรับพีเอชลดลง ค่าการลดลงของฟลักซ์จะมากขึ้น โดยที่พีเอช 3 มีค่าการลดลงของฟลักซ์มากกว่าที่พีเอช 5, 7 และ 9 อาจเนื่องจากการอัดตัวของเยื่อกรอง (Compaction) ที่เกิดจากความแรงของประจุ คือ จะเกิดแรงหนึ่ยวนำระหว่างประจุบวกของไฮโดรเนียมไอออนกับประจุลบที่บริเวณผิวของเยื่อกรอง ทำให้บริเวณผิวเยื่อกรองมีการบีบอัดตัวตามความแรงของประจุเป็นผลให้อัตราการแพร่ของโมเลกุลน้ำ และไอออนลดลง



รูปที่ 4.8 ผลของพีเอชต่อเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์

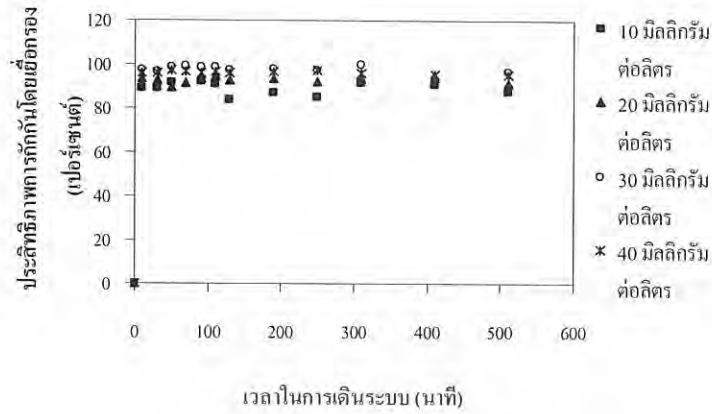
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

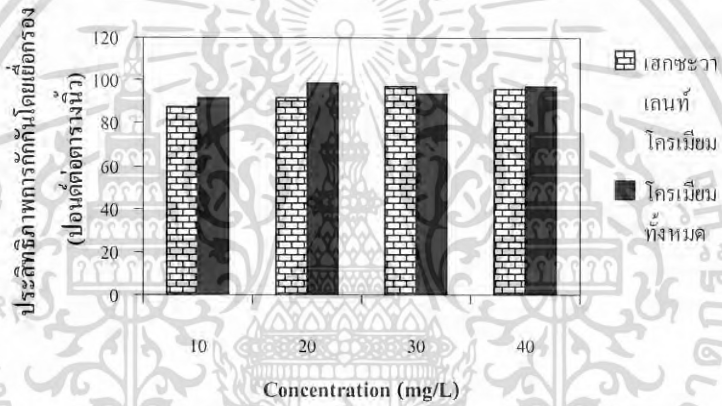
ความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นมีผลต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ระหว่างการเดินระบบ ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เตรียมขึ้นมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 ที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเข้มข้นโครเมียมที่ใช้ทดสอบมีค่า 0, 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร รูปที่ 4.9 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-3 ภาคผนวก ค) แสดงผลของความเข้มข้นโครเมียมต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน การเพิ่มความเข้มข้นโครเมียม ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกักกันสูงขึ้นทุกความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น โดยพบว่าปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเพอร์มิเอท มีค่าคงที่ดังแสดงผลในรูปที่ 4.10 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahmed และคณะ (2002) โดยอิทธิพลของปฏิกิริยาไอออนิกที่ความเข้มข้นระหว่าง 2.5 ถึง 10 มิลลิโมลต่อลิตรมีประสิทธิภาพการกักกันจะลดลงอย่างต่อเนื่องและจะคงที่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิโมลต่อลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



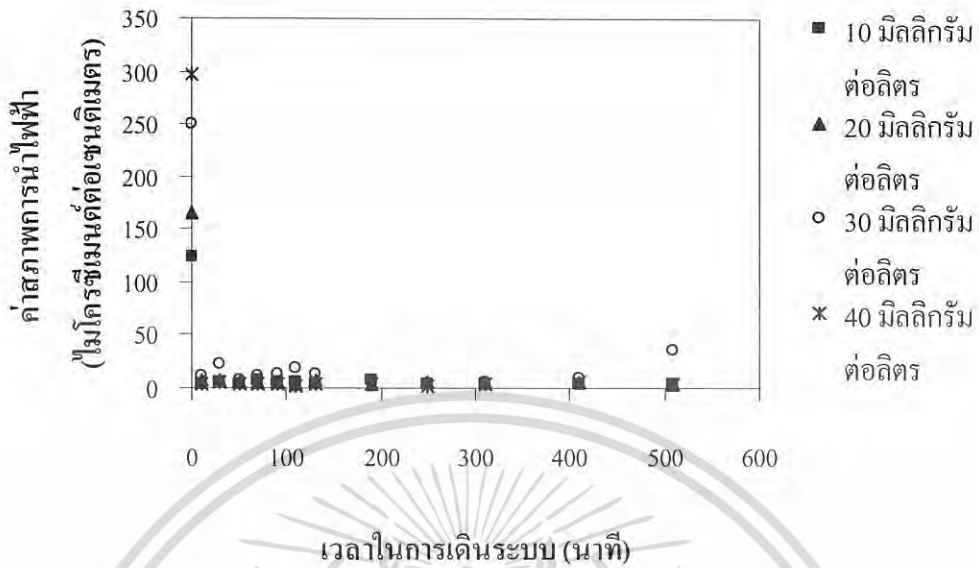
(ก) การกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เวลาต่างๆ



(ข) ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการกำจัดโครเมียม

รูปที่ 4.9 ผลของความเข้มข้นโครเมียมต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อกรองนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



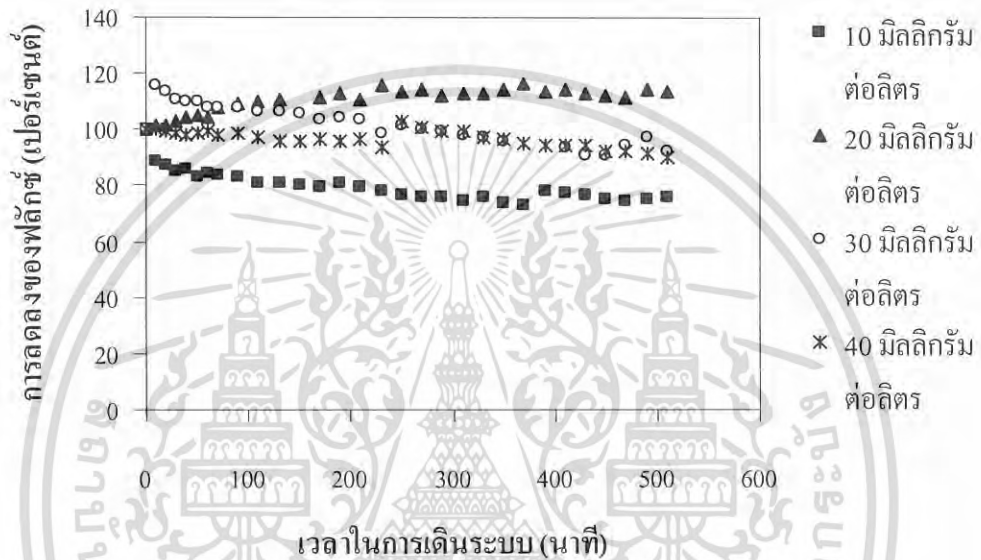
รูปที่ 4.10 ผลของความเข้มข้น โครเมียมต่อสภาพการนำไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมในระบบมีผลต่อการลดลงของฟลักซ์ จากรูปที่ 4.11 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-3 ภาคผนวก ค) แสดงผลของความเข้มข้นของโครเมียมต่อเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์ ที่ความเข้มข้นของโครเมียมที่ 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร การเพิ่มความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นส่งผลให้การลดลงของฟลักซ์มากขึ้น เนื่องจากผลของความเข้มข้นที่สูงขึ้น จะมีความแรงของประจุมากขึ้น ทำให้เกิดกลไกการดูดซับเนื่องจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Peeva และคณะ (2004) ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเตตระออกทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (tetraoctylammonium bromide, TOABr) จาก 0.005 – 0.3 โมลาร์ ส่งผลให้ค่า ฟลักซ์เพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันที่เพิ่มขึ้น

Koyuncu และคณะ (2004) ศึกษาปัจจัยต่อการลดลงของฟลักซ์ของการกำจัดสีข้อมและเกลือด้วยเยื่อกรองนาโน พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีข้อมรีเอกทีฟแบดคัลด์ 5 (RB5) ค่าการลดลงของฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันตามทฤษฎีการเกิดชั้นฟิล์ม (Film theory equation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความเข้มข้นของโครเมียมที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าฟลักซ์ลดลงกว่าที่ความเข้มข้นอื่นๆ อาจเนื่องมาจากเสกชะวาลেন্টโครเมียมที่ความเข้มข้นต่ำจะมีขนาดเล็กในขณะที่มีประจุลบบริเวณพื้นที่ผิวมากส่งผลให้เกิดการกักกันที่บริเวณผิวหน้า และ/หรือ ภายในรูพรุนของเยื่อกรองทำให้ฟลักซ์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Oh และคณะ (2004) ว่าเมื่อขนาดของอาซินิกเล็กลง พื้นที่ผิวจะลดลงส่งผลให้จุดตันบริเวณผิวหน้า และ/หรือ ภายในรูพรุนของเยื่อกรองทำให้ฟลักซ์ลดลง

