

การพัฒนากระบวนการเมมเบรนแบบผสมผสาน (ฟอร์เวิร์ดออสโมซิส และเมมเบรนชนิด
นาโนฟิลเตรชัน) เพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of Combined membrane processes (Forward Osmosis and
Nanofiltration Membrane) for Groundwater quality improvement in Industry



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การพัฒนากระบวนการเมมเบรนแบบผสมผสาน (ฟอร์เวิร์ด ออสโมซิส และเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชัน) เพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม |
| โดย | น.ส.เอื้ออนุช ศรีน้อย |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ยมณฑล |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | อาจารย์ ดร.เจนยุกต์ โล่ห์วีชรินทร์ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภู่งามเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ยมณฑล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.เจนยุกต์ โล่ห์วีชรินทร์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มรุพัชร จำนงค์วงศ์)

เอื้ออนุช ศรีน้อย : การพัฒนากระบวนการเมมเบรนแบบผสมผสาน (ฟอร์เวิร์ดออสโมซิส และเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชัน) เพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลสำหรับใช้ใน อุตสาหกรรม. (Development of Combined membrane processes (Forward Osmosis and Nanofiltration Membrane) for Groundwater quality improvement in Industry) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, อ.ที่ปรึกษา ร่วม : อ. ดร.เจนยุกต์ โล่หัวชรินทร์

ปัญหาในการนำน้ำบาดาลมาใช้คือ ความกระด้างของน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดตะกอนในระบบ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยกระบวนการเมมเบรนผสมผสาน(ฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-อัลตราฟิลเตรชัน/นาโนฟิลเตรชัน) โดยทดลองกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ สารตั้งที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสได้แก่ 1) โซเดียมคลอไรด์ 2) แมกนีเซียมซัลเฟต และ 3) อีดีทีเอ ซึ่งพารามิเตอร์ที่พิจารณาในกระบวนการนี้คือ ค่าฟลักซ์ของสารตั้งหลังผ่านกระบวนการ ผลการศึกษาพบว่าสารตั้งทั้ง 3 ชนิดมีความดันออสโมติกมากกว่าน้ำบาดาล โดยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.6 โมลต่อลิตร ให้ค่าฟลักซ์เท่ากับเท่ากับ 5.74 และ 4.82 ลิตรต่อตารางเมตร ชั่วโมง ในการเลือกใช้สารตั้ง จำเป็นต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของกระบวนการที่ใช้ฟื้นฟูสภาพด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันในการฟื้นฟูสภาพสารตั้ง เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่สูงกว่าอัลตราฟิลเตรชัน และจากการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตให้ฟลักซ์ที่สูงที่สุด นอกจากนี้คุณภาพน้ำที่ได้จากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีความกระด้างและซิลิกาผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับระบบหล่อเย็นของ Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRA)

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5870314721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Forward Osmosis, Nanofiltration, Hardness removal, Groundwater

Auaanuch Srinoi : Development of Combined membrane processes (Forward Osmosis and Nanofiltration Membrane) for Groundwater quality improvement in Industry. Advisor: Prof. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D. Co-advisor: Jenyuk Lohwacharin, Ph.D.

The problem in using groundwater is water hardness which causes scaling in the system. The objective of this research is to study the process of hardness removal by applying the combined membrane process (forward osmosis - ultrafiltration/nanofiltration) with synthetic groundwater. The draw solution used in the forward osmosis process are 1) sodium chloride, 2) magnesium sulfate and 3) EDTA. The parameters considered in this process is Flux of the draw solution after the process. The results showed that all 3 draw solutions had osmotic pressure more than groundwater. With 0.6 mol/l of sodium chloride and magnesium sulfate gave the Flux value equal to 5.74 and 4.82 LMH respectively. Therefore, selection of the draw solution, it is necessary to consider the suitability of the regeneration process. In this research, the nanofiltration process was selected to regenerate the draw solution, because nanofiltration has a higher removal percentage than ultrafiltration. From the design of the experiment with the Minitab program, it is found that the magnesium sulfate gave the highest flux value. In addition, the water quality obtained from the nanofiltration process in this research had a hardness and silica meets the water quality standards for the Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association for cooling system.

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความกรุณาเป็นอย่างสูงจากศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร. เจนยุกต์ โล่ห์วีชรินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่างจนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภู่งประเสริฐ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเจียร รองศาสตราจารย์ ดร. ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มรุตพัชร จำนงค์วงศ์ ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเพื่อสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และชี้แนะข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณทุนวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) และบริษัท วาติโอ จำกัด ที่สนับสนุนข้อมูลเชิงอุตสาหกรรมและทุนเพื่อการวิจัย

ขอขอบคุณน.ส. สุพัตรา ศรีสันต์ที่คอยช่วยเหลือในระหว่างการทำวิจัย

และสุดท้ายขอขอบพระคุณสำหรับความห่วงใยและกำลังใจจากทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุนจนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบความสำเร็จ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เอื้ออนุช ศรีน้อย

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| กิตติกรรมประกาศ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ฐ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตงาน..... | 2 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 น้ำบาดาล (Groundwater)..... | 4 |
| 2.2 ความกระด้างของน้ำ..... | 5 |
| 2.2.1 ประเภทของความกระด้าง..... | 5 |
| 2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างและสภาพด่าง (Alkalinity)..... | 6 |
| 2.2.3 การกำจัดความกระด้าง..... | 6 |
| 2.3 หม้อไอน้ำ (Steam Boiler)..... | 8 |
| 2.3.1 ประเภทของหม้อไอน้ำ..... | 8 |
| 2.3.2 น้ำสำหรับหม้อไอน้ำ..... | 10 |
| 2.4 หอหล่อเย็น (Cooling tower)..... | 13 |
| 2.4.1 ประเภทของน้ำในระบบ..... | 13 |

| | |
|---|----|
| 2.5 กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส (Forward osmosis; FO)..... | 15 |
| 2.5.1 หลักการทำงาน..... | 15 |
| 2.5.2 สารดึง (Draw Solution; DS)..... | 16 |
| 2.5.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส..... | 18 |
| 2.6 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration; UF)..... | 19 |
| 2.7 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration; NF)..... | 20 |
| 2.7.1 กลไกการทำงาน | 20 |
| 2.8 การเกิดฟาวลิงของเมมเบรน (Membrane fouling)..... | 21 |
| 2.8.1 กลไกการเกิดฟาวลิง..... | 21 |
| 2.8.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดฟาวลิง..... | 22 |
| 2.8.3 ชนิดของสารอุดตัน (Foulant)..... | 24 |
| 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 24 |
| บทที่ 3 วิธีการทดลอง | 37 |
| 3.1 ข้อมูลพื้นฐานของโรงงานผลิตเอทานอลที่สนับสนุนข้อมูลสำหรับงานวิจัย | 37 |
| 3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย..... | 39 |
| 3.2.1 น้ำบาดาลสังเคราะห์..... | 39 |
| 3.2.2 ฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเมมเบรน | 41 |
| 3.2.3 นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนและอุปกรณ์ยึดจับเมมเบรน (Test cell) ในงานวิจัย | 44 |
| 3.2.4 อัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนและอุปกรณ์ยึดจับเมมเบรน (Test cell) ในงานวิจัย..... | 47 |
| 3.3 ขั้นตอนการทดลอง..... | 49 |
| 3.3.1 การทดลองที่ 1 : การวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลและสังเคราะห์น้ำ | 50 |
| 3.3.2 การทดลองที่ 2 : การศึกษาชนิดและปริมาณสารเคมีของสารดึงในกระบวนการฟอร์เวิร์ด ออสโมซิส | 50 |

| | |
|--|----|
| 3.3.3 การทดลองที่ 3 : การทดลองหาชนิดและปริมาณสารเคมีของสารตั้งในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส | 50 |
| 3.3.4 การทดลองที่ 4 : กระบวนการที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารตั้ง (Regeneration)..... | 50 |
| 3.3.5 การทดลองที่ 5 : เปรียบเทียบกระบวนการบำบัดน้ำบาดาลด้วยกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-นาโนฟิลเตรชัน/อัลตราฟิลเตรชัน | 52 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง..... | 53 |
| 4.1 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลจริงและสังเคราะห์น้ำบาดาลเพื่อใช้ในการทดลอง | 53 |
| 4.2 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณสารเคมีของสารตั้งในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส | 56 |
| 4.2.1 ความดันออสโมติกของน้ำบาดาลสังเคราะห์..... | 56 |
| 4.2.2 ความดันออสโมติกของสารตั้งแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่างๆที่อุณหภูมิห้อง | 57 |
| 4.2.3 ค่าฟลักซ์ของสารตั้ง | 58 |
| 4.3 การทดลองหาค่าฟลักซ์จากกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส | 60 |
| 4.4 กระบวนการฟื้นฟูสภาพโดยนาโนฟิลเตรชัน/อัลตราฟิลเตรชัน | 64 |
| 4.4.1 การเลือกกระบวนการฟื้นฟูสภาพ | 64 |
| 4.4.2 การวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab | 65 |
| 4.4.2.1 ผลการทดลองด้วยสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต..... | 65 |
| 4.4.2.2 ผลการทดลองด้วยสารละลายอีทีทีเอ..... | 70 |
| 4.4.3 การวิเคราะห์SEM-EDX ของเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันก่อนและหลังการใช้งาน โดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟตเป็นสารตั้ง | 75 |
| 4.5 ผลการเปรียบเทียบกระบวนการบำบัดน้ำบาดาลด้วยกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-นาโนฟิลเตรชัน/อัลตราฟิลเตรชัน | 77 |
| 4.5.1 คุณภาพน้ำสะอาดหลังผ่านกระบวนการ | 77 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 80 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 80 |

| | |
|---|-----|
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 81 |
| บรรณานุกรม..... | 82 |
| ภาคผนวก..... | 85 |
| ภาคผนวก ก เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ | 86 |
| ภาคผนวก ข สารเคมีและขั้นตอนในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ..... | 88 |
| ภาคผนวก ค อุปกรณ์จับยึดเมมเบรน (Test cell)..... | 94 |
| ภาคผนวก ง คุณภาพน้ำบาดาลจริงของโรงงานผลิตเอทานอล..... | 95 |
| ภาคผนวก จ คุณภาพน้ำบาดาลสังเคราะห์..... | 96 |
| ภาคผนวก ฉ ค่าฟลักซ์ของสารตั้งในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส | 97 |
| ภาคผนวก ช ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง (DOE) ด้วยโปรแกรม Minitab | 105 |
| ภาคผนวก ซ ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดเมื่อผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันจากการออกแบบการทดลอง | 108 |
| ภาคผนวก ด SEM-EDX ของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่ไม่ผ่านการใช้งานและหลังการใช้งาน จากการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นสารตั้ง | 153 |
| ภาคผนวก ต มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการ..... | 155 |
| ภาคผนวก ถ มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทาน ในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน | 158 |
| ภาคผนวก ท ราคาสารเคมี..... | 161 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 164 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 1 เกณฑ์ความกระด้างของน้ำ | 6 |
| ตารางที่ 2 ประเภทของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ..... | 8 |
| ตารางที่ 3 น้ำในระบบหม้อไอน้ำ..... | 10 |
| ตารางที่ 4 มาตรฐานน้ำสำหรับหม้อไอน้ำ (ความดันต่ำ – ปานกลาง)..... | 11 |
| ตารางที่ 5 มาตรฐานน้ำสำหรับหม้อไอน้ำ (ความดันสูง) | 12 |
| ตารางที่ 6 น้ำในระบบหล่อเย็น | 13 |
| ตารางที่ 7 มาตรฐานน้ำทดแทนและน้ำหล่อเย็นในกระบวนการหล่อเย็นแบบระบบเปิดที่มีการ หมุนเวียนน้ำกลับที่กำหนดขึ้นโดย The Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association Microbial (JRA)..... | 14 |
| ตารางที่ 8 การพัฒนาและศึกษาสารตั้งชนิดต่างๆ..... | 16 |
| ตารางที่ 9 ราคาของสารตั้งทั้ง 14 ชนิด..... | 26 |
| ตารางที่ 10 พลั๊กซ์ของน้ำและค่าความต้านทานของสารตั้ง | 27 |
| ตารางที่ 11 เปอร์เซนต์การกำจัดของสารตั้งทั้ง 7 ชนิด | 31 |
| ตารางที่ 12 คุณภาพน้ำบาดาลของโรงงานผลิตเอทานอล..... | 39 |
| ตารางที่ 13 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์สำหรับการทดลอง..... | 40 |
| ตารางที่ 14 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำบาดาล | 41 |
| ตารางที่ 15 คุณสมบัติของเมมเบรนชนิดพอร์เวียร์ดอสมิซิส..... | 41 |
| ตารางที่ 16 สารตั้งที่ใช้ในการทดลอง..... | 43 |
| ตารางที่ 17 คุณสมบัติของเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชัน | 44 |
| ตารางที่ 18 รายละเอียดของอุปกรณ์จับยึดเมมเบรน (Test cell) ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech | 45 |
| ตารางที่ 19 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเดินระบบเมมเบรน | 46 |

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 20 คุณสมบัติของเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชัน | 48 |
| ตารางที่ 21 การทดลองหาเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่อัตราการนำน้ำกลับคืนต่างๆ | 51 |
| ตารางที่ 22 เงื่อนไขในการออกแบบการทดลอง | 51 |
| ตารางที่ 23 ตารางการทดลองจากการออกแบบด้วยโปรแกรม Minitab | 51 |
| ตารางที่ 24 มาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับระบบหล่อเย็นของ The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRA) และคุณภาพน้ำบาดาลจริงก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส | 53 |
| ตารางที่ 25 สารเคมี และปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำบาดาล | 55 |
| ตารางที่ 26 ความเข้มข้นของไอออนในน้ำบาดาลสังเคราะห์..... | 56 |
| ตารางที่ 27 ความดันออสโมติกที่ได้จากการคำนวณ..... | 57 |
| ตารางที่ 28 ค่าฟลักซ์ของน้ำที่ได้จากการคำนวณ..... | 59 |
| ตารางที่ 29 ค่าฟลักซ์ของน้ำที่ได้จากการทดลองด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส | 62 |
| ตารางที่ 30 เปอร์เซนต์การกำจัดที่อัตราการนำน้ำกลับคืนต่างๆของเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด | 64 |
| ตารางที่ 31 ตารางการทดลองการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน | 65 |
| ตารางที่ 32 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (1) .. | 66 |
| ตารางที่ 33 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (2) .. | 67 |
| ตารางที่ 34 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3) .. | 67 |
| ตารางที่ 35 ตารางการทดลองจากการใช้สารละลายอีดีทีเอผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน | 70 |
| ตารางที่ 36 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากการใช้สารละลายอีดีทีเอ (1)..... | 71 |
| ตารางที่ 37 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากการใช้สารละลายอีดีทีเอ (2)..... | 71 |
| ตารางที่ 38 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากการใช้สารละลายอีดีทีเอ (3)..... | 72 |
| ตารางที่ 39 องค์ประกอบธาตุของเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันที่ไม่ผ่านการใช้งานและหลังผ่านการใช้งาน..... | 76 |
| ตารางที่ 40 มาตรฐานคุณภาพน้ำทดแทนของน้ำหล่อเย็น และน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูง และคุณภาพน้ำหลังการบำบัด..... | 77 |

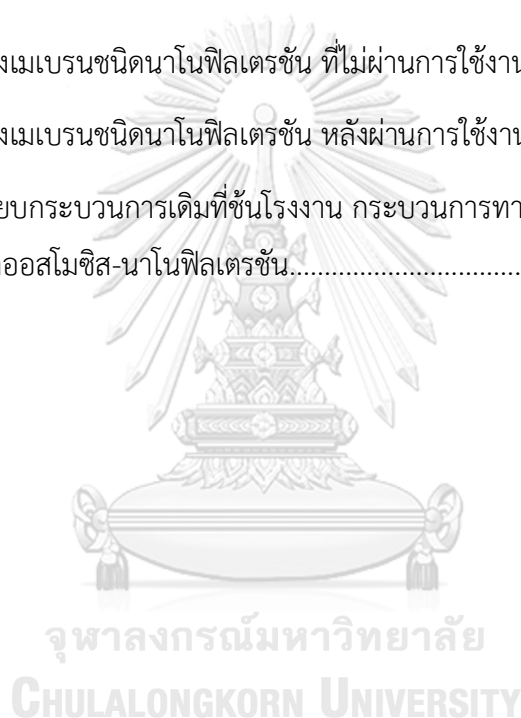
ตารางที่ 41 ตารางการเปรียบเทียบค่าพลังค์ของน้ำสะอาด..... 79



สารบัญรูปภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1 วัฏจักรการเกิดน้ำบาดาล..... | 4 |
| รูปที่ 2 หม้อไอน้ำแบบท่อไพนอน..... | 8 |
| รูปที่ 3 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟตั้ง..... | 9 |
| รูปที่ 4 หม้อไอน้ำแบบไม่มีท่อไฟเล็ก..... | 9 |
| รูปที่ 5 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ..... | 10 |
| รูปที่ 6 หอหล่อเย็น..... | 13 |
| รูปที่ 7 การเคลื่อนที่ของน้ำในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส..... | 16 |
| รูปที่ 8 การแยกขนาดของเมมเบรนชนิดต่างๆ..... | 19 |
| รูปที่ 9 โปรโตคอลในการเลือกสารตั้ง..... | 25 |
| รูปที่ 10 ค่าS ของสารตั้ง 12 ชนิด..... | 29 |
| รูปที่ 11 ฟลักซ์ของน้ำเทียบกับความเข้มข้นของสารตั้งทั้ง 7 ชนิด..... | 30 |
| รูปที่ 12 ฟลักซ์ของน้ำโดยการใช้สารตั้ง 4 ชนิดที่ความดัน 35 บรรยากาศ..... | 32 |
| รูปที่ 13 เปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับความเข้มข้นของสารตั้ง..... | 32 |
| รูปที่ 14 ผลของอุณหภูมิต่อฟลักซ์ของน้ำ..... | 33 |
| รูปที่ 15 แผนผังแสดงกระบวนการผสมผสานฟอร์เวิร์ดออสโมซิส – นาโนฟิลเตรชัน..... | 34 |
| รูปที่ 16 ฟลักซ์ของน้ำเมื่อใช้เมมเบรนต่างชนิดกัน..... | 35 |
| รูปที่ 17 กระบวนการผลิตน้ำสำหรับหอหล่อเย็น และหม้อไอน้ำของโรงงานผลิตเอทานอลแห่งหนึ่ง ใน จ.ขอนแก่น..... | 38 |
| รูปที่ 18 ชุดทดสอบกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส..... | 42 |
| รูปที่ 19 แผ่นเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน..... | 45 |
| รูปที่ 20 ลักษณะของอุปกรณ์จับยึดเมมเบรน (Test cell) ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech... | 46 |

| | | |
|-----------|--|----|
| รูปที่ 21 | แผนผังการเดินระบบเมมเบรน | 47 |
| รูปที่ 22 | ลำดับการทดลองกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-นาโนฟิลเตรชัน ทั้ง 5 ช่วง | 49 |
| รูปที่ 23 | ฟลักซ์ของน้ำเมื่อใช้สารตั้ง a) NaCl b) MgSO ₄ c) EDTA ที่แต่ละความเข้มข้น | 61 |
| รูปที่ 24 | กราฟแสดงฟลักซ์ของน้ำจากการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตผ่านกระบวนการ นาโนฟิลเตรชัน | 69 |
| รูปที่ 25 | กราฟแสดงฟลักซ์ของน้ำจากการใช้สารละลายอีดีทีเอผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน | 73 |
| รูปที่ 26 | แผนผังการเดินระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - นาโนฟิลเตรชัน | 75 |
| รูปที่ 27 | ผล SEM ของเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชัน ที่ไม่ผ่านการใช้งาน | 75 |
| รูปที่ 28 | ผล SEM ของเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชัน หลังผ่านการใช้งาน | 76 |
| รูปที่ 29 | รูปเปรียบเทียบกระบวนการเดิมที่ชั้นโรงงาน กระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-นาโนฟิลเตรชัน | 79 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

น้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำจืดที่สำคัญแหล่งหนึ่งของประเทศ นอกจากนำมาใช้ในการอุปโภคบริโภคแล้ว ในภาคอุตสาหกรรมยังได้มีการนำน้ำบาดาลมาใช้ในการกระบวนการต่างๆ เพื่อช่วยประหยัดต้นทุนในการดำเนินการอีกด้วย ทั้งนี้ปัญหาที่พบในการนำน้ำบาดาลมาใช้เป็นน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็น และหม้อไอน้ำ คือ ความกระด้างของน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดตะกรันในระบบน้ำหล่อเย็นและหม้อไอน้ำ ตะกรันที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะเกาะอยู่ตามผนังท่อซึ่งจะทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพลดลงและต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการเดินระบบ ดังนั้นในการนำไปใช้จึงต้องมีการกำจัดความกระด้างออกก่อน

กระบวนการที่นิยมใช้กำจัดความกระด้างในปัจจุบันคือกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งกระบวนการนี้จะสามารถกำจัดความกระด้างได้โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของตัวกลางกับประจุที่อยู่ในน้ำ ในที่นี้คือความกระด้าง ซึ่งอยู่ในรูปแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออน แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ เกิดของเสียที่มีปริมาณและความเข้มข้นมาก ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ ทั้งในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) การล้างย้อน (Backwash) และการชะล้างสารเคมี (Rinse)

อีกกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้คือ รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis; RO) โดยการใช้แรงดันผลักดันให้โมเลกุลของน้ำซึมผ่านเยื่อเมมเบรนที่มีความสามารถในการกรองไอออนและโมเลกุลของสารละลายที่อยู่ในน้ำได้ กระบวนการจะได้น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่มีข้อเสียคือ เกิดการอุดตันของเมมเบรนบ่อยครั้ง มีอัตราการนำกับคืนต่ำ สิ้นเปลืองพลังงานเพราะต้องใช้แรงดันที่สูงในการเดินระบบ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบมีราคาสูง

จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส เพื่อให้ได้น้ำสะอาดที่จะนำไปใช้เป็นน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็น ซึ่งกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเป็นกระบวนการเมมเบรนที่ไม่จำเป็นต้องใช้แรงดันจากภายนอกในการเดินระบบ เนื่องจากแรงขับเคลื่อนในกระบวนการนี้คือ ความแตกต่างของความดันออสโมติกระหว่างสาร 2 ชนิด (สารขาเข้าและสารดึง) หากสารดึงมีความดันออสโมติกมีค่ามากกว่าความดันออสโมติกของสารขาเข้า โมเลกุลของน้ำจากสารขาเข้าจะไหลซึมผ่านเมมเบรนมายังฝั่งสารดึง แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตน้ำสะอาดจากกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสจำเป็นต้องมีกระบวนการฟื้นฟูสารดึงควบคู่กันไปด้วย เพื่อแยกน้ำสะอาดออกจากสารดึง และได้สารดึงที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถนำกลับไปใช้ได้อีกครั้ง ทางผู้วิจัยจะใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน/นาโนฟิลเตรชันในการฟื้นฟูสารดึง เนื่องจากเมมเบรนทั้ง 2 ชนิดนี้ใช้

ความดันในการเดินระบบที่ต่ำกว่ารีเวอร์สออสโมซิสมาก (ความดันในการเดินระบบของอัลตราฟิลเตรชัน นาโนฟิลเตรชันและรีเวอร์สออสโมซิสเท่ากับ 5 – 10 บาร์ 5 – 20 บาร์ และ 50 – 100 บาร์ ตามลำดับ) ซึ่งหากคุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการมีคุณภาพเพียงพอสำหรับใช้เป็นน้ำทดแทน จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำส่วนนี้ลดลงจากการผลิตด้วยกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนากระบวนการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาลด้วยกระบวนการผสมผสาน (ฟอร์เวิร์ดออสโมซิส – เมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชัน/อัลตราฟิลเตรชัน) สำหรับใช้เป็นกระบวนการผลิตน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็น
- 2) เพื่อศึกษาชนิดของสารตั้ง สำหรับใช้ในกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยฟอร์เวิร์ดออสโมซิส
- 3) เพื่อศึกษากระบวนการฟื้นฟูสภาพของสารตั้งด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน/นาโนฟิลเตรชัน
- 4) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-อัลตราฟิลเตรชัน/นาโนฟิลเตรชัน

1.3 ขอบเขตงาน

- 1) งานวิจัยนี้ทำการทดลองกับน้ำบาดาลสังเคราะห์จากลักษณะของน้ำบาดาลจริงที่ใช้ในการผลิตน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำของโรงงานผลิตเอทานอลแห่งหนึ่งใน จ.ขอนแก่น พารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ ความกระด้างทั้งหมด ปริมาณแคลเซียม ปริมาณแมกนีเซียม ปริมาณซิลิกา และค่าพีเอชของน้ำ
- 2) งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการบำบัดความกระด้างของน้ำบาดาล โดยใช้กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-อัลตราฟิลเตรชัน/นาโนฟิลเตรชัน
- 3) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการแบบทีละเท (Batch Lab-Scale) ที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการ ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 4) เมมเบรนที่ใช้ในการทดลองกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส มีลักษณะเป็นแผ่น (Flat-sheet) ชนิด CTA โดยมี Test cell เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับยึดแผ่นเมมเบรน
- 5) พารามิเตอร์ที่สนใจในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส คือ ฟลักซ์ของสารตั้งหลังผ่านกระบวนการแล้ว

- 6) เมมเบรนที่ใช้ในการทดลองกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารตั้ง (อัลตราฟิลเตรชัน/นาโนฟิลเตรชัน) มีลักษณะเป็นแผ่น (Flat-sheet) โดยมี Test cell เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับยึดแผ่นเมมเบรน
- 7) ความดันที่ใช้ในการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชัน/นาโนฟิลเตรชัน จะทำการศึกษาที่ช่วง 4 – 10 บาร์

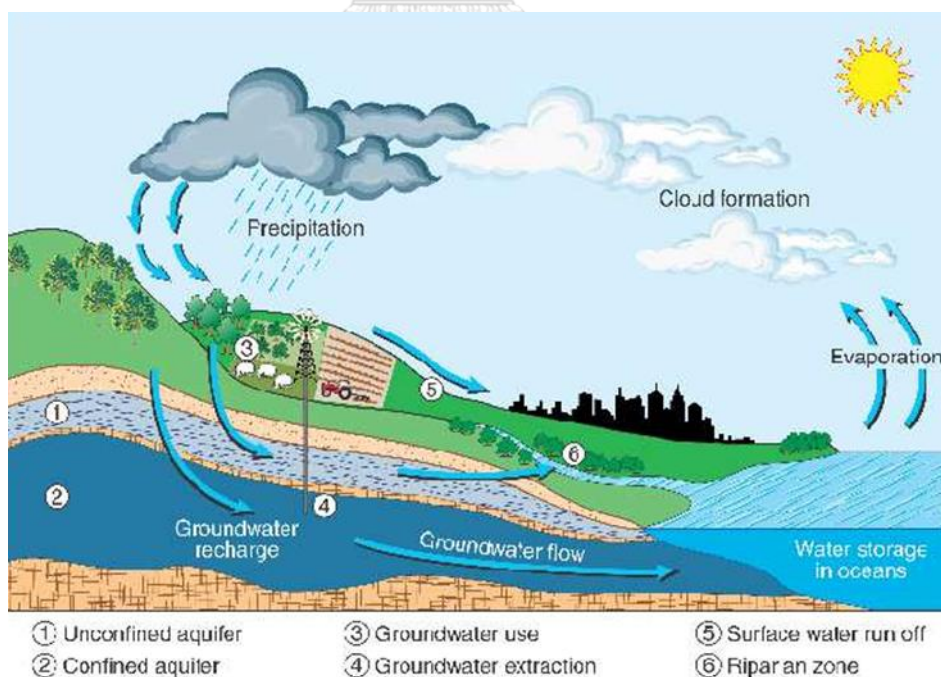


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำบาดาล (Groundwater)

น้ำบาดาล คือ น้ำที่อยู่ระหว่างรูพรุนของดินและหิน ซึ่งเกิดจากน้ำในชั้นบรรยากาศและน้ำผิวดิน โดยทั่วไปคุณภาพน้ำบาดาลจะมีคุณภาพดีกว่าน้ำผิวดินเนื่องจากการกรองจากชั้นดินและหินแล้ว แต่ยังมีแร่ธาตุและสารเคมีมากกว่าน้ำผิวดิน นอกจากนี้น้ำฝนยังเป็นอีกแหล่งหนึ่งที่ทำให้เกิดน้ำบาดาล โดยน้ำฝนจะไหลซึมลงไปชั้นดินและเกิดการสะสมตัว น้ำบาดาลสามารถปนเปื้อนได้จากมลภาวะต่างๆ เช่น น้ำชะมูลฝอยจากการฝังกลบที่ไม่มีการป้องกันการรั่วซึม การกำจัดขยะที่ไม่ถูกต้อง ขยะอุตสาหกรรมหรือการใช้สารเคมีในภาคอุตสาหกรรม แหล่งน้ำบาดาลบางที่มีการปนเปื้อนจากโลหะหนักซึ่งเป็นอันตรายกับสุขภาพ ยกตัวอย่างเช่นน้ำบาดาลทางภาคเหนือของไทยมีปริมาณคลอไรด์ที่สูง ทำให้เกิดปัญหาด้านทันตกรรมกับคนก็นำน้ำบาดาลไปบริโภค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีอนุมูลของคลอไรด์ในน้ำทำให้น้ำกร่อยและมีรสเค็ม และน้ำบาดาลในกรุงเทพฯมีเหล็กและสังกะสีทำให้มีกลิ่นและก่อให้เกิดสนิม ดังนั้นในการนำน้ำบาดาลมาใช้จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อน



รูปที่ 1 วัฏจักรการเกิดน้ำบาดาล

2.2 ความกระด้างของน้ำ

ความกระด้างของน้ำหมายถึง ปริมาณไอออนบวกหลายประจุที่มีประจุมากกว่า 1 มักจะพบในรูปของไอออน $2+$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ระดับความกระด้างของน้ำใต้ดินจะสูงกว่าน้ำผิวดินเนื่องจากน้ำฝนมีคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่และก่อตัวเป็นกรดคาร์บอนิก เมื่อน้ำฝนซึมผ่านระดับพื้นดินที่มีสารละลายได้ทำให้ความเป็นกรดเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นความกระด้างจะเพิ่มขึ้นเมื่อมันไหลผ่านชั้นหินปูนซึ่งมี CaCO_3 และ MgCO_3 ที่ละลายอยู่และทำให้เกิด Ca^{2+} และ Mg^{2+} ความกระด้างของน้ำเป็นปัญหาสำคัญสำหรับการใช้น้ำบาดาลในกระบวนการอุตสาหกรรมเนื่องจาก Ca^{2+} และ Mg^{2+} ละลายในน้ำจะทำให้เกิดตะกอนในระบบท่อและอุปกรณ์อื่น ๆ โดยเฉพาะในหม้อไอน้ำ

2.2.1 ประเภทของความกระด้าง

ความกระด้างของน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท (มันซิน ตัณฑุลเวศม์, 2547) คือ

1) ความกระด้างชั่วคราวหรือความกระด้างคาร์บอเนต (Carbonate hardness) คือ ความกระด้างเนื่องจากไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ของแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งความกระด้างชนิดนี้สามารถกำจัดได้โดยการให้ความร้อน ปฏิกิริยาการตกตะกอนมีดังนี้:



โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำทำให้ความสามารถในการละลายของเพิ่มขึ้น ยกเว้น CaCO_3 , CaSO_4 , MgCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ซึ่งทั้งหมดนี้ละลายได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2) ความกระด้างถาวรหรือความกระด้างไม่ใช่คาร์บอเนต (Non-Carbonate hardness) คือ ความกระด้างเนื่องจากมีคลอไรด์ ไนเตรตและซัลเฟตของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งไม่สามารถตกตะกอนได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ

ตารางที่ 1 เกณฑ์ความกระด้างของน้ำ

| ปริมาณความกระด้างของน้ำ (mg/l as CaCO ₃) | เกณฑ์ความกระด้างของน้ำ |
|--|------------------------|
| 0-75 | น้ำอ่อน |
| 75-150 | น้ำค่อนข้างกระด้าง |
| 150-300 | น้ำกระด้าง |
| มากกว่า 300 | น้ำกระด้างมาก |

2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างและสภาพด่าง (Alkalinity)

ในน้ำธรรมชาติทั่วไปซึ่งมีค่า pH ระหว่าง 6.5 – 8.5 ค่า Alkalinity ก็คือค่า Carbonate hardness (HCO³⁻, CO₃²⁻) สามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

1) เมื่อ Total Alkalinity < Total Hardness

Carbonate hardness (mg/l) = Total Alkalinity (mg/l)

Non-Carbonate hardness (mg/l) = Total Hardness (mg/l) – Carbonate hardness (mg/l)

2) เมื่อ Total Alkalinity ≥ Total Hardness

Carbonate hardness (mg/l) = Total Hardness (mg/l)

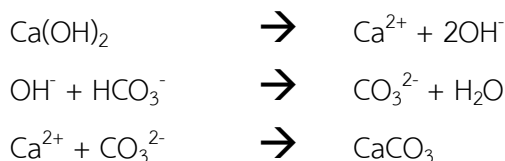
Non-Carbonate hardness (mg/l) = 0

2.2.3 การกำจัดความกระด้าง

การกำจัดความกระด้างสามารถทำได้หลายวิธี (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2547) ได้แก่