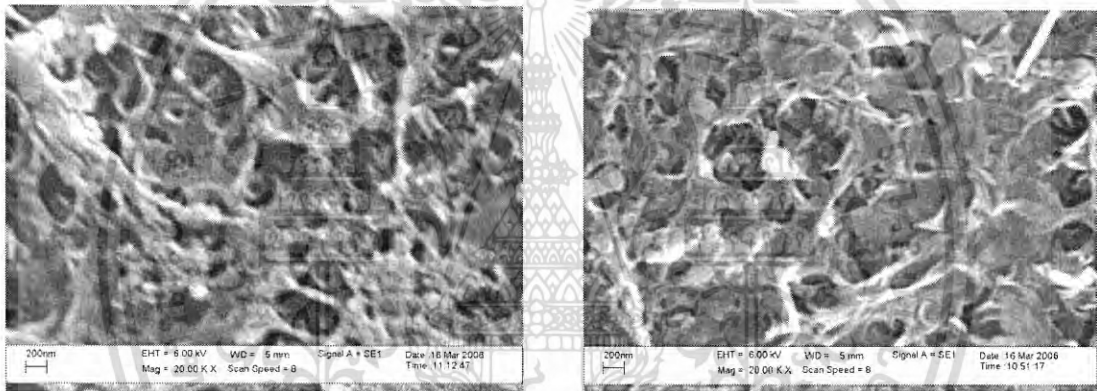


รูปที่ 4.11 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมต่อเปอร์เซ็นต์การลดลงของฟลักซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์การอุดตันของเยื่อกรองนาโนโดยภาพถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

จากการทดสอบด้วยภาพถ่าย Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 20,000 เท่าเพื่อเปรียบเทียบลักษณะการกักกันของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมบนผิวหน้าของเยื่อกรองนาโน 2 แบบ คือแบบที่ไม่ได้ผ่านการใช้งาน และแบบที่ผ่านการกรองตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียม รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่าย SEM ของเยื่อกรองนาโนที่สะอาดยังไม่ผ่านการใช้งาน (รูปที่ 4.12 ก) เปรียบเทียบกับเยื่อกรองที่ผ่านการกรองตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียม (รูปที่ 4.12 ข) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า พบว่ารูพรุนเยื่อกรองที่ผ่านการใช้งานมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้เกิดการลดลงของฟลักซ์ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการสะสมตัวของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมบริเวณผิวหน้า หรือภายในรูพรุนของเยื่อกรอง



(ก) เยื่อกรองที่สะอาด

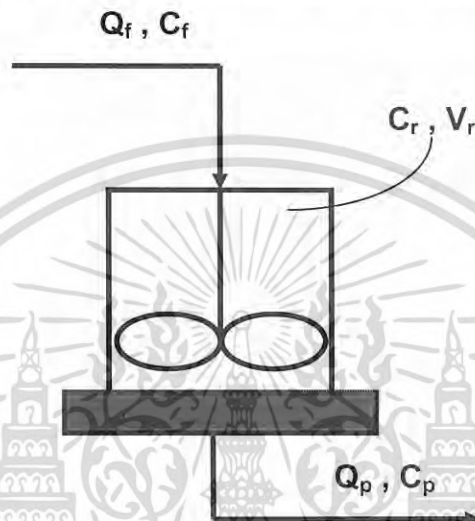
(ข) เยื่อกรองที่ผ่านการใช้งาน

รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM แสดงการเปรียบเทียบการกักกันเฮกซะวาเลนท์โครเมียมบนเยื่อกรองนาโน (กำลังขยาย 20,000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการกำจัดโครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เขียนขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการกักกันโครเมียมและปริมาณโครเมียมในรีเทนเทดโดยอาศัยหลักการของสมดุลมวลสาร โดยคำนึงถึงมวลสารเข้า ออก และสะสมในระบบ Dead-end stirred cell unit ซึ่งมีการปั่นกวอย่างสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor, CSTR) รูปที่ 4.13 แสดงไดอะแกรมการเดินระบบของเยื่อกรองนาโน



รูปที่ 4.13 ไดอะแกรมการเดินระบบของเยื่อกรองนาโน

โดยทั่วไป สมดุลมวลสารของระบบเขียนได้ดังนี้

$$\text{Accumulation} = \text{Mass}_{in} - \text{Mass}_{out} + \text{Generation (หรือ-Decomposition)}$$

แต่ระบบเยื่อกรองไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวลสารในระบบ ดังนั้นจะลดเทอม *Generation* หรือ *Decomposition* ได้ดังนี้

$$\text{Accumulation} = \text{Mass}_{in} - \text{Mass}_{out}$$

จากรูป ส่วนที่อยู่ล่างถึงพักจะเป็นส่วน Input ส่วนที่ออกจากระบบเรียกส่วนของ Output และส่วนที่อยู่ภายในระบบจะเป็นส่วนของ Accumulate ดังนั้นสมการสมดุลมวลสารของระบบเขียนได้ดังสมการ 4.2

$$V_r \frac{dC_r}{dt} + C_r \frac{dV_r}{dt} = Q_f C_f - Q_p C_p \quad (4.2)$$

โดยที่ C_f = ความเข้มข้นของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (mg/L)

C_p = ความเข้มข้นของสารที่เพอร์มิเอท (mg/L)

C_r = ความเข้มข้นของสารที่รีเทนเทด (mg/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Q_f	=	อัตราการไหลของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (L/hr)
Q_p	=	อัตราการไหลของสารที่เพอร์มิเอท (L/hr)
V_r	=	ปริมาตรที่รีเทนเทด (L)
t	=	เวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (min)

จากระบบปริมาตรไม่มีการเปลี่ยนแปลงดังสมการ 4.3

$$C_r \frac{dV_r}{dt} = 0 \quad (4.3)$$

จากทฤษฎีประสิทธิภาพการกักกันโดยเชื่อกอง (สมการ 4.4)

$$C_p = (1-R)C_r \quad (4.4)$$

แทนค่าสมการ 4.4 ลงในสมการ 4.3 จะได้สมการ 4.5 แด 4.6

$$V_r \frac{dC_r}{dt} = Q_f C_f - Q_p (1-R) C_r \quad (4.5)$$

$$\frac{dC_r}{dt} = \frac{Q_f C_f}{V_r} - \frac{Q_p (1-R)}{V_r} \cdot C_r \quad (4.6)$$

จาก Integrating factor กำหนดให้ (สมการ 4.7)

$$e^{\int \left(\frac{Q_p (1-R)}{V_r} \right) dt} = e^{\left(\frac{Q_p (1-R)}{V_r} \right) t} \quad (4.7)$$

และกำหนดให้ (สมการ 4.8)

$$\beta = \frac{Q_p (1-R)}{V_r} \quad (4.8)$$

แทนค่าสมการ 4.7 และ 4.8 ลงในสมการ 4.6 จะได้สมการ 4.9

$$e^{\beta t} \left(\frac{dC_r}{dt} + \beta C_r \right) = \frac{Q_f C_f}{V_r} \cdot e^{\beta t} \quad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของอนุพันธ์ผลคูณ (สมการ 4.10)

$$d \frac{e^{\beta t} C_r}{dt} = e^{\beta t} \left(\frac{dC_r}{dt} + \beta \cdot C_r \right) \quad (4.10)$$

จัดสมการใหม่ได้ดังสมการ 4.11 – 4.13

$$d \frac{e^{\beta t} C_r}{dt} = \frac{Q_f C_f}{V_r} \cdot e^{\beta t} \quad (4.11)$$

$$\int d(e^{\beta t} C_r) = \frac{Q_f C_f}{V_r} \int e^{\beta t} dt \quad (4.12)$$

$$e^{\beta t} C_r = \frac{Q_f C_f}{V_r \beta} \cdot e^{\beta t} + K \quad (4.13)$$

หาค่า K แทนค่า $t = 0$; $C_r = C_{r,0} = C_f$ จะได้สมการ 4.14 – 4.16

$$I \cdot C_{r,0} = \frac{Q_f C_f}{V_r \beta} \cdot I + K \quad (4.14)$$

$$K = C_{r,0} - \frac{Q_f C_f}{V_r \beta} \quad (4.15)$$

$$K = C_f - \frac{Q_f C_f}{V_r \beta} \quad (4.16)$$

แทนค่า K ในสมการ 4.16 เพื่อหาค่า C_r จะได้สมการ 4.17 – 4.19

$$e^{\beta t} C_r = \frac{Q_f C_f}{V_r \beta} \cdot e^{\beta t} + C_f - \frac{Q_f C_f}{V_r \beta} \quad (4.17)$$

$$C_r = \frac{Q_f C_f}{V_r \beta} + e^{-\beta t} C_f - e^{-\beta t} \cdot \frac{Q_f C_f}{V_r \beta} \quad (4.18)$$

$$C_r = e^{-\beta t} C_f + \frac{Q_f C_f}{V_r \beta} (1 - e^{-\beta t}) \quad (4.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากปริมาตรเข้าที่เข้าสู่ระบบเท่ากับปริมาตรที่ออกจากระบบ ; $Q_f = Q_p$ จะได้สมการ 4.20 – 4.21

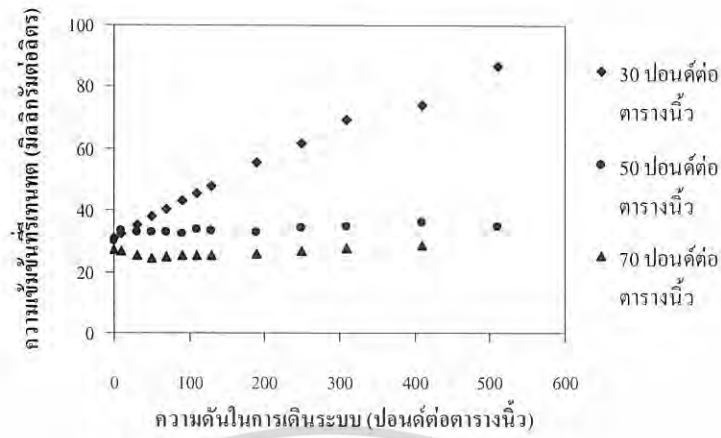
$$C_r = e^{-\beta t} C_f + \frac{Q_p C_f}{V_r} \cdot \frac{V_r}{Q_p(1-R)} (1 - e^{-\beta t}) \quad (4.20)$$

$$C_r = e^{-\beta t} C_f + \frac{C_f}{1-R} (1 - e^{-\beta t}) \quad (4.21)$$

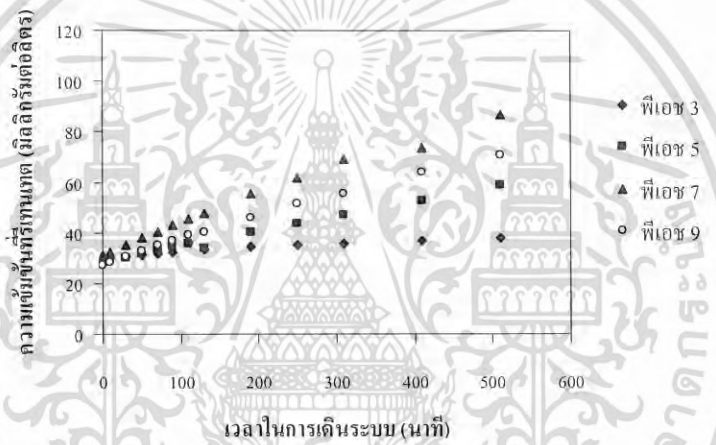
จากสมการที่ 4.21 สามารถใช้ในการทำนายการสะสมตัวของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่รีเทนเทตในสภาวะต่างๆตามปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม

รูปที่ 4.14 แสดงความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่รีเทนเทตโดยแปรผันตามความดันพีเอช และความเข้มข้นของโครเมียมของระบบ โดยเมื่อเวลาเดินระบบผ่านไปความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์ที่รีเทนเทตเพิ่มมากขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงตามสมการที่ 4.21 และที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พีเอช 7 และความเข้มข้นของโครเมียม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีการตกสะสมของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมสูงที่สุดที่ค่า 86.94 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

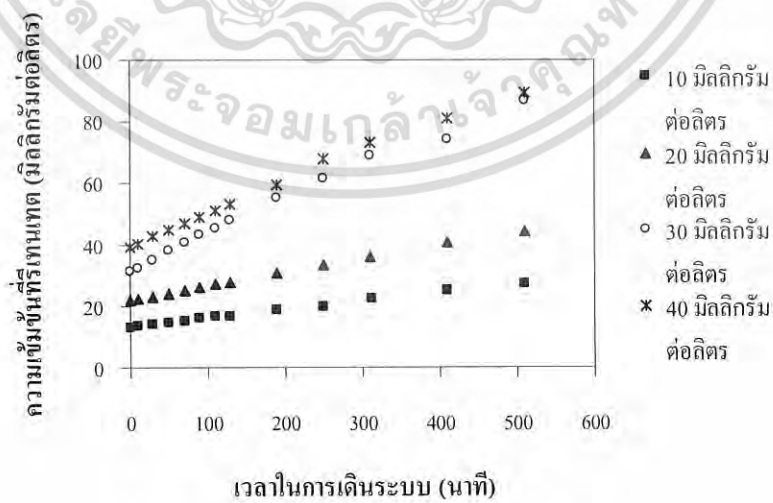
รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่รีเทนเทตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เทียบกับการทดลอง โดยที่เวลา 510 นาที เก็บตัวอย่างที่รีเทนเทตไปวิเคราะห์ พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าจากแบบจำลอง และจากการคำนวณความแตกต่างพบว่ามีความแตกต่างเฉลี่ยประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากค่าจากแบบจำลองไม่คำนึงถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการกักกัน และการดูดซับของเยื่อกรอง ยกเว้นที่ความดัน 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เท่านั้นที่มีค่าจากการทดลองมากกว่าค่าจากแบบจำลอง อาจเนื่องมาจากความดันที่สูงมากทำให้เฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ติดค้างอยู่บริเวณผิวหน้า และ/หรือ ภายในรูพรุนของเยื่อกรองหลุดผ่านเยื่อกรองออกมาด้วย รวมไปถึงทฤษฎีประสิทธิภาพการกักกันโดยเยื่อกรอง (สมการที่ 2.6) ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกักกันของเยื่อกรองดังแสดงในรูปที่ 4.2



(ก) ผลของความคั่น

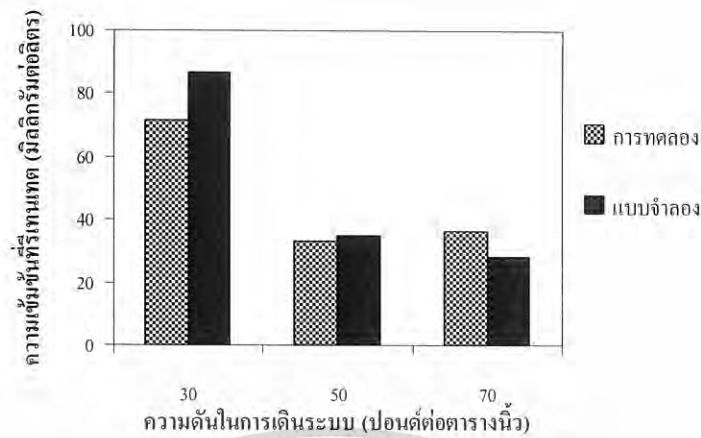


(ข) ผลของพีเอช

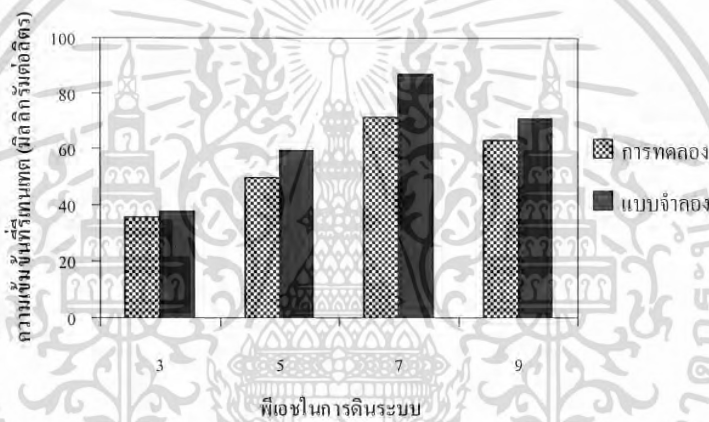


(ค) ผลของความเข้มข้นของโครเมียม

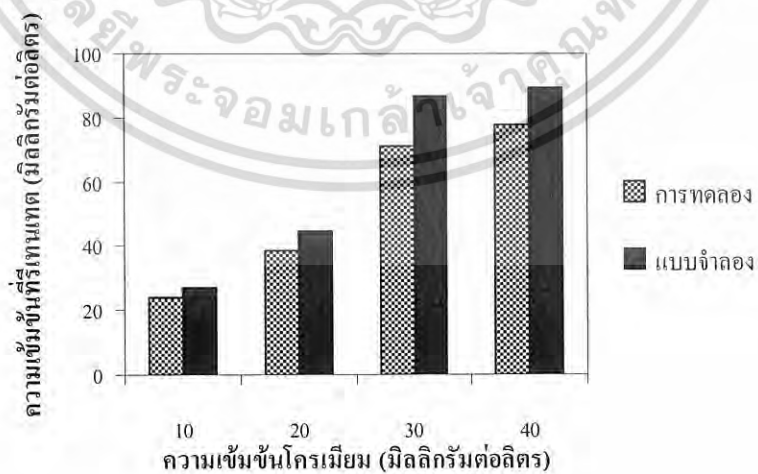
รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่รีเทนเทดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลของความดัน



(ข) ผลของพีเอช



(ค) ผลของความเข้มข้นของ โครเมียม

รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่รีเทนเทตของการทดลองเทียบแบบจำลองที่ 510 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การใช้เยื่อกรองนาโน และกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน สามารถกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมได้ โดยที่สภาวะที่เหมาะสมได้แก่ ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พีเอช 7 และที่ความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เยื่อกรองนาโนมีประสิทธิภาพการกักกันเฮกซะวาเลนต์โครเมียมสูงถึง 93.55 – 99.82 เปอร์เซ็นต์
2. ความดันในการเดินระบบมีผลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม โดยเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะลดลง อาจเนื่องจากความดันที่ให้กับระบบมีผลมากกว่าแรงผลักรังของ Electrostatic repulsion ส่วนเมื่อลดความดันพบว่าประสิทธิภาพการกักกันเฮกซะวาเลนต์โครเมียมลดลง เนื่องจากความดันที่ให้กับระบบมีผลน้อยกว่าแรงผลักรังของ Electrostatic repulsion
3. พีเอชมีผลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม โดยเมื่อลดค่าพีเอช อัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะลดลง เนื่องจากมีความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนสูง ไปทำให้ประจุลบที่บริเวณผิวของเยื่อกรองส่งผลต่อความหนาของชั้น Double Layer ส่งผลให้แรงผลักรังระหว่างเฮกซะวาเลนต์โครเมียมกับผิวเยื่อกรองสูงขึ้น ทำให้เฮกซะวาเลนต์โครเมียมมีโอกาสที่จะเข้าไปใกล้ผิวเยื่อกรองสูงขึ้น และใช้ความดันของระบบเพื่อผ่านไปสู่อุปกรณ์รวม ทั้งอาจส่งผลให้โคโครเมตไอออนเปลี่ยนแปลงเป็นกรดโคโครมิกซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่มีประจุ ดังนั้น Electrostatic repulsion จึงไม่มีผลต่อการกักกันทำให้เฮกซะวาเลนต์โครเมียมออกมามากขึ้น
4. ความเข้มข้นของโครเมียมส่งผลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นโครเมียม ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกักกันสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อความสามารถของเยื่อกรองนาโนในการกักกัน เพราะปริมาณเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในน้ำเพอร์มิเอทมีค่าคงที่
5. ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM แสดงถึง การลดลงของขนาดรูพรุน ทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลง ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการสะสมตัวของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมบริเวณผิวหน้า หรือภายในรูพรุนของเยื่อกรอง
6. การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยเยื่อกรองนาโน สามารถบ่งชี้ถึงปริมาณเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ถูกกักกันได้โดยเยื่อกรอง ขณะที่ผลจากแบบจำลองมีค่าต่างจากการทดลองประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการวิจัยประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ได้เลือกใช้เยื่อกรองประเภทนาโนรู่น NF 90-4040 เพียงรู่นเดียวดังนั้นควรจะมีการเลือกใช้เยื่อกรองรู่น และประเภทอื่นๆเพื่อเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ดีที่สุด
2. จากการวิจัย ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เป็น โครเมียมในรูปเฮกซะวาเลนท์โครเมียม เพื่อความต้องการข้อมูลการกำจัดโลหะหนักที่หลากหลายควรศึกษาการกำจัดโลหะหนักประเภทอื่นๆ เพื่อตอบสนองความต้องการในการบำบัดโลหะหนักที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน
3. จากการวิจัยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ควรศึกษาปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือ และอัตราการไหลที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติมเพื่อทราบสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน
4. ตัวอย่างน้ำเสียเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเป็นตัวอย่างน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการ อาจใช้ตัวอย่างน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมปนเปื้อน สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมโลหะหนักเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด หรือนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปริมาณการปล่อยโครเมียมสู่สิ่งแวดล้อม
5. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเพียงแบบเดียว จึงควรมีการเปรียบเทียบการบำบัดจากกระบวนการอื่นๆเช่น การดูดซับ การตกตะกอนทางเคมี เป็นต้น ร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเพื่อทราบกระบวนการที่เหมาะสมต่อการบำบัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม
6. เนื่องจากกระบวนการฟิลเตรชันจะเดินระบบแบบ Cross flow ส่วนงานวิจัยนี้เป็นการเดินระบบแบบ Dead-end ดังนั้นจึงควรปรับปรุง และประยุกต์งานวิจัยให้เป็นการเดินระบบแบบ Cross flow เพื่อใกล้เคียงกับการบำบัดในอุตสาหกรรมมากขึ้น
7. เนื่องจากระบบบำบัดนี้มีประสิทธิภาพการบำบัดสูง และเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ส่วนของค่าใช้จ่าย และต้นทุนต่างๆสูงตามไปด้วย ดังนั้นควรประเมินค่าใช้จ่ายในการลงทุน การติดตั้ง การบำบัด รวมไปถึงจุดคุ้มทุนในการบำบัดเพื่อเป็นข้อมูลในการลงทุนต่อไป
8. ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้จะเป็นตัวอย่างเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมาก ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการของเสียเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากห้องปฏิบัติการเพื่อลดการแพร่กระจายสารพิษสู่สิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- การะเกด อมรรัตนเกียรติ และเกรียงศักดิ์ เลิศประภามงคล. 2538. “การดูดซับโครเมียม (+6) ในน้ำเสียโดยยีสต์.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยาประยุกต์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- กิติพร พรหมเทศน์ และสุนันท์ แรมสว่าง. 2544. “การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยต้นรูปถ่าย.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ขันทอง สุนทรภา. 2547. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิตยา ศรีอุดมศิลป์, เบญจรัตน์ บุญช่วย และวิศรุต สุนทรารักษ์. 2544. “การล้างดินและกากตะกอนที่ปนเปื้อนโครเมียมโดยใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ โซเดียมอิตีทีเอ และสารละลายผสมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์กับโซเดียมอิตีทีเอ.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พิชิต จริยธรรมานุกูล. 2544. “การกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ด้วยเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพิ่มพงษ์ พุ่มวิเศษ. 2541. “การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสาขาภิบาลสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ภาสกร สว่างยุคิธรรม, สุภโชค ชายแดน และสมชาย กองทรัพย์เจริญ. 2543. “การดูดซับตะกั่วและโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์และขี้เถ้าลอย.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มันติน ตัณฑุลเวศม์. 2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ยุพา ตันทวี. 2547. การควบคุมมลพิษทางน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. โครงการตำรา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. 2543. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ไทยเส็ง. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วุฒิชัย ทิวทอง. 2545. “การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบเหล็ก.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สัตยุชัย ใจยงค์, อ่อนหวาน อาจสาคร และเอกราช ถิมวัฒนา. 2540. “การดูดซับโครเมียม (+6) โดยสาหร่ายเซลล์เดียวสีเขียว *Chlorella sp.*” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยาประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- APHA, AWWA and WPCF. 1992. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 18 th. USA.**
- Ahmad, A.L., Ismail, S. and Bhatia, S. 2005. “Ultrafiltration behavior in the treatment of agro-industry effluent: Pilot scale studies.” **Chemical Engineering science.** Vol.60(19), pp. 5385-5394.
- Ahmed, M.T., Taha, S., Chaabane, T., Cabon, J., Maachi, R. and Dorange, G. 2004. “Treatment of the tannery effluents from a plant near algiers by nanofiltration (NF): experimental results and modeling.” **Desalination.** Vol.165, pp. 155-160.
- Ahmed, M.T., Taha, S., Maachi, R. and Dorange, G. 2002. “The influence of physico-chemistry on the retention of chromium ions during nanofiltration.” **Desalination.** Vol.145, pp. 103-108.
- Bessiere, Y., Abidine, N. and Bacchin, P. 2005. “Low fouling condition in dead-end filtration: Evidence for a critical filtered volume and interpretation using critical osmotic pressure.” **Separation and Purification Technology.** Vol.264, pp. 37-47.
- Broeckmann, A., Busch, J., Wintgens, T. and Marquardt, W. 2006. “Modeling of pore blocking and cake layer formation in membrane filtration for wastewater treatment.” **Desalination.** Vol.189, pp. 97-109.
- Chellam, S. and Taylor, J.S. 2001. “Simplified analysis of contaminant rejection during group-and surface water nanofiltration under the information collection.” **Water Research.** Vol.35(10), pp. 2460-2474.
- Frares, N.B., Taha, S. and Dorange, G. 2005. “Influence of the operating conditions on the elimination of zinc ions by nanofiltration.” **Desalination.** Vol.185, pp. 245-253.
- Gzara, L. and Dhabbi, M. 2001. “Removal of chromate anions by micellar-enhanced , ultrafiltration using cationic surfactants.” **Desalination.** Vol.137, pp. 241-250.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Hafiane, A., Lemordant, D. and Dhahbi, M. 2000. "Removal of hexavalent chromium by nanofiltration." **Desalination**. Vol.130, pp. 305-312.
- James, W.M. 1995. "Inorganic contaminants of surface water: Research and monitoring properties." **Journal of Contaminant Hydrology**. Vol.14, pp. 295-296.
- Kim, J.I. 1976. "Adsorption of chromium on activated carbon." Doctoral Degree Dissertation, University of Florida.
- Koyuncu, I., Topacik, D. and Wiesner, M.R. 2004. "Factors influencing flux decline during nanofiltration of solutions containing dyes and salts." **Water Research**. Vol.38, pp. 432-440.
- Lapointe, J-F., Gauthier, s.f., Pouliot, Y. and Bouchard, C. 2005. "Fouling of a nanofiltration membrane by a β -lactoglobulin tryptic hydrolysate: impact on the membrane sieving and electrostatic properties." **Journal of Membrane Science**. Vol.253, pp. 89-102
- Manttari, M., Pihlajamaki, A. and Nystrom, M. 2006. "Effect of pH on hydrophilicity and charge and their effect on the filtration efficiency of NF membranes at different pH." **Journal of Membrane Science**.
- Oh, J.I., Lee, S.H. and Yamamoto, K. 2004. "Relationship between molar volume and rejection of arsenic species in groundwater by low-pressure nanofiltration process." **Journal of Membrane Science**. Vol.234, pp. 167-175.
- Ortega, L. M., Lebrun, R., Isabelle, M. N. and Hausler, R. 2005. "Application of nanofiltration in the recovery of chromium (III) from tannery effluents." **Separation and Purification Technology**. Vol.44, pp. 45-52.
- Ozer, A., Tumen, F. and Bildik, M. 1997. "Chromium (III) removal from aqueous solutions by depectinated sugar beet pulp." **Environmental Technology**. Vol.18, pp. 893-901.
- Peeva, G.L., Gibbins, E., Luthra, S.S., White, L.S., Stateva, R.P. and Livingston, A.G. 2004. "Effect of concentration polarisation and osmotic pressure on flux in organic solvent nanofiltration." **Journal of Membrane Science**. Vol.236, pp. 121-136.
- Ranjan, R., Gupta, S.D. and De, S. 2005. "Performance prediction of membrane modules incorporating the effects of suction in the mass transfer coefficient under laminar flow condition." **Separation and Purification Technology**. Vol.45, pp. 109-118.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Stafie, N., Stamatialis, D.F. and Wessling, M. 2005. "Effect of PDMS cross-linking degree on the permeation performance of PAN/PDMS composite nanofiltration membranes." **Separation and Purification Technology**. Vol.45(3), pp. 220-231.
- Tarleton, E.S., Robinson, J.P., Millington, C.R., Nijmeijer, A. and Taylor, M.L. 2005. "The influence of polarity on flux and rejection behaviour in solvent resistant nanofiltration- Experimental observations." **Journal of Membrane Science**.
- Thorsen, T. 1998. "Flux and recovery influences on treatment efficiency in ultrafiltration of coloured drinking water." **Desalination**. Vol.117, pp. 131-138.
- Uruse, T., Oh, J.I. and Yamamoto, K. 1998. "Effect of pH on rejection of different species of arsenic by nanofiltration" **Desalination**. Vol.117, pp. 11-18.
- Yang, Y., Jian, X., Yang, D., Zhang, S. and Zou, L. 2005. "Poly(phthalazinone ether sulfone ketone) (PPESK) hollow fiber asymmetric nanofiltration membranes: Preparation, morphologies and properties." **Journal of Membrane Science**. Vol.270, pp. 1-12.
- www.dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/vantHoff.1887.html, 21 October 2005
- www.dissertations.ub.rug.nl/FILES/faculties/science/2000/t.r.noordman/c1.pdf, 17 March 2006
- www.epa.gov/iris/toxreviews/0144-tr.pdf, 17 March 2006
- www.h2ofilter.net/NF270-2540, 17 March 2006
- www.msds.pcd.go.th/view_search_name.asp?Name=Chromium, 21 October 2005
- www.pall.com/pdf/mtcnpaper.pdf, 17 March 2006
- www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html, 21 October 2005
- www.pcd.go.th/infoserv/waterenviwarrior.Htm#S4, 21 October 2005
- www.scescape.net/~woods, 21 October 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
ตารางแสดงลักษณะนำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงาน
ในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล (พ.ศ. 2537-2541)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1 ตารางแสดงลักษณะรน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงาน ในเขต
กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล (พ.ศ. 2537-2541) (วุฒิชัย, 2545)