1) การกำจัดความกระด้างด้วยวิธีปูน-โซดา (Lime-Soda)

การกำจัดความกระด้างด้วยวิธีปูน-โซดาเป็นวิธีที่ใช้ปฏิกิริยาตกผลึกทางเคมี (Precipitation) แคลเซียมและแมกนีเซียม โดยการเกิดปฏิกิริยาตกผลึกกับ CO₃²⁻ และ OH⁻ ได้ตะกอนของแข็งเป็น CaCO₃ และ Mg(OH)₂ ตามลำดับ สารเคมีที่นิยมใช้ คือ ปูนขาว (Ca(OH)₂) และโซดาแอช (Na₂CO₃) การเติมปูนขาวลงในน้ำปูนขาวจะแตกตัวให้ OH⁻ และทำปฏิกิริยากับ HCO₃⁻ ในน้ำ ทำให้เกิด CO₃²⁻ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับความกระด้างในน้ำ (Ca²⁺) จนเกิดเป็นผลึก CaCO₃ ได้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้



จากปฏิกิริยาดังกล่าว จะเห็นได้ว่าการกำจัด Ca^{2+} ด้วยกระบวนการตกผลึกของ CaCO_3 ในน้ำจะต้องมีปริมาณ HCO_3^- มากเพียงพอ ในส่วนของการกำจัด Mg^{2+} นั้น MgCO_3 ละลายน้ำได้มากกว่า Mg(OH)_2 ทำให้ Mg^{2+} เลือกทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นผลึก Mg(OH)_2 มากกว่า ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำสามารถพิจารณาได้จากค่า K_{sp} โดยค่า K_{sp} ของ MgCO_3 มีค่าเท่ากับ 4×10^{-5} และ K_{sp} ของ Mg(OH)_2 มีค่าเท่ากับ 9×10^{-12}

อย่างไรก็ตามน้ำที่ผ่านกระบวนการนี้เป็นน้ำที่ไม่เสถียร ยังไม่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ เนื่องจากยังมีค่า pH สูงมาก และมีแนวโน้มในการตกผลึกได้อีก ดังนั้นจำเป็นต้องมีการปรุงแต่งน้ำอีกครั้ง เพื่อลดค่า pH และการทำให้น้ำมีความเสถียรสำหรับการนำไปใช้งาน ซึ่งการทำให้น้ำมีความเสถียรที่ pH สูง มักทำโดยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Recarbonation) หรือเติมกรดแก่เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

2) การกำจัดความกระด้างด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

การกำจัดความกระด้างออกจากน้ำด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนจะใช้เรซินแบบกรดคือ ไอออนบวกที่ติดอยู่กับเรซินโดยส่วนมากจะเป็น H^+ หรือ Na^+ แลกเปลี่ยนกับ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ที่ต้องการกำจัดออก ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดแก่ที่มี Na^+ เป็นไอออนบวกที่เกาะอยู่กับเรซิน



การกำจัดความกระด้างด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นจนกระทั่งเรซินอิ่มตัวไปด้วย Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในการนำกลับมาใช้ใหม่จำเป็นต้องทำให้เรซินมีความสามารถกลับมาแลกเปลี่ยนไอออนได้อีกครั้ง โดยการรีเจนเนอเรชัน (Regeneration)

3) การกำจัดความกระด้างด้วยกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis; RO)

การกำจัดความกระด้างด้วยกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส เป็นกระบวนการที่ใช้ความดันในการผลักโมเลกุลของน้ำซึมผ่านเมมเบรน โดยใช้ความดันอยู่ในช่วง 50-100 บาร์ ซึ่งเป็นระดับที่สูงมาก

เมื่อเทียบกับกระบวนการเมมเบรนชนิดอื่นๆ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่สวนทางกับกระบวนการออสโมซิส อีออนและสารปนเปื้อนต่างๆจะสามารถถูกเก็บไว้โดยเมมเบรน ทำให้ได้ส่วน Permeate เป็นน้ำที่บริสุทธิ์ และส่วนที่เป็น Retentate ที่มีความเข้มข้นสูง

2.3 หม้อไอน้ำ (Steam Boiler)

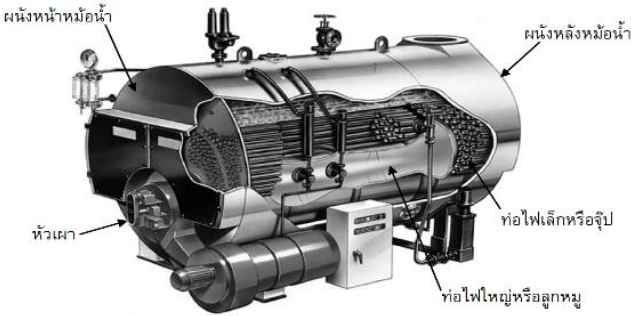
หม้อไอน้ำเป็นเครื่องกำเนิดไอน้ำประเภทหนึ่งที่ทำจากเหล็กหรือวัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติคล้ายกัน โดยการให้ความร้อนแก่น้ำจนทำให้กลายเป็นไอน้ำ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรมด้านต่างๆ

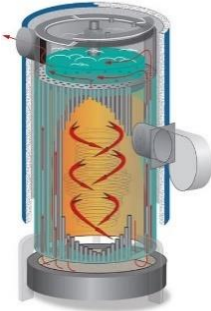
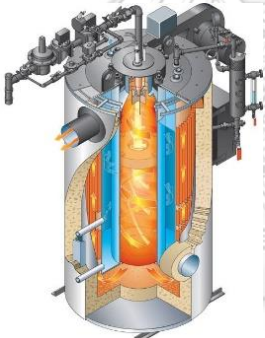
2.3.1 ประเภทของหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะโครงสร้างคือ

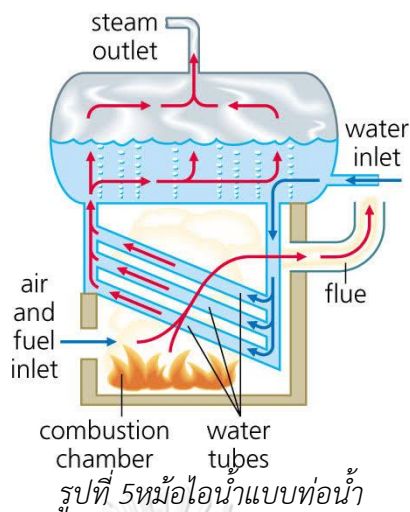
1) หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire tube boiler) คือหม้อไอน้ำที่มีท่อไฟที่ก๊าซร้อนไหลผ่านอยู่ในท่อ และมีน้ำที่รับความร้อนเพื่อกลายเป็นไอน้ำอยู่ด้านนอกท่อ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทย่อยได้อีก 3 ประเภทตามลักษณะการจัดวางท่อไฟ ดังนี้

ตารางที่ 2 ประเภทของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

| ประเภท | ความดัน อนุญาตใช้งาน สูงสุด (MAWP) | ประสิทธิภาพ |
|---|---|-------------|
| <p>1.แบบท่อไฟนอน (Horizontal fire tube boiler)</p>  <p>รูปที่ 2 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟนอน</p> | 1-2 MPa | 80-93% |

| ประเภท | ความดัน อนุญาตใช้งาน สูงสุด (MAWP) | ประสิทธิภาพ |
|---|---|-------------|
| 2.แบบท่อไฟตั้ง (Vertical fire tube boiler)  รูปที่ 3 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟตั้ง | < 1 MPa | 75-85% |
| 3.แบบไม่มีท่อไฟเล็ก (Tubeless boiler)  รูปที่ 4 หม้อไอน้ำแบบไม่มีท่อไฟเล็ก | < 1MPa | 75-80% |

2) หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water tube boiler) คือหม้อไอน้ำที่มีน้ำอยู่ภายในท่อ รับความร้อนจากก๊าซร้อนที่ไหลผ่านอยู่ภายนอกท่อ เพื่อระเหยกลายเป็นไอน้ำ ความดันอนุญาตใช้งานสูงสุด (MAWP) อยู่ระหว่าง 1-31 MPa



รูปที่ 5 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ

2.3.2 น้ำสำหรับหม้อไอน้ำ

น้ำสำหรับหม้อไอน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของหม้อไอน้ำ หากน้ำป้อนไม่เข้าเกณฑ์ที่เหมาะสม จะทำให้เกิดตะกรันหรือการกัดกร่อนบนพื้นผิว ตะกรันที่เกิดขึ้นเกิดจากสารประกอบคาร์บอเนตของซิลิกา แคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำที่อุณหภูมิสูง เมื่อเกิดตะกรันบนพื้นผิวของท่อจะทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลดลง และอาจเป็นสาเหตุให้หม้อไอน้ำระเบิดได้ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมคุณภาพน้ำในหม้อให้มีความเหมาะสมอยู่ตลอดเวลา น้ำในระบบหม้อไอน้ำมี 6 ประเภท ได้แก่

ตารางที่ 3 น้ำในระบบหม้อไอน้ำ

| น้ำในระบบหม้อไอน้ำ | รายละเอียด |
|------------------------------------|---|
| น้ำทดแทน (Makeup Water) | น้ำที่ใช้ส่งเข้าระบบหม้อไอน้ำเพื่อทดแทนน้ำที่กลายเป็นไอและน้ำโบลวดาวน์ ซึ่งน้ำผิวดินหรือน้ำบาดาลหรือน้ำประปาอาจนำมาใช้เป็นน้ำทดแทนได้ หากมีคุณภาพไม่เหมาะสมที่จะส่งเข้าหม้อไอน้ำจะต้องมีการบำบัดน้ำก่อน |
| น้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ (Feed Water) | น้ำทดแทนที่บำบัดแล้วและพร้อมที่จะส่งเข้าหม้อไอน้ำ น้ำคอนเดนเสทอาจถูกนำมาผสมกับน้ำทดแทนและใช้เป็นน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ |
| น้ำหม้อไอน้ำ (Boiler Water) | น้ำร้อนที่อยู่ในหม้อไอน้ำ เกิดขึ้นจากการต้มน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำให้ร้อนจนกลายเป็นไอ น้ำหม้อไอน้ำจะมีคุณภาพต่ำเนื่องจากน้ำบางส่วนระเหยกลายเป็นไอ ทำให้มีการสะสมของแข็งละลาย |

| น้ำในระบบหม้อไอน้ำ | รายละเอียด |
|----------------------------|---|
| น้ำโบลดาวน์ (Blowdown) | น้ำหม้อน้ำที่ถูกระบายทิ้งเพื่อควบคุมความเข้มข้นของน้ำหม้อน้ำให้อยู่ในระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ |
| ไอน้ำ (Steam) | ไอน้ำเกิดจากการต้มน้ำเลี้ยงให้กลายเป็นไอน้ำภายใต้แรงดันที่สูงกว่าแรงดันบรรยากาศ ไอน้ำถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ เช่น ให้ความร้อน หรือใช้เป็นพลังงาน |
| น้ำควบแน่น (Condensate) | ไอน้ำที่ถูกใช้ประโยชน์แล้วทำให้เย็นเพื่อให้ควบแน่นเป็นน้ำร้อนซึ่งอาจถูกระบายทิ้งเป็นน้ำเสียหรือถูกนำมาใช้ใหม่เป็นน้ำเลี้ยงหม้อน้ำ |

ที่มา: (มันสิน ตันตุลเวศม์ และคณะ, 2554)

ตารางที่ 4 มาตรฐานน้ำสำหรับหม้อไอน้ำ (ความดันต่ำ - ปานกลาง)

| พารามิเตอร์ | หน่วย | ค่าเกณฑ์ควบคุมตามความดันที่ใช้ในการดำเนินการ (บาร์) | | |
|---|------------------------|---|---------------|---------------|
| | | ความดันน้อยกว่า 20 | ความดัน 21-39 | ความดัน 40-59 |
| ค่าพีเอช (pH) | - | 8.5-9.5 | 8.5-9.5 | 8.5-9.5 |
| ค่าความกระด้าง | มก./ล. ในเทอมของหินปูน | 10 | 1.0 | 0.5 |
| ซิลิกา (Silica) | มก./ล. | - | 5 | 0.5 |
| ออกซิเจน (Oxygen) | มก./ล. | 0.1 | 0.02 | 0.01 |
| ไฮดราซีนที่หลงเหลือ (Residual hydrazine) | มก./ล. | 0.1-1 | 0.1-0.5 | 0.05-0.3 |

ที่มา: Indian Standard Specification for Feed Water and Boiler Water for Low and Medium Pressure Land Boilers (IS : 10392 – 1982)

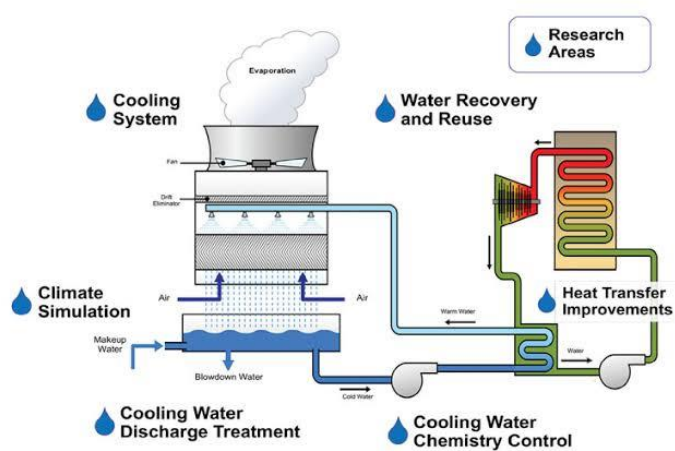
ตารางที่ 5 มาตรฐานน้ำสำหรับหม้อไอน้ำ (ความดันสูง)

| พารามิเตอร์ | หน่วย | ค่าเกณฑ์ควบคุมตามความดัน ที่ใช้ในการดำเนินการ (บาร์) | | | |
|--|----------------------------|---|------------------|-------------------|------------------|
| | | ความดัน 60-78 | ความดัน 79-98 | ความดัน 99-118 | ความดัน > 118 |
| ค่าพีเอช (pH) | - | 8.5-9.5 | 8.5-9.5 | 8.5-9.5 | 8.5-9.5 |
| ค่าความกระด้าง | มก./ล. ในเทอม ของหินปูน | Nil | Nil | Nil | Nil |
| ซิลิกา (Silica) | มก./ล. | 0.05 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่ 25 °C | ไมโครซีเมนต์/ ชม. | 0.5 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| เหล็กและทองแดง (Iron and Copper) | มก./ล. | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| น้ำมัน (Oil) | มก./ล. | Nil | Nil | Nil | Nil |
| ออกซิเจน (Oxygen) | มก./ล. | 0.01 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| ไฮดราซีนที่หลงเหลือ (Residual hydrazine) | มก./ล. | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |

ที่มา: Indian Standard Specification for Feed Water, Boiler Water and Condensate for High Pressure Boilers (IS : 10496 - 1983)

2.4 หอหล่อเย็น (Cooling tower)

หอหล่อเย็น เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ชนิดหนึ่ง โดยใช้กระแสน้ำในการไหลผ่านเพื่อลดรักษาระดับอุณหภูมิของอุปกรณ์อื่นๆ ไม่ให้สูงไปและสามารถทำงานได้เป็นปกติ ความร้อนจากกระแสน้ำที่ถูกถ่ายโอนไปยังชั้นบรรยากาศ น้ำบางส่วนจะระเหยออกไปจากระบบ แต่น้ำส่วนใหญ่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ปัญหาทั่วไปที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นที่เกิดจากการเกิดตะกอนของแคลเซียมและแมกนีเซียม การเกิดสนิม หรือการเจริญเติบโตของสาหร่ายและแบคทีเรีย



รูปที่ 6 หอหล่อเย็น

2.4.1 ประเภทของน้ำในระบบ

น้ำในระบบหอหล่อเย็นมี 5 ประเภท ได้แก่

ตารางที่ 6 น้ำในระบบหอหล่อเย็น

| น้ำในระบบหม้อไอน้ำ | รายละเอียด |
|--------------------------------|--|
| น้ำทดแทน (Makeup Water) | น้ำที่เติมให้กับหอหล่อเย็นเพื่อทดแทนให้กับปริมาณน้ำที่สูญเสีย อัตราการเติมน้ำทดแทนประมาณ 6 - 10% ของอัตราหมุนเวียนของน้ำหล่อเย็น |
| น้ำหล่อเย็น (Cooling Water) | น้ำที่หมุนเวียนอยู่ในระบบที่ใช้ในการระบายความร้อน |
| น้ำโบลวดาวน์ (Blowdown) | น้ำหล่อเย็นที่ถูกระบายทิ้งเพื่อควบคุมความเข้มข้นของน้ำหล่อเย็นไม่ให้มีค่าสูงเกินไป |

| น้ำในระบบหม้อไอน้ำ | รายละเอียด |
|-----------------------------------|---|
| น้ำระเหย (Evaporation) | น้ำหล่อเย็นที่ระเหยกลายเป็นไอออกจากหอหล่อเย็น ปริมาณน้ำระเหยมีค่าประมาณ 0.85 - 1% ของอัตราน้ำหล่อเย็นต่อทุก ๆ 10 องศาเซลเซียสของอุณหภูมิที่เย็นลง |
| ละอองน้ำ (Windage หรือ Drift Off) | น้ำหล่อเย็นที่ถูกกระแสนลมพัดออกจากหอหล่อเย็นกลายเป็นละอองน้ำ |

ในปัจจุบันไม่มีมาตรฐานสากลสำหรับคุณภาพน้ำทดแทนและน้ำหล่อเย็นที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป อย่างไรก็ตามมาตรฐานกำหนดค่าน้ำทดแทนและน้ำหล่อเย็นของระบบหล่อเย็นที่มียังมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละมาตรฐาน ตัวอย่างของมาตรฐานที่มี เช่น มาตรฐานน้ำทดแทนและน้ำหล่อเย็นในกระบวนการหล่อเย็นแบบระบบเปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับที่กำหนดขึ้นโดย The Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association Microbial (JRA) ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 มาตรฐานน้ำทดแทนและน้ำหล่อเย็นในกระบวนการหล่อเย็นแบบระบบเปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับที่กำหนดขึ้นโดย The Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association Microbial (JRA)

| พารามิเตอร์ | หน่วย | น้ำทดแทน (Makeup Water) | น้ำที่ผ่านการใช้หล่อเย็น (Cooling Water) |
|--------------------------|------------------------|-------------------------|--|
| Basic Items | | | |
| ค่าพีเอช (ที่ 25°C) | | 6.0 - 8.0 | 6.5 - 8.0 |
| ค่าการนำไฟฟ้า (ที่ 25°C) | ไมโครซีเมนต์/ซม. | น้อยกว่า 200 | น้อยกว่า 800 |
| คลอไรด์ | มก./ล. | น้อยกว่า 50 | น้อยกว่า 200 |
| ซัลเฟต | มก./ล. | น้อยกว่า 50 | น้อยกว่า 200 |
| ปริมาณกรด | มก./ล. ในเทอมของหินปูน | น้อยกว่า 50 | น้อยกว่า 100 |
| ความกระด้างทั้งหมด | มก./ล. ในเทอมของหินปูน | น้อยกว่า 50 | น้อยกว่า 200 |
| Reference Items | | | |
| เหล็ก | มก./ล. | น้อยกว่า 0.3 | น้อยกว่า 1.0 |
| ซิลิไซด์ | มก./ล. | วัดไม่พบ | วัดไม่พบ |

| พารามิเตอร์ | หน่วย | น้ำทดแทน (Makeup Water) | น้ำที่ผ่านการใช้ หล่อเย็น (Cooling Water) |
|-------------|--------|-------------------------------|---|
| แอมโมเนียม | มก./ล. | น้อยกว่า 0.2 | น้อยกว่า 1.0 |
| ซิลิกา | มก./ล. | น้อยกว่า 30 | น้อยกว่า 50 |

2.5 กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส (Forward osmosis; FO)

ฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเป็นกระบวนการแพร่ของน้ำที่เกิดขึ้นเอง โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลาย (ความดันออสโมติก) เป็นแรงผลักดัน ลักษณะการแพร่ของน้ำสามารถอธิบายได้โดยกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์

2.5.1 หลักการทำงาน

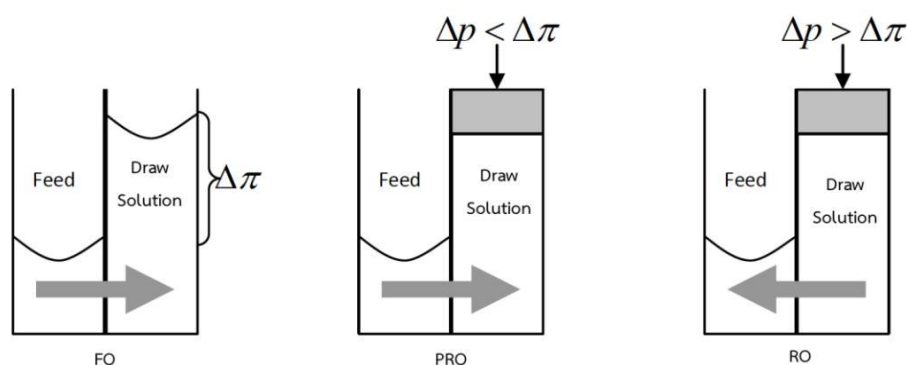
การแพร่ของน้ำผ่านแผ่นเมมเบรนที่ซึมผ่านได้จากสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำ (ความเข้มข้นของน้ำสูง) ไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูง พลังงานธรรมชาติของกระบวนการทางธรรมชาตินี้เรียกว่าศักย์ทางเคมีหรือโดยเฉพาะอย่างยิ่งศักย์ของน้ำ เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายทั้งสอง (Tan, 2011)

เพื่อต่อต้านการเคลื่อนที่ของน้ำออสโมซิสอาจถูกต่อต้านโดยการเพิ่มความดัน ในบริเวณที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูงเมื่อเทียบกับบริเวณที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำ นี้เท่ากับแรงดันออสโมติกของสารละลาย ความแตกต่างของแรงดันออสโมติก เป็นการวัดแรงผลักดันของน้ำที่เคลื่อนย้ายจากสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำข้ามเมมเบรนลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูง ดังนั้นโดยการคำนวณ จึงเป็นไปได้ที่จะกำหนดแรงผลักดันของกระบวนการออสโมซิส โดยใช้สมการซึ่งอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำดังนี้

$$J_w = A (\Delta\pi - \Delta P)$$

| | | | |
|-------|-------------|-----|--|
| เมื่อ | J_w | คือ | ฟลักซ์ของน้ำ หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร วินาที |
| | A | คือ | สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ หน่วย เมตรต่อวินาที บรรยากาศ |
| | $\Delta\pi$ | คือ | ความแตกต่างของความดันออสโมติก หน่วย บรรยากาศ |
| | ΔP | คือ | ความแตกต่างของความดันไฮดรอลิก หน่วย บรรยากาศ |

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำขึ้นอยู่กับ ($\Delta\pi - \Delta P$) ถ้า $\Delta\pi > \Delta P$ (หรือ $\Delta P = 0$) น้ำจะเคลื่อนที่จากฝั่งสารขาเข้ามายังสารดึง ในขณะที่เดียวกันน้ำจะเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้าม (reverse osmosis) เมื่อ $\Delta P > \Delta\pi$



รูปที่ 7 การเคลื่อนที่ของน้ำในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

2.5.2 สารดึง (Draw Solution; DS)

สารดึง หมายถึง สารละลายเข้มข้นที่ใช้เป็นแรงผลักดันในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส หลักเกณฑ์ในการเลือกใช้สารดึงคือมีแรงดันออสโมติกสูงกว่าสารละลายขาเข้า เกณฑ์ที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือการเลือกกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการนำสารดึงกลับมาใช้ใหม่ (Cath, Childress, & Elimelech, 2006) การพัฒนาและศึกษาสารดึงชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การพัฒนาและศึกษาสารดึงชนิดต่างๆ

| ปี | ผู้วิจัย | สารดึง | กระบวนการนำสารดึงกลับมาใช้ใหม่ |
|------|------------|---|--------------------------------|
| 1964 | Neff | Ammonia and carbon dioxide | Heating |
| 1965 | Batchelder | Volatile solutes (e.g. SO ₂) | Heating or air stripping |
| 1965 | Glew | Mixture of H ₂ O and another gas (SO ₂) or liquid (aliphatic alcohols) | Distillation |

| ปี | ผู้วิจัย | สารตั้ง | กระบวนการนำสาร ตั้งกลับมาใช้ใหม่ |
|-----------|-------------------|---|--|
| 1970 | Hough | Organic acid and inorganic salt | Temperature variation or chemical reaction |
| 1972 | Frank | Al_2SO_4 | Precipitation by doping $Ca(OH)_2$ |
| 1975 | Kravath and Davis | Glucose | None |
| 1976 | Kessler and Moody | Glucose-Fructose | None |
| 1989 | Stache | Fructose | None |
| 1992 | Yaeli | Glucose | Low pressure RO |
| 1997 | Loeb et al. | $MgCl_2$ | None |
| 2002 | McGinnis | KNO_3 & SO_2 | SO_2 was recycled through standard |
| 2005-2007 | McCutcheon et al. | NH_3 & CO_2 (NH_4HCO_3) or $NH_4OH-NH_4HCO_3$ | Moderate heating (~ 60 °C) |
| 2007 | Adham et al. | Magnetic nanoparticles | Captured by a canister separator |
| 2007 | Adham et al. | Dendrimers | Adjusting pH or UF |
| 2007 | Adham et al. | Albumin | Denatured and solidified by heating |
| 2008 | McCormick et al. | Salt, ethanol | Pervaporation- based separations |
| 2010 | Yen et al. | 2-Methylimidazole based solutes | Membrane Distillation (MD) |
| 2010-2011 | Ling et al. | Magnetic nanoparticles | Recycled by external magnetic field |
| | Ge et al. | | |

| ปี | ผู้วิจัย | สารตั้ง | กระบวนการนำสาร ดึงกลับมาใช้ใหม่ |
|------|------------------|---|--|
| 2011 | Li et al | Stimuli-responsive polymer hydrogels | Deswelling of the polymer hydrogels |
| 2011 | Ling & Chung | Hydrophilic nanoparticles | UF |
| 2011 | Phuntsho et al. | Fertilizers | None |
| 2011 | Iyer and Linda | Fatty acid- polyethylene glycol | Thermal method |
| 2012 | Su et al. | Sucrose | NF |
| 2012 | Ge et al. | Polyelectrolytes | UF |
| 2012 | Noh et al. | Thermo-sensitive solute (Derivatives of AcylTAEA) | Not studied |
| 2012 | Yong et al. | Urea, ethylene glycol, and glucose | Not studied |
| 2012 | Bowden et al. | Organic salts | RO |
| 2012 | Carmignani et al | polyglycol copolymers | NF |
| 2012 | Stone et al. | hexavalent phosphazene salts | Not studied |

ที่มา: (Ge, Ling, & Chung, 2013)

2.5.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

1) การบำบัดน้ำเสีย

Holloway, Childress, Dennett, and Cath (2007) ศึกษาการใช้ฟอร์เวิร์ดออสโมซิส – รีเวอร์สออสโมซิสสำหรับการบำบัดบ่อหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ฟอร์เวิร์ดออสโมซิสถูกนำมาใช้การ

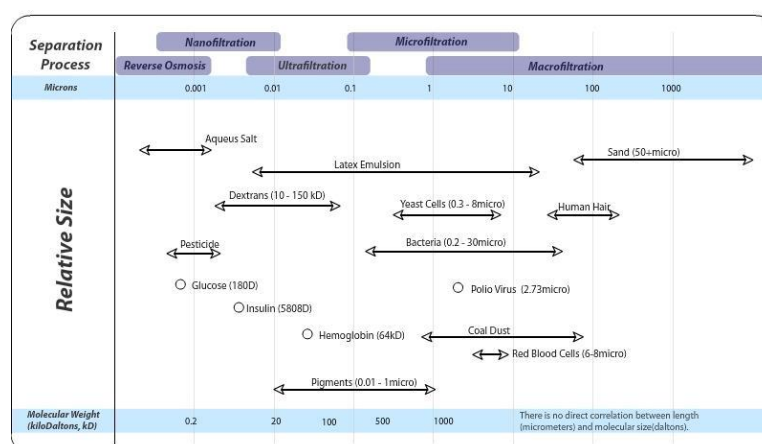
บำบัดขั้นต้นสำหรับกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ผลจากกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสแสดงให้เห็นว่า พลังค์ของน้ำในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - รีเวอร์สออสโมซิสได้รับอิทธิพลจากความเข้มข้นของสารละลายในระบบ

2) การทำน้ำจืดจากน้ำทะเล

Altaee, Mabrouk, and Bourouni (2013) แนะนำการออกแบบแนวความคิดใหม่ของการผสมผสานเมมเบรนฟอร์เวิร์ดออสโมซิสด้วย Multi Stage Flashing (MSF) หรือ Multi Effect Distillation (MED) กระบวนการแยกเกลือด้วยความร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการพัฒนาเพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการเมมเบรนฟอร์เวิร์ดออสโมซิส อัตราการนำน้ำกลับของระบบไฮบริดถูกนำไปใช้กับโปรแกรม การแยกเกลือด้วยความร้อนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่และใช้เป็นสารตั้งได้ ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสสามารถนำมาใช้เป็นการบำบัดขั้นต้น เพื่อลดความเข้มข้นของไอออน ซึ่งความเข้มข้นของ Ca^{2+} , Mg^{2+} และ SO_4^{2-} ลดลงตามการเพิ่มของอัตราการนำน้ำกลับคืน

2.6 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration; UF)

อัลตราฟิลเตรชัน เป็นชนิดของการกรองเมมเบรนที่ใช้ความดันไฮโดรสแตติกบังคับให้โมเลกุลของน้ำผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันสามารถใช้สำหรับการกำจัดอนุภาคและแมโครโมเลกุลจากน้ำดิบเพื่อผลิตน้ำสะอาด ซึ่งถูกใช้เพื่อแทนที่การแข็งตัวการตกตะกอน การตกตะกอนหรือระบบการกรองทรายที่ใช้ในโรงงานบำบัดน้ำ กลไกการแยกหลักของการกรองโดยอัลตราฟิลเตรชันคือการแยกขนาด(Sieving) จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าอัลตราฟิลเตรชันสามารถกำจัดอนุภาคในช่วงขนาดที่น้อยกว่า 0.01 ถึง 0.1 มม. ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 8 การแยกขนาดของเมมเบรนชนิดต่างๆ

2.7 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration; NF)

การพัฒนาเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันเกิดขึ้นหลังจากเมมเบรนรีเวอร์สออสโมซิส เนื่องจากรีเวอร์สออสโมซิสส่วนใหญ่ใช้สำหรับการแยกเกลือออกจากน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล ดังนั้นการแยกตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่กว่าโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 500 กรัมต่อโมลจึงไม่เหมาะสม เนื่องจากโครงสร้างของเมมเบรนจะทำให้เกิดการดึงน้ำกลับคืนมาต่ำ เมมเบรนนาโนฟิลเตรชันเป็นเมมเบรนแบบกึ่งสังเคราะห์ที่มีขนาดรูพรุน 2 นาโนเมตรและแรงดันในการทำงานประมาณ 10 - 20 บาร์ซึ่งต่ำกว่ารีเวอร์สออสโมซิส สรุปได้ว่าเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดอินทรีย์วัตถุซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 200 กรัมต่อโมล อีออนหลายโมเลกุล โลหะหนัก สี ไวรัส และแบคทีเรียจากน้ำ จากคุณสมบัติที่กล่าวมาสามารถใช้ในการบำบัดน้ำและน้ำเสียอุตสาหกรรม ยา หรืออาหารได้ ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ได้แก่ โพลาริเซชันความเข้มข้น ค่า pH อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้นของน้ำขาเข้า (Shon, Phuntsho, Chaudhary, Vigneswaran, & Cho, 2013)

ในทางปฏิบัติการเตรียมน้ำเป็นสิ่งจำเป็นเพราะน้ำดิบอาจทำให้ระบบเสียหายหรือลดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ โดยปกติความเข้มข้นของสารที่ละลายในน้ำดิบจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2 - 4 เท่าเมื่อใช้งานระบบด้วยสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกของ CaCO_3 หรือ CaSO_4 เพื่อป้องกันการตกผลึก แคลเซียม ซัลเฟตและคาร์บอนเอตอออนจำเป็นจะต้องมีการกำจัดออก

2.7.1 กลไกการทำงาน

กลไกในการทำงานของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเหมือนกันกับการทำงานของรีเวอร์สออสโมซิส ต่างกันที่แรงดันที่ใช้ กล่าวคือ นาโนฟิลเตรชันจะใช้แรงดันที่ต่ำกว่ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายแตกต่างกัน ซึ่งการทำงานของเมมเบรนทั้งสองชนิดนี้เกี่ยวข้องกันโดยตรงกับกระบวนการออสโมซิส (Osmosis) สำหรับกลไกในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (A. W. Mohammad et al., 2015) ได้แก่

- กลไกทางกายภาพ เนื่องจากนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนมีขนาดรูพรุนที่เล็กมาก (ประมาณ 2 นาโนเมตร) สารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 กรัมต่อโมล จะถูกกำจัดโดยวิธีกรองต็ดค่าง (Sieve)