ลำดับที่	ลักษณะกิจการ	วันที่เก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง	pH	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
				Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
1	โรงงานชุบโครเมียม	10 มค. 2537	1.8	11.00	6.00	-	-	-
2	โรงงานชุบสังกะสี	18 มค. 2537	9.2	-	-	-	8.00	-
3	โรงงานทำไฟแช็ค	27 มค. 2537	4.6	0.20	300.00	-	-	-
4	โรงงานผลิตล้อจักรยาน	10 มีค. 2537	6.1	60.00	140.00	-	-	-
5	โรงงานทำโลหะแปรรูป	11 มีค. 2537	3.3	32.00	44.00	-	-	-
6	โรงงานผลิตอะไหล่รถจักรยาน	17 มีค. 2537	6.2	184.00	208.00	-	-	-
7	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์	19 มีค. 2537	7.0	0.10	3.80	-	-	-
8	โรงงานชุบโลหะ	27 มีค. 2537	12.5	1.50	-	-	-	-
9	โรงงานประกอบพัดลม	3 พค. 2537	4.3	-	60.00	-	400.00	-
10	โรงงานชุบโลหะ	25 มค. 2537	9.1	-	-	-	60.00	-
11	โรงงานชุบโลหะ	26 มค. 2537	7.8	0.10	20.00	1.28	22.00	-
12	โรงงานผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้ารถยนต์	2 กพ. 2537	7.3	0.10	1.60	-	-	-
13	โรงงานผลิตชิบ	2 กพ. 2537	7.7	-	0.10	-	0.10	-
14	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์	3 กพ. 2537	8.7	2.70	19.00	-	-	-
15	โรงงานผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า	8 กย. 2537	8.1	0.80	0.30	-	-	-
16	โรงงานชุบโลหะ	3 พค. 2537	5.5	41.30	33.30	-	-	-
17	โรงงานผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี	6 พค. 2537	7.5	-	-	-	7.30	1.10
18	โรงงานผลิตน็อต, ดอกสว่าน	10 พค. 2537	8.4	39.60	0.18	-	29.70	-
19	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์	18 พค. 2537	2.2	51.50	46.60	-	-	-
20	โรงงานผลิตน็อต, ดอกสว่าน	7 มิย. 2537	5.1	6.27	-	-	346.50	-
21	โรงงานชุบโลหะ	7 กย. 2537	6.0	-	0.05	-	-	-
22	โรงงานชุบโลหะ	21 กพ. 2538	4.4	20.20	300.00	-	-	-
23	โรงงานชุบสังกะสี	1 พค. 2538	2.0	-	-	-	34.00	-
24	โรงงานผลิตอุปกรณ์รถยนต์	20 มิย. 2538	7.0	0.02	0.12	-	-	-
25	โรงงานชุบอะไหล่รถจักรยาน	19 กค. 2538	5.6	39.40	73.80	-	-	-
26	โรงงานชุบอะไหล่รถจักรยาน	19 กค. 2538	4.0	105.00	274.00	-	-	-
27	โรงงานผลิตชิบ	3 สค. 2538	7.6	-	0.05	-	0.08	-
28	โรงงานชุบโลหะ	11 สค. 2538	2.7	0.06	-	0.19	16.30	-
29	โรงงานผลิตพัดลม	18 สค. 2538	8.1	-	4.72	0.02	48.00	0.01
30	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	19 สค. 2538	7.9	0.48	54.40	-	0.07	-
31	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยาน	25 สค. 2538	6.7	-	0.04	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1 (ต่อ) ตารางแสดงลักษณะโรงงานน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงาน ในเขต
กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล (พ.ศ. 2537-2541)

ลำดับที่	ลักษณะกิจการ	วันที่เก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง	pH	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
				Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
32	โรงงานชุบโลหะ	6 กย. 2538	7.4	-	0.03	-	-	-
33	โรงงานผลิตน็อต, ดอกสว่าน	20 ธค. 2538	6.1	-	-	-	61.00	-
34	โรงงานผลิตกลอนประตูชุบโครเมียม	28 ธค. 2538	2.7	0.04	1.81	-	0.16	-
35	โรงงานชุบโลหะ	5 กพ. 2539	7.8	0.11	0.14	-	0.04	-
36	โรงงานชุบโลหะ	2 กพ. 2539	5.8	0.87	61.20	-	-	-
37	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	9 กพ. 2539	6.1	0.25	3.28	-	0.13	-
38	โรงงานผลิตชิป	18 มีค. 2539	2.2	-	2.53	1.43	0.32	-
39	โรงงานผลิตน็อต, สกรู	19 มีค. 2539	6.5	-	4.16	-	38.00	-
40	โรงงานเครื่องประดับชุบ	10 เมย. 2539	12.0	1.17	1.69	9.50	-	-
41	โรงงานชุบโลหะ	28 เมย. 2539	7.2	0.05	2.64	-	0.52	-
42	โรงงานชุบโครเมียม	24 พค. 2539	11.8	0.95	0.23	0.08	-	-
43	โรงงานชุบโลหะ	13 พค. 2539	11.2	0.02	4.20	-	0.04	-
44	โรงงานชุบโลหะ	4 มิย. 2539	5.9	9.80	9.10	-	4.36	-
45	โรงงานผลิตเครื่องเรือนจากโลหะ	19 มิย. 2539	8.5	4.80	11.40	-	-	-
46	โรงงานผลิตน็อต, สกรู และหมุดข้อ	27 มิย. 2539	5.3	-	0.06	-	3.00	-
47	โรงงานผลิตรถจักรยาน	4 กค. 2539	7.6	0.02	3.94	-	-	-
48	โรงงานท่อเหล็กอาบสังกะสี	4 กค. 2539	6.6	-	0.16	-	0.68	-
49	โรงงานชุบโครเมียม	8 กค. 2539	7.3	0.26	0.82	-	-	-
50	โรงงานชุบโลหะ	19 กค. 2539	7.1	-	0.24	0.44	0.59	-
51	โรงงานชุบโครเมียม	21 สค. 2539	2.4	556.00	324.00	-	-	-
52	โรงงานชุบโลหะ	21 สค. 2539	5.9	128.80	90.80	-	-	-
53	โรงงานผลิตโลหะแปรรูป	20 สค. 2539	6.5	21.80	1.08	-	0.18	-
54	โรงงานชุบโลหะ	27 สค. 2539	6.9	1.68	1.51	0.28	-	-
55	โรงงานหลอมรีดและชุบอลูมิเนียม	30 สค. 2539	6.7	0.04	18.00	-	-	-
56	โรงงานชุบโครเมียม	30 สค. 2539	8.4	26.40	28.80	-	-	-
57	โรงงานชุบโลหะ	25 ธค. 2539	10.2	-	17.40	36.80	-	-
58	โรงงานชุบโลหะ	18 ธค. 2539	8.2	0.12	1.66	0.24	-	-
59	โรงงานผลิตสังกะสีถูกฟูกและแผ่นรีด	16 มค. 2540	4.5	-	-	-	188.00	-
60	โรงงานทำผลิตภัณฑ์โลหะแปรรูป	19 มค. 2540	10.0	23.40	1.40	0.16	0.02	0.44
61	โรงงานชุบโลหะ	10 มีค. 2540	6.0	0.88	4.05	0.79	-	-
62	โรงงานชุบโลหะ	21 มีค. 2540	8.6	0.09	0.96	-	1.16	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1 (ต่อ) ตารางแสดงลักษณะน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงาน ในเขต
กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล (พ.ศ. 2537-2541)

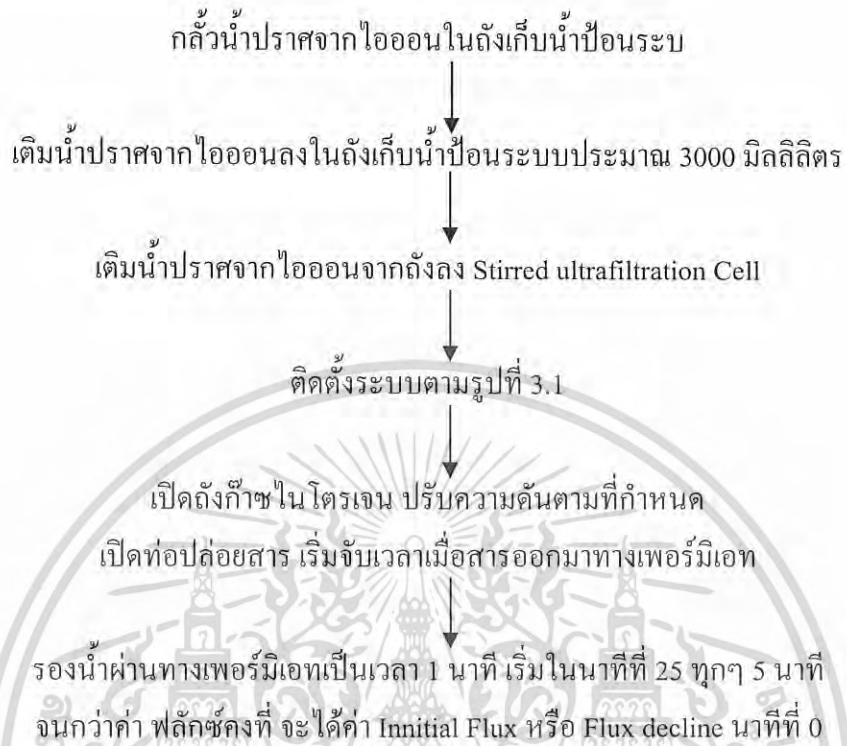
ลำดับที่	ลักษณะกิจการ	วันที่เก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง	pH	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
				Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
63	โรงงานทำผลิตภัณฑ์โลหะแปรรูป	30 เม.ย. 2540	8.6	1.11	0.26	0.04	-	1.39
64	โรงงานชุบสังกะสี	13 พ.ค. 2540	8.6	-	-	-	23.50	-
65	โรงงานผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี	30 พ.ค. 2540	8.8	0.21	-	-	0.05	-
66	โรงงานผลิตน็อต, สกรูและสลัก	17 มิ.ย. 2540	10.6	-	0.11	-	0.18	-
67	โรงงานชุบโลหะ	16 ก.ย. 2540	11.1	3.40	2.20	3.08	-	-
68	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์	25 ก.ย. 2540	7.2	-	0.05	-	7.00	-
69	โรงงานชุบทอง, นาก, เงิน	1 ต.ค. 2540	6.8	-	144.00	0.04	-	-
70	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	10 ต.ค. 2540	2.8	6.40	18.10	4.80	-	-
71	โรงงานชุบทอง, นาก, เงิน	21 ต.ค. 2540	6.8	-	0.32	0.01	-	-
72	โรงงานชุบโลหะ	24 พ.ย. 2540	6.4	2.80	-	-	-	-
73	โรงงานชุบโลหะ	3 ธ.ค. 2540	2.3	3.90	3.70	2.10	-	-
74	โรงงานผลิตรถจักรยานยนต์	16 ธ.ค. 2540	8.0	0.19	0.14	0.10	-	-
75	โรงงานชุบโลหะ	23 ม.ค. 2541	6.2	0.06	132.00	5.20	-	-
76	โรงงานชุบโลหะ	10 มี.ค. 2541	2.2	1.10	55.00	63.00	-	-
77	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	23 มี.ค. 2541	8.5	0.19	0.14	0.10	-	-
78	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	2 ก.ค. 2541	7.0	0.75	0.68	0.12	-	-
79	โรงงานชุบโลหะ	4 ส.ค. 2541	7.0	50.00	280.00	-	-	-
80	โรงงานทำเครื่องประดับ	14 ต.ค. 2541	8.0	-	0.32	0.12	-	-
ค่าเฉลี่ย			6.8	26.25	41.53	5.41	39.42	0.74
ช่วงความเข้มข้น			1.8- 12.5	0.02- 556	0.03- 324	0.01-63	0.02- 400	0.01- 1.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-1. ขั้นตอนการเดินระบบ Initial Flux



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-2. ขั้นตอนการเดินระบบควบคุม

เตรียมน้ำปราศจากไอออนปรับพีเอชตามปัจจัยที่กำหนด

อบฆ่าน้ำหนักบีกเกอร์ 30 ใบ

เดินระบบ Initial Flux

เดินระบบควบคุมปรับความดันตามปัจจัยที่กำหนด

วิเคราะห์การลดลงของฟลักซ์โดยร่อนน้ำผ่านทางเพอร์มิเอทเป็นเวลา 10 นาที ทุกๆ 10 นาที ในชม. แรก และทุกๆ 20 นาที ในชม. ถัดไป จนกว่าจะคงที่

วิเคราะห์ประสิทธิภาพการกักกันสาร โดย วัดค่าพีเอช, สภาพการนำไฟฟ้า, รัศยาสภาพเอกซเวเลนซ์ โครเมียม และ โครเมียมทั้งหมด

ณ พีค (ในถังพัก)

รีเทนเทต (Stirred Cell)

เพอร์มิเอท (นาทีที่ 10)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-3. ขั้นตอนการเดินระบบตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนที่โครเมียม

เตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนที่โครเมียมตามความเข้มข้น, พีเอชที่กำหนด

อบชั่งน้ำหนักบีกเกอร์ 30 ใบ

เดินระบบ Initial Flux

เดินระบบตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนที่โครเมียมตามความดันที่กำหนด

วิเคราะห์การลดลงของฟลักซ์โดยตรงนำผ่านทางเพอร์มิเอทเป็นเวลา 10 นาที ทุกๆ 10 นาที ในชม. แรก และทุกๆ 20 นาที ในชม. ถัดไป จนนาทีที่ 500

วิเคราะห์ประสิทธิภาพการกักกันสาร โดย วัดค่าพีเอช, สภาพการนำไฟฟ้า,

รักษาสภาพเฮกซะวาเลนที่โครเมียม และโครเมียมทั้งหมด

ณ ฟีด (ในถังพัก)

รีเทนเทต (Stirred Cell)

เพอร์มิเอท (นาทีที่ 10 ถึง นาทีที่ 510)

เตรียมขวดพลาสติกหาปริมาณ

รีเทนเทต = 200 มิลลิลิตร

เพอร์มิเอท = ชั่งน้ำหนักที่ผ่านเยื่อกรอง

และส่วนที่ไม่ต้องการ

ปริมาตรที่ฟีด (V_0) = 6,000 มิลลิลิตร

และ $V_t = V_0 - V_{per}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-4. ขั้นตอนการรักษาสภาพตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (APHA, AWWA and WPCF., 1992)

4.1 การรักษาสภาพตัวอย่างเฮกซะวาเลนต์โครเมียม

กรองลดความดันส่วนเพอร์มิเอตด้วยกระดาษกรอง Whatmann No. 42



ปรับพีเอชให้น้อยกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น (ประมาณ 1 หยด)

4.2 การรักษาสภาพตัวอย่างโครเมียมทั้งหมด

ปรับพีเอชให้น้อยกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น (ประมาณ 1 หยด) ในส่วนเพอร์มิเอต โดยไม่ต้องกรอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-5. ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมทั้งหมดจากน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนที่โครเมียม (APHA, AWWA and WPCF., 1992)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-6. ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณเฮกซะวาเลนที่โครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะวาเลนที่โครเมียม (APHA, AWWA and WPCF., 1992)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
ตารางแสดงผลการทดสอบการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน
โครเมียมด้วยเยื่อกรองนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1.1 ผลของความดันต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม
ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 7 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ฟลักซ์ของ อัตราการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณเอกซะวา- เลนท์โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	21.95	7.83	3.90	0.00	0.00
10	22.64	7.70	0.10	0.00	0.12
20	22.89	-	-	-	-
30	22.41	-	-	-	-
40	21.76	-	-	-	-
50	21.97	-	-	-	-
60	22.14	-	-	-	-
70	21.95	-	-	-	-
90	21.70	-	-	-	-
110	21.91	-	-	-	-
130	21.93	-	-	-	-
150	21.76	-	-	-	-
170	21.87	-	-	-	-
190	-	-	-	-	-
210	-	-	-	-	-
230	-	-	-	-	-
250	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-
290	-	-	-	-	-
310	-	-	-	-	-
330	-	-	-	-	-
350	-	-	-	-	-
370	-	-	-	-	-
390	-	-	-	-	-
410	-	-	-	-	-
430	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-
470	-	-	-	-	-
490	-	-	-	-	-
510	-	-	-	-	-
Retentate	-	8.09	6.10	0.00	0.12
Feed	21.95	7.83	3.90	0.00	0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1.2 ผลของความดันต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม

ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 7 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ฟลักซ์ของ อัตราการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณเอกซะวา- เลนท์โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	565.09	6.77	0.10	0.00	0.00
10	560.51	6.77	0.10	0.00	0.09
20	510.63	-	-	-	-
30	479.85	-	-	-	-
40	454.79	-	-	-	-
50	434.66	-	-	-	-
60	416.36	-	-	-	-
70	398.34	-	-	-	-
90	381.43	-	-	-	-
110	355.59	-	-	-	-
130	324.00	-	-	-	-
150	304.22	-	-	-	-
170	287.23	-	-	-	-
190	272.59	-	-	-	-
210	255.37	-	-	-	-
230	241.99	-	-	-	-
250	229.40	-	-	-	-
270	218.32	-	-	-	-
290	207.89	-	-	-	-
310	197.31	-	-	-	-
330	188.66	-	-	-	-
350	180.67	-	-	-	-
370	172.26	-	-	-	-
390	166.06	-	-	-	-
410	159.91	-	-	-	-
430	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-
470	-	-	-	-	-
490	-	-	-	-	-
510	-	-	-	-	-
Retentate	-	6.89	0.10	0.00	0.09
Feed	565.09	6.77	0.10	0.00	0.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1.3 ผลของความดันต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม

ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 7 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ฟลักซ์ของ อัตราการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณเอกซะวา- เลนท์โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	729.41	7.25	75.00	0.00	0.00
10	754.54	6.95	4.40	0.00	0.12
20	721.51	-	-	-	-
30	676.93	-	-	-	-
40	616.39	-	-	-	-
50	565.17	-	-	-	-
60	526.37	-	-	-	-
70	498.56	-	-	-	-
90	448.39	-	-	-	-
110	407.12	-	-	-	-
130	-	-	-	-	-
150	343.57	-	-	-	-
170	318.65	-	-	-	-
190	335.87	-	-	-	-
210	-	-	-	-	-
230	-	-	-	-	-
250	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-
290	-	-	-	-	-
310	-	-	-	-	-
330	-	-	-	-	-
350	-	-	-	-	-
370	-	-	-	-	-
390	-	-	-	-	-
410	-	-	-	-	-
430	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-
470	-	-	-	-	-
490	-	-	-	-	-
510	-	-	-	-	-
Retentate	-	7.10	6.50	0.00	0.12
Feed	729.41	7.25	75.00	0.00	0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1.4 ผลของความดันต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม

ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 7 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ฟลักซ์ของ อัตราการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณแฮกซะวา- เลนที่โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	16.80	6.81	250.00	0.00	0.00
10	19.46	6.39	10.70	0.78	1.39
20	19.12	-	-	-	-
30	18.57	6.07	23.00	0.92	0.69
40	18.55	-	-	-	-
50	18.52	6.52	7.70	0.34	0.46
60	18.15	-	-	-	-
70	18.12	6.50	11.50	0.28	0.46
90	18.14	6.46	13.80	0.34	0.46
110	17.94	6.46	18.10	0.45	0.93
130	17.90	6.56	12.50	0.86	1.54
150	17.83	-	-	-	-
170	17.47	-	-	-	-
190	17.53	6.70	5.50	0.59	1.39
210	17.41	-	-	-	-
230	16.64	-	-	-	-
250	17.02	6.85	4.50	0.76	1.39
270	16.83	-	-	-	-
290	16.68	-	-	-	-
310	16.49	6.87	5.60	0.06	1.62
330	16.33	-	-	-	-
350	16.10	-	-	-	-
370	-	-	-	-	-
390	-	-	-	-	-
410	15.74	7.07	8.60	2.02	1.62
430	15.28	-	-	-	-
450	15.27	-	-	-	-
470	15.91	-	-	-	-
490	16.41	-	-	-	-
510	15.47	7.25	36.20	0.91	1.70
Retentate	-	6.55	26.00*	71.43	75.46
Feed	16.80	6.81	250.00	31.25	29.63

หมายเหตุ : *mS/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1.5 ผลของความดันต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม

ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 7 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ฟลักซ์ของ อัตราการใช้ (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณเยื่อหุ้ม เลนที่โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	445.46	-	-	0.00	0.00
10	393.18	6.89	210.40	24.49	21.85
20	354.89	-	-	-	-
30	332.31	6.89	221.20	27.01	19.53
40	317.04	-	-	-	-
50	304.45	6.60	288.40	27.01	23.53
60	293.74	-	-	-	-
70	285.16	6.65	225.70	27.22	24.17
90	269.26	6.69	226.60	27.57	22.40
110	257.04	6.54	226.60	26.45	22.96
130	242.29	7.09	230.30	27.01	22.01
150	-	-	-	-	-
170	228.26	-	-	-	-
190	218.59	6.93	230.30	27.43	23.17
210	210.43	-	-	-	-
230	202.34	-	-	-	-
250	195.77	6.93	230.30	26.17	19.60
270	188.16	-	-	-	-
290	184.35	-	-	-	-
310	179.22	6.86	229.30	25.75	19.96
330	170.22	-	-	-	-
350	164.48	-	-	-	-
370	159.77	-	-	-	-
390	157.17	-	-	-	-
410	153.18	6.62	226.60	24.84	18.88
430	147.88	-	-	-	-
450	143.18	-	-	-	-
470	140.50	-	-	-	-
490	138.10	-	-	-	-
510	135.18	6.80	223.90	25.75	24.49
Retentate	-	6.77	271.80	33.17	56.16
Feed	445.46	-	-	30.00	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1.6 ผลของความดันต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม

ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 7 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ฟลักซ์ของ อัตราการใช้ (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณเอกซะวา- เลนที่โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	717.91	6.51	170.00	0.00	0.00
10	730.75	9.48	281.00	28.28	28.70
20	690.31	-	-	-	-
30	654.65	9.52	281.00	29.82	33.33
40	625.38	-	-	-	-
50	598.24	9.55	283.00	31.01	33.33
60	572.28	-	-	-	-
70	551.29	9.09	278.00	30.24	31.02
90	514.87	9.49	273.00	29.96	29.17
110	487.15	9.52	275.00	29.68	28.24
130	461.81	9.40	275.00	30.03	32.41
150	439.02	-	-	-	-
170	420.79	-	-	-	-
190	403.07	9.50	279.00	29.26	28.01
210	398.05	-	-	-	-
250	351.09	9.45	279.00	28.21	27.31
230	377.85	-	-	-	-
270	344.49	-	-	-	-
290	333.41	-	-	-	-
310	321.70	9.50	274.00	27.51	27.31
330	310.95	-	-	-	-
350	303.22	-	-	-	-
370	293.10	-	-	-	-
390	283.48	-	-	-	-
410	275.29	6.73	253.00	26.61	29.63
430	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-
470	-	-	-	-	-
490	-	-	-	-	-
510	-	-	-	-	-
Retentate	-	9.55	14.75*	36.38	39.58
Feed	717.91	6.51	170.00	27.58	27.31

หมายเหตุ : *mS/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2.1 ผลของพีเอชต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม

ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 3 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ฟลักซ์ของ อัตราการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณแอกเซวลา- เลนท์โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	12.96	3.06	189.40	0.00	0.00
10	11.06	5.71	67.70	15.46	14.80
20	11.12	-	-	-	-
30	10.77	5.79	68.50	16.98	16.45
40	9.70	-	-	-	-
50	10.49	5.02	60.00	17.70	18.48
60	10.43	-	-	-	-
70	11.12	5.27	79.90	16.77	15.85
90	10.79	5.43	56.30	17.23	11.23
110	10.64	5.17	79.90	4.74	17.23
130	10.66	5.21	50.10	17.53	17.35
150	10.33	-	-	-	-
170	10.03	-	-	-	-
190	10.12	5.78	79.60	17.53	16.95
210	10.08	-	-	-	-
230	10.12	-	-	-	-
250	10.03	5.80	59.40	18.12	17.15
270	9.87	-	-	-	-
290	9.87	-	-	-	-
310	9.80	5.19	72.10	18.59	17.40
330	9.85	-	-	-	-
350	9.72	-	-	-	-
370	9.47	-	-	-	-
390	9.22	-	-	-	-
410	9.83	5.61	82.50	19.10	18.28
430	10.14	-	-	-	-
450	10.10	-	-	-	-
470	10.01	-	-	-	-
490	9.55	-	-	-	-
510	9.51	5.54	67.20	19.44	19.70
Retentate	-	3.04	22.20*	35.91	33.55
Feed	12.96	3.06	189.40	29.64	27.25

หมายเหตุ : *mS/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2.2 ผลของพีเอชต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม

ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 5 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ฟลักซ์ของ อัตราการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณเอกซวา- เลนท์โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	12.75	5.41	108.90	0.00	0.00
10	13.59	6.06	10.40	6.68	1.73
20	13.36	-	-	-	-
30	13.19	5.95	8.70	4.69	1.70
40	12.88	-	-	-	-
50	12.88	6.39	6.30	2.70	1.98
60	12.67	-	-	-	-
70	12.59	6.14	5.90	2.84	2.00
90	12.40	5.29	7.60	3.13	1.85
110	12.33	5.69	5.30	3.56	2.28
130	7.88	6.38	6.10	3.27	2.00
150	12.08	-	-	-	-
170	12.00	-	-	-	-
190	11.81	5.86	5.20	4.27	2.50
210	11.83	-	-	-	-
230	11.73	-	-	-	-
250	11.79	5.34	4.40	4.55	1.63
270	11.92	-	-	-	-
290	12.00	-	-	-	-
310	11.87	5.91	3.30	4.69	2.75
330	12.02	-	-	-	-
350	12.17	-	-	-	-
370	11.87	-	-	-	-
390	11.96	-	-	-	-
410	12.15	5.11	4.10	5.12	3.55
430	11.83	-	-	-	-
450	11.94	-	-	-	-
470	12.02	-	-	-	-
490	13.59	-	-	-	-
510	12.19	5.73	3.70	4.55	3.98
Retentate	-	5.65	215.00	49.63	47.50
Feed	12.75	5.41	108.90	28.16	25.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2.3 ผลของพีเอชต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม

ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 7 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ฟลักซ์ของ อัตราการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณเอกซะวา- เลนทีโครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	16.80	6.81	250.00	0.00	0.00
10	19.46	6.39	10.70	0.78	1.39
20	19.12	-	-	-	-
30	18.57	6.07	23.00	0.92	0.69
40	18.55	-	-	-	-
50	18.52	6.52	7.70	0.34	0.46
60	18.15	-	-	-	-
70	18.12	6.50	11.50	0.28	0.46
90	18.14	6.46	13.80	0.34	0.46
110	17.94	6.46	18.10	0.45	0.93
130	17.90	6.56	12.50	0.86	1.54
150	17.83	-	-	-	-
170	17.47	-	-	-	-
190	17.53	6.70	5.50	0.59	1.39
210	17.41	-	-	-	-
230	16.64	-	-	-	-
250	17.02	6.85	4.50	0.76	1.39
270	16.83	-	-	-	-
290	16.68	-	-	-	-
310	16.49	6.87	5.60	0.06	1.62
330	16.33	-	-	-	-
350	16.10	-	-	-	-
370	-	-	-	-	-
390	-	-	-	-	-
410	15.74	7.07	8.60	2.02	1.62
430	15.28	-	-	-	-
450	15.27	-	-	-	-
470	15.91	-	-	-	-
490	16.41	-	-	-	-
510	15.47	7.25	36.20	0.91	1.70
Retentate	-	6.55	26.00*	71.43	75.46
Feed	16.80	6.81	250.00	31.25	29.63