- กลไกเนื่องจากแรงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Interaction) เป็นแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนกับอีออน เนื่องจากมีประจุทางไฟฟ้าเหมือนกัน เช่น นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีประจุลบจะเกิดแรงผลักทางไฟฟ้ากับอีออนประจุลบ ทั้งนี้ อีออนลบที่มีประจุทางไฟฟ้ามากจะถูกกำจัดได้มากกว่า เนื่องจากมีแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างเมมเบรนมากกว่า

2.8 การเกิดฟาวลิงของเมมเบรน (Membrane fouling)

ฟาวลิงเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการเมมเบรนเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ลดลง เพราะสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราการลดลงของฟลักซ์และอายุการใช้งานของเมมเบรน โดยฟลักซ์ที่ลดลงนั้นขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้นของสารป้อนและความเร็วของสารป้อน เป็นต้น ฟาวลิงของกระบวนการเมมเบรนจะแตกต่างกับการเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน เนื่องจากการเกิดฟาวลิงเป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคมีการสะสมและอุดตันของตัวถูกละลายทั้งที่ผิวหน้าและภายในรูพรุนของ เมมเบรน และไม่สามารถผันกลับได้ส่งผลให้เมมเบรนมีขนาดรูพรุนเล็กลง สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีการใช้สารเคมีเท่านั้น

2.8.1 กลไกการเกิดฟาวลิง

เนื่องจากในกระบวนการเมมเบรนเป็นการใช้ความดันในการขับเคลื่อนสารป้อนผ่านเมมเบรน ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นในระหว่างการกรองคือ การเกิดฟาวลิงซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออัตราการลดลงของฟลักซ์และประสิทธิภาพของเมมเบรนในระยะยาว โดยกระบวนการสะสมของฟาวลิงสามารถเกิดได้หลากหลายรูปแบบ ดังนั้นการเข้าใจถึงปรากฏการณ์และกลไกของการเกิดฟาวลิงจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการกรองเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องโดย แบบจำลองที่ยอมรับกันมากในกระบวนการเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน คือ แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการกรองภายใต้สภาวะความดันคงที่ สามารถแบ่งกลไกการอุดตันและการเกิด ฟาวลิงไว้ 4 ลักษณะ คือ Standard blocking model (SBM), Intermediate blocking model (IBM), Complete blocking model (CBM) และ Cake filtration model (CFM) ซึ่งกลไกการเกิดฟาวลิงดังกล่าวมีข้อจำกัดภายใต้สภาวะความดันคงที่และใช้ในสารป้อนมีคุณสมบัติแบบนอนนิวโตเนียน (Hermia, 1985) (Jonsson, Prádanos, & Hernández, 1996) ซึ่งมีสมการพื้นฐานคือ

$$\frac{d^2t}{dV} = k \left(\frac{dt}{dV} \right)^n$$

| | | |
|-------|---|---|
| เมื่อ | t | คือ เวลาการกรอง (s) |
| | V | คือ ปริมาตรของเพอมีเอท (m ³) |
| | k | คือ ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิง |
| | n | คือ ตัวแปรของแบบจำลองต่างๆ (CBM=2, IBM=1, SBM=1.5, CFM=0) |

โดยลักษณะของการเกิดฟาวลิงในรูปแบบต่างๆ ขึ้นกับหลายปัจจัย อาทิเช่น ขนาดอนุภาคของสารป้อน คุณสมบัติของสารป้อน ชนิดและวัสดุเมมเบรน สภาวะการ คำนึงการกรอง เป็นต้น โดยการศึกษาของนักวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการเกิดฟาวลิงส่วนใหญ่ สามารถแบ่งได้เป็นสองลักษณะใหญ่ๆ คือ (1) การเกิดฟาวลิงภายในรูพรุน ซึ่งสามารถอธิบาย ได้โดยแบบจำลอง SBM และ IBM (2) ฟาวลิงบนผิวหน้าเมมเบรน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดย แบบจำลอง CBM และ CFM

2.8.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดฟาวลิง

ปัจจัยการเกิดฟาวลิงสามารถจำแนกได้ 3 สาเหตุ คือ

1) คุณสมบัติของเมมเบรน

การเลือกเมมเบรนในการใช้งานนั้นจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ทำการผลิตเมมเบรน ทั้งนี้การเลือกใช้วัสดุจะต้องเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์และการใช้งาน เพื่อป้องกันการเกิดฟาวลิงได้

- คุณสมบัติการชอบน้ำ (Hydrophilicity)

การป้อนสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย การเลือกใช้เมมเบรนจะต้องเลือกเมมเบรนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) หากเมมเบรนมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) สามารถทำให้องค์ประกอบ ในสารป้อนที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำเช่น โปรตีน สามารถสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนได้ง่าย การศึกษาถึงคุณสมบัติชอบน้ำ สามารถใช้น้ำหยดที่ผิวหน้าเมมเบรน เพื่อหาค่ามุมประชิด (Contact angle) หากมุมของหยดน้ำมีค่าเท่ากับศูนย์หรือต่ำกว่า แสดงว่าเมมเบรนสามารถเลือกผ่าน น้ำได้สูง เมมเบรนที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ส่วนใหญ่ใช้แยกสารละลายที่มีองค์ประกอบของน้ำมัน

- ลักษณะผิวหน้าเมมเบรน (Surface topography)

ลักษณะของผิวหน้าเมมเบรนเป็นปัจจัยหนึ่งในการเกิดฟาวลิง ถ้าผิวเมมเบรนมีลักษณะราบเรียบการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้ามีน้อย ในทางตรงข้ามหากเมมเบรนมีลักษณะผิวหน้าขรุขระไม่สม่ำเสมอ อาจทำให้ตัวถูกละลายหลุดออกจากพื้นผิวได้ยากการเกิดฟาวลิงจึงมีโอกาสเกิดได้สูงกว่า

- ประจุของแผ่นเมมเบรน (Charge on membrane)

เมมเบรนส่วนใหญ่แสดงสมบัติเป็นประจุลบซึ่งประจุของแผ่นเมมเบรนสำคัญต่อกระบวนการ ทั้งนี้เนื่องจากสามารถเกิดแรงกระทำระหว่างเมมเบรนและประจุของอนุภาค เช่น หากเมมเบรนมีประจุลบและอนุภาคในสารป้อนเป็นประจุบวกทำให้เกิดการสะสมของ อนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรน เนื่องจากแรงกระทำระหว่างประจุ ส่งผลให้ที่ผิวหน้าเมมเบรนเกิดการ สะสมของอนุภาคหรือก่อตัวเป็นชั้นที่สามารถกั้นการไหลได้

- ขนาดของรูพรุน (Pore size)

ขนาดของรูพรุนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ได้ โดยเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จะมีฟลักซ์ในช่วงแรกสูงกว่าเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กและหนาแน่น เมื่อเวลาผ่านไปฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็วทั้งนี้เนื่องจากมีอนุภาคปิดหรือสะสมภายในรูพรุน ส่งผลให้พื้นที่ของรูพรุนลดลง

2) คุณสมบัติของสารขาเข้า

การเกิดฟาวลิงเป็นผลมาจากแรงกระทำระหว่างเมมเบรนและองค์ประกอบของสารขาเข้า ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่ง ที่ใช้ในการพิจารณาถึงการเลือกเมมเบรนและสภาวะการเดินระบบ สาเหตุส่วนใหญ่เกิดได้จากองค์ประกอบต่างๆ เช่น

- โพรตีน

โพรตีนเป็นปัญหาหลักที่สำคัญของกระบวนการเมมเบรน ทั้งนี้เนื่องจากโพรตีนมีโครงสร้างหลายรูปแบบและมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ และความหนาแน่นของประจุในโมเลกุลของโพรตีน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อการเกิดฟาวลิง อีกทั้งค่าพีเอช (pH) ความแรงของประจุ (ionic strength) แรงเฉือน (shear) การใช้ความร้อนและปัจจัยต่างๆ สามารถทำให้โพรตีนเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดแรงกระทำต่อเมมเบรน และส่งผลให้ฟลักซ์ลดลง

- เกลือ

เกลือและองค์ประกอบของเกลือ ส่งผลต่อกระบวนการเมมเบรน โดยเกลือสามารถตกตะกอนองค์ประกอบและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโพรตีนได้ และสามารถเกิดแรงกระทำเนื่องจากประจุกับเมมเบรนและส่งผลให้มีความต้านทานการไหลของเพอมีเอทเพิ่มขึ้น

- pH

การเปลี่ยนแปลงของ pH มีผลต่อความสามารถในการละลายและโครงสร้างของสารขาเข้า

- น้ำมันและไขมัน

เนื่องจากน้ำมันและไขมันมีสมบัติเป็นไม่ชอบน้ำ ดังนั้นหากใช้เมมเบรนที่มีสมบัติเป็นไม่ชอบน้ำ มาทำการแยกองค์ประกอบที่มีไขมันเจือปน สามารถทำให้เกิดการเคลือบหรือการสะสมของน้ำมันและไขมันที่ผิวหน้าเมมเบรน ส่งผลให้ฟลักซ์ลดลงได้

3) สภาวะการเดินระบบ

- อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อฟลักซ์และการเกิดฟาวลิง ในการกรองที่อุณหภูมิฟลักซ์มีการลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นส่งผลให้ความหนืดและความสามารถในการละลายของสารป้อนเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันบางผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์นม การเพิ่มอุณหภูมิสูง

องค์ประกอบโปรตีนเกิดการเสื่อมสภาพ และถูกทำลายด้วยความร้อน ทำให้ความสามารถในการละลายลดลง และมีการสะสมบริเวณผิวหน้าเมมเบรนมากขึ้น

- อัตราการไหลและลักษณะการไหล

อัตราการไหลและลักษณะการเคลื่อนที่ของสารป้อนภายในเมมเบรน มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์และสามารถลดการเกิดฟาวลิงได้ ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (turbulence flow) มีแรงเฉือนสูง ทำให้การแพร่กลับของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนมีมากขึ้น การสะสมของอนุภาคจึงลดลง มีผลต่อการเกิดฟาวลิงเพราะสามารถลดการเกาะตัวของตัวถูกละลายได้ดังเช่น ในการกรองโดยใช้เมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน เมื่อมีการเพิ่มความเร็วของสาร ป้อนทำให้ลดการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและมีการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของเพอมีเอทเพิ่มสูงขึ้น

- ความดัน

ในกระบวนการเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน เป็นการดำเนินการกระบวนการ โดยอาศัยความดันเป็นแรงขับสารป้อน เมื่อให้ความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้นในช่วงหนึ่ง แต่เมื่อให้ความดันเพิ่มขึ้น ฟลักซ์จะมีการลดลง และคงที่ เนื่องจากเมื่อเพิ่มความดันจะมีผลทำให้อนุภาคและคอลลอยด์มีการอัดตัวแน่นขึ้น ซึ่งช่วงการเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและการเกิดฟาวลิงซึ่งเป็นช่วงไม่ขึ้นกับความดัน (independent of pressure)

2.8.3 ชนิดของสารอุดตัน (Foulant)

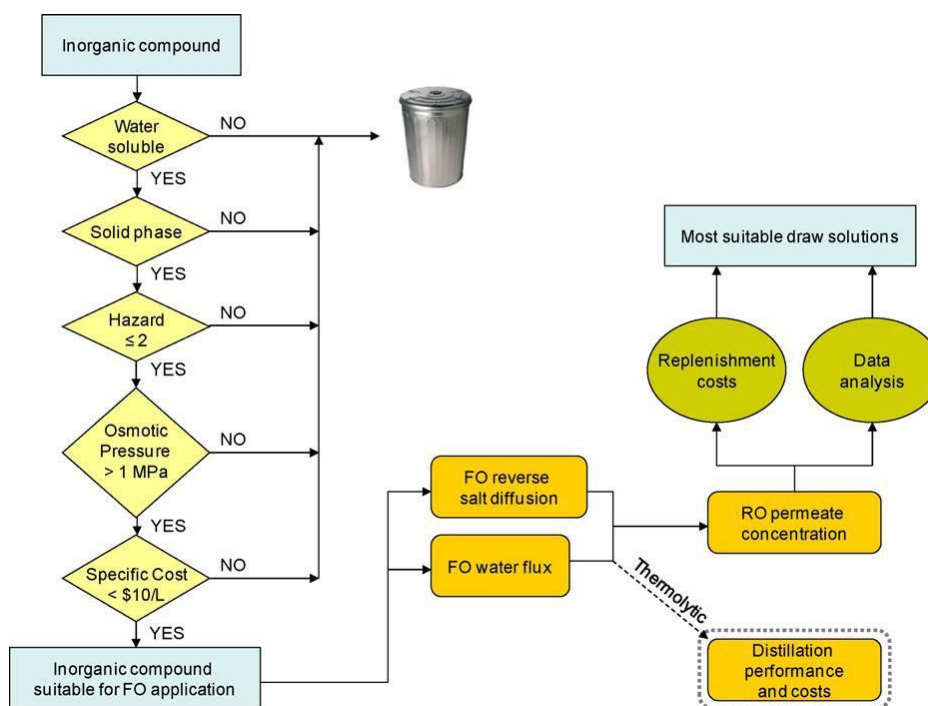
สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท (Guo, Ngo, & Li, 2012) ดังนี้

- 1) อนุภาค: อนุภาคหรือคอลลอยด์ทั้งแบบอินทรีย์และอนินทรีย์ เป็นสารอุดตันที่ปิดอยู่บนผิวเมมเบรน และรูพรุนของเมมเบรน สะสมตัวจนเกิดเป็นชั้นแค้ก
- 2) สารอินทรีย์: สารละลายหรือคอลลอยด์ที่ติดอยู่กับเมมเบรนโดยการดูดซึม
- 3) สารอนินทรีย์: สารละลายที่มีแนวโน้มจะตกตะกอนบนผิวเมมเบรนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง pH หรือออกซิเดชัน
- 4) จุลินทรีย์ (Micro-biological organism)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Achilli, Cath, and Childress (2010) ได้ทำการพัฒนาโปรโตคอลสำหรับการคัดเลือกสารตั้งที่เหมาะสมกับกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส และพิจารณาสารตั้งที่เหมาะสมกับ specific application ในโปรโตคอลนี้จะประกอบไปด้วยกระบวนการ desktop screening การทดลองในห้องปฏิบัติการ และการวิเคราะห์จากโมเดล จากกระบวนการ desktop screening พบว่ามีสารตั้ง 14

ชนิดที่เหมาะสมจะนำมาใช้ในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส และสารตั้งทั้ง 14 ชนิดนี้จะถูกนำมาทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินค่าฟลักซ์ของน้ำ และการแพร่กลับของเกลือ



รูปที่ 9 โปรโตคอลในการเลือกสารตั้ง

ไดอะแกรมในรูปที่ 9 ได้อธิบายโปรโตคอลในการเลือกสารตั้ง โดยในขั้นตอนของกระบวนการ desktop screening จะถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดสารที่ไม่ละลายน้ำและไม่เป็นของแข็งที่ความดันและอุณหภูมิแวดล้อม หลังจากนั้น Hazardous Material Identification System (HMIS) codes จะถูกนำมาใช้ โดย HMIS code จะเป็นตัวบ่งชี้ถึง health, flammability, and physical hazards ของสารเคมี ซึ่งมีสเกลตั้งแต่ 0 ถึง 4 โดย 0 หมายถึง ไม่เป็นอันตรายแล 4 หมายถึง อันตรายสูงสุด โดยในการเลือกสารตั้งที่จะนำมาใช้นั้น HMIS code ของสารนั้นๆ ควรจะมีค่าไม่มากกว่า 2 (moderate hazard) ต่อจากนั้นเครื่อง OLI Stream Analyzer™ จะถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าความดันออสโมติกของสารนั้นๆ ตามความเข้มข้น สารละลายที่มีความดันออสโมติกน้อยกว่า 1 MPa (145 psi) ที่ความเข้มข้นอิ่มตัวจะถูกคัดออก ท้ายสุดในการบวนการ desktop screening จะเป็นการประเมินต้นทุนของสารแต่ละชนิดจะถูกประเมินจาก Fisher Scientific unit prices โดยจะประเมินจากการคำนวณราคาของสารที่ใช้ในการทำสารตั้ง 1 ลิตร ที่ความดันออสโมติก 2.8 MPa (406 psi) ซึ่งสารที่มีค่าใช้จ่ายจำเพาะมากกว่า 10\$ ต่อลิตร จะถูกคัดออก จากกระบวนการ desktop screening ข้างต้น พบว่ามีสารอินทรีย์ที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสได้ 14 ชนิดตามตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ราคาของสารตั้งทั้ง 14 ชนิด

| Draw Solution | Cost, \$/kg | Specific cost, \$/L |
|---|-------------|---------------------|
| NaCl | 15 | 0.53 |
| NH ₄ Cl | 26 | 0.85 |
| MgCl ₂ | 28 | 0.96 |
| NaHCO ₃ | 20 | 1.28 |
| Na ₂ SO ₄ | 8 | 1.28 |
| CaCl ₂ | 35 | 1.53 |
| KCl | 37 | 1.74 |
| KHCO ₃ | 32 | 2.1 |
| NH ₄ HCO ₃ | 45 | 2.38 |
| (NH ₄) ₂ SO ₄ | 60 | 4.46 |
| K ₂ SO ₄ | 53 | 5.38 |
| KBr | 80 | 5.7 |
| Ca(NO ₃) ₂ | 70 | 6.1 |
| MgSO ₄ | 52 | 7.35 |

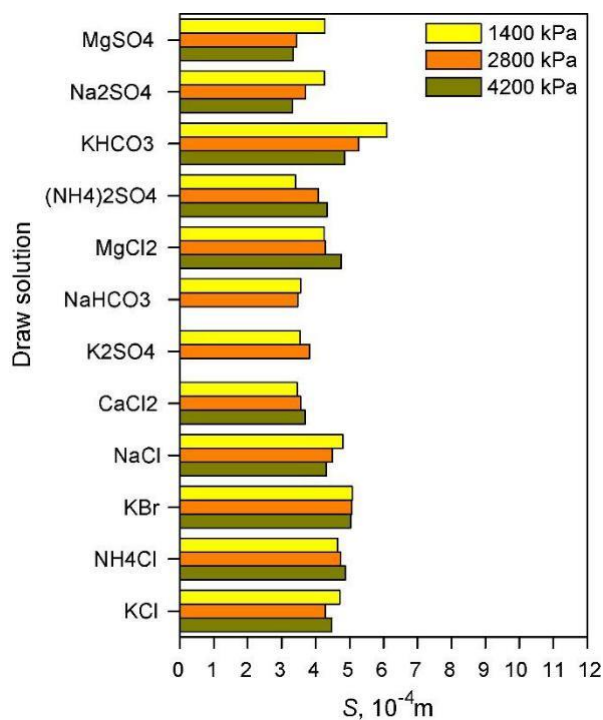
การเลือกสารตั้งในขั้นต่อไปจะถูกพิจารณาจากการทดลองกับกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส เพื่อคำนวณค่าพลังค์ของน้ำและการแพร่กลับของเกลือ แผ่นเมมเบรนชนิดเซลลูโลสไตรอะซิเตท (cellulose triacetate; CTA) ถูกนำมาใช้ในการทดลอง ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนชนิดนี้มีความแตกต่างจากเมมเบรนทั่วไปที่มีขายและเป็นเมมเบรนที่สามารถนำมาใช้งานได้กับกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสได้ดี เมมเบรนชนิดนี้มีความหนาประมาณ 50 μm และประกอบด้วยโพลีเมอร์ชนิดเซลลูโลสไตรอะซิเตท 2 ชั้นซึ่งมีโพลีเอสเตอร์อยู่ตรงกลาง มุมสัมผัสของเมมเบรนวัดได้ 61° และมีความเป็นลบ เมมเบรนที่นำมาใช้นี้มีพื้นที่ผิว 139 ตารางเซนติเมตรและถูกติดตั้งไว้กับชุดทดสอบซึ่งมีช่องทั้ง 2 ด้านของเมมเบรน ปีม 2 ตัวถูกนำมาใช้เพื่อหมุนเวียนสารขาเข้าและสารตั้งโดยให้ความเร็วอยู่ที่ 1.5 ลิตรต่อนาที น้ำบริสุทธิ์ปริมาตร 5.4 ลิตรถูกบรรจุในถังและวางไว้บนตาชั่ง ซึ่งเชื่อมอยู่กับคอมพิวเตอร์ สารตั้งปริมาตร 10 ลิตรถูกบรรจุอยู่ในถังและทำให้มีความเข้มข้นคงที่โดยการเติมสารเข้าไปในถังอย่างต่อเนื่อง ค่า pH และค่าความนำไฟฟ้าของทั้งสารขาเข้าและสารตั้ง ดูได้จากหัววัด ผลลัพธ์ของพลังค์ของน้ำและค่าความต้านทานของสารตั้งแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 พลั๊กซ์ของน้ำและค่าความต้านทานของสารดึง

| Draw Solution | C_{DS} , g/L | S_{DS} , MPa | J_w 10^{-6} m/s | K , 10^5 s/m | S , 10^{-4} m |
|-----------------------------------|----------------|----------------|---------------------|------------------|-------------------|
| KCl | 70.3 | 4.2 | 3.74 | 2.37 | 4.48 |
| | 47.0 | 2.8 | 3.02 | 2.3 | 4.28 |
| | 23.4 | 1.4 | 1.87 | 2.56 | 4.71 |
| NH ₄ Cl | 48.2 | 4.2 | 3.61 | 2.56 | 4.88 |
| | 32.6 | 2.8 | 2.90 | 2.53 | 4.74 |
| | 17.0 | 1.4 | 1.88 | 2.52 | 4.65 |
| KBr | 104.7 | 4.2 | 3.59 | 2.58 | 5.03 |
| | 71.3 | 2.8 | 2.84 | 2.67 | 5.07 |
| | 37.9 | 1.4 | 1.84 | 2.72 | 5.08 |
| NaCl | 50.8 | 4.2 | 3.38 | 2.92 | 4.32 |
| | 35.2 | 2.8 | 2.68 | 3.05 | 4.49 |
| | 17.9 | 1.4 | 1.73 | 3.25 | 4.8 |
| CaCl ₂ | 62.3 | 4.2 | 3.22 | 3.22 | 3.69 |
| | 43.8 | 2.8 | 2.64 | 3.15 | 3.55 |
| | 24.3 | 1.4 | 1.75 | 3.11 | 3.46 |
| K ₂ SO ₄ | 101.4 | 2.8 | 2.52 | 3.47 | 3.82 |
| | 49.4 | 1.4 | 1.74 | 3.19 | 3.54 |
| NaHCO ₃ | 63.9 | 2.8 | 2.47 | 3.62 | 3.48 |
| | 30.3 | 1.4 | 1.68 | 3.53 | 3.56 |
| Ca(NO ₃) ₂ | 131.2 | 4.2 | 2.97 | n.a.a | n.a. |
| | 87.2 | 2.8 | 2.46 | n.a. | n.a. |
| | 42.6 | 1.4 | 1.66 | n.a. | n.a. |
| MgCl ₂ | 47.6 | 4.2 | 2.70 | 4.48 | 4.75 |
| | 33.8 | 2.8 | 2.33 | 4.08 | 4.28 |

| Draw Solution | C_{DS} , g/L | S_{DS} , MPa | J_w 10^{-6} m/s | K , 10^5 s/m | S , 10^{-4} m |
|----------------|----------------|----------------|---------------------|------------------|-------------------|
| | 20.0 | 1.4 | 1.58 | 4.09 | 4.25 |
| $(NH_4)_2SO_4$ | 109.1 | 4.2 | 2.74 | 4.36 | 4.34 |
| | 74.3 | 2.8 | 2.28 | 4.29 | 4.08 |
| | 39.4 | 1.4 | 1.65 | 3.82 | 3.41 |
| $KHCO_3$ | 99.0 | 4.2 | 2.80 | 4.2 | 4.85 |
| | 65.5 | 2.8 | 2.25 | 4.4 | 5.27 |
| | 32.0 | 1.4 | 1.48 | 4.85 | 6.1 |
| Na_2SO_4 | 127.3 | 4.2 | 2.56 | 4.93 | 3.32 |
| | 84.7 | 2.8 | 2.14 | 4.87 | 3.7 |
| | 41.0 | 1.4 | 1.48 | 4.84 | 4.26 |
| NH_4HCO_3 | 83.4 | 4.2 | 2.85 | n.a. | n.a. |
| | 52.8 | 2.8 | 2.04 | n.a. | n.a. |
| | 25.2 | 1.4 | 1.52 | n.a. | n.a. |
| $MgSO_4$ | 141.3 | 2.8 | 1.54 | 8.92 | 3.34 |
| | 73.8 | 1.4 | 1.18 | 7.93 | 3.44 |
| | | | | Average | 4.27 |

The internal concentration polarization modulus (K) and membrane structural parameter (S) จะถูกคำนวณในแต่ละการทดลอง ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 10 เห็นได้ว่าคุณค่า S มีค่าคงที่ reasonably constant under the different experimental conditions ซึ่งสนับสนุนสมมติฐานที่ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสารตั้งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิด ICP ซึ่งถูกคำนวณจากการทดลองที่สภาวะต่างๆ ผลการทดลองถูกแสดงในรูปที่ 10

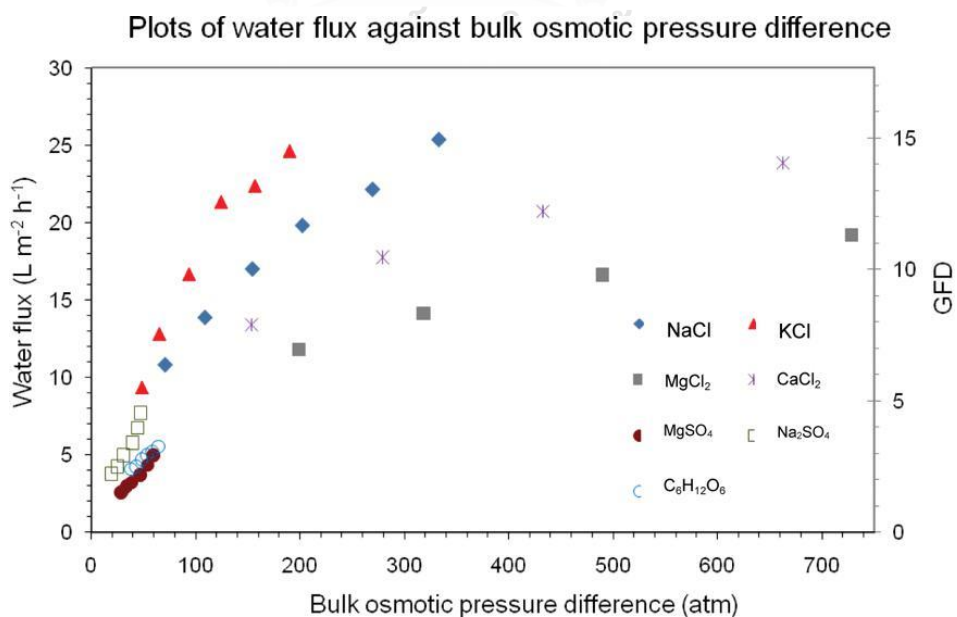


รูปที่ 10 ค่า S ของสารดึง 12 ชนิด

สารดึงที่เหลือจะถูกพิจารณาภายใต้สภาวะการทดลองโดยระบบรีเวิร์สออสโมซิส เพื่อประเมิน RO permeate concentration โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ROSA และ IMSDesign) ในการ simulation จากการ simulation แสดงให้เห็นว่า พารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัว (ฟลักซ์ของน้ำ การแพร่กลับของเกลือ และ RO permeate concentration) ถูกนำมาใช้ในการทดลองประสิทธิภาพของสารดึง โดยสารดึงชนิดโพแทสเซียมคลอไรด์ จะให้ฟลักซ์ของน้ำสูงที่สุด สารดึงชนิดโพแทสเซียมไปคาร์บอเนต จะให้การแพร่กลับของเกลือที่ต่ำที่สุด และสารดึงชนิดแมกนีเซียมซัลเฟต จะให้ RO permeate concentration ต่ำที่สุด

Tan and Ng (2010) ศึกษากระบวนการผสมผสานฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - นาโนฟิลเตรชัน สำหรับการแยกเกลือออกจากน้ำทะเล ในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสจะใช้สารดึงที่มีแรงดันออสโมติกมากกว่าสารละลายขาเข้า แต่ความท้าทายอย่างหนึ่งในการพัฒนากระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสคือการหาสารดึงที่เหมาะสมสำหรับการทำงานต่างๆ และเหมาะกับกระบวนการที่นำสารดึงกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสเป็นกระบวนการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้สำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ แต่ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูงและต้องใช้แรงดันสูง ในงานวิจัยนี้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันได้ถูกนำมาใช้แทนรีเวิร์สออสโมซิส เนื่องจากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเป็นกระบวนการที่ใช้ความดันต่ำกว่ารีเวิร์สออสโมซิส มีความสามารถในการกำจัดพวกไดวาแลนซ์และสารที่มีโมเลกุลใหญ่

กว่าได้ กระบวนการผสมผสานฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - นาโนฟิลเตรชันคาดว่าจะจะเป็นกระบวนการที่ใช้ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบที่น้อยกว่าเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดเกลือที่มีการใช้อยู่ และสามารถที่จะนำสารดึงกลับมาใช้ใหม่และผลิตน้ำสะอาดได้ กระบวนการผสมผสานนี้จำเป็นต้องใช้สารดึงที่สามารถให้แรงดันออสโมติกสูง เพื่อเป็นแรงขับสำหรับกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส และดึงน้ำออกมาจากน้ำทะเล นอกจากนี้ยังต้องสามารถนำมาแยกด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันซึ่งเป็นกระบวนการหลังการบำบัดขั้นต้น เพื่อให้ได้น้ำสะอาดและสารดึงที่สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส สารดึง 7 ชนิด ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) และกลูโคส (C₆H₁₂O₆) ถูกนำมาทดลองโดยใช้ชุดทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการของเมมเบรนชนิดฟอร์เวิร์ดออสโมซิสและนาโนฟิลเตรชัน ค่าฟลักซ์ของน้ำที่ได้จากสารดึงทั้ง 7 ชนิดถูกพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในการทดลองของกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.6 โมลต่อลิตร เป็นสารขาเข้า ผลการทดลองที่ได้ถูกแสดงในรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารดึง (ความดันออสโมติก) เพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์ของน้ำก็จะมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ของน้ำ ไม่ได้เป็นการเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงเหมือนการเพิ่มขึ้นของความดันออสโมติก และ คอนเซนเตรชันโพลโรเซชัน (CP) ซึ่งเกิดขึ้นทั้ง 2 ด้านของเมมเบรน จากรูปที่ 11 สารดึงชนิดโซเดียมคลอไรด์และโพแทสเซียมคลอไรด์สามารถให้ฟลักซ์ของน้ำที่มากที่สุด (มากกว่า 25 ลิตรต่อตารางเมตร ชั่วโมง) ในขณะที่แมกนีเซียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ทำให้เกิดความดันออสโมติกที่สูงที่สุดเนื่องจากเป็นสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง

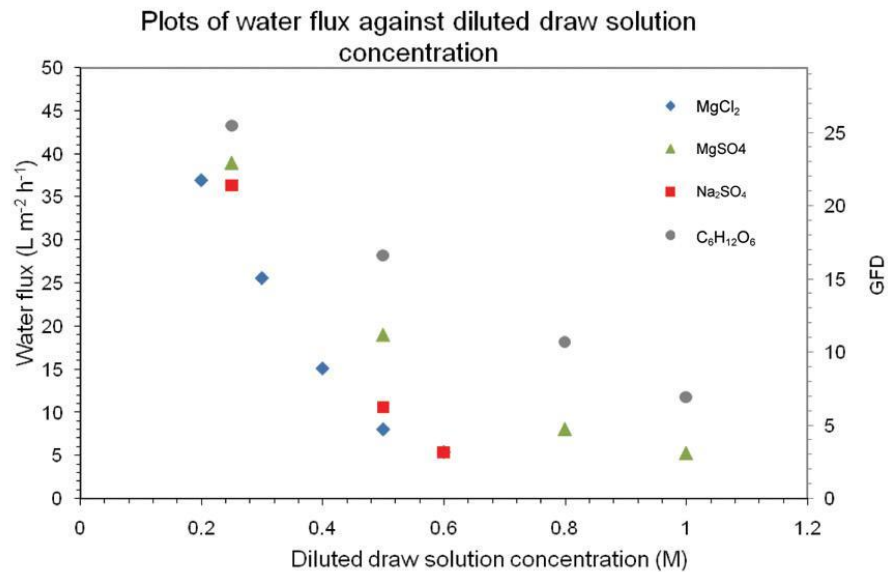


รูปที่ 11 ฟลักซ์ของน้ำเทียบกับความเข้มข้นของสารดึงทั้ง 7 ชนิด

ตารางที่ 11 เปอร์เซ็นต์การกำจัดของสารตั้งทั้ง 7 ชนิด

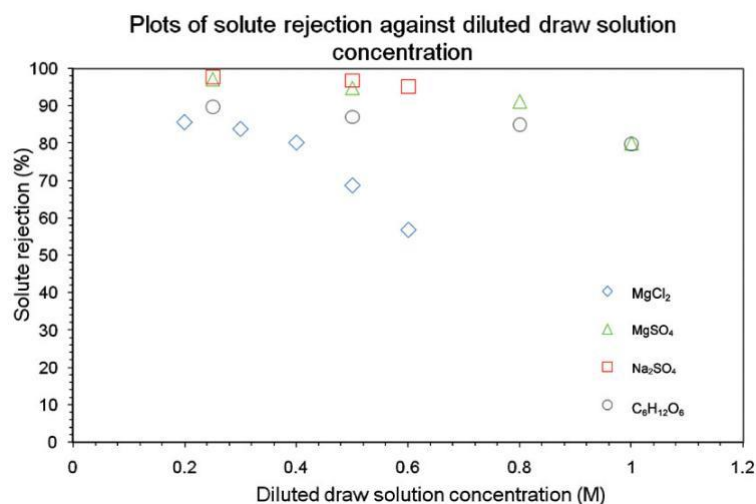
| Draw Solution | Solute Rejection (%) |
|---|----------------------|
| NaCl | 99.47 |
| KCl | 99.48 |
| CaCl ₂ | 99.98 |
| MgCl ₂ | 99.97 |
| MgSO ₄ | 99.99 |
| Na ₂ SO ₄ | 99.97 |
| C ₆ H ₁₂ O ₆ | 99.86 |