หมายเหตุ : *mS/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2.4 ผลของพีเอชต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม

ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 9 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ฟลักซ์ของ อัตราการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณเอกซวา- เลนท์โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	16.93	9.12	305.00	0.00	0.00
10	17.60	6.70	4.50	1.00	0.55
20	17.92	-	-	-	-
30	17.62	6.47	4.00	1.00	0.55
40	17.62	-	-	-	-
50	17.44	6.97	2.40	0.71	1.50
60	17.29	-	-	-	-
70	17.37	5.31	4.00	0.71	1.45
90	17.44	5.80	2.90	1.00	1.30
110	17.46	5.72	2.10	1.14	1.50
130	17.67	5.50	2.80	2.42	0.60
150	17.35	-	-	-	-
170	17.29	-	-	-	-
190	17.14	5.50	4.30	2.56	0.10
210	16.87	-	-	-	-
230	16.75	-	-	-	-
250	16.81	5.50	3.60	1.85	0.55
270	16.58	-	-	-	-
290	16.18	-	-	-	-
310	16.14	5.80	2.30	2.42	1.10
330	16.08	-	-	-	-
350	16.10	-	-	-	-
370	15.99	-	-	-	-
390	15.87	-	-	-	-
410	15.66	5.76	4.30	1.99	1.00
430	15.78	-	-	-	-
450	15.64	-	-	-	-
470	15.49	-	-	-	-
490	15.53	-	-	-	-
510	15.30	6.05	4.50	2.13	0.75
Retentate	-	9.15	32.50*	63.28	46.76
Feed	16.93	9.12	305.00	27.30	25.99

หมายเหตุ : *mS/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม
ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 7 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ฟลักซ์ของ อัตราการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณออกซิเจน ละลายที่โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	21.95	7.83	3.90	0.00	0.00
10	22.64	7.70	0.10	0.00	0.115741
20	22.89	-	-	-	-
30	22.41	-	-	-	-
40	21.76	-	-	-	-
50	21.97	-	-	-	-
60	22.14	-	-	-	-
70	21.95	-	-	-	-
90	21.70	-	-	-	-
110	21.91	-	-	-	-
130	21.93	-	-	-	-
150	21.76	-	-	-	-
170	21.87	-	-	-	-
190	-	-	-	-	-
210	-	-	-	-	-
230	-	-	-	-	-
250	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-
290	-	-	-	-	-
310	-	-	-	-	-
330	-	-	-	-	-
350	-	-	-	-	-
370	-	-	-	-	-
390	-	-	-	-	-
410	-	-	-	-	-
430	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-
470	-	-	-	-	-
490	-	-	-	-	-
510	-	-	-	-	-
Retentate	-	8.09	6.10	0.00	0.12
Feed	21.95	7.83	3.90	0.00	0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม
ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 7 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ฟลักซ์ของ อัตรการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณเยื่อหุ้ม เลนที่โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	14.01	6.90	124.60	0.00	0.00
10	12.44	5.40	3.70	1.41	0.20
20	12.23	-	-	-	-
30	11.90	5.03	5.30	1.41	0.28
40	12.04	-	-	-	-
50	11.62	4.77	3.90	1.09	0.28
60	11.83	-	-	-	-
70	11.73	4.75	6.60	3.22	0.35
90	11.62	5.66	5.90	1.01	0.28
110	11.39	5.46	4.90	1.17	0.35
130	11.35	5.33	3.90	2.09	0.92
150	11.29	-	-	-	-
170	11.18	-	-	-	-
190	11.35	5.62	6.60	1.69	0.42
210	11.18	-	-	-	-
230	10.91	-	-	-	-
250	10.79	5.46	3.50	1.93	0.39
270	10.62	-	-	-	-
290	10.64	-	-	-	-
310	10.49	5.16	3.60	1.13	0.48
330	10.64	-	-	-	-
350	10.33	-	-	-	-
370	10.29	-	-	-	-
390	11.00	-	-	-	-
410	10.81	5.89	3.40	1.21	0.56
430	10.77	-	-	-	-
450	10.56	-	-	-	-
470	10.47	-	-	-	-
490	10.56	-	-	-	-
510	10.64	5.90	3.60	1.61	0.88
Retentate	0.00	6.93	246.00	23.96	19.30
Feed	14.01	6.90	124.60	13.19	11.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกันโครเมียม

ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 7 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ฟลักซ์ของ อัตราการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณเฮกซะวา- เลนที่โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	8.57	7.05	166.10	0.00	0.00
10	8.70	5.66	8.20	1.36	0.88
20	8.72	-	-	-	-
30	8.84	5.98	7.90	1.61	0.85
40	8.95	-	-	-	-
50	9.03	5.86	5.00	2.19	1.08
60	8.97	-	-	-	-
70	9.26	5.85	5.30	1.85	0.95
90	9.41	5.89	5.60	1.39	0.78
110	9.47	5.86	3.90	1.20	0.78
130	9.51	6.05	7.60	1.55	0.78
150	9.70	-	-	-	-
170	9.53	-	-	-	-
190	9.70	5.67	3.40	1.44	0.43
210	9.51	-	-	-	-
230	9.93	-	-	-	-
250	9.74	5.85	6.40	1.71	0.25
270	9.83	-	-	-	-
290	9.62	-	-	-	-
310	9.66	5.65	4.90	1.42	0.60
330	9.70	-	-	-	-
350	9.78	-	-	-	-
370	9.97	-	-	-	-
390	9.74	-	-	-	-
410	9.83	5.62	6.00	1.34	0.43
430	9.68	-	-	-	-
450	9.62	-	-	-	-
470	9.57	-	-	-	-
490	9.80	-	-	-	-
510	9.76	5.70	3.40	1.77	0.23
Retentate	0.00	7.09	302.00	38.92	35.95
Feed	8.57	7.05	166.10	21.87	22.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกัน โครเมียม

ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 7 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ฟลักซ์ของ อัตราการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณเฮกซะวา- เลนทีโครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	16.80	6.81	250.00	0.00	0.00
10	19.46	6.39	10.70	0.78	1.39
20	19.12	-	-	-	-
30	18.57	6.07	23.00	0.92	0.69
40	18.55	-	-	-	-
50	18.52	6.52	7.70	0.34	0.46
60	18.15	-	-	-	-
70	18.12	6.50	11.50	0.28	0.46
90	18.14	6.46	13.80	0.34	0.46
110	17.94	6.46	18.10	0.45	0.93
130	17.90	6.56	12.50	0.86	1.54
150	17.83	-	-	-	-
170	17.47	-	-	-	-
190	17.53	6.70	5.50	0.59	1.39
210	17.41	-	-	-	-
230	16.64	-	-	-	-
250	17.02	6.85	4.50	0.76	1.39
270	16.83	-	-	-	-
290	16.68	-	-	-	-
310	16.49	6.87	5.60	0.06	1.62
330	16.33	-	-	-	-
350	16.10	-	-	-	-
370	-	-	-	-	-
390	-	-	-	-	-
410	15.74	7.07	8.60	2.02	1.62
430	15.28	-	-	-	-
450	15.27	-	-	-	-
470	15.91	-	-	-	-
490	16.41	-	-	-	-
510	15.47	7.25	36.20	0.91	1.70
Retentate	0.00	6.55	26.00*	71.43	75.46
Feed	16.80	6.81	250.00	31.25	29.63

หมายเหตุ : *mS/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพการกักกันโครเมียม

ด้วยเยื่อกรองนาโน

ณ ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, พีเอช 7 และความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ฟลักซ์ของ อัตราการไหล (ลิตรต่อตารางเมตร ต่อชั่วโมง)	พีเอช	สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์ต่อ เซนติเมตร)	ปริมาณเยื่อชะว เลนที่โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโครเมียม ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	12.33	6.85	298.00	0.00	0.00
10	12.36	5.18	4.10	1.45	0.77
20	12.29	-	-	-	-
30	12.17	6.32	5.50	1.53	0.82
40	12.10	-	-	-	-
50	12.17	5.21	3.60	1.05	0.92
60	12.27	-	-	-	-
70	12.10	5.26	3.60	1.25	0.81
90	12.21	5.29	3.40	1.41	0.86
110	12.04	5.44	2.80	1.37	1.07
130	11.83	5.70	4.00	1.61	1.15
150	11.87	-	-	-	-
170	11.94	-	-	-	-
190	11.85	5.48	4.40	1.37	1.02
210	11.90	-	-	-	-
230	11.60	-	-	-	-
250	12.69	5.42	2.70	1.09	0.99
270	12.48	-	-	-	-
290	12.23	-	-	-	-
310	12.27	5.89	4.50	1.57	1.18
330	12.04	-	-	-	-
350	11.94	-	-	-	-
370	11.75	-	-	-	-
390	11.64	-	-	-	-
410	11.64	5.79	6.00	1.77	1.03
430	11.67	-	-	-	-
450	11.44	-	-	-	-
470	11.39	-	-	-	-
490	11.29	-	-	-	-
510	11.16	5.85	4.60	1.69	1.06
Retentate	0.00	7.01	599.00	77.84	36.10
Feed	12.33	6.85	298.00	39.40	37.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้