ตารางที่ 11 แสดงเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของการกำจัด ของสารตั้งทั้ง 7 ชนิดจากกระบวนการฟอรวีร์ตออสโมซิส จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดมีค่ามากกว่า 99% (มากที่สุด 99.99%) ในการประเมินความเป็นไปได้ของกระบวนการผสมผสานจะต้องมีการทดลองสารตั้งกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันในแง่ของฟลักซ์ของน้ำและประสิทธิภาพในการกำจัด จากการศึกษาของ A. Mohammad, Hilal, Al-Zoubi, and Darwish (2007) โซเดียมคลอไรด์และโพแทสเซียมคลอไรด์ไม่ได้ถูกนำมาทดสอบด้วยนาโนฟิลเตรชัน เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การกำจัด แคลเซียมคลอไรด์ไม่ได้ถูกนำมาทดสอบเช่นกัน เนื่องจากสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นสูง เมื่อสัมผัสกับบรรยากาศทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายลงในสารละลายเพื่อทำให้เป็นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต สารตั้งที่เหลือทั้ง 4 ชนิดถูกนำมาทดสอบกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน เพื่อประเมินการนำกลับของสารตั้งและคุณภาพของน้ำที่ได้ จากรูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงค่าฟลักซ์ของน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆของสารตั้งทั้ง 4 ชนิด โดยการใช้แรงดันที่ 35 บรรยากาศ จะเห็นว่าในแต่ละสารละลายมีแนวโน้มที่คล้ายกัน ซึ่งฟลักซ์ของน้ำจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายลดลง



รูปที่ 12 ฟลักซ์ของน้ำโดยการใช้น้ำจืด 4 ชนิดที่ความดัน 35 บรรยากาศ

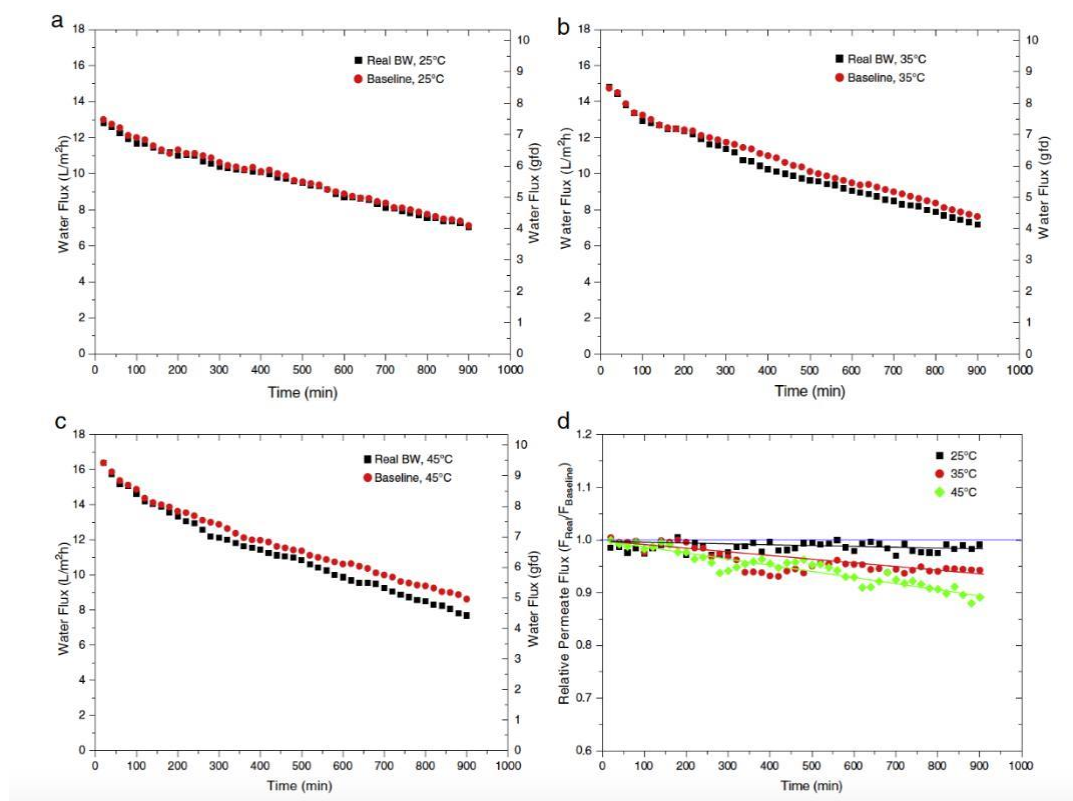
ผลลัพธ์ในรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นไม่สูงเกินไป เนื่องจากฟลักซ์ของน้ำที่ต่ำลงเกินไปสำหรับการผลิตสารที่มีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน การเลือกใช้น้ำจืดขึ้นอยู่กับความเสถียรและไม่ทำให้เกิดการย่อยสลาย (ทางกายภาพ ทางเคมี หรือทางชีวภาพ) เมื่อนำมาใช้ซ้ำ ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงการใช้น้ำจืดละลายอินทรีย์ในการรีไซเคิล เเปอร์เซ็นต์การกำจัดเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญในการพิจารณาการใช้น้ำจืดสำหรับกระบวนการผสมผสาน



รูปที่ 13 เเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับความเข้มข้นของสารตั้ง

รูปที่ 13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดของสารตั้ง 4 ชนิด เห็นว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดของโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากกว่า 90% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย และเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำที่มีคุณภาพดีที่ตรงตามคำแนะนำของ GDWQ จากองค์การอนามัยโลก กระบวนการผสมผสานฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-นาโนฟิลเตรชันที่ใช้ควรประกอบด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน 2 ยูนิต

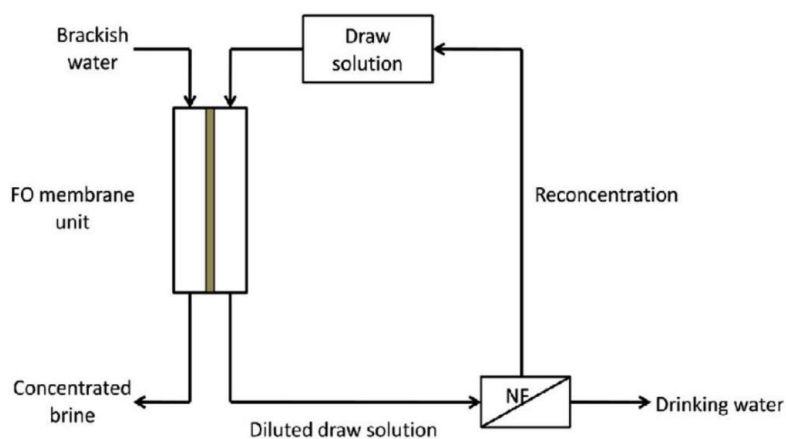
Zhao and Zou (2011) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำงานในการแยก การอุดตันของเมมเบรนและการทำความสะอาด โดยการตรวจสอบผ่านกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส ปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการเมมเบรนคืออุณหภูมิซึ่งเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนมวล การละลายของของเหลว ความชุ่มของเมมเบรนและความเข้มข้นของโพลีไธเซน แผ่นเมมเบรนชนิด CTAถูกนำมาใช้ในการทดลอง น้ำกร่อยทั้งของจริงและที่สังเคราะห์ถูกนำมาใช้เป็นสารขาเข้า และใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 1.5 โมลต่อลิตร เป็นสารตั้ง เนื่องจากสามารถแยกด้วยกระบวนการรีเวิร์ดออสโมซิส หรือ นาโนฟิลเตรชันได้ ในการทดลองสารตั้งจะถูกนำเข้าสู่ด้านactive layerของเมมเบรน ซึ่งสามารถให้พลังค์ของน้ำได้สูงขึ้นเพื่อลดความเข้มข้นของโพลีไธเซนภายใน อัตราการไหลถูกรักษาไว้ที่ 25 เซนติเมตรต่อวินาที สำหรับทั้งสองด้านและถูกควบคุมด้วยปั๊ม อุณหภูมิจะถูกเปลี่ยนตั้งแต่ 25 °C ถึง 45 °C ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ผลของอุณหภูมิต่อพลังค์ของน้ำ

สำหรับน้ำกร่อยทั้งสองชนิด ฟลักซ์ของน้ำเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยหลายปัจจัยเช่น ความหนืดของของไหล ความเข้มข้นโพลาไรซ์ การซึมผ่านของน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลซึ่งเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นช่วยลดความหนืด แต่เพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล การอุดตันของเมมเบรนไม่ส่งผลต่อฟลักซ์ของน้ำในตอนเริ่มต้น อย่างไรก็ตามการอุดตันของเมมเบรนจะเกิดขึ้นและเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเวลา การอุดตันของเมมเบรนจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ผลกระทบของอุณหภูมิในการบำบัดน้ำจะถูกทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 1.5 โมลต่อลิตร เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการนำน้ำกลับคืนและความเข้มข้นสุดท้ายก็เพิ่มขึ้น ในช่วงเวลาเดียวกันสำหรับการซึมผ่าน อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดฟลักซ์ของน้ำที่สูงขึ้นซึ่งจะช่วยให้อัตราการนำน้ำกลับคืนดีขึ้น อย่างไรก็ตามระดับความอึดตัวของสารละลายขาเข้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการนำน้ำกลับคืนนั้นการอุดตันของเมมเบรนจะรุนแรงมากขึ้นเมื่ออัตราการนำน้ำกลับคืนสูงขึ้นพร้อมกับอุณหภูมิในการทำงานที่สูงขึ้น

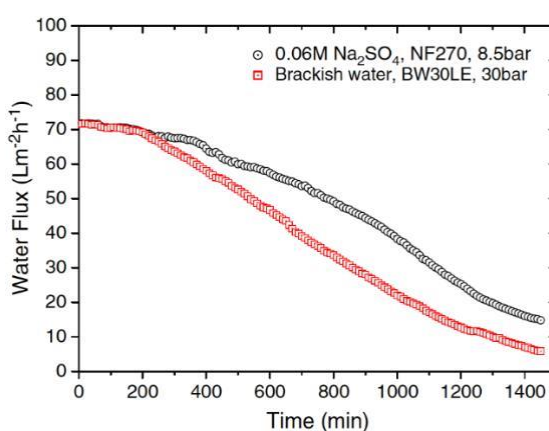
Zhao, Zou, and Mulcahy (2012) ศึกษากระบวนการผสมผสานฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - นาโนฟิลเตรชันสำหรับการแยกเกลือออกจากน้ำกร่อย โดยการใช้สารตั้งชนิดไดวาเลนซ์ และเปรียบเทียบกับกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส แผนภาพของระบบผสมผสานนี้จะถูกแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 แผนผังแสดงกระบวนการผสมผสานฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - นาโนฟิลเตรชัน

น้ำกร่อยที่มีของแข็งละลายน้ำ 3,970 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกนำมาใช้เป็นน้ำขาเข้า และถูกนำเข้าด้านหนึ่งของเมมเบรน อีกด้านหนึ่งเป็นสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 1.5 โมลต่อลิตร

ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นสารตั้ง ทั้งน้ำกร่อยและสารตั้งจะไหลไปในทิศเดียวกัน โดยจะถูกควบคุมด้วยปั๊มแบบรีดท่อและเกจวัดความเร็ว ความเร็วที่ไหลผ่านเมมเบรนจะถูกควบคุมไว้ที่ 25 เซนติเมตรต่อวินาที หลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมง น้ำขาเข้าจะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำปราศจากไอออน เพื่อทำความสะอาดเป็นเวลา 30 นาที จากการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดของเมมเบรนชนิดฟอร์เวิร์ดออสโมซิสให้ค่ามากกว่า 99% และ อัตราการนำน้ำกลับคืน มากกว่า 70% ในการทดลองนาโนฟิลเตรชัน สารขาเข้าจะถูกน้ำเข้าโดยการใช้น้ำ ความดันในการดำเนินการถูกควบคุมด้วยวาล์วเข็ม และวาล์วควบคุมให้ความดันอยู่ที่ 8.5 บาร์ น้ำหนักที่เปลี่ยนไปของน้ำส่วนขาออกถูกบันทึกด้วยตาชั่งดิจิตอล และในการเปรียบเทียบทั้งสารตั้งที่เจือจางและน้ำกร่อยจะถูกนำมาใช้



รูปที่ 16 พลั๊กซ์ของน้ำเมื่อใช้เมมเบรนต่างชนิดกัน

รูปที่ 16 แสดงให้เห็นค่าพลั๊กซ์ของน้ำที่ลดลงเมื่อใช้เมมเบรนต่างชนิดกันสำหรับสารละลายทั้ง 2 ชนิดคือ น้ำกร่อยและสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ถูกเจือจาง จะเห็นได้ว่าพลั๊กซ์ของน้ำกร่อยที่ผ่านรีเวิร์ดออสโมซิสเมมเบรนจะลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับกับการลดลงของพลั๊กซ์ของน้ำโดยการใช้น้ำกร่อยโซเดียมซัลเฟตเจือจางผ่านนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนหลังจากเวลาผ่านไป 200 นาที ซึ่งเกิดจากการอุดตันของเมมเบรน

การแยกเกลือโดยการใช้นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนใกล้เคียง 98% และได้ค่าของแข็งละลายน้ำของน้ำสะอาดที่ออกมาที่ 130 มิลลิกรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่านาโนฟิลเตรชันเมมเบรนสามารถนำมาใช้ในกระบวนการผสมผสานเพื่อผลิตน้ำสะอาดได้

Altaee, Zaragoza, and van Tonninggen (2014) ศึกษากระบวนการผสมผสานฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - รีเวิร์ดออสโมซิส สำหรับการดึงเกลือออกจากน้ำทะเล และเปรียบเทียบกับกระบวนการรีเวิร์ดออสโมซิส ปัจจุบันกระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเลมากกว่า 50% จะเป็นการผลิตโดยการใช้น้ำกร่อยรีเวิร์ดออสโมซิส ถึงแม้ว่ากระบวนการนี้จะมีประโยชน์ แต่ข้อเสียหลักคือการ

ใช้พลังงานในการดำเนินการสูง กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเป็นความคิดหนึ่งที่จะถูกนำมาใช้เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเล อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเลด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องด้วยคือ ชนิดของเมมเบรน, ชนิดของสารตั้ง, ความเข้มข้นของสารตั้ง และกระบวนการในการนำสารตั้งกลับมาใช้ใหม่ ในกระบวนการผสมผสานนี้ น้ำทะเลและสารตั้งจะถูกปั๊มเข้าฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเมมเบรนโดยให้ไหลสวนทางกัน น้ำสะอาดจากฝั่งน้ำขาเข้า(น้ำทะเล)จะซึมผ่านเมมเบรนมาทางด้านสารตั้งตามทิศทางของความดันออสโมติก หลังจากกระบวนการนี้จะได้สารตั้งเจือจางซึ่งจะถูกนำไปเข้ากระบวนการรีเวิร์ดออสโมซิสต่อเพื่อให้ได้น้ำสะอาด และสารตั้งที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ในการศึกษานี้มีสารตั้งเพียง 2 ชนิดที่ถูกนำมาทดสอบ เนื่องจากสารทั้ง 2 ชนิดเป็นสารที่ให้ความดันออสโมติกสูง, เปอร์เซ็นต์การกำจัดโดยการใช่กระบวนการรีเวิร์ดออสโมซิสสูง และความสามารถในการละลายสูง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการรีเวิร์ดออสโมซิสน้อยกว่ากระบวนการผสมผสาน แต่พลังงานที่ใช้ในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเป็นเพียง 2% - 4% ของพลังงานทั้งหมดของกระบวนการผสมผสาน

บทที่ 3

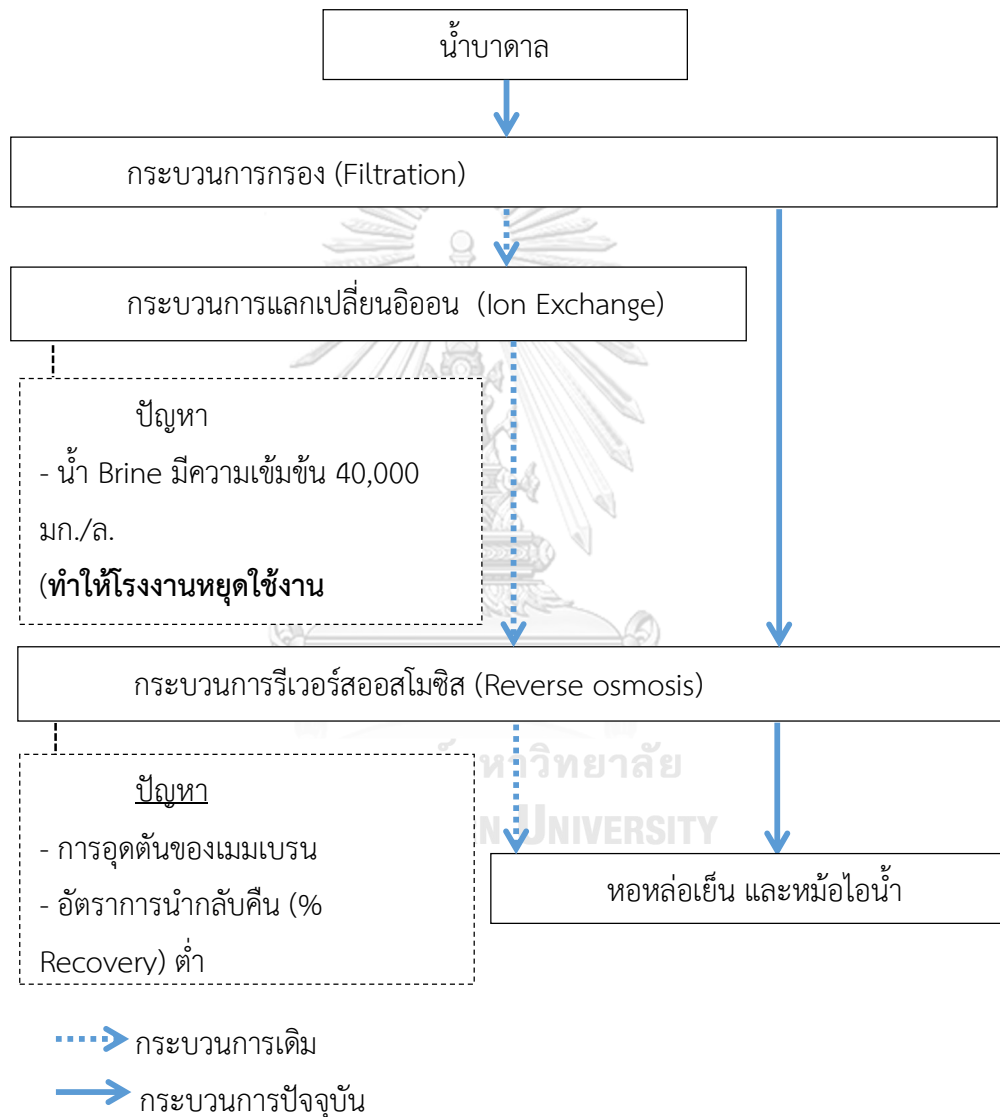
วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการบำบัดขั้นต้นที่เหมาะสม ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสเพื่อผลิตน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำจากน้ำบาดาล ซึ่งกระบวนการบำบัดขั้นต้นดังกล่าวจะสนใจพารามิเตอร์ทั้งความกระด้างและซิลิกาในน้ำ เนื่องจากความกระด้างและซิลิกาส่งผลต่อการอุดตันของเมมเบรน รวมถึงเป็นสาเหตุของตะกรันในระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำ สำหรับกระบวนการบำบัดขั้นต้นที่เลือกศึกษา ได้แก่ กระบวนการเมมเบรนประกอบด้วย กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเพื่อกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำบาดาล กระบวนการนาโนฟิลเตรชันหรือกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเพื่อฟื้นฟูสภาพของสารตั้งจากกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส โดยการศึกษากระบวนการดังกล่าวจะพิจารณาคุณภาพของน้ำหลังผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้น ทั้งนี้คุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้นจะถูกพิจารณาสำหรับใช้เป็นน้ำทดแทนในระบบหล่อเย็น โดยมีความกระด้างในน้ำหลังผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้นไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเทอมของหินปูน (mg/l as CaCO_3) ซึ่งอ้างอิงจากคุณภาพน้ำทดแทนของน้ำหล่อเย็นที่กำหนดขึ้นโดย The Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association Microbial (JRA)

3.1 ข้อมูลพื้นฐานของโรงงานผลิตเอทานอลที่สนับสนุนข้อมูลสำหรับงานวิจัย

โรงงานผลิตเอทานอลผลิตน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำ ประมาณ 100 และ 20 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (m^3/hr) ตามลำดับ ทั้งนี้จำนวนชั่วโมงในการเดินระบบผลิตน้ำทดแทนต่อวันไม่สามารถระบุได้ชัดเจน โดยระบบผลิตน้ำทดแทนที่ใช้ในปัจจุบันของโรงงาน คือ กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส คือ การอุดตันของเมมเบรน (Fouling) มีอัตราการนำกลับคืน (% Recovery) ต่ำ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหการอุดตันของเมมเบรน โรงงานเลือกใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment) เพื่อกำจัดความกระด้างซึ่งเป็นต้นเหตุของปัญหาการอุดตันของเมมเบรน ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน คือ มีน้ำ Brine ความเข้มข้นของแข็งละลายน้ำได้ (TDS) 40,000 มก./ล. เกิดขึ้นปริมาณ 50 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (m^3/day) ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียจากค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจำนวนมาก ทำให้โรงงานหยุดใช้งานกระบวนการนี้ในปัจจุบัน

ในปัจจุบันโรงงานใช้กระบวนการกรอง (Filtration) และกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสในการผลิตน้ำหล่อเย็นและน้ำในหม้อไอน้ำ โดยคุณภาพน้ำดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 12 ซึ่งคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้อ้างอิงในการสังเคราะห์น้ำบาดาล คือ น้ำเข้ารีเวอร์สออสโมซิสของกระบวนการผลิตน้ำหล่อเย็นและน้ำในหม้อไอน้ำของโรงงานผลิตเอทานอลแห่งหนึ่งใน จ.ขอนแก่น โดยมีพารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ ความกระด้างทั้งหมด ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม ค่าความเป็นด่าง ปริมาณไบคาร์บอเนต ปริมาณซิลิกา และค่าพีเอชของน้ำ



รูปที่ 17 กระบวนการผลิตน้ำสำหรับหอหล่อเย็น และหม้อไอน้ำของโรงงานผลิตเอทานอลแห่งหนึ่งใน จ.ขอนแก่น

ตารางที่ 12 คุณภาพน้ำบาดาลของโรงงานผลิตเอทานอล

| พารามิเตอร์ | หน่วย | น้ำดิบ | น้ำเข้ารีเวอร์สออสโมซิส (RO Feed) |
|-------------------------------------|------------------------|--------|-----------------------------------|
| ค่าพีเอช (pH) | - | 7.0 | 7.7 |
| ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity-M) | มก./ล. ในเทอมของหินปูน | 256 | 276 |
| ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) | มก./ล. ในเทอมของหินปูน | 256 | 276 |
| ความกระด้างทั้งหมด (Total hardness) | มก./ล. ในเทอมของหินปูน | 226 | 216 |
| แคลเซียม (Ca^{2+}) | มก./ล. ในเทอมของหินปูน | 144 | 132 |
| แมกนีเซียม (Mg^{2+}) | มก./ล. ในเทอมของหินปูน | 82 | 84 |
| ซิลิกา (SiO_2) | มก./ล. | 25.9 | 26.5 |

ที่มา: บริษัท ไทยเอทานอล พาวเวอร์ จำกัด (มหาชน)

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 น้ำบาดาลสังเคราะห์

คุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้ คือ น้ำบาดาลที่ใช้ในการผลิตน้ำหล่อเย็นและน้ำสำหรับหม้อไอน้ำของโรงงานผลิตเอทานอลแห่งหนึ่งใน จ.ขอนแก่น โดยมีพารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ ความกระด้างทั้งหมด ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม ค่าความเป็นด่าง ปริมาณไบคาร์บอเนต ปริมาณซิลิกา และค่าพีเอชของน้ำ เครื่องมือและวิธีการในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 13 สำหรับสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำบาดาลแสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 13 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์สำหรับการทดลอง

| พารามิเตอร์ | วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ | สารเคมีที่ใช้ |
|---------------|---|--|
| ค่าพีเอช | pH/Conductivity meter ของบริษัท EZ DO รุ่น 7200 | - |
| ค่าการนำไฟฟ้า | pH/Conductivity meter ของบริษัท EZ DO รุ่น 7200 | - |
| ความกระด้าง | อิตีทีเอ ไตเตรชัน | กรดไฮโดรคลอริก, 2-อะมีโนเอทานอล, เกลือแมกนีเซียมของอิตีทีเอ, อีรีโอโครม แบลค ที, โซเดียมคลอไรด์, แคลเซียมคาร์บอเนต, เมทิลเรด, อิตีทีเอไดโซเดียมซอลท์ |
| แคลเซียม | อิตีทีเอ ไตเตรชัน | โซเดียมไฮดรอกไซด์, เมอเรกไซด์, โซเดียมคลอไรด์, แคลเซียมคาร์บอเนต, เมทิลเรด, อิตีทีเอไดโซเดียม |
| ซิลิกา | วิธีโมลิบโดซิลิเคต | โซเดียมไบคาร์บอเนต, กรดซัลฟูริก, กรดไฮโดรคลอริก, แอมโมเนียมโมลิบเดต, กรดออกซาลิก, โซเดียมเมตาซิลิเกตโมโนไฮเดรต |

ตารางที่ 14 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำบาดาล

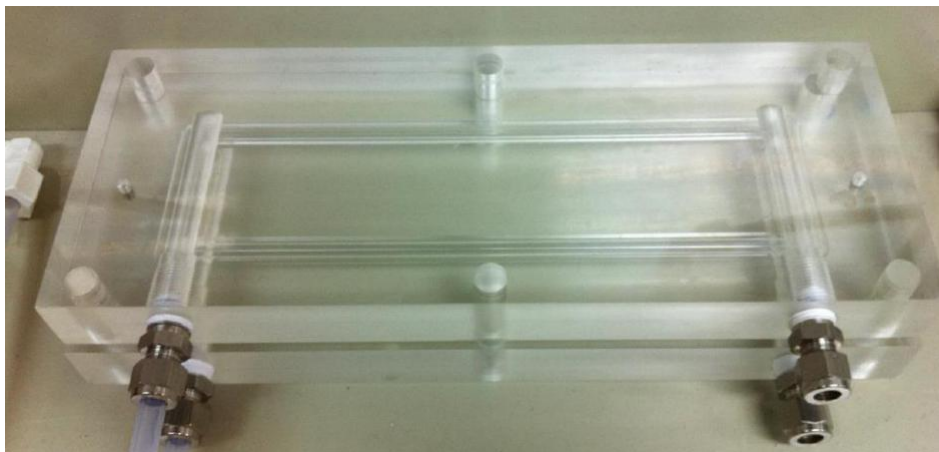
| พารามิเตอร์ | สารเคมีที่ใช้ |
|-------------|---|
| ไบคาร์บอเนต | NaHCO ₃ |
| แคลเซียม | CaCl ₂ .2H ₂ O |
| แมกนีเซียม | MgCl ₂ .6H ₂ O |
| ซิลิกา | Na ₂ SiO ₃ .9H ₂ O |
| ค่าพีเอช | NaOH, HCl |

3.2.2 ฟอรัเวิร์ดออสโมซิสเมมเบรน

ในงานวิจัยนี้แผ่นเมมเบรนที่ใช้มีลักษณะเป็นแผ่น (Flat-sheet) ทำมาจากเซลลูโลส ไตรอะซิเตต (cellulose triacetate; CTA) และมีลักษณะทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ ดังนี้

ตารางที่ 15 คุณสมบัติของเมมเบรนชนิดฟอรัเวิร์ดออสโมซิส

| | หน่วย | ลักษณะทางกายภาพและเคมี |
|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| วัสดุ | - | CTA Polymer |
| ขนาดเมมเบรน | ตารางเซนติเมตร (cm ²) | 75 |
| ช่วงค่าพีเอชในการทำงาน (pH Range) | - | 2-8 |
| เปอร์เซ็นต์การกำจัด (% Rejection) | เปอร์เซ็นต์ (%) | 99% NaCl |



รูปที่ 18 ชุดทดสอบกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

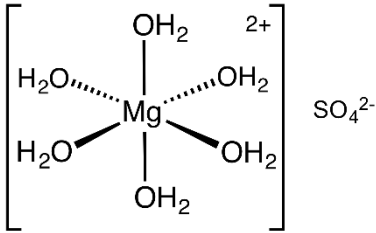
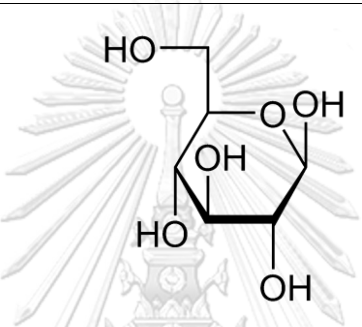
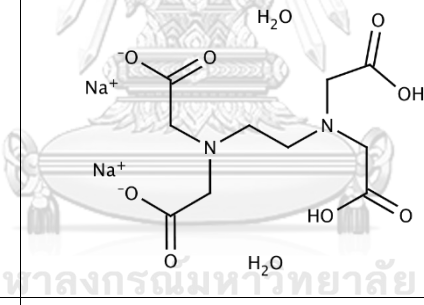
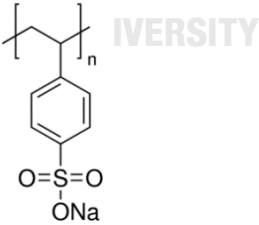
การทดลองกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส อุปกรณ์ของชุดทดสอบที่ใช้ในการเดินระบบ น้ำบาดาลสังเคราะห์และสารตั้งจากถังเก็บน้ำจะถูกสูบด้วยปั๊มรีดท่อ ซึ่งสารตั้งที่ผ่านกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสแล้ว จะถูกเก็บในถังเก็บและวัดน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกน้ำหนักของสารตั้งหลังผ่านกระบวนการ เพื่อหาค่าฟลักซ์ (Permeate Flux) โดยค่าฟลักซ์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$J = \frac{\Delta V}{A \times \Delta t} = \frac{\Delta m}{\rho \times A \times \Delta t}$$

| | | |
|-------|------------|--|
| เมื่อ | J | คือ ฟลักซ์ของน้ำสะอาด (ลบ.ม./ตร.ม.วินาที) |
| | ΔV | คือ ปริมาตรของน้ำที่เปลี่ยนแปลง (ลบ.ม.) |
| | Δt | คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลง (วินาที) |
| | Δm | คือ มวลของน้ำที่เปลี่ยนแปลง (กิโลกรัม) |
| | ρ | คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม/ลบ.ม.) |
| | A | คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศการไหลของฟลักซ์ (ตร.ม.) |

สำหรับการเตรียมแผ่นเมมเบรนที่ใช้งาน ต้องนำมาแช่น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water; DI) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อล้างสารเคมีที่อาจเคลือบมาบนผิวของเมมเบรน นอกจากนี้ในการเริ่มเดินระบบทุกครั้ง จะต้องรันเมมเบรนด้วยน้ำ DI เสียก่อน เพื่อให้เมมเบรนที่ถูกกดอัดมาพร้อมสำหรับการใช้งาน สารตั้งที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

ตารางที่ 16 สารตั้งที่ใช้ในการทดลอง

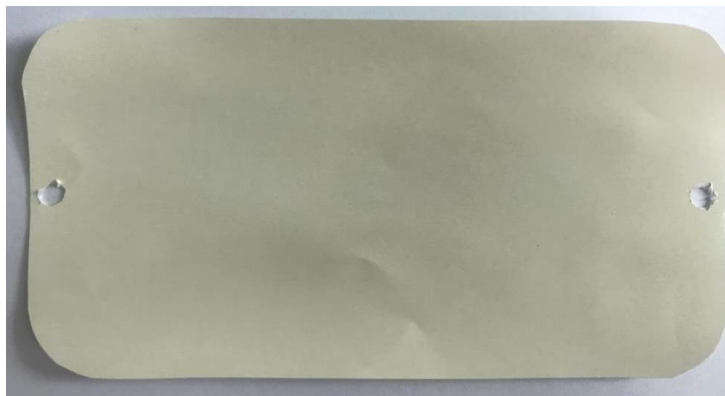
| Draw Solution | Structure | M.W. |
|--|--|----------|
| NaCl | | 58.44 |
| MgSO ₄ |  | 120.37 |
| Glucose (C ₆ H ₁₂ O ₆) |  | 180.16 |
| EDTA disodium |  | 292.24 |
| PSS (C ₈ H ₇ NaO ₃ S) _n |  | ~ 70,000 |

3.2.3 นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนและอุปกรณ์ยึดจับเมมเบรน (Test cell) ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้เมมเบรนรุ่น DK ของบริษัท GE water and process technologies จำกัด โดยเมมเบรนที่ใช้ในการทดสอบทำจากโพลีเอไมด์ (Polyamide) มีลักษณะเป็นแผ่น (Flat-sheet) และมีลักษณะทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ ดังนี้

ตารางที่ 17 คุณสมบัติของเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชัน

| | หน่วย | ลักษณะทางกายภาพและเคมี |
|---|--|--|
| บริษัทผู้ผลิต | - | GE Osmonics |
| วัสดุ | - | Polyamide TFC |
| ขนาดเมมเบรน | ตารางเซนติเมตร (cm ²) | 42 |
| Molecular-weight Cutoff (MWCO) | ดอลตัน (Daltons) หรือ กรัมต่อโมล (g/mol) | 150-300 |
| ช่วงค่าพีเอชในการทำงาน (pH Range) | - | 3-9 |
| ค่าความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability) | (ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง) ต่อบาร์ (L/m ² .h)/bar | 5.43 |
| เปอร์เซ็นต์การกำจัด (% Rejection) | เปอร์เซ็นต์ (%) | 98% MgSO ₄ |
| ความดันสูงสุดที่สามารถรับได้ (Maximum Operating Pressure) | บาร์ (bar) | 41 บาร์ ถ้าอุณหภูมิ <35°C 30 บาร์ ถ้าอุณหภูมิ >35°C |
| อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถรับได้ (Maximum Operating Temperature) | องศาเซลเซียส (°C) | 50 |
| ความทนทานต่อคลอรีน (Chlorine Tolerance) | พีพีเอ็มต่อชั่วโมง (ppm/hr) | 500 |

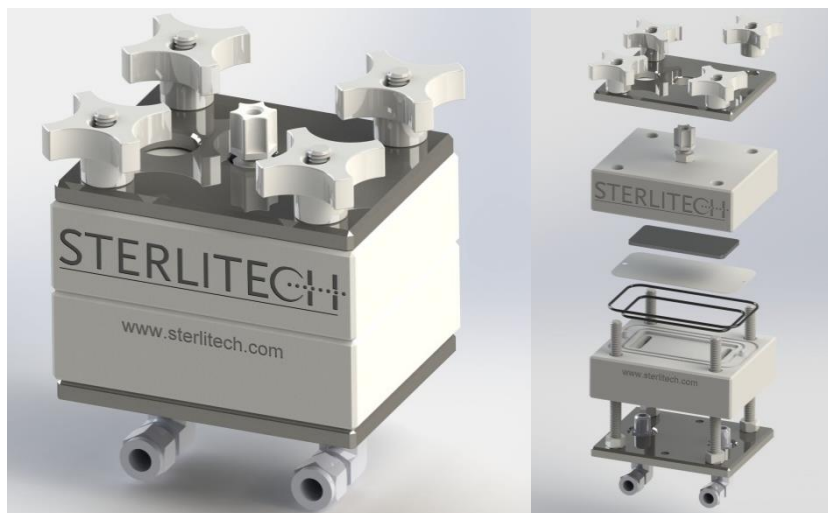


รูปที่ 19 แผ่นเมมเบรนนาโนฟิลเตรชัน

การทดลองทำในระดับห้องปฏิบัติการและมีการเดินระบบของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันแบบไหลตามขวาง (Crossflow filtration) ด้วยอุปกรณ์จับยึดเมมเบรน (Test cell) ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech

ตารางที่ 18 รายละเอียดของอุปกรณ์จับยึดเมมเบรน (Test cell) ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech

| Test cell ชนิด CF042D | หน่วย | รายละเอียด |
|--|-----------------------------------|-----------------|
| วัสดุ | - | Acetal (Delrin) |
| พื้นที่เมมเบรน (Active Membrane Area) | ตารางเซนติเมตร (cm ²) | 42 |
| ความดันสูงสุดที่สามารถรับได้ (Maximum Operating Pressure) | บาร์ (bar) | 69 |
| อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถรับได้ (Maximum Operating Temperature) | องศาเซลเซียส (°C) | 82 |



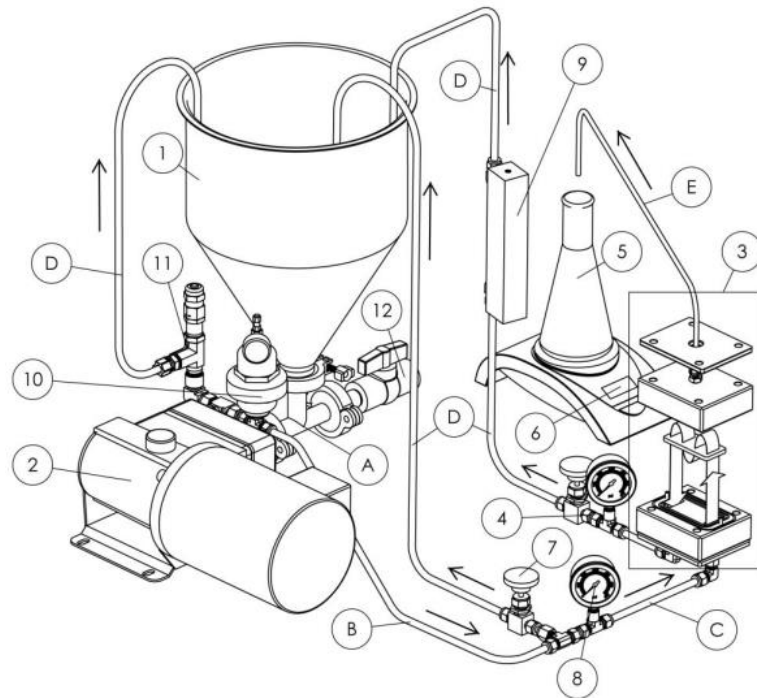
รูปที่ 20 ลักษณะของอุปกรณ์จับยึดเมมเบรน (Test cell) ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech

โดยการทดลองกระบวนการนาโนฟิลเตรชันอุปกรณ์ของชุดทดสอบที่ใช้ในการเดินระบบ น้ำจากถังเก็บน้ำจะถูกสูบด้วยปั๊ม ซึ่งสามารถปรับความดันสายน้ำเข้า (P_f) ที่วาล์วควบคุมน้ำ Bypass (Bypass Control Valve) และปรับความดันสายน้ำเข้มข้น (P_c) ที่ วาล์วควบคุมน้ำเข้มข้น (Concentrate Control Valve) ซึ่งน้ำเข้มข้นจะถูกเวียนกลับไปถังเก็บน้ำ ขณะที่น้ำสะอาดจะถูกวัดน้ำหนักของน้ำสะอาดด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกน้ำหนักของน้ำสะอาด เพื่อหาค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด (Permeate Flux)

ตารางที่ 19 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเดินระบบเมมเบรน

| หมายเลข | ชื่ออุปกรณ์ |
|---------|---|
| 1 | ถังเก็บน้ำ (Feed tank) ขนาด 5.7 ลิตร |
| 2 | ปั๊ม (Feed pump) |
| 3 | Test cell ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech |
| 4 | วาล์วควบคุมน้ำเข้มข้น (Concentrate Control Valve) |
| 5 | บีกเกอร์ (Beaker) |
| 6 | เครื่องชั่งน้ำหนักแบบไฟฟ้า (Electronic balance) |
| 7 | วาล์วควบคุมน้ำ Bypass (Bypass Control Valve) |
| 8 | เกจวัดความดันน้ำเข้มข้น (Concentrate Pressure gauge) |
| 9 | มิเตอร์วัดอัตราการไหล (Flow meter) |
| 10 | อุปกรณ์ปรับจังหวะการทำงานของปั๊ม (Pulsation Dampener) |

| หมายเลข | ชื่ออุปกรณ์ |
|---------|---|
| 11 | วาล์วระบายความดัน (Pressure relief valve) |
| 12 | วาล์วระบายน้ำจากถังเก็บน้ำ (Drain Valve) |



รูปที่ 21 แผนผังการเดินระบบเมมเบรน

3.2.4 อัดตราฟิลเตรชันเมมเบรนและอุปกรณ์ยึดจับเมมเบรน (Test cell) ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้เมมเบรนรุ่น PW ของบริษัท GE water and process technologies จำกัด โดยเมมเบรนที่ใช้ในการทดสอบทำจากโพลีอีเทอร์ซัลโฟน (Polyethersulfone) มีลักษณะเป็นแผ่น (Flat-sheet) และมีลักษณะทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ ดังนี้

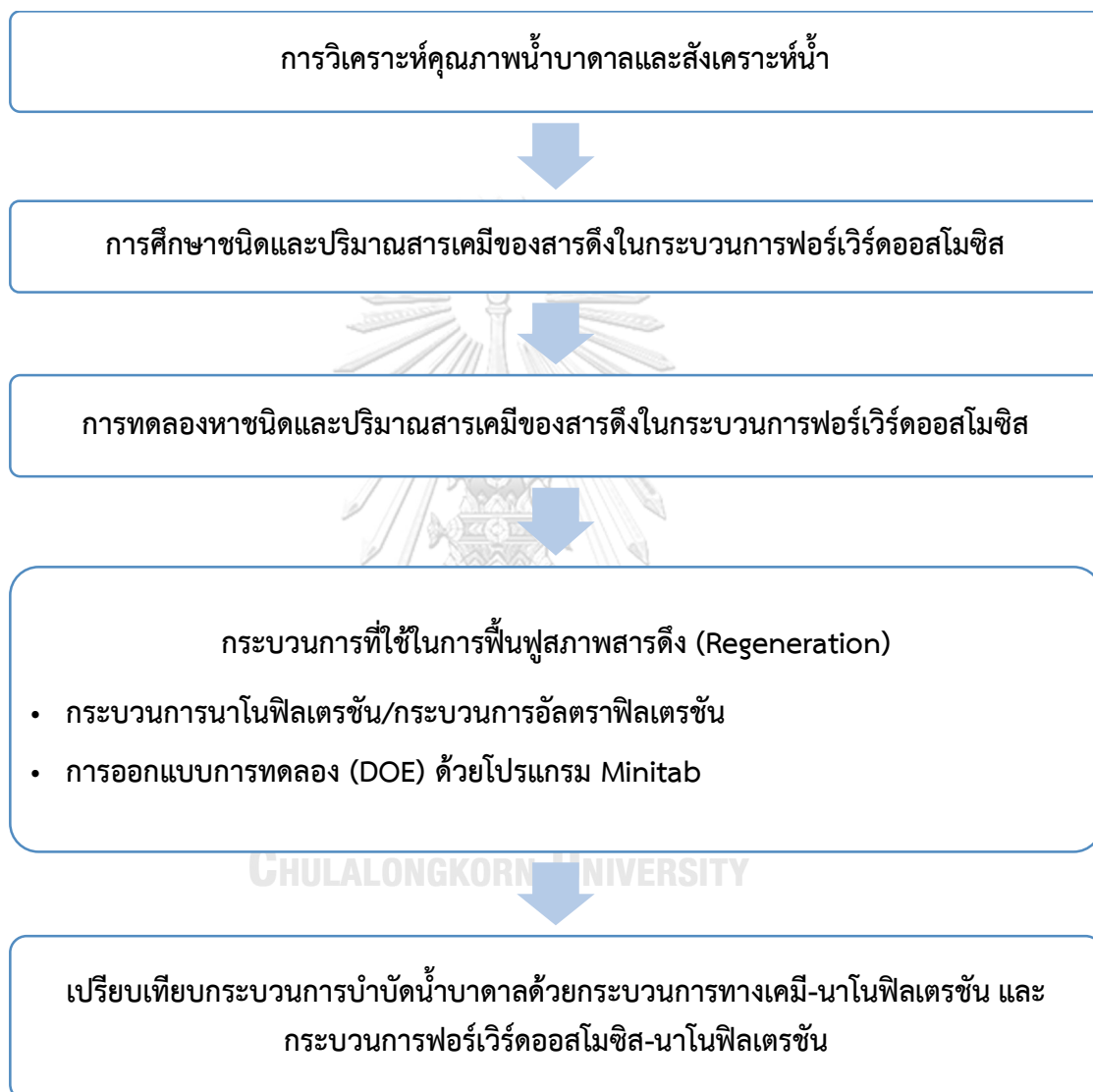
ตารางที่ 20 คุณสมบัติของเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชัน

| | หน่วย | ลักษณะทางกายภาพและเคมี |
|---|--|------------------------|
| บริษัทผู้ผลิต | - | GE Osmonics |
| วัสดุ | - | Polyethersulfone |
| ขนาดเมมเบรน | ตารางเซนติเมตร (cm ²) | 42 |
| Molecular-weight Cutoff (MWCO) | ดอลตัน (Daltons) หรือ กรัมต่อโมล (g/mol) | 20K |
| ช่วงค่าพีเอชในการทำงาน (pH Range) | - | 1-11 |
| เปอร์เซ็นต์การกำจัด (% Rejection) | เปอร์เซ็นต์ (%) | None NaCl |
| ความดันสูงสุดที่สามารถรับได้ (Maximum Operating Pressure) | บาร์ (bar) | 10 |
| อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถรับได้ (Maximum Operating Temperature) | องศาเซลเซียส (°C) | 70 |
| ความทนทานต่อคลอรีน (Chlorine Tolerance) | พีพีเอ็มต่อวัน (ppm/day) | 5000 |

การทดลองทำในระดับห้องปฏิบัติการและมีการเดินระบบของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันแบบไหลตามขวาง (Crossflow filtration) ด้วยอุปกรณ์จับยึดเมมเบรน (Test cell) ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech เช่นเดียวกับการเดินระบบนาโนฟิลเตรชัน

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำในห้องปฏิบัติการ ของภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การทดลองกระบวนการเมมเบรนจะแบ่งการทดลองออกเป็น 5 ช่วง



รูปที่ 22 ลำดับการทดลองกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-นาโนฟิลเตรชัน ทั้ง 5 ช่วง

3.3.1 การทดลองที่ 1 : การวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลและสังเคราะห์น้ำ

สังเคราะห์น้ำตัวอย่างให้มีคุณภาพน้ำเหมือนกับน้ำเข้ารีเวอร์สออสโมซิสหรือน้ำบาดาลจริง เพื่อใช้ในการทดลอง พารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ ความกระด้างทั้งหมด ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม ค่าความเป็นด่าง ปริมาณไบคาร์บอเนต ปริมาณซิลิกา และค่าพีเอชของน้ำ เป็นต้น โดยใช้น้ำปราศจากอออน (Deionized Water; DI)

3.3.2 การทดลองที่ 2 : การศึกษาชนิดและปริมาณสารเคมีของสารตั้งในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

1) ศึกษาชนิดและปริมาณสารเคมีของสารตั้งในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส ซึ่งส่งผลต่อความดันออสโมติกและฟลักซ์ขาออก โดยชนิดของสารตั้งที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) อีดีทีเอ (EDTA disodium) กลูโคส ($C_6H_{12}O_6$) และ โพลีสไตรีนซัลโฟเนต (Polystyrenesulfonate; PSS) ที่ความเข้มข้นของสารเคมี 0.2, 0.4 และ 0.6 โมลต่อลิตร เปรียบเทียบกับน้ำบาดาลสังเคราะห์

2) เลือกชนิดของสารเคมีที่ทำให้กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสมีค่าฟลักซ์มากที่สุด 3 อันดับ เพื่อใช้ในการทดลองที่ 3 ต่อไป

3.3.3 การทดลองที่ 3 : การทดลองหาชนิดและปริมาณสารเคมีของสารตั้งในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

1) เลือกใช้ชนิดของสารเคมีจากการทดลองที่ 2 สำหรับทำการทดลองกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ในกระบวนการกับฟอร์เวิร์ดออสโมซิส โดยกำหนดให้ความเร็วของปั๊มของน้ำขาเข้า (Feed Solution) และสารตั้ง (Draw Solution) เท่ากันที่ 0.38 ลิตรต่อนาที โดยค่าฟลักซ์ของสารตั้ง (Draw Solution Flux) จะถูกบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์ที่ต่อเชื่อมกับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบไฟฟ้า (Electronic balance)

2) เลือกสารตั้งที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าฟลักซ์และกระบวนการที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารตั้ง

3.3.4 การทดลองที่ 4 : กระบวนการที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารตั้ง (Regeneration)

1) ศึกษากระบวนการที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารตั้ง (Regeneration) โดยทำการทดลอง 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยเลือกพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การกำจัดอออน (% Rejection) ที่อัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) เท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 แสดงดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 การทดลองหาเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่อัตราการนำน้ำกลับคืนต่างๆ

| Recovery rate | %Rejection | |
|---------------|-----------------|----------------|
| | Ultrafiltration | Nanofiltration |
| 20 | | |
| 40 | | |
| 60 | | |
| 80 | | |

2) เลือกกระบวนการที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารตั้งที่ได้จากข้อที่ 1) มาทำการออกแบบการทดลอง (DOE) ด้วยโปรแกรม Minitab โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเดินระบบ ประกอบด้วย ความดันในการเดินระบบ ความเข้มข้นและค่าพีเอชของสารตั้ง จึงได้กำหนดเงื่อนไขในการออกแบบการทดลองของสารเคมีแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 22 ซึ่งจะได้ลำดับการทดลองตามเงื่อนไขที่กำหนดที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 23

ตารางที่ 22 เงื่อนไขในการออกแบบการทดลอง

| พารามิเตอร์ | ค่าสูงสุด | ค่าต่ำสุด |
|--------------------------|-----------|-----------|
| ความดัน (บาร์) | 10 | 4 |
| ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร) | 0.2 | 0.02 |
| ค่าพีเอช | 10 | 4 |

ตารางที่ 23 ตารางการทดลองจากการออกแบบด้วยโปรแกรม Minitab

| ลำดับ | เงื่อนไขในการเดินระบบ | | |
|-------|-----------------------|-------------|-------|
| | ความดัน | ความเข้มข้น | พีเอช |
| 1 | 4 | 0.2 | 4 |
| 2 | 10 | 0.2 | 4 |
| 3 | 10 | 0.2 | 10 |
| 4 | 7 | 0.11 | 7 |
| 5 | 7 | 0.11 | 7 |
| 6 | 4 | 0.2 | 10 |

| ลำดับ | เงื่อนไขในการเดินระบบ | | |
|-------|-----------------------|-------------|-------|
| | ความดัน | ความเข้มข้น | พีเอช |
| 7 | 7 | 0.11 | 4 |
| 8 | 10 | 0.11 | 7 |
| 9 | 10 | 0.02 | 10 |
| 10 | 4 | 0.11 | 7 |
| 11 | 4 | 0.02 | 10 |
| 12 | 7 | 0.2 | 7 |
| 13 | 7 | 0.02 | 7 |
| 14 | 7 | 0.11 | 7 |
| 15 | 7 | 0.11 | 7 |
| 16 | 10 | 0.02 | 7 |
| 17 | 7 | 0.11 | 7 |
| 18 | 4 | 0.02 | 4 |
| 19 | 7 | 0.11 | 7 |
| 20 | 7 | 0.11 | 10 |

3.3.5 การทดลองที่ 5 : เปรียบเทียบกระบวนการบำบัดน้ำบาดาลด้วยกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-นาโนฟิลเตรชัน/อัลตราฟิลเตรชัน

1) เปรียบเทียบกระบวนการบำบัดน้ำบาดาลด้วยกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-นาโนฟิลเตรชัน/อัลตราฟิลเตรชัน โดยพิจารณาคุณภาพน้ำสะอาดสำหรับใช้เป็นน้ำทดแทนของระบบหล่อเย็น และค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด

2) เสนอแนะกระบวนการบำบัดน้ำขั้นต้นเพื่อผลิตน้ำทดแทนในระบบหล่อเย็น สำหรับโรงงานผลิตเอทานอลที่สนับสนุนข้อมูลงานวิจัย โดยพิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากข้อที่ 1

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลจริงและสังเคราะห์น้ำบาดาลเพื่อใช้ในการทดลอง

จากผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลจริงก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของโรงงานผลิตเอทานอล กล่าวคือเป็นน้ำบาดาลจริงที่ผ่านกระบวนการกรอง (Filtration) ในการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว ซึ่งจะเป็นคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้อ้างอิงในการสังเคราะห์น้ำบาดาล เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับระบบหล่อเย็นของ The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRA) ดังตารางที่ 24 พบว่าค่าความกระด้างทั้งหมด แคลเซียม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความเป็นด่างมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าน้ำที่ผ่านแค่กระบวนการกรองในขั้นต้นไม่สามารถนำมาใช้เป็นน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นหรือหม้อไอน้ำได้ จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้

ตารางที่ 24 มาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับระบบหล่อเย็นของ The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRA) และคุณภาพน้ำบาดาลจริงก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส

| พารามิเตอร์ | หน่วย | JRA Cooling water standard | | น้ำบาดาลจริงก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส |
|--------------------------|-------------------|---|-----------------------------|---|
| | | น้ำทดแทนหรือน้ำที่เข้าสู่ระบบน้ำหล่อเย็น (Makeup Water) | น้ำหล่อเย็น (Cooling Water) | |
| ค่าพีเอช (ที่ 25°C) | - | 6.0 – 8.0 | 6.5-8.2 | 7.7 |
| ค่าการนำไฟฟ้า (ที่ 25°C) | ไมโครซีเมนต์/ ซม. | น้อยกว่า 300 | น้อยกว่า 800 | 698 |
| คลอไรด์ | มก./ล. | น้อยกว่า 50 | น้อยกว่า 200 | 48.5 |

| พารามิเตอร์ | หน่วย | JRA Cooling water standard | | น้ำบาดาลจริงก่อน เข้ากระบวนการ รีเวอร์สออสโมซิส |
|--------------------------------|----------------------------|--|-----------------------------------|---|
| | | น้ำทดแทนหรือน้ำ ที่เข้าสู่ระบบน้ำ หล่อเย็น (Makeup Water) | น้ำหล่อเย็น (Cooling Water) | |
| ซัลเฟต | มก./ล. | น้อยกว่า 50 | น้อยกว่า 200 | - |
| ความเป็นด่าง (M alkalinity) | มก./ล. ในเทอม ของหินปูน | น้อยกว่า 50 | น้อยกว่า 100 | 276 |
| ความกระด้าง ทั้งหมด | มก./ล. ในเทอม ของหินปูน | น้อยกว่า 50 | น้อยกว่า 200 | 216 |
| แคลเซียม | มก./ล. ในเทอม ของหินปูน | น้อยกว่า 50 | น้อยกว่า 150 | 132 |
| เหล็ก | มก./ล. | น้อยกว่า 0.3 | น้อยกว่า 1.0 | 0.1 |
| ทองแดง | มก./ล. | น้อยกว่า 0.3 | น้อยกว่า 1.0 | - |
| ซัลไฟด์ | มก./ล. | วัดไม่พบ | วัดไม่พบ | - |
| แอมโมเนียม | มก./ล. | น้อยกว่า 1.0 | น้อยกว่า 1.0 | - |
| ซิลิกา | มก./ล. | น้อยกว่า 30 | น้อยกว่า 50 | 26.5 |
| คลอรีนที่เหลือ | มก./ล. | น้อยกว่า 0.3 | น้อยกว่า 0.3 | วัดไม่พบ |
| คาร์บอนไดออกไซด์ อิสระ | มก./ล. | น้อยกว่า 4.0 | น้อยกว่า 4.0 | - |

ในการทดลองกระบวนการบำบัดน้ำบาดาล จะใช้น้ำบาดาลสังเคราะห์ในการทดลอง เนื่องจากคุณภาพน้ำที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าคงที่มากกว่าการใช้น้ำบาดาลจริง พารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ ความกระด้างทั้งหมด ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม ค่าความเป็นด่าง ปริมาณไบคาร์บอเนต ปริมาณซิลิกา และค่าพีเอชของน้ำ ทำการสังเคราะห์น้ำให้มีคุณภาพน้ำใกล้เคียงกับน้ำบาดาลจริงก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของระบบผลิตน้ำทดแทน โดยสารเคมีที่ใช้ใน

การสังเคราะห์น้ำ ประกอบด้วย โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) โซเดียมเมตาซิลิเกต (Na_2SiO_3) ทำการเติมสารเคมีทั้งหมดลงในน้ำปราศจากอ็อกซิเจน (DI Water) และปรับค่าพีเอชน้ำด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดังกล่าวคุณภาพน้ำ ซึ่งปริมาณของสารเคมีที่ใช้จะแสดงในตารางที่ 25

ตารางที่ 25 สารเคมี และปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำบาดาล

| พารามิเตอร์ | สารเคมีที่ใช้ | ปริมาณสาร (mg) | คุณภาพน้ำ บาดาลสังเคราะห์ | คุณภาพน้ำบาดาลก่อนเข้ากระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส |
|-------------|---|----------------|--------------------------------|---|
| ไบคาร์บอเนต | NaHCO_3 | 463.75 | 216.56 mg/L as CaCO_3 | 216 mg/L as CaCO_3 |
| แคลเซียม | $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 194 | 132.89 mg/L as CaCO_3 | 132 mg/L as CaCO_3 |
| แมกนีเซียม | $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 170.75 | 83.44 mg/L as CaCO_3 | 84 mg/L as CaCO_3 |
| ซิลิกา | $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ | 125.35 | 26.3 mg/L as SiO_2 | 26.5 mg/L as SiO_2 |
| พีเอช | NaOH, HCl | | 7.82 | 7.7 |

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่าคุณภาพน้ำสังเคราะห์ที่ได้ใกล้เคียงกับคุณภาพน้ำบาดาลตัวอย่างก่อนเข้ากระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส สามารถนำมาใช้ในการทดลองแทนการนำน้ำบาดาลจริงมาใช้ได้ เพื่อความสะดวกในการทำการทดลองและได้คุณภาพน้ำที่คงที่มากกว่าการใช้น้ำบาดาลจริง

กระบวนการกำจัดความกระด้างโดยทั่วไปมักนิยมใช้กระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาว ซึ่งประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ขึ้นกับปริมาณปูนขาวที่ใช้ และจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อค่าพีเอชเป็นด่าง (อยู่ในช่วง 10.6-11.0) เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)_2) อย่างไรก็ตามการบำบัดความกระด้างด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดในการใช้ เนื่องจากในกระบวนการเติมสารเคมีจะประกอบไปด้วยถังกวนเร็ว ถังกวนช้า และถังตกตะกอน ซึ่งเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่หากเทียบกับกระบวนการอื่นๆ นอกจากนี้ยังเกิดของเสีย

ในระบบคือตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และน้ำที่ได้หลังจากกระบวนการนี้จะมีค่าพีเอชสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับใช้เป็นน้ำทดแทนในระบบหล่อเย็น ซึ่งมาตรฐานพีเอชของน้ำทดแทนจะต้องมีค่า 6.0-8.0 จึงจำเป็นต้องมีการปรับพีเอชลง

4.2 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณสารเคมีของสารตั้งในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

ในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส ความแตกต่างของความดันออสโมติกระหว่างน้ำบาดาลและสารตั้งเป็นแรงขับในกระบวนการนี้ โดยการหาค่าความดันออสโมติกของของเหลวใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการของแวนต์ฮอฟ (van't Hoff's Law) (Zhang, Han, Li, Wan, & Chung, 2016) คือ

$$\Pi = i\phi MRT$$

| | | |
|-----|--------|--|
| โดย | Π | คือค่าความดันออสโมติก มีหน่วยเป็น บรรยากาศ |
| | i | คือค่าแวนต์ฮอฟแฟกเตอร์ ไม่มีหน่วย |
| | ϕ | คือ ค่าสัมประสิทธิ์การออสโมซิส ไม่มีหน่วย |
| | M | คือ ค่าความเข้มข้น มีหน่วยเป็นโมลต่อลิตร |
| | R | คือ ค่าคงที่ของแก๊ส มีหน่วยเป็น ลิตร บรรยากาศ โมล ⁻¹ .เคลวิน ⁻¹ มีค่าเท่ากับ 0.082 |
| | T | คืออุณหภูมิ มีหน่วยเป็นเคลวิน |

4.2.1 ความดันออสโมติกของน้ำบาดาลสังเคราะห์

จากสมการของแวนต์ฮอฟที่กล่าวมาในข้างต้น ค่าสัมประสิทธิ์การออสโมซิสของน้ำบาดาลจะมีค่าเท่ากับ 0.93 (Burn & Gray, 2015) และความเข้มข้นในที่นี้คือความเข้มข้นของไอออนในน้ำ ได้แก่ ไบคาร์บอเนต แคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟต เมื่อทำการเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นของไอออนในน้ำบาดาลสังเคราะห์แล้ว จะได้ความเข้มข้นในหน่วยโมลต่อลิตร ของไอออนต่างๆดังนี้

ตารางที่ 26 ความเข้มข้นของไอออนในน้ำบาดาลสังเคราะห์

| พารามิเตอร์ | ความเข้มข้น | ความเข้มข้น(โมล/ลิตร) |
|-------------|----------------------------------|-------------------------|
| ไบคาร์บอเนต | 216.56 mg/L as CaCO ₃ | 5.52 x 10 ⁻³ |
| แคลเซียม | 132.89 mg/L as CaCO ₃ | 1.32 x 10 ⁻³ |

| พารามิเตอร์ | ความเข้มข้น | ความเข้มข้น(โมล/ลิตร) |
|-------------|---------------------------------|-----------------------|
| แมกนีเซียม | 83.44 mg/L as CaCO ₃ | 0.84×10^{-3} |
| ซิลิกา | 26.3 mg/L as SiO ₂ | 0.94×10^{-3} |

ดังนั้นเมื่อคิดที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ความดันออสโมติกของน้ำบาดาลจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \Pi &= 1 \times 0.93 \times (5.52 + 1.32 + 0.84 + 0.94) \times 10^{-3} \times 0.082 \times (273 + 25) \\ &= 0.193 \text{ บรรยากาศ (0.196 บาร์)} \end{aligned}$$

4.2.2 ความดันออสโมติกของสารตั้งแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่างๆที่อุณหภูมิห้อง

จากสมการของแวนต์ฮอฟฟ์ ความดันออสโมติกของสารตั้งแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่างๆที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าดังนี้

ตารางที่ 27 ความดันออสโมติกที่ได้จากการคำนวณ

| ชนิดของสารตั้ง | ค่าแวนต์ฮอฟฟ์แฟกเตอร์ | ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร) | ความดันออสโมติก (บรรยากาศ) | ความดันออสโมติก (บาร์) |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------|
| NaCl | 2 | 0.20 | 9.774 | 9.903 |
| | | 0.40 | 19.548 | 19.807 |
| | | 0.60 | 29.323 | 29.712 |
| MgSO ₄ | 2 | 0.20 | 9.774 | 9.903 |
| | | 0.40 | 19.548 | 19.807 |
| | | 0.60 | 29.323 | 29.712 |
| EDTA disodium | 1 | 0.20 | 4.691 | 4.753 |
| | | 0.40 | 9.578 | 9.705 |
| | | 0.60 | 14.466 | 14.658 |
| Glucose | 1 | 0.20 | 4.691 | 4.753 |
| | | 0.40 | 9.578 | 9.705 |
| | | 0.60 | 14.466 | 14.658 |

| ชนิดของสารตั้ง | ค่าแวนต์ฮอฟฟ์แฟกเตอร์ | ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร) | ความดันออสโมติก (บรรยากาศ) | ความดันออสโมติก (บาร์) |
|----------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------|
| PSS | 1 | 0.20 | 4.691 | 4.753 |
| | | 0.40 | 9.578 | 9.705 |
| | | 0.60 | 14.466 | 14.658 |

จะเห็นได้ว่าความดันออสโมติกของสารทั้ง 5 ชนิดจากการคำนวณมีค่าเหมือนและต่างกัน คือ สารตั้งชนิดโซเดียมคลอไรด์และแมกนีเซียมซัลเฟตให้ค่าที่เท่ากัน เนื่องจากคิดที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิเดียวกัน อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกับความดันออสโมติกคือค่าแวนต์ฮอฟฟ์แฟกเตอร์ หรือจำนวนอออนที่แตกตัวของตัวถูกละลาย ซึ่งโซเดียมคลอไรด์และแมกนีเซียมซัลเฟต เมื่อแตกตัวแล้วจะให้จำนวนอออนที่เท่ากัน ในขณะที่สารชนิดอื่นไม่สามารถแตกตัวได้ทำให้มีค่าแวนต์ฮอฟฟ์แฟกเตอร์เท่ากับ 1 นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้ง ความดันออสโมติกของสารตั้งนั้นๆจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเช่นกัน

4.2.3 ค่าฟลักซ์ของสารตั้ง

จากการคำนวณความดันออสโมติกของน้ำบาดาลสังเคราะห์และสารตั้งชนิดต่างๆ ก่อนหน้านี้สามารถนำมาคำนวณค่าฟลักซ์โดยใช้สมการด้านล่างนี้ คือ

$$J = A_m(\Delta\Pi)$$

โดย J คือ ค่าฟลักซ์ มีหน่วยเป็น ลิตรต่อตารางเมตร² ชั่วโมง
 A_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของแผ่นเมมเบรน มีหน่วยเป็น ลิตรต่อตารางเมตร² ชั่วโมง บาร์ (L m⁻² hr⁻¹ bar⁻¹; LMH/bar)

$\Delta\Pi$ คือ ความแตกต่างของความดันออสโมติกระหว่างสารขาเข้าและสารตั้ง มีหน่วยเป็น บาร์

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านของแผ่นพอร์เวอไรต์ออสโมซิสเมมเบรนชนิดCTA มีค่าเท่ากับ 0.2 ลิตรต่อตารางเมตร ชั่วโมง บาร์ (Kim, Gwak, & Hong, 2017) ดังนั้นค่าฟลักซ์ที่ได้จากสารตั้งชนิดต่างๆจะเป็นดังตารางที่ 28

ตารางที่ 28 ค่าฟลักซ์ของน้ำที่ได้จากการคำนวณ

| ชนิดของสารตั้ง | ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร) | ความดันออสโมติก (บาร์) | $\Delta\Pi$ | ค่าฟลักซ์ (LMH) |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|-----------------|
| NaCl | 0.20 | 9.903 | 9.707 | 1.941 |
| | 0.40 | 19.807 | 19.611 | 3.922 |
| | 0.60 | 29.712 | 29.516 | 5.903 |
| MgSO ₄ | 0.20 | 9.903 | 9.707 | 1.941 |
| | 0.40 | 19.807 | 19.611 | 3.922 |
| | 0.60 | 29.712 | 29.516 | 5.903 |
| EDTA disodium | 0.20 | 4.753 | 4.557 | 0.911 |
| | 0.40 | 9.705 | 9.509 | 1.902 |
| | 0.60 | 14.658 | 14.462 | 2.892 |
| Glucose | 0.20 | 4.753 | 4.557 | 0.911 |
| | 0.40 | 9.705 | 9.509 | 1.902 |
| | 0.60 | 14.658 | 14.462 | 2.892 |
| PSS | 0.20 | 4.753 | 4.557 | 0.911 |
| | 0.40 | 9.705 | 9.509 | 1.902 |
| | 0.60 | 14.658 | 14.462 | 2.892 |

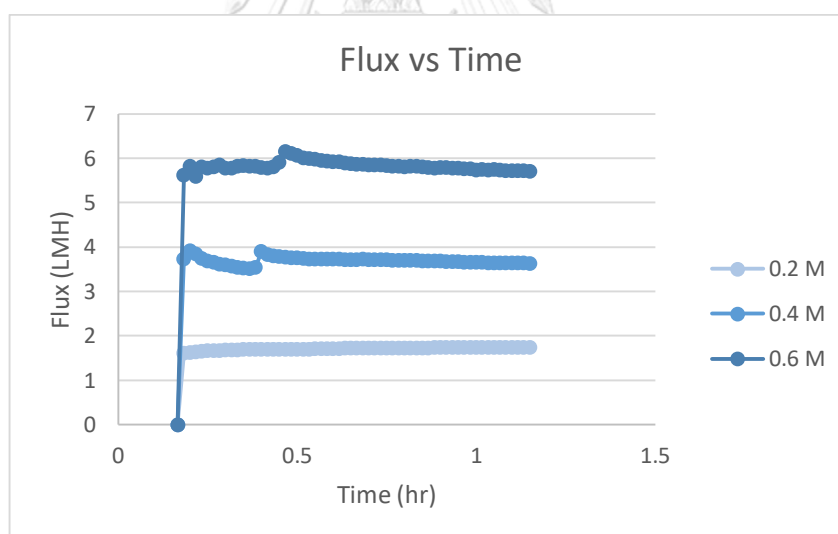
ค่าฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณข้างต้นพบว่าสารตั้งชนิดโซเดียมคลอไรด์และแมกนีเซียมซัลเฟตมีแนวโน้มให้ค่าฟลักซ์ที่เท่ากันและมากที่สุดที่ 5.903 ลิตรต่อตารางเมตร ชั่วโมง เนื่องจากโซเดียมคลอไรด์และแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าความดันออสโมติกเท่ากัน ส่งผลให้ความต่างของความดันออสโมติกมีค่าเท่ากันด้วย และหากจะพิจารณาที่สารตั้งแต่ละชนิดพบว่า เมื่อสารตั้งมีความเข้มข้นมากขึ้น ค่าฟลักซ์ที่ได้สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

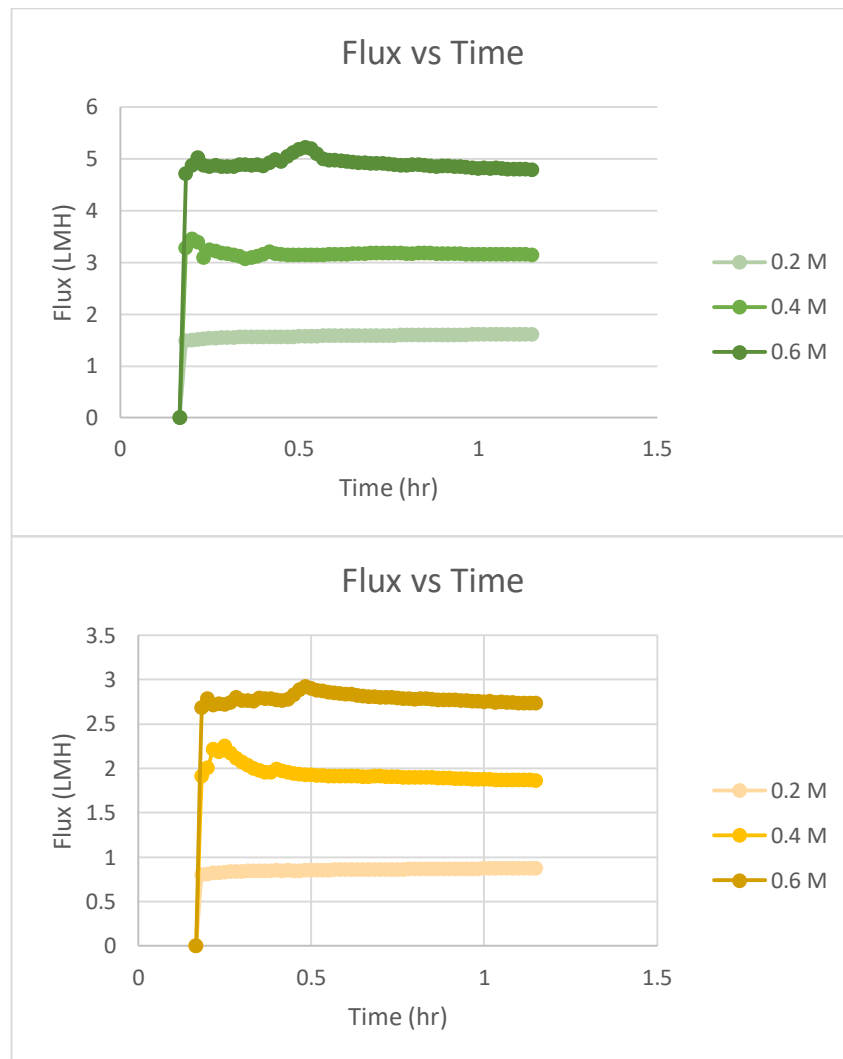
อย่างไรก็ตามการหาค่าฟลักซ์จากการคำนวณนั้น ยังไม่ใช่ค่าฟลักซ์ที่ได้จริงๆ เนื่องจากในการเดินระบบนั้นยังมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลกระทบต่อค่าฟลักซ์อีกด้วย ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกสารตั้งมา 3 ชนิดจากทั้งหมด 5 ชนิดที่มีแนวโน้มที่จะได้ค่าฟลักซ์ที่สูง มาทำการทดลอง เพื่อหาค่าฟลักซ์จากการเดินระบบ โดยผู้วิจัยได้เลือกสารตั้งดังนี้คือ สารตั้งชนิดโซเดียมคลอไรด์และแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากค่าฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงที่สุด และได้เลือกสารตั้งชนิดที่ดีเพื่อ

มาใช้อีกชนิดหนึ่ง เนื่องจากกลูโคสเป็นสารอินทรีย์ มีแนวโน้มที่ก่อให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ และส่งผลกระทบต่อผิวเมมเบรนเมื่อใช้เป็นระยะเวลาเวลานาน ในขณะที่โพลีไสตริลซัลโฟเนตเป็นโพลีเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ เมื่อนำมาใช้ในการทดลองกับแผ่นเมมเบรนชนิดพอร์เวิร์ดออสโมซิสซึ่งมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย $1\mu\text{m}$ จะทำให้แผ่นเมมเบรนเกิดการอุดตันได้ง่าย

4.3 การทดลองหาค่าฟลักซ์จากกระบวนการพอร์เวิร์ดออสโมซิส

เมื่อได้สารตั้งมาทำการทดลองแล้ว ทางผู้วิจัยได้ทดลองนำสารตั้งทั้ง 3 ชนิดมาผ่านกระบวนการพอร์เวิร์ดออสโมซิสโดยใช้ความเข้มข้นที่ 0.2, 0.4 และ 0.6 โมลต่อลิตร โดยกำหนดให้ความเร็วของปั๊มของสารขาเข้า (Feed Solution) และสารดึง (Draw Solution) เท่ากันที่ 0.38 ลิตรต่อนาที (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ 3.1 มิลลิเมตร) โดยค่าฟลักซ์ของสารดึง (Draw Solution Flux) วัดน้ำหนักรของสารดึงที่ผ่านกระบวนการแล้วด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบไฟฟ้า ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกน้ำหนักของสารดึง และนำค่าน้ำหนักที่ได้มาคำนวณค่าฟลักซ์ที่เวลาใดๆ พร้อมสร้างกราฟค่าฟลักซ์ที่ได้เทียบกับเวลา ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 23





รูปที่ 23 ฟลักซ์ของน้ำเมื่อใช้สารตั้ง a) NaCl b) MgSO4 c) EDTA ที่แต่ละความเข้มข้น

จากรูปที่ 23 แสดงให้เห็นค่าฟลักซ์ของน้ำเมื่อใช้สารตั้งต่างชนิดและต่างความเข้มข้นที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้ง ค่าฟลักซ์ที่ได้จะสูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย(สารตั้ง)ที่มากขึ้น จะทำให้ความดันออสโมติกของสารนั้นๆมีค่าสูงขึ้นด้วย เมื่อความดันออสโมติกของสารตั้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแตกต่างของความดันออสโมติกระหว่างน้ำบาดาลสังเคราะห์และสารตั้งจึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ค่าฟลักซ์ที่ได้จึงมีค่าสูงขึ้น โดยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ให้ฟลักซ์มากที่สุดที่ 5.74 ลิตรต่อตารางเมตร ชั่วโมง เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นเดียวกันจะพบว่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์ให้ค่าฟลักซ์ที่มากกว่าแมกนีเซียมซัลเฟตและอีดีทีเอ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มากกว่า

และจากกราฟที่ได้ จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงค่าฟลักซ์ที่ได้จะเริ่มคงที่ ซึ่งค่าฟลักซ์ที่ได้นี้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณในผลการทดลองก่อนหน้านี้ ผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 29

ตารางที่ 29 ค่าฟลักซ์ของน้ำที่ได้จากการทดลองด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

| ชนิดของสาร ตั้ง | ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร) | $J_w = A_m(P_{DS} - P_{GW})$ | J_w |
|--------------------|-----------------------------|------------------------------|-------|
| NaCl | 0.20 | 1.98 | 1.74 |
| | 0.40 | 3.96 | 3.66 |
| | 0.60 | 5.94 | 5.74 |
| MgSO ₄ | 0.20 | 1.98 | 1.61 |
| | 0.40 | 3.96 | 3.16 |
| | 0.60 | 5.94 | 4.82 |
| EDTA disodium | 0.20 | 0.91 | 0.87 |
| | 0.40 | 1.90 | 1.88 |
| | 0.60 | 2.89 | 2.75 |

จะเห็นได้ว่าค่าฟลักซ์ของน้ำที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีค่าต่างกัน โดยค่าที่ได้จากการทดลองจะมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากในการทดลองนั้นยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลกับค่าฟลักซ์ของน้ำลดลงคือ ผลของการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration polarization; CP) และ ฟาวลิง โดยเป็นปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน อาจอธิบายได้ในเทอมของฟาวลิงที่สามารถผันกลับได้ จะเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายที่มีขนาดโมเลกุลต่างๆกัน ถูกพาเข้าสู่ผิวหน้าเมมเบรน ตัวถูกละลายขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนของเมมเบรน จะถูกสะสมและกักอยู่ใกล้หรือบนผิวเมมเบรน ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเมมเบรนสูงกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป ตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเมมเบรนจึงเกิดการแพร่กลับ เนื่องจากผลต่างของความเข้มข้น หากความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเมมเบรนมีค่าสูงถึงขีดจำกัดการแพร่กลับของสารนั้นๆ

ตัวถูกละลายอาจเกิดลักษณะคล้ายเจลหรือชั้นเค้กชั้นเคลือบคลุมผิวเมมเบรน มีลักษณะคล้ายเมมเบรนอีกชั้นหนึ่งและทำให้ความต้านทานการไหลของตัวถูกละลายสูงขึ้น ส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าลดลง ในขณะที่ฟาวลิงเป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคมีการสะสมและอุดตันของตัวถูกละลายทั้งที่ผิวหน้าและภายในรูพรุนของเมมเบรนและไม่สามารถผันกลับได้ ส่งผลให้เมมเบรนมีรูพรุนเล็กลง การเกิดฟาวลิงส่งผลต่อฟลักซ์คล้ายคลึงกันกับการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน โดยส่วนใหญ่ฟาวลิงเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการเมมเบรนเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ลดลง และไม่สามารถใช้วิธีปรับสภาวะในการเดินระบบเพื่อลดฟาวลิงได้

นอกจากนี้สภาวะในการเดินระบบก็ส่งผลกับค่าฟลักซ์และการเกิดฟาวลิงด้วยเช่นกัน ได้แก่ อุณหภูมิ และอัตราการไหล ซึ่งผลของอุณหภูมิที่ลดลง ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงเช่นเดียวกัน และอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้สารละลายเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน การเคลื่อนที่ในลักษณะนี้จะมีแรงเฉือนที่สูงทำให้การแพร่กลับของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนมีมากขึ้น การสะสมของอนุภาคจึงลดลง

ทั้งนี้ในการเลือกสารตั้งที่จะนำมาใช้ในกระบวนการบำบัด ไม่สามารถพิจารณาเพียงการทดลองหาค่าฟลักซ์ที่ได้จากกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเท่านั้น เพราะสารตั้งทุกชนิดที่มีความดันออสโมติกมากกว่าน้ำบาดาลสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งได้ทุกชนิด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาชนิดของสารตั้งที่เหมาะสมกับกระบวนการฟื้นฟูสารตั้งด้วยอีกปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากการใช้ประโยชน์จากกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส จำเป็นจะต้องมีกระบวนการในการฟื้นฟูสภาพของสารตั้ง เพื่อให้ได้สารตั้งที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ ในขณะเดียวกันก็ได้น้ำสะอาด สำหรับนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ในการพิจารณาเลือกกระบวนการที่ใช้ นอกจากฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ได้ เปรอร์เซ็นต์การกำจัดและอัตราการนำน้ำกลับคืนยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณา

4.4 กระบวนการฟื้นฟูสภาพโดยนาโนฟิลเตรชัน/อัลตราฟิลเตรชัน

4.4.1 การเลือกกระบวนการฟื้นฟูสภาพ

ในการเลือกกระบวนการฟื้นฟูสภาพ สิ่งหนึ่งที่เป็นปัจจัยในการเลือก นอกจากพลั๊กซ์ของน้ำแล้ว ก็คือเปอร์เซ็นต์การกำจัดและอัตราการนำน้ำกลับคืน ทางผู้วิจัยได้เลือกสารตั้งชนิดแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร มาทำการทดลองผ่านเมมเบรนทั้ง 2 ชนิดคือนาโนฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันโดยการเดินระบบที่ความดัน 7 บาร์ วัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ของสารละลายในถังกักเก็บ และน้ำเพอมีเอตที่อัตราการนำน้ำกลับคืนที่ 20, 40, 60 และ 80 เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การกำจัด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\% \text{ Rejection} = [(C_f - C_p) / C_f] \times 100$$

โดย C_f คือ ความเข้มข้นของน้ำขาเข้า
 C_p คือ ความเข้มข้นของน้ำเพอมีเอต

ตารางที่ 30 เปอร์เซนต์การกำจัดที่อัตราการนำน้ำกลับคืนต่างๆของเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด

| Recovery rate | %Rejection | |
|---------------|-----------------|----------------|
| | Ultrafiltration | Nanofiltration |
| 20 | 81.24 | 94.12 |
| 40 | 80.72 | 93.51 |
| 60 | 78.52 | 91.28 |
| 80 | 74.92 | 87.39 |

จากตารางที่ 30 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดของเมมเบรนทั้ง 2 ชนิดจะเห็นได้ว่าที่อัตราการนำน้ำกลับคืนต่างๆ แผ่นเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันจะให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดที่สูงกว่าแผ่นเมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชัน ดังนั้นในการเลือกกระบวนการฟื้นฟูสภาพของสารตั้ง ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้เมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันมาใช้

4.4.2 การวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab

การออกแบบการทดลอง (DOE) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาผลกระทบจากหลายๆ ปัจจัยที่ส่งผลพร้อมๆ กันต่อตัวแปรตอบสนอง (Response) ที่เราสนใจ แบบการทดลองจะประกอบด้วยชุดของการทดลองหรือรายการทดสอบที่มีเป้าหมายในการศึกษาการเปลี่ยนระดับปัจจัยเพื่อบันทึกค่าตอบสนองที่แต่ละรายการทดสอบ (Run)

โปรแกรม Minitab สามารถออกแบบการทดลองได้ 4 ประเภท คือ Factorial, Response Surface, Mixture และ Taguchi โดยสามารถสร้างแบบการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง สร้างกราฟ เมื่อได้ทำการทดลองและป้อนผลการทดลองเข้าไปในโปรแกรมแล้ว Minitab ก็จะสามารถวิเคราะห์การทดลองตลอดจนสร้างกราฟในหลากหลายรูปแบบ โดยคำสั่ง DOE ใน Minitab ประกอบด้วย

- 1) การทดลองแบบต่างๆ ให้เลือกเพื่อช่วยให้การสร้างแบบการทดลองทำได้ง่ายและ สะดวก
- 2) การสร้างและจัดเก็บการทดลองอย่างอัตโนมัติ หลังจากได้เลือกรูปแบบการทดลอง พร้อมทั้งระบุข้อมูลที่จำเป็นแล้ว
- 3) สามารถแสดงและจัดเก็บ ค่าสถิติที่ใช้ในการบ่งชี้เพื่อช่วยในการแปลผลการทดลอง
- 4) กราฟที่ช่วยในการแปลผลและนำเสนอผลการทดลอง
- 5) เมื่อทำการสร้างและเก็บข้อมูลตามแบบการทดลองแล้วโปรแกรม Minitab จะสามารถหาโมเดลและสร้างกราฟเพื่อใช้ในการประเมินอิทธิพลของปัจจัย โดยพิจารณาผลจากโมเดลและกราฟที่ได้เพื่อที่จะดูว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลบ้าง

4.4.2.1 ผลการทดลองด้วยสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

เมื่อทำการทดลองด้วยสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตตามเงื่อนไขในการเดินระบบ จากการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab ผลของตัวแปรตอบสนอง (Response) เป็นดังตารางที่ 31

ตารางที่ 31 ตารางการทดลองการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

| ลำดับ | เงื่อนไขในการเดินระบบ | | | ตัวแปรตอบสนอง | | |
|-------|-----------------------|-------------|-------|---------------|------------------|------------------|
| | ความดัน | ความเข้มข้น | พีเอช | ฟลักซ์ | Ca ²⁺ | Si ²⁺ |
| 1 | 4 | 0.2 | 4 | 0.00009969 | nil | nil |
| 2 | 10 | 0.2 | 4 | 0.00029389 | nil | nil |

| ลำดับ | เงื่อนไขในการเดินระบบ | | | ตัวแปรตอบสนอง | | |
|-------|-----------------------|-------------|-------|---------------|------------------|------------------|
| | ความดัน | ความเข้มข้น | พีเอช | ฟลักซ์ | Ca ²⁺ | Si ²⁺ |
| 3 | 10 | 0.2 | 10 | 0.00018648 | nil | nil |
| 4 | 7 | 0.11 | 7 | 0.00027897 | nil | nil |
| 5 | 7 | 0.11 | 7 | 0.00025809 | nil | nil |
| 6 | 4 | 0.2 | 10 | 0.00003580 | nil | nil |
| 7 | 7 | 0.11 | 4 | 0.00023422 | nil | nil |
| 8 | 10 | 0.11 | 7 | 0.00039832 | nil | nil |
| 9 | 10 | 0.02 | 10 | 0.00108632 | nil | nil |
| 10 | 4 | 0.11 | 7 | 0.00457533 | nil | nil |
| 11 | 4 | 0.02 | 10 | 0.00036850 | nil | nil |
| 12 | 7 | 0.2 | 7 | 0.00025809 | nil | nil |
| 13 | 7 | 0.02 | 7 | 0.00076083 | nil | nil |
| 14 | 7 | 0.11 | 7 | 0.00027897 | nil | nil |
| 15 | 7 | 0.11 | 7 | 0.00025809 | nil | nil |
| 16 | 10 | 0.02 | 7 | 0.00108632 | nil | nil |
| 17 | 7 | 0.11 | 7 | 0.00025809 | nil | nil |
| 18 | 4 | 0.02 | 4 | 0.00036850 | nil | nil |
| 19 | 7 | 0.11 | 7 | 0.00025809 | nil | nil |
| 20 | 7 | 0.11 | 10 | 0.00025809 | nil | nil |

เมื่อนำผลของตัวแปรตอบสนองป้อนกลับเข้าไปในโปรแกรม และทำการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้เป็นดังนี้

ตารางที่ 32 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (1)

| Analysis of Variance | | | | | |
|----------------------|----|----------|--------|---------|---------|
| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
| Model | 9 | 0.000002 | 0 | 257.85 | 0 |
| Linear | 3 | 0.000001 | 0 | 480.23 | 0 |

| Analysis of Variance | | | | | |
|----------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
| P | 1 | 0 | 0 | 549.83 | 0 |
| [C] | 1 | 0.000001 | 0.000001 | 955.96 | 0 |
| pH | 1 | 0 | 0 | 0.8 | 0.393 |
| Square | 3 | 0 | 0 | 99.84 | 0 |
| P2 | 1 | 0 | 0 | 8.98 | 0.013 |
| [C]2 | 1 | 0 | 0 | 243.81 | 0 |
| pH2 | 1 | 0 | 0 | 3.15 | 0.106 |
| 2-Way Interaction | 3 | 0 | 0 | 69.05 | 0 |
| P * [C] | 1 | 0 | 0 | 166.4 | 0 |
| P * pH | 1 | 0 | 0 | 0.04 | 0.842 |
| [C] * pH | 1 | 0 | 0 | | |
| Error | 10 | 0 | 0 | 10.91 | 0.01 |
| Lack-of-Fit | 5 | 0 | 0 | | |
| Pure Error | 5 | 0 | 0 | | |
| Total | 19 | 0.000002 | | | |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 33 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (2)

| Model Summary | | | |
|---------------|--------|------------|-------------|
| S | R-sq | R-sq (adj) | R-sq (pred) |
| 0.0000263 | 99.57% | 99.18% | 94.64% |

ตารางที่ 34 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (3)

| Coded Coefficients | | | | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|---------|---------|------|
| Term | Effect | Coef | SE Coef | T-Value | P-Value | VIF |
| constant | | 0.00267 | 0.000009 | 29.37 | 0 | |
| P | 0.000417 | 0.000208 | 0.000009 | 23.45 | 0 | 1.14 |

| Coded Coefficients | | | | | | |
|--------------------|------------|-----------|----------|---------|---------|------|
| Term | Effect | Coef | SE Coef | T-Value | P-Value | VIF |
| conc | -0.0000549 | -0.000275 | 0.000009 | -30.92 | 0 | 1.14 |
| pH | -0.000017 | -0.000009 | 0.00001 | -0.89 | 0.393 | 1.19 |
| P2 | -0.000093 | -0.000046 | 0.000015 | -3 | 0.013 | 1.72 |
| [C]2 | 0.000482 | 0.000241 | 0.000015 | 15.61 | 0 | 1.72 |
| pH2 | -0.000055 | -0.000028 | 0.000016 | -1.78 | 0.106 | 1.74 |
| P * [C] | -0.00026 | -0.00013 | 0.00001 | -12.9 | 0 | 1.17 |
| P * pH | 0.000005 | 0.000002 | 0.000011 | 0.2 | 0.842 | 1.23 |
| [C] * pH | -0.000058 | -0.000029 | 0.000011 | -2.63 | -2.63 | 1.23 |

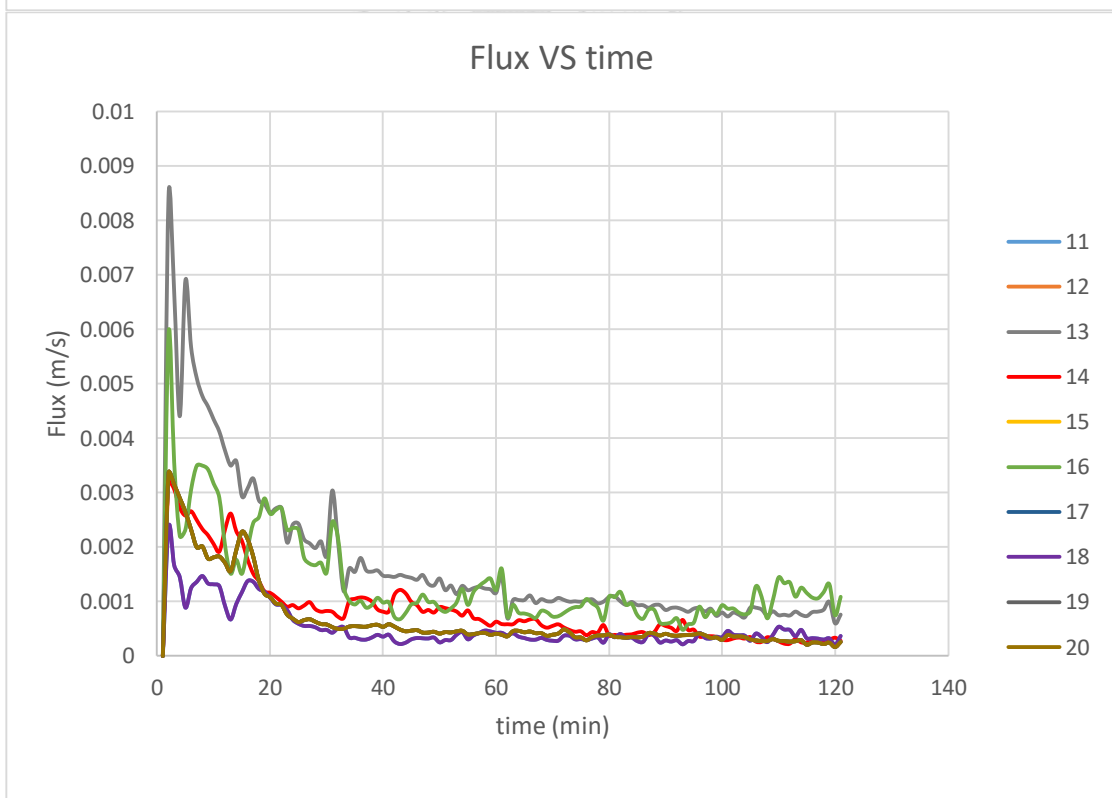
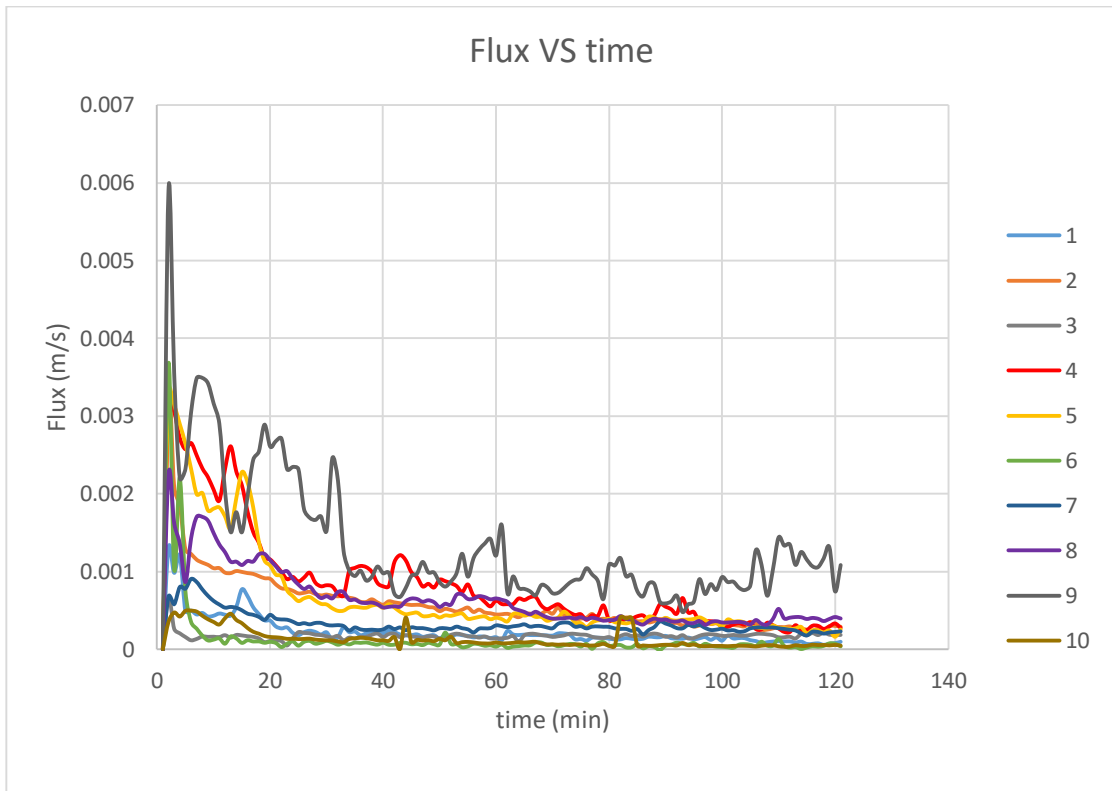
จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จะได้สมการในการหาค่าฟลักซ์ในเทอมของความดัน ความเข้มข้น และค่าพีเอช ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Flux} = & -0.000347 + 0.000193 P - 0.005474 [C] + 0.000050 \text{ pH} \\ & - 0.000005 P*P + 0.02977 [C]*[C] - 0.000003 \text{ pH}*\text{pH} \\ & - 0.000482 P*[C] + 0.000000 P*\text{pH} - 0.000108 [C]*\text{pH} \end{aligned}$$

และเมื่อพิจารณาค่า P-value จากตารางที่ 32 พบว่า ที่ค่า P-value มากกว่า 0.05 ถือว่าไม่มีนัยสำคัญ และเมื่อนำกลับเข้าไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab อีกครั้งจะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Flux} = & -0.000269 + 0.00021 P - 0.005266 [C] + 0.000007 \text{ pH} \\ & - 0.000006 P*P + 0.02877 [C]*[C] - 0.000498 P*[C] \\ & - 0.000095 [C]*\text{pH} \end{aligned}$$

นอกจากนี้เมื่อทำการพลอตกราฟค่าฟลักซ์ของน้ำที่ได้ในแต่ละการทดลอง เทียบกับเวลาจะ
ได้ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 กราฟแสดงฟลักซ์ของน้ำจากการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตผ่านกระบวนการ
นาโนฟิลเตรชัน

4.3.2.2 ผลการทดลองด้วยสารละลายอีดีทีเอ

เมื่อทำการทดลองด้วยสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตตามเงื่อนไขในการเดินระบบ จากการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab ผลของตัวแปรตอบสนอง (Response) เป็นดังตารางที่ 35

ตารางที่ 35 ตารางการทดลองจากการใช้สารละลายอีดีทีเอผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

| ลำดับ | เงื่อนไขในการเดินระบบ | | | พารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์ | | |
|-------|-----------------------|-------------|-------|--------------------------------|------------------|------------------|
| | ความดัน | ความเข้มข้น | พีเอช | ฟลักซ์ | Ca ²⁺ | Si ²⁺ |
| 1 | 4 | 0.2 | 4 | 0.0000322 | nil | nil |
| 2 | 10 | 0.2 | 4 | 0.0000950 | nil | nil |
| 3 | 10 | 0.2 | 10 | 0.0000603 | nil | nil |
| 4 | 7 | 0.11 | 7 | 0.0000902 | nil | nil |
| 5 | 7 | 0.11 | 7 | 0.0000834 | nil | nil |
| 6 | 4 | 0.2 | 10 | 0.0000116 | nil | nil |
| 7 | 7 | 0.11 | 4 | 0.0000757 | nil | nil |
| 8 | 10 | 0.11 | 7 | 0.0001288 | nil | nil |
| 9 | 10 | 0.02 | 10 | 0.0003512 | nil | nil |
| 10 | 4 | 0.11 | 7 | 0.0000148 | nil | nil |
| 11 | 4 | 0.02 | 10 | 0.0001191 | nil | nil |
| 12 | 7 | 0.2 | 7 | 0.0000834 | nil | nil |
| 13 | 7 | 0.02 | 7 | 0.0002460 | nil | nil |
| 14 | 7 | 0.11 | 7 | 0.0000902 | nil | nil |
| 15 | 7 | 0.11 | 7 | 0.0000834 | nil | nil |
| 16 | 10 | 0.02 | 7 | 0.0002351 | nil | nil |
| 17 | 7 | 0.11 | 7 | 0.0000834 | nil | nil |
| 18 | 4 | 0.02 | 4 | 0.0001191 | nil | nil |
| 19 | 7 | 0.11 | 7 | 0.0000834 | nil | nil |
| 20 | 7 | 0.11 | 10 | 0.0000834 | nil | nil |

เมื่อนำผลของตัวแปรตอบสนองป้อนกลับเข้าไปในโปรแกรม และทำการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้เป็นดังนี้

ตารางที่ 36 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากการใช้สารละลายอีดีทีเอ (1)

| Analysis of Variance | | | | | |
|----------------------|----|--------|--------|---------|---------|
| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
| Model | 9 | 0 | 0 | 25.3 | 0 |
| Linear | 3 | 0 | 0 | 47.3 | 0 |
| P | 1 | 0 | 0 | 47.48 | 0 |
| [C] | 1 | 0 | 0 | 93.04 | 0 |
| pH | 1 | 0 | 0 | 0.55 | 0.393 |
| Square | 3 | 0 | 0 | 9.04 | 0 |
| P ² | 1 | 0 | 0 | 4.15 | 0.013 |
| [C] ² | 1 | 0 | 0 | 23.31 | 0 |
| pH ² | 1 | 0 | 0 | 0.02 | 0.106 |
| 2-Way Interaction | 3 | 0 | 0 | 6.08 | 0 |
| P * [C] | 1 | 0 | 0 | 7.97 | 0 |
| P * pH | 1 | 0 | 0 | 1.52 | 0.842 |
| [C] * pH | 1 | 0 | 0 | | |
| Error | 10 | 0 | 0 | 10.91 | 0.01 |
| Lack-of-Fit | 5 | 0 | 0 | | |
| Pure Error | 5 | 0 | 0 | | |
| Total | 19 | 0 | | | |

ตารางที่ 37 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากการใช้สารละลายอีดีทีเอ (2)

| Model Summary | | | |
|---------------|--------|------------|-------------|
| S | R-sq | R-sq (adj) | R-sq (pred) |
| 0.0000263 | 99.57% | 99.18% | 94.64% |

ตารางที่ 38 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากการใช้สารละลายอีดีทีเอ (3)

| Coded Coefficients | | | | | | |
|--------------------|------------|-----------|----------|---------|---------|------|
| Term | Effect | Coef | SE Coef | T-Value | P-Value | VIF |
| constant | | 0.00267 | 0.000009 | 29.37 | 0 | |
| P | 0.000417 | 0.000208 | 0.000009 | 23.45 | 0 | 1.14 |
| conc | -0.0000549 | -0.000275 | 0.000009 | -30.92 | 0 | 1.14 |
| pH | -0.000017 | -0.000009 | 0.00001 | -0.89 | 0.393 | 1.19 |
| P2 | -0.000093 | -0.000046 | 0.000015 | -3 | 0.013 | 1.72 |
| [C]2 | 0.000482 | 0.000241 | 0.000015 | 15.61 | 0 | 1.72 |
| pH2 | -0.000055 | -0.000028 | 0.000016 | -1.78 | 0.106 | 1.74 |
| P * [C] | -0.00026 | -0.00013 | 0.00001 | -12.9 | 0 | 1.17 |
| P * pH | 0.000005 | 0.000002 | 0.000011 | 0.2 | 0.842 | 1.23 |
| [C] * pH | -0.000058 | -0.000029 | 0.000011 | -2.63 | -2.63 | 1.23 |

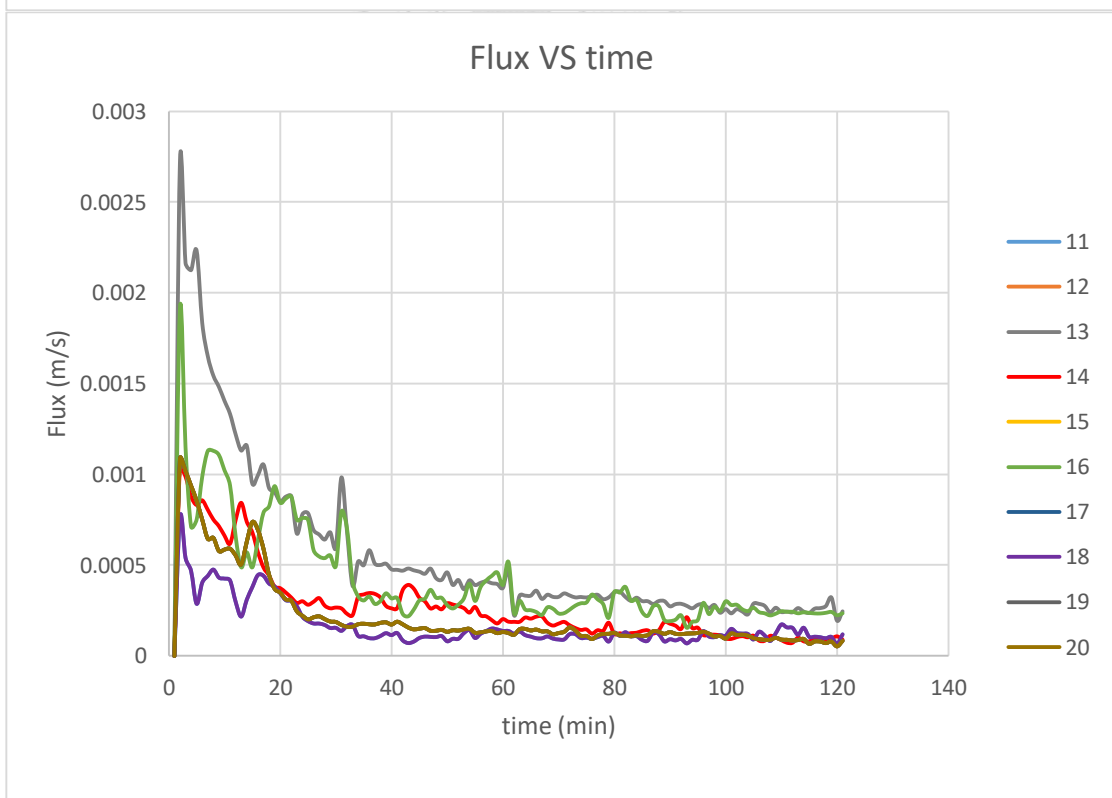
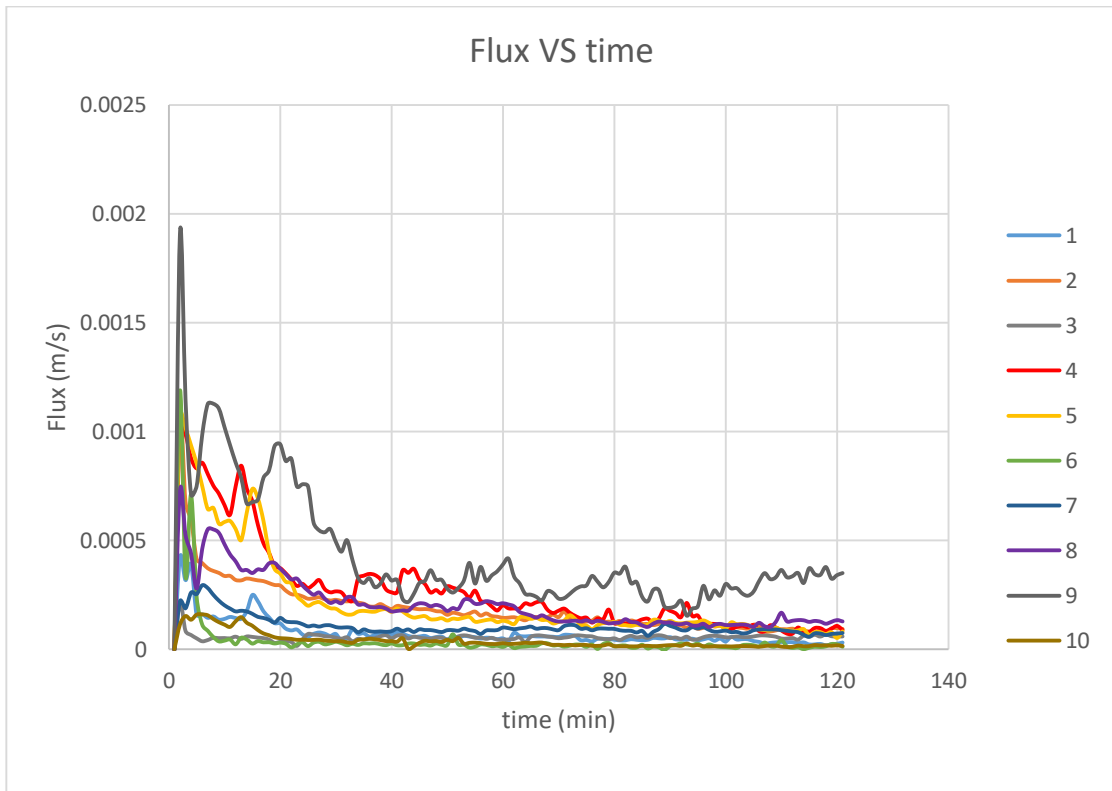
จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จะได้สมการในการหาค่าฟลักซ์ในเทอมของความดัน ความเข้มข้น และค่าพีเอช ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Flux} = & -0.00068 + 0.000062 P - 0.001427 [C] - 0.00002 \text{ pH} \\ & - 0.000003 P^*P + 0.00807 [C]^*[C] + 0.00000 \text{ pH}^*\text{pH} \\ & - 0.000092 P^*[C] + 0.000001 P^*\text{pH} - 0.000077 [C]^*\text{pH} \end{aligned}$$

และเมื่อพิจารณาค่า P-value จากตารางที่ 36 พบว่า ที่ค่า P-value มากกว่า 0.05 ถือว่าไม่มีนัยสำคัญ และเมื่อนำกลับเข้าไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab อีกครั้งจะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Flux} = & 0.00004 + 0.000031 P - 0.001565 [C] + 0.00662 [C]^*[C] \\ & - 0.00011 P^*[C] \end{aligned}$$

นอกจากนี้เมื่อทำการพลอตกราฟค่าฟลักซ์ของน้ำที่ได้ในแต่ละการทดลอง เทียบกับความเข้มข้นจะได้กราฟตามรูปที่ 25



รูปที่ 25 กราฟแสดงฟลักซ์ของน้ำจากการใช้สารละลายอีดีทีเอผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

เมื่อลองแทนค่าในสมการที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้เงื่อนไขในการเดินระบบดังนี้

- ความดันที่ใช้ในการเดินระบบ 10 บาร์
- ความเข้มข้นของสารขาเข้า 1 โมล/ลิตร
- ค่าพีเอช 7

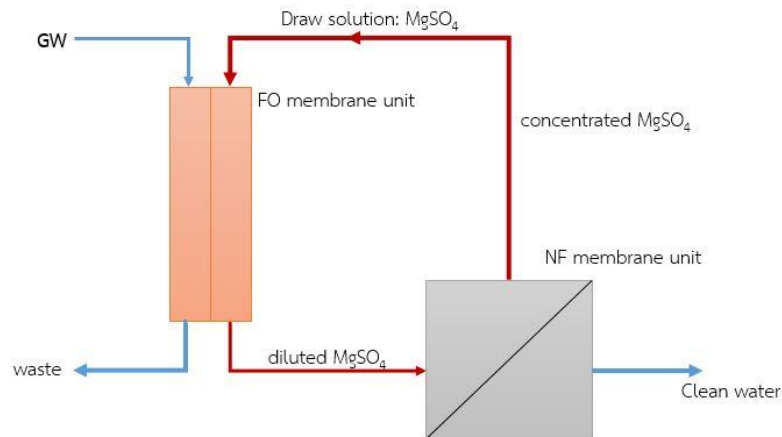
จะได้ค่าฟลักซ์จากการใช้แมกนีเซียมซัลเฟตเป็นสารตั้งเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 \text{Flux} &= -0.000269 + 0.00021 P - 0.005266 [C] + 0.000007 \text{ pH} \\
 &\quad - 0.000006 P*P + 0.02877 [C]*[C] - 0.000498 P*[C] \\
 &\quad - 0.000095 [C]*\text{pH} \\
 &= -0.000269 + 0.00021(10) - 0.005266(1) + 0.000007(7) \\
 &\quad - 0.000006(10*10) + 0.02877(1*1) - 0.000498(10*1) \\
 &\quad - 0.000095(1*7) \\
 &= 0.0379
 \end{aligned}$$

และค่าฟลักซ์จากการใช้อีดีทีเอเป็นสารตั้งเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 \text{Flux} &= 0.00004 + 0.000031 P - 0.001565 [C] + 0.00662 [C]*[C] \\
 &\quad - 0.00011 P*[C] \\
 &= 0.00004 + 0.000031(10) - 0.001565(1) + 0.00662(1*1) \\
 &\quad - 0.00011(10*1) \\
 &= 0.0043
 \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าค่าฟลักซ์ที่ได้จากการใช้แมกนีเซียมซัลเฟตเป็นสารตั้งให้ค่าที่มากกว่าการใช้อีดีทีเอเป็นสารตั้ง เมื่อผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นสารตั้งในการกำจัดความกระด้างออกจากน้ำบาดาล โดยการใช้กระบวนการฟอรวีร์ดออสโมซิส - นาโนฟิลเตรชัน โดยแผนผังการเดินระบบจะเป็นดังรูปที่ 26

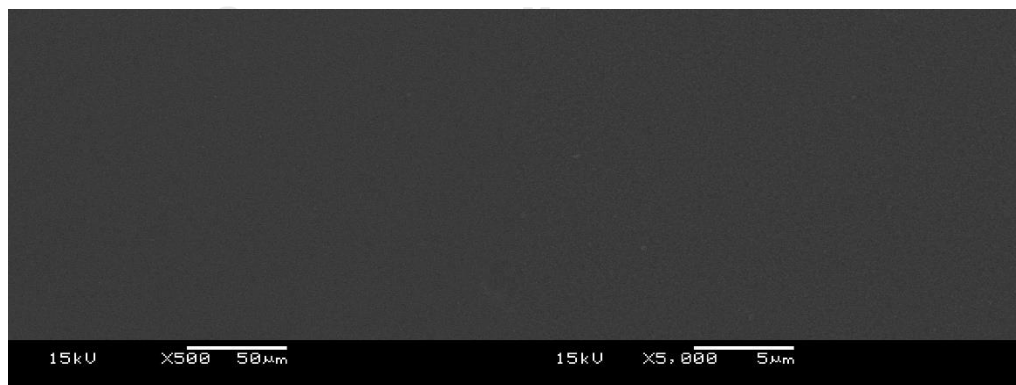


รูปที่ 26 แผนผังการเดินระบบฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - นาโนฟิลเตรชัน

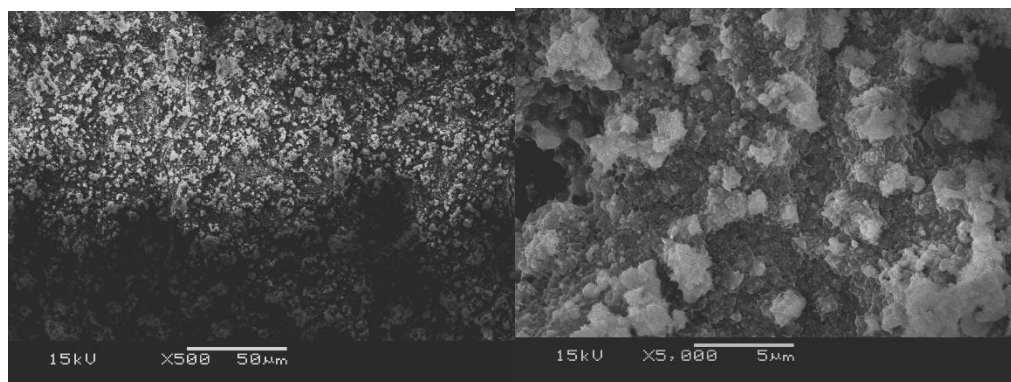
4.4.3 การวิเคราะห์SEM-EDX ของเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันก่อนและหลังการใช้งาน โดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟตเป็นสารตั้ง

หลังทำการทดลองในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ผู้วิจัยได้นำแผ่นเมมเบรนไปวิเคราะห์ด้วย SEM-EDX เพื่อหาค่าประกอบของฟาวแลนท์ที่เป็นสาเหตุของค่าฟลักซ์ที่ลดลง และลักษณะของฟาวแลนท์ที่อุดตันบนผิวเมม ซึ่งการเตรียมตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ SEM-EDX ทำโดยการตัดแผ่นเมมเบรนที่แห้งสนิทบริเวณช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงท้ายของแผ่นเมมเบรน ให้มีขนาดประมาณ 6 x 6 ตร.มม. พบว่านาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่ไม่ผ่านการใช้งาน ไม่มีฟาวแลนท์ติดบนผิวเมมเบรนเลย ดังรูปที่ 27 และลักษณะของเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันหลังผ่านการใช้งานมีลักษณะดังรูปที่ 28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 27 ผล SEM ของเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชัน ที่ไม่ผ่านการใช้งาน



รูปที่ 28 ผล SEM ของเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชัน หลังผ่านการใช้งาน

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของเมมเบรนที่ไม่ผ่านการใช้งานและเมมเบรนหลังผ่านการใช้งาน พบว่าลักษณะของเมมเบรนหลังใช้งาน มีผลึกปกคลุมอยู่บนผิวเมมเบรน ซึ่งเป็นผลให้ค่าฟลักซ์มีค่าลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า EDX เปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุบนเมมเบรนที่ไม่ผ่านการใช้งานและเมมเบรนหลังผ่านการใช้งาน ผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 39

ตารางที่ 39 องค์ประกอบธาตุของเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันที่ไม่ผ่านการใช้งานและหลังผ่านการใช้งาน

| ธาตุ | องค์ประกอบธาตุ (% อะตอม) | |
|-----------------|----------------------------|--------------------------|
| | เมมเบรนที่ไม่ผ่านการใช้งาน | เมมเบรนหลังผ่านการใช้งาน |
| คาร์บอน (C) | 76.8±2.3 | 70.6±2.6 |
| ออกซิเจน (O) | 19.3±2.0 | 22.4±2.1 |
| ซิลไฟด์ (S) | 3.9±0.5 | 5.3±0.2 |
| แมกนีเซียม (Mg) | - | 1.7±0.1 |
| แคลเซียม (Ca) | - | - |

จากตารางที่ 39 พบว่าเมมเบรนที่ไม่ผ่านการใช้งานมีองค์ประกอบของธาตุคือ คาร์บอน (76.8±2.3%) ออกซิเจน(19.3±2.0%) และซิลไฟด์(19.3±2.0%) ซึ่งองค์ประกอบของธาตุดังกล่าวเป็นธาตุหลักของแผ่นเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัย และองค์ประกอบธาตุของเมมเบรนหลังผ่านการใช้งานคือ คาร์บอน(70.6±2.6%) ออกซิเจน(22.4±2.1%) ซิลไฟด์ (5.3±0.2%) และแมกนีเซียม(1.7±0.1%) จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจน ซิลไฟด์และ

แมกนีเซียมมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากฟาวแลนท์ที่ปกคลุมของบนผิวเมมเบรนและฟาวแลนท์ที่เกิดขึ้น น่าจะเป็นสารประกอบของแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากสารละลายที่นำมาผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเป็นสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเพียงชนิดเดียว

4.5 ผลการเปรียบเทียบกระบวนการบำบัดน้ำบาดาลด้วยกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-นาโนฟิลเตรชัน/อัลตราฟิลเตรชัน

4.5.1 คุณภาพน้ำสะอาดหลังผ่านกระบวนการ

ตารางที่ 40 มาตรฐานคุณภาพน้ำทดแทนของน้ำหล่อเย็น และน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูง และคุณภาพน้ำหลังการบำบัด

| พารามิเตอร์ | หน่วย | มาตรฐาน | | กระบวนการทางเคมี(ปูนขาวและPACl) - นาโนฟิลเตรชัน | กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - นาโนฟิลเตรชัน |
|--------------------|-------------------------|-------------|--------------------|---|---|
| | | น้ำหล่อเย็น | น้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ | | |
| ค่าพีเอช | - | 6.0 - 8.0 | 8.5 - 9.5 | 6.7 ± 0.1 | 7.6 |
| ค่าของแข็งละลายน้ำ | mg/L | - | - | 200.9 ± 1.6 | |
| ค่าการนำไฟฟ้า | S/cm | 300 | 0.3 | 301.3 ± 2.4 | 116 |
| ความขุ่น | NTU | - | - | nil | nil |
| ค่าความเป็นด่าง M | mg/L as CaCO_3 | 50 | - | 53.5 ± 1.2 | nil |
| ความกระด้างทั้งหมด | mg/L as CaCO_3 | 50 | nil | 8.0 ± 1 | nil |
| แคลเซียม | mg/L as CaCO_3 | 50 | - | 4.3 ± 0 | nil |

| พารามิเตอร์ | หน่วย | มาตรฐาน | | กระบวนการทางเคมี(ปูนขาวและPACl) - นาโนฟิลเตรชัน | กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - นาโนฟิลเตรชัน |
|-------------|---------------------------------|-------------|--------------------|---|---|
| | | น้ำหล่อเย็น | น้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ | | |
| แมกนีเซียม | mg/L as CaCO ₃ | - | - | 2.3 ± 0.1 | |
| ซิลิกา | mg/L as SiO ₂ | 30 | 0.02 | 7.8 ± 0.1 | nil |

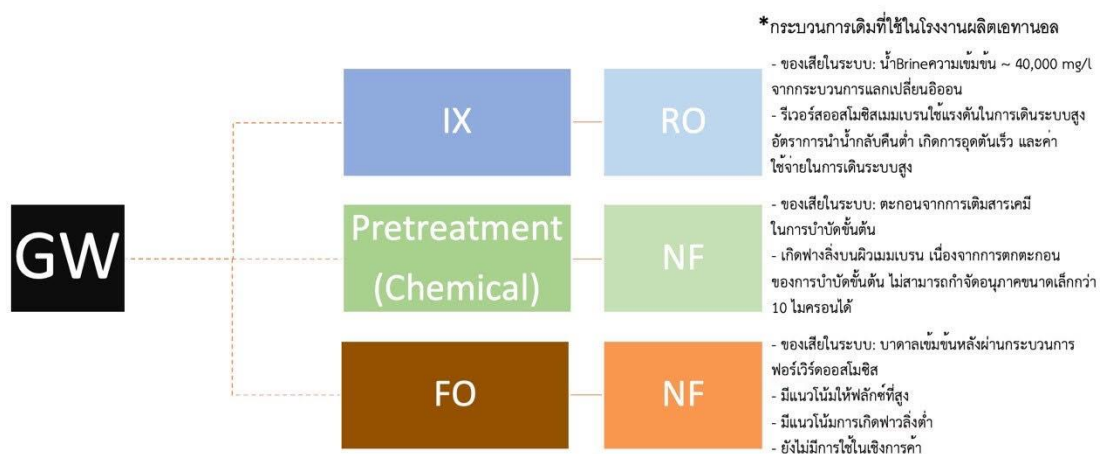
จากตารางที่ 40 แสดงให้เห็นถึงมาตรฐานคุณภาพน้ำทดแทนของน้ำหล่อเย็น และน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูงเปรียบเทียบกับคุณภาพน้ำที่ได้จากการบำบัดทั้ง 2 ระบบพบว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมี - นาโนฟิลเตรชันและกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - นาโนฟิลเตรชัน มีคุณภาพดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของโรงงานที่สนับสนุนข้อมูลในงานวิจัย และเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำจาก The Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association Microbial (JRA) พบว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการทั้ง 2 กระบวนการสามารถนำไปใช้เป็นน้ำหล่อเย็นได้ แต่ไม่สามารถนำมาใช้เป็นน้ำสำหรับหม้อไอน้ำได้ เนื่องจากน้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมี - นาโนฟิลเตรชันมีค่าความกระด้างทั้งหมดและซิลิกาเกินมาตรฐาน ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้มีผลทำให้เกิดตะกอนบนผิวถ่ายเทความร้อนและก่อให้เกิดความเสียหาย ในขณะที่น้ำที่ผ่านกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - นาโนฟิลเตรชันมีค่าการนำไฟฟ้าเกินมาตรฐาน ซึ่งค่าการนำไฟฟ้านี้จะสัมพันธ์กับปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด(TDS) โดยสามารถประมาณค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ได้จากค่าการนำไฟฟ้าเนื่องจากค่าโมเลกุลของไฮโดรเจน และ ออกซิเจน ในน้ำไม่มีประจุไฟฟ้า ส่วนค่าการนำไฟฟ้า คือ ค่าเหล็ก แร่ธาตุ และ เกลือ ซึ่งมีประจุไฟฟ้า ดังนั้นค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดจึงสามารถคำนวณจากค่าการนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากค่าเหล็ก แร่ธาตุ และ เกลือ ที่แตกต่างกัน จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าแตกต่างกันด้วย

4.5.2 ฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ได้หลังผ่านกระบวนการ

ตารางที่ 41 ตารางการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด

| ความดัน | กระบวนการทางเคมี - นาโนฟิลเตรชัน | กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส - นาโนฟิลเตรชัน |
|---------|-------------------------------------|--|
| 4 | 0.0055±0.0003 | 0.0072 |
| 7 | 0.0338±0.0002 | 0.1433 |
| 10 | 0.0625±0.0004 | 1.2003 |

จากตารางที่ 41 พบว่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ได้จากกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-นาโนฟิลเตรชันมีค่าสูงกว่า เนื่องมาจากน้ำที่เข้ามาในกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเป็นสารตั้งต้นผ่านกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสมาแล้ว ซึ่งในการบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส โมเลกุลของน้ำจากน้ำบาดาลจะถูกแพร่เข้ามายังฝั่งของสารตั้งต้นจากความแตกต่างของความเข้มข้นเป็นแรงขับเคลื่อน ทำให้ฝั่งสารตั้งต้นถูกเจือจางลง และเมื่อนำเข้ามาในกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเพื่อฟื้นฟูสภาพ จะพบว่าที่ความเข้มข้นของสารต่ำ ฟลักซ์ของน้ำที่ได้จะมีค่าสูง



รูปที่ 29 รูปเปรียบเทียบกระบวนการเดิมที่ชั้นโรงงาน กระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน และ กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-นาโนฟิลเตรชัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาลด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสและนาโนฟิลเตรชัน/อัลตราฟิลเตรชัน เพื่อใช้แทนกระบวนการรีเวอร์ออสโมซิสในการผลิตน้ำทดแทนของระบบหล่อเย็นและน้ำในหม้อไอน้ำจากน้ำบาดาลของโรงงานผลิตเอทานอลแห่งหนึ่งในจังหวัดขอนแก่น สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

- 1) จากการคำนวณความดันออสโมติกของสารตั้งแต่ละชนิดพบว่าสารตั้งทุกชนิดที่นำมาศึกษามีแนวโน้มที่ให้ความดันออสโมติกมากกว่าความดันออสโมติกของน้ำบาดาลทุกชนิด ซึ่งสารตั้งที่ให้ความดันออสโมติกมากที่สุดคือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์และแมกนีเซียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 0.6 โมลต่อลิตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.712 บาร์ ในขณะที่ความดันออสโมติกของน้ำบาดาลสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 0.196 บาร์ และมีแนวโน้มให้ฟลักซ์มากที่สุดที่ 5.903 ลิตรต่อตารางเมตร ชั่วโมง
- 2) เมื่อทดลองนำสารตั้งมาผ่านกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสด้วยชุดทดสอบ โดยควบคุมความเร็วในการป้อนน้ำบาดาลและสารตั้งเข้าสู่ชุดทดสอบที่ความเร็ว 0.38 ลิตรต่อนาที (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ 3.1 มิลลิเมตร) พบว่าค่าฟลักซ์ที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยสารตั้งที่ให้ฟลักซ์มากที่สุดคือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ แมกนีเซียมซัลเฟต และอีดีทีเอที่ความเข้มข้น 0.6 โมลต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 5.74, 4.82 และ 2.75 ลิตรต่อตารางเมตร ชั่วโมง ตามลำดับ
- 3) ในการเลือกกระบวนการฟื้นฟูสภาพของสารตั้งระหว่างอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน พบว่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์ไม่สามารถแยกได้ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน ดังนั้นสารละลายที่เหมาะสมกับกระบวนการฟื้นฟูสภาพทั้ง 2 กระบวนการคือ แมกนีเซียมซัลเฟต และอีดีทีเอ เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การกำจัด นาโนฟิลเตรชัน เมมเบรนมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่มากกว่าอัลตราฟิลเตรชัน เมมเบรน และมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดมากกว่า 90%
- 4) การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตให้ฟลักซ์ของน้ำสะอาดมากกว่าการใช้สารละลายอีดีทีเอ และคุณภาพของน้ำที่ได้ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็น
- 5) เมื่อเปรียบเทียบกับกำจัดความกระด้างด้วยกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน พบว่ากระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส-นาโนฟิลเตรชัน มีข้อดีมากกว่าทั้งในเรื่องฟลักซ์ของน้ำ

สะอาดที่ได้หลังกระบวนการบำบัด ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัด และราคาสารเคมี ต่อการผลิตน้ำสะอาด

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรปรับอัตราการนำสารเข้าของกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสด้วยความเร็วที่มากกว่า 0.38 ลิตรต่อนาที่ เพื่อลดผลกระทบจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน
- 2) ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับน้ำบาดาลจริง เพื่อให้เห็นความแตกต่างและยืนยันผลการทดลองได้ ชัดเจนมากขึ้น
- 3) ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการเดินระบบของเมมเบรน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการ ออกแบบการเดินระบบในระดับ Full-scale
- 4) ควรมีการศึกษาในด้านราคาก่อสร้าง และจุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ ศึกษาเพียงค่าใช้จ่ายจากสารเคมีซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของค่าดำเนินการ (Operation cost) ของ ระบบ

บรรณานุกรม

- Achilli, A., Cath, T. Y., & Childress, A. E. (2010). Selection of inorganic-based draw solutions for forward osmosis applications. *Journal of Membrane Science*, 364(1), 233-241. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.08.010>
- Altaee, A., Mabrouk, A., & Bourouni, K. (2013). A novel Forward osmosis membrane pretreatment of seawater for thermal desalination processes. *Desalination*, 326, 19-29. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.07.008>
- Altaee, A., Zaragoza, G., & van Tonningen, H. R. (2014). Comparison between Forward Osmosis-Reverse Osmosis and Reverse Osmosis processes for seawater desalination. *Desalination*, 336, 50-57. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.01.002>
- Burn, S., & Gray, S. (2015). *Efficient Desalination by Reverse Osmosis: A guide to RO practice*. In. Retrieved from <https://doi.org/10.2166/9781780405049>
doi:10.2166/9781780405049
- Cath, T. Y., Childress, A. E., & Elimelech, M. (2006). Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments. *Journal of Membrane Science*, 281(1), 70-87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.05.048>
- Ge, Q., Ling, M., & Chung, T.-S. (2013). Draw solutions for forward osmosis processes: Developments, challenges, and prospects for the future. *Journal of Membrane Science*, 442, 225-237. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.03.046>
- Guo, W., Ngo, H.-H., & Li, J. (2012). A mini-review on membrane fouling. *Bioresour Technology*, 122, 27-34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.089>
- Hermia, J. (1985). Blocking Filtration. Application to Non-Newtonian Fluids. In A. Rushton (Ed.), *Mathematical Models and Design Methods in Solid-Liquid Separation* (pp. 83-89). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Holloway, R. W., Childress, A. E., Dennett, K. E., & Cath, T. Y. (2007). Forward osmosis for concentration of anaerobic digester centrate. *Water Research*, 41(17), 4005-4014. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.05.054>
- Jonsson, G., Prádanos, P., & Hernández, A. (1996). Fouling phenomena in microporous

- membranes. Flux decline kinetics and structural modifications. *Journal of Membrane Science*, 112, 171-183. doi:10.1016/0376-7388(95)00286-3
- Kim, B., Gwak, G., & Hong, S. (2017). Review on methodology for determining forward osmosis (FO) membrane characteristics: Water permeability (A), solute permeability (B), and structural parameter (S). *Desalination*, 422, 5-16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.08.006>
- Mohammad, A., Hilal, N., Al-Zoubi, H., & Darwish, N. (2007). Prediction of permeate fluxes and rejections of highly concentrated salts in nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science - J MEMBRANE SCI*, 289, 40-50. doi:10.1016/j.memsci.2006.11.035
- Mohammad, A. W., Teow, Y. H., Ang, W. L., Chung, Y. T., Oatley-Radcliffe, D. L., & Hilal, N. (2015). Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination*, 356, 226-254. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.043>
- Shon, H. K., Phuntsho, S., Chaudhary, D. S., Vigneswaran, S., & Cho, J. (2013). Nanofiltration for water and wastewater treatment - A mini review. *Drinking Water Engineering and Science*, 6, 47-53. doi:10.5194/dwes-6-47-2013
- Tan, C. H. (2011). *A novel hybrid forward osmosis - nanofiltration (FO-NF) process - parameters selection, flux prediction and process applications*. (Ph.D Thesis), Singapore University,
- Tan, C. H., & Ng, H. Y. (2010). A novel hybrid forward osmosis - nanofiltration (FO-NF) process for seawater desalination: Draw solution selection and system configuration. *Desalination and Water Treatment*, 13(1-3), 356-361. doi:10.5004/dwt.2010.1733
- Zhang, S., Han, G., Li, X., Wan, C., & Chung, T. S. (2016). Pressure retarded osmosis. In *Sustainable Energy from Salinity Gradients* (pp. 19-53).
- Zhao, S., & Zou, L. (2011). Effects of working temperature on separation performance, membrane scaling and cleaning in forward osmosis desalination. *Desalination*, 278(1), 157-164. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.018>
- Zhao, S., Zou, L., & Mulcahy, D. (2012). Brackish water desalination by a hybrid forward osmosis–nanofiltration system using divalent draw solute. *Desalination*, 284,

175-181. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.053>

มันลิน ตันตุลเวศม์, ม. ต. (2547). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย กรุงเทพฯ โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1) pH Conductivity และ TDS

- pH/Conductivity meter ของบริษัท EZ DO รุ่น 7200

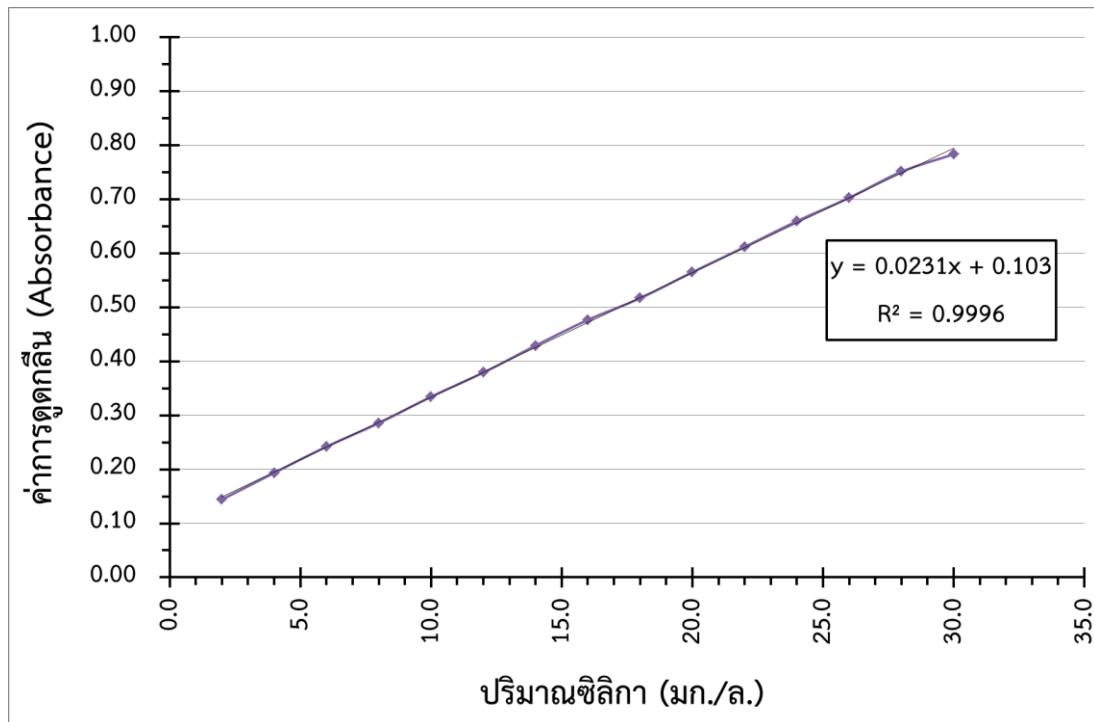


2) ซิลิกาและอลูมิเนียม

- เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ของบริษัท Thermo Scientific รุ่น GENESYS 10S



- กราฟมาตรฐานของซิลิกา (Si Calibration Curve)



ภาคผนวก ข

สารเคมีและขั้นตอนในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

1) ความกระด้าง

เครื่องมือและอุปกรณ์ (Apparatus)

- ขวดรูปชมพู่(erlenmeyer flask) ขนาด 125 mL
- ปิเปต (pipette) ขนาด 25 mL
- บิวเรต (burette) ขนาด 25 mL

สารเคมี (Reagents)

- สารละลายบัฟเฟอร์ (buffer solution):
แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride, NH_4Cl) 16.9 g ละลายในแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (conc. Ammonium hydroxide, conc. NH_4OH) 143 mL เติมน้ำกลั่น
แมกนีเซียมซอลต์ของอีดีทีเอ (magnesium salt of EDTA) 1.25 g และปรับปริมาตรเป็น 250 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร
- อินดิเคเตอร์(indicators):
อิริโอโครม แบลค ที 0.5 กรัม ผสมกับโซเดียมคลอไรด์ 100 กรัม
- สารละลายมาตรฐานแคลเซียม (Standard Calcium solution) ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) ชนิด primary standard (ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100 ± 2 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) 1.000 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 mL วางกรวยไว้บนคอขวด ค่อยๆ เติมน้ำกลั่น 1+1 HCl ลงไปที่ละน้อยเพื่อละลายแคลเซียมคาร์บอเนต จนหมดพอดี เติมน้ำกลั่นประมาณ 200 mL นำไปต้มให้เดือดประมาณ 2-3 นาที เพื่อไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่งอกขึ้นที่อุณหภูมิห้อง เติมน้ำกลั่นและอินดิเคเตอร์ (methyl red indicator) ลงไป 2-3 หยด ปรับให้เป็นกลางด้วย 3N NH_4OH หรือ 1+1 HCl จนมีสีเหลืองอมส้มหรือสีส้มกลางๆ ถ่ายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1000 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นที่ต้มไล่คาร์บอนไดออกไซด์(CO_2)

- โซเดียมไฮดรอกไซด์(Sodium hydroxide, NaOH) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล (N)
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 g ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร
- กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) ความเข้มข้น 1+1
กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. Hydrochloric acid) ปริมาตร 100 mL ลงในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 200 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร
- แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide) ความเข้มข้น 3N
แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น ปริมาตร 100 mL ลงในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 500 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร
- น้ำกลั่น (Distilled Water)

ขั้นตอนการทดสอบ

1. Standardization

Standardize สารละลายมาตรฐานอิตีทีเอ ด้วยสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์

- ปิเปต สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 10 mL ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 mL
- เติมน้ำฟอสฟอริก 1 mL แต่ถ้าผู้มีความเป็นกรดสูงอาจเติม 2 mL แกว่งให้เข้ากัน
- เติม อิริโอโครม แบลค ทีชนิดผง ลงไปเล็กน้อย แกว่งให้เข้ากัน
- นำไปไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอ 0.01 โมลาร์ เมื่อถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีน้ำเงิน คำนวณความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอ จากสมการ

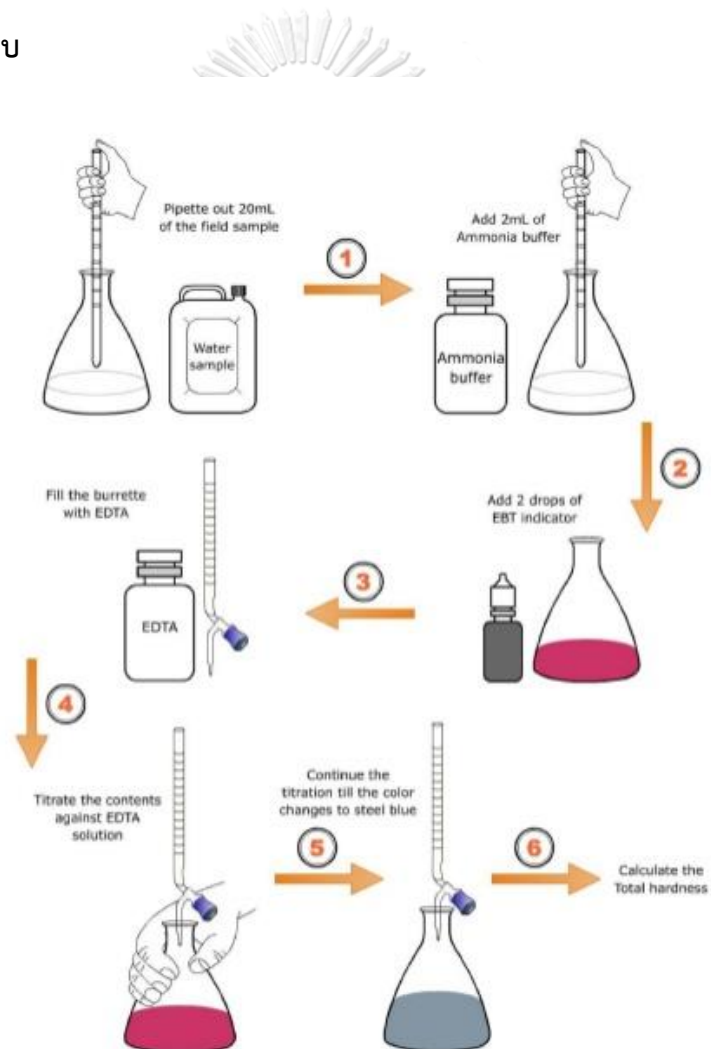
$$N_1 V_1 = N_2 V_2$$

เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอ
 V_1 = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอที่ใช้ในการไตเตรท
 N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต
 V_2 = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต

2. การทดสอบตัวอย่าง

- ปิเปตตัวอย่างน้ำ ปริมาตร 25.0 mL และปรับปริมาตรเป็น 50 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร และเทลงในขวดรูปชมพู่
- เติมสารละลายบัฟเฟอร์ 1 mL เพื่อปรับพีเอชให้ได้ประมาณ 10.0-10.1 แกว่งให้เข้ากัน
- เติม อิริโอโครม แบลค ที่ อินดิเคเตอร์ลงไปเล็กน้อย แกว่งให้เข้ากัน
- นำไปไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ 0.01 โมลาร์ จนถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีน้ำเงิน จดปริมาตรที่ใช้

ขั้นตอนการทดสอบ



การคำนวณ

$$\text{Hardness (mg/L)} = (A \times B \times 1000) / (\text{ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ (mL)})$$

เมื่อ A = ปริมาตรของอีดีทีเอ ที่ใช้ในการไตเตรท (mL)

B = mg แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งสมมูลกับ 1.00 mL อีดีทีเอ
หรือ ความเข้มข้นของอีดีทีเอ (M) \times 100

2) แคลเซียม

เครื่องมือและอุปกรณ์ (Apparatus)

- ขวดรูปชมพู่(erlenmeyer flask) ขนาด 125 mL
- ปิเปต (pipette) ขนาด 25 mL
- บิวเรต (burette) ขนาด 25 mL

สารเคมี (Reagents)

- อินดิเคเตอร์(indicators):
เมอร์เรกไซด์ 200 กรัม ผสมกับโซเดียมคลอไรด์ 100 กรัม
- สารละลายมาตรฐานแคลเซียม (Standard Calcium solution) ความเข้มข้น 0.01

โมลต่อลิตร

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) ชนิด primary standard (ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100 ± 2 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) 1.000 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 mL วางกรวยไว้บนคอขวด ค่อยๆ เติมน้ำ 1+1 HCl ลงไปที่ละน้อยเพื่อละลายแคลเซียมคาร์บอเนต จนหมดพอดี เติมน้ำกลั่นประมาณ 200 mL นำไปต้มให้เดือดประมาณ 2-3 นาที เพื่อไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เติมนเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ (methyl red indicator) ลงไป 2-3 หยด ปรับให้เป็นกลางด้วย 3N NH_4OH หรือ 1+1 HCl จนมีสีเหลืองอมส้มหรือสีส้มกลางๆ ถ่ายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1000 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นที่ต้มไล่คาร์บอนไดออกไซด์(CO_2)

- โซเดียมไฮดรอกไซด์(Sodium hydroxide, NaOH) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล (N)
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 g ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร
- กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) ความเข้มข้น 1+1
กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. Hydrochloric acid) ปริมาตร 100 mL ลงในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 200 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร
- น้ำกลั่น (Distilled Water)

ขั้นตอนการทดสอบ

3. Standardization

Standardize สารละลายมาตรฐานอิตีทีเอ ด้วยสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์

- ปิเปต สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 10 mL ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 mL
- เติมน้ำฟอสฟอริก 1 mL แต่ถ้ามีน้ำมีความเป็นกรดสูงอาจเติม 2 mL แกว่งให้เข้ากัน
- เติม อิริโอโครม แบลค ทีซินิดมลง ลงไปเล็กน้อย แกว่งให้เข้ากัน
- นำไปไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอ 0.01 โมลาร์ เมื่อถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีน้ำเงิน คำนวณความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอ จากสมการ

$$N_1 V_1 = N_2 V_2$$

เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอ
 V_1 = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอที่ใช้ในการไตเตรต
 N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต
 V_2 = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต

4. การทดสอบตัวอย่าง

- ปิเปตตัวอย่างน้ำ ปริมาตร 25.0 mL และปรับปริมาตรเป็น 50 mL ด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร และเทลงในขวดรูปชมพู่

- เติมสารละลายบัฟเฟอร์ 1 mL เพื่อปรับพีเอชให้ได้ประมาณ 10.0-10.1 แกว่งให้เข้ากัน
- เติม เมอร์เรกไซด์ อินดิเคเตอร์ลงไปเล็กน้อย แกว่งให้เข้ากัน นำไปไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ 0.01 โมลต่อลิตร จนถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นม่วง จดปริมาตรที่ใช้

การคำนวณ

$$\text{Calcium (mg/L)} = (A \times B \times 1000) / (\text{ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ (mL)})$$

เมื่อ A = ปริมาตรของอีดีทีเอ ที่ใช้ในการไตเตรท (mL)

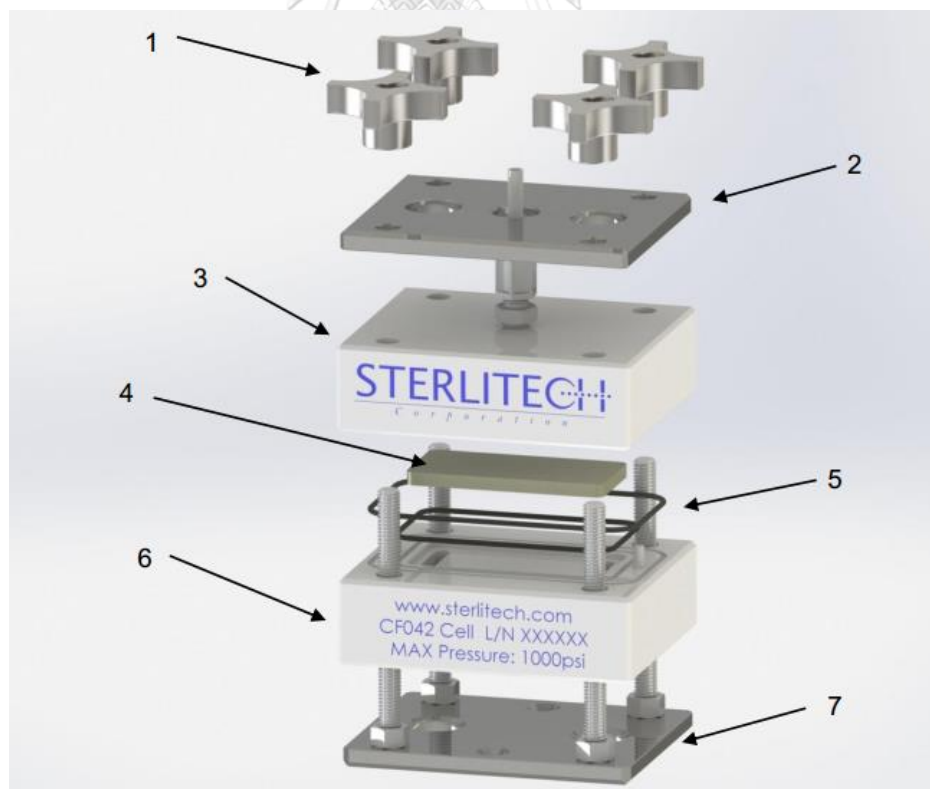
B = mg แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งสมมูลกับ 1.00 mL อีดีทีเอ
หรือ ความเข้มข้นของอีดีทีเอ (M) x 100



ภาคผนวก ค
อุปกรณ์จับยึดเมมเบรน (Test cell)

ประกอบไปด้วย

1. Tightening Knobs
2. Top plate
3. Cell top
4. Sintered metal support (Integrated with cell top)
5. O-rings
6. Cell bottom
7. Bottom plate



ภาคผนวก ง

คุณภาพน้ำบาดาลจริงของโรงงานผลิตเอทานอล



Ecotech Water Systems Co., Ltd.

(eco-i-F002/2010)Page 1 / 3

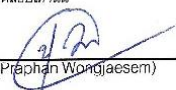
Analysis / Test Report


Customer Name: บริษัท ไทยเอทานอล พาวเวอร์ จำกัด (มหาชน) Attn.: คุณ อีร์วิณห์ แซ่ก๊วย
 Address: _____
 Tel: 043 - 418807- 13 Fax: 043 - 418906
 Report Number: An-T17-15-1670
 Sampling date: 18 December 2015 Received date: 19 December 2015
 Completed date: 22 December 2015 Reported date: 22 December 2015

| Parameters | Units | Method / Reference | Water samples | | | |
|--|---------------------------------------|--|---------------|---------|-----|--|
| | | | น้ำดิบ | Feed RO | RO | |
| Physical properties | | | | | | |
| Appearance | - | Visual Comparison/ 2120 B* | ใส ตมกนแดง | ใส | ใส | |
| Turbidity | NTU | Nepheometric Method/ 2130 B* | 6.6 | 0.4 | 0.0 | |
| pH / (°C) | - | Electrometric Method/ 4500-H ⁺ * | 7.0 | 7.7 | 6.7 | |
| Conductivity | µs/cm | Laboratory Method/ 2510 B* | 667 | 698 | 23 | |
| TDS | ppm | Laboratory Method/ 2510 B* | 400 | 412 | 14 | |
| Chemical properties | | | | | | |
| Total hardness | mg/l as CaCO ₃ | EDTA Titrimetric Method/ 2340 C* | 226 | 216 | Nil | |
| Calcium (Ca) as hardness | mg/l as CaCO ₃ | EDTA Titrimetric Method/ 2340 C* | 144 | 132 | Nil | |
| Alkalinity (P) | mg/l as CaCO ₃ | Titration Method/ 2320 B* | Nil | Nil | Nil | |
| Alkalinity (M) | mg/l as CaCO ₃ | Titration Method/ 2320 B* | 256 | 276 | 24 | |
| Carbonate | mg/l as CaCO ₃ | Titration Method/ 2320 B* | Nil | Nil | Nil | |
| Bicarbonate | mg/l as CaCO ₃ | Titration Method/ 2320 B* | 256 | 276 | 24 | |
| Chloride | mg/l as Cl ⁻ | Argentometric Method/ 4500-Cl ⁻ * | 46.5 | 48.5 | 6.5 | |
| Iron | mg/l as Fe | Phenanthroline Method/ 3500-Fe* | 0.2 | 0.1 | 0.1 | |
| Silica | mg/l as SiO ₂ | Molybdate Method/ 4500-Si* | 25.9 | 26.5 | 0.2 | |
| Sulfite | mg/l as SO ₃ ²⁻ | Iodometric Method/ 4500-SO ₃ ²⁻ * | | | | |
| Nitrite | mg/l as NO ₂ ⁻ | Colorimetric Method/ 4500-NO ₂ ⁻ * | | | | |
| Phosphate | mg/l as P | Ascorbic Method/ 4500-P* | | | | |
| Free Chlorine | mg/l as Cl ₂ | Iodometric Method/ 4500-Cl ⁻ * | | Nil | | |
| Langelier | | | | | | |
| Recommendation: น้ำดิบ: คุณภาพน้ำปกติ RO : คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ ค่า Salt Rejection = 96.7% | | | | | | |

* APHA, AWWA, AND WEF "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" 21st Edition Edited by Lenore S. Chesceri, Arnold E. Greenberg, Lewis and Andrew D. Eton American Public Health Association, Washington D.C. 2005

ได้รับมาตรฐานห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เอกชน จากกรมโรงงานอุตสาหกรรม เลขทะเบียน ๖-186
 ชื่อความมีผลเฉพาะกับตัวอย่างน้ำที่นำมาทดสอบเท่านั้น

Reported by: 
 (Praphan Wongjaesem)
 Scientist
 ๖-186-๖-5391

Approved by: 
 (Dr. Apasana Romsaiyud)
 Lab. Manager
 ๖-186-๖-4006

Ecotech Water Systems Co., LTD

88 Sangkhro-Songkor Rd., Ladprao, Ladprao, Bangkok 10230 Tel : 0 2538 9635 (4 line) Fax : 0 2539 8829
 www.ecotechthailand.com

ภาคผนวก จ
คุณภาพน้ำบาดาลสังเคราะห์

| การทดลองที่ | ความกระด้างทั้งหมด | แคลเซียม | แมกนีเซียม | ซัลเฟต | pH |
|-------------|--------------------|----------|------------|--------|------|
| 1 | 215 | 132 | 85 | 25.5 | 7.77 |
| 2 | 210 | 135 | 82 | 26.4 | 7.85 |
| 3 | 215 | 132 | 84 | 26.5 | 7.76 |
| 4 | 220 | 132 | 84 | 26.5 | 7.85 |
| 5 | 217 | 132 | 82 | 27.2 | 7.79 |
| 6 | 217 | 134 | 81 | 25.9 | 7.85 |
| 7 | 220 | 135 | 85 | 26.5 | 7.75 |
| 8 | 217 | 132 | 84 | 26.2 | 7.9 |
| 9 | 218 | 132 | 84 | 26 | 7.86 |
| ค่าเฉลี่ย | 216.56 | 132.89 | 83.44 | 26.3 | 7.82 |

ภาคผนวก ฉ

ค่าฟลักซ์ของสารตั้งในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

1) สารตั้งชนิดโซเดียมคลอไรด์

| timr(hr) | ความเข้มข้น(โมล/ลิตร) | | |
|-------------|-----------------------|---------|---------|
| | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| 0.166666667 | 0 | 0 | 0 |
| 0.183333333 | 1.61004 | 3.73566 | 5.61802 |
| 0.2 | 1.62252 | 3.92068 | 5.82027 |
| 0.216666667 | 1.64748 | 3.85314 | 5.59555 |
| 0.233333333 | 1.65996 | 3.74447 | 5.81465 |
| 0.25 | 1.66995 | 3.69337 | 5.78431 |
| 0.266666667 | 1.67244 | 3.65637 | 5.80903 |
| 0.283333333 | 1.67601 | 3.62238 | 5.84916 |
| 0.3 | 1.68024 | 3.6035 | 5.78094 |
| 0.316666667 | 1.6877 | 3.57707 | 5.77782 |
| 0.333333333 | 1.69366 | 3.54359 | 5.82926 |
| 0.35 | 1.694 | 3.53222 | 5.83457 |
| 0.366666667 | 1.6974 | 3.52127 | 5.81839 |
| 0.383333333 | 1.6974 | 3.54048 | 5.82199 |
| 0.4 | 1.70008 | 3.90558 | 5.79779 |
| 0.416666667 | 1.69824 | 3.83904 | 5.78581 |
| 0.433333333 | 1.7013 | 3.81055 | 5.80341 |
| 0.45 | 1.69887 | 3.7906 | 5.90883 |
| 0.466666667 | 1.6981 | 3.77776 | 6.16234 |
| 0.483333333 | 1.70003 | 3.76534 | 6.11122 |
| 0.5 | 1.70801 | 3.75857 | 6.06746 |

| timr(hr) | ความเข้มข้น(โมล/ลิตร) | | |
|-------------|-----------------------|---------|---------|
| | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| 0.516666667 | 1.70751 | 3.74909 | 6.01716 |
| 0.533333333 | 1.70705 | 3.74127 | 5.99902 |
| 0.55 | 1.71097 | 3.73566 | 5.97855 |
| 0.566666667 | 1.71612 | 3.73199 | 5.95791 |
| 0.583333333 | 1.71937 | 3.73073 | 5.93892 |
| 0.6 | 1.72092 | 3.72956 | 5.93263 |
| 0.616666667 | 1.7219 | 3.72718 | 5.9243 |
| 0.633333333 | 1.72281 | 3.72622 | 5.90213 |
| 0.65 | 1.72409 | 3.72229 | 5.88148 |
| 0.666666667 | 1.72445 | 3.72274 | 5.8742 |
| 0.683333333 | 1.72438 | 3.72714 | 5.86883 |
| 0.7 | 1.72432 | 3.7263 | 5.85959 |
| 0.716666667 | 1.72501 | 3.72178 | 5.8584 |
| 0.733333333 | 1.7242 | 3.71908 | 5.85464 |
| 0.75 | 1.7245 | 3.71653 | 5.8421 |
| 0.766666667 | 1.72722 | 3.70972 | 5.82588 |
| 0.783333333 | 1.72945 | 3.70661 | 5.82148 |
| 0.8 | 1.73222 | 3.70181 | 5.81258 |
| 0.816666667 | 1.73261 | 3.70313 | 5.82718 |
| 0.833333333 | 1.73391 | 3.69998 | 5.82308 |
| 0.85 | 1.73576 | 3.69784 | 5.81204 |
| 0.866666667 | 1.73693 | 3.69413 | 5.79458 |
| 0.883333333 | 1.73746 | 3.69018 | 5.78891 |
| 0.9 | 1.73882 | 3.6844 | 5.79882 |

| timr(hr) | ความเข้มข้น(โมล/ลิตร) | | |
|-------------|-----------------------|---------|---------|
| | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| 0.916666667 | 1.73845 | 3.67967 | 5.7928 |
| 0.933333333 | 1.73919 | 3.67437 | 5.78314 |
| 0.95 | 1.73989 | 3.66968 | 5.78249 |
| 0.966666667 | 1.74135 | 3.66555 | 5.76736 |
| 0.983333333 | 1.74249 | 3.66122 | 5.76248 |
| 1 | 1.74333 | 3.65813 | 5.74386 |
| 1.016666667 | 1.74317 | 3.6555 | 5.75902 |
| 1.033333333 | 1.74301 | 3.65332 | 5.74118 |
| 1.05 | 1.74285 | 3.65254 | 5.74903 |
| 1.066666667 | 1.74317 | 3.6518 | 5.73371 |
| 1.083333333 | 1.7437 | 3.64916 | 5.72834 |
| 1.1 | 1.74443 | 3.64756 | 5.72396 |
| 1.116666667 | 1.74492 | 3.64477 | 5.72486 |
| 1.133333333 | 1.74518 | 3.64178 | 5.71992 |
| 1.15 | 1.745 | 3.638 | 5.714 |

2) สารตั้งชนิดแมกนีเซียมซัลเฟต

| timr(hr) | ความเข้มข้น(โมล/ลิตร) | | |
|-------------|-----------------------|-------------|-------------|
| | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| 0.166666667 | 0 | 0 | 0 |
| 0.183333333 | 1.485089482 | 3.287516709 | 4.711028358 |
| 0.2 | 1.496601803 | 3.450341829 | 4.880625379 |
| 0.216666667 | 1.519626447 | 3.390897738 | 5.025096915 |
| 0.233333333 | 1.531138768 | 3.101430857 | 4.875914351 |

| timr(hr) | ความเข้มข้น(โมล/ลิตร) | | |
|-------------|-----------------------|-------------|-------------|
| | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| 0.25 | 1.540348625 | 3.250299539 | 4.850474797 |
| 0.266666667 | 1.54265109 | 3.217734515 | 4.871203322 |
| 0.283333333 | 1.545940324 | 3.18782786 | 4.851013201 |
| 0.3 | 1.549846291 | 3.171213052 | 4.84764818 |
| 0.316666667 | 1.556721705 | 3.14795232 | 4.845030942 |
| 0.333333333 | 1.562222036 | 3.118488727 | 4.888163024 |
| 0.35 | 1.562536009 | 3.066187325 | 4.892617087 |
| 0.366666667 | 1.565675733 | 3.098846332 | 4.879055036 |
| 0.383333333 | 1.565675733 | 3.115745154 | 4.882074926 |
| 0.4 | 1.568142659 | 3.15349059 | 4.861781266 |
| 0.416666667 | 1.566443221 | 3.207913317 | 4.925851251 |
| 0.433333333 | 1.569273333 | 3.167336263 | 4.984268003 |
| 0.45 | 1.567030124 | 3.15616199 | 4.954893355 |
| 0.466666667 | 1.566315306 | 3.150536846 | 5.05231619 |
| 0.483333333 | 1.56809938 | 3.149584652 | 5.124607058 |
| 0.5 | 1.575461206 | 3.14795232 | 5.182131194 |
| 0.516666667 | 1.574995231 | 3.150167628 | 5.225203453 |
| 0.533333333 | 1.574571618 | 3.149362062 | 5.201831858 |
| 0.55 | 1.578189126 | 3.149300769 | 5.09528441 |
| 0.566666667 | 1.582944215 | 3.150536846 | 4.996045574 |
| 0.583333333 | 1.585937419 | 3.15291461 | 4.980122298 |
| 0.6 | 1.587372031 | 3.156898755 | 4.974845946 |
| 0.616666667 | 1.588273994 | 3.160587779 | 4.967866645 |
| 0.633333333 | 1.58911153 | 3.162905648 | 4.949271792 |

| timr(hr) | ความเข้มข้น(โมล/ลิตร) | | |
|-------------|-----------------------|-------------|-------------|
| | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| 0.65 | 1.590288282 | 3.166133122 | 4.931959343 |
| 0.666666667 | 1.590619096 | 3.166560905 | 4.925851251 |
| 0.683333333 | 1.590557202 | 3.170462706 | 4.921352979 |
| 0.7 | 1.590499176 | 3.177512833 | 4.913602577 |
| 0.716666667 | 1.591142384 | 3.179906456 | 4.912603268 |
| 0.733333333 | 1.590393364 | 3.178966629 | 4.909445788 |
| 0.75 | 1.590673917 | 3.17940969 | 4.898931089 |
| 0.766666667 | 1.59317739 | 3.179828137 | 4.885336407 |
| 0.783333333 | 1.595234396 | 3.176451955 | 4.88164398 |
| 0.8 | 1.597789051 | 3.176110048 | 4.874178709 |
| 0.816666667 | 1.598146383 | 3.174195197 | 4.886423568 |
| 0.833333333 | 1.599349273 | 3.177415913 | 4.882980893 |
| 0.85 | 1.601055063 | 3.176697289 | 4.873731191 |
| 0.866666667 | 1.602131418 | 3.176751321 | 4.859089249 |
| 0.883333333 | 1.602622253 | 3.175360314 | 4.854331267 |
| 0.9 | 1.603875709 | 3.173680099 | 4.862637816 |
| 0.916666667 | 1.603538479 | 3.170351543 | 4.857593685 |
| 0.933333333 | 1.604216983 | 3.167841931 | 4.849491626 |
| 0.95 | 1.604866615 | 3.164779232 | 4.848951231 |
| 0.966666667 | 1.606208698 | 3.162167212 | 4.836263195 |
| 0.983333333 | 1.607261058 | 3.159978277 | 4.832169087 |
| 1 | 1.608041076 | 3.157566756 | 4.816555393 |
| 1.016666667 | 1.607887579 | 3.15616199 | 4.829265933 |
| 1.033333333 | 1.607739985 | 3.155109468 | 4.814308595 |

| timr(hr) | ความเข้มข้น(โมล/ลิตร) | | |
|-------------|-----------------------|-------------|-------------|
| | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| 1.05 | 1.60759796 | 3.154389252 | 4.820893095 |
| 1.066666667 | 1.607887579 | 3.154844389 | 4.808040646 |
| 1.083333333 | 1.60837598 | 3.155282975 | 4.803535824 |
| 1.1 | 1.609052516 | 3.154044417 | 4.799864893 |
| 1.116666667 | 1.609503343 | 3.153665482 | 4.800620546 |
| 1.133333333 | 1.609740136 | 3.152230156 | 4.796476666 |
| 1.15 | 1.609578654 | 3.150580652 | 4.79151508 |

3) สารตั้งชนิดอิตีทีเอ

| timr(hr) | ความเข้มข้น(โมล/ลิตร) | | |
|----------|-----------------------|---------|---------|
| | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| 0.16667 | 0 | 0 | 0 |
| 0.18333 | 0.80596 | 1.91591 | 2.68728 |
| 0.2 | 0.81221 | 2.0108 | 2.78402 |
| 0.21667 | 0.8247 | 2.21715 | 2.71236 |
| 0.23333 | 0.82626 | 2.19155 | 2.72759 |
| 0.25 | 0.83595 | 2.25571 | 2.72383 |
| 0.26667 | 0.8372 | 2.17649 | 2.74282 |
| 0.28333 | 0.83898 | 2.11602 | 2.79784 |
| 0.3 | 0.8411 | 2.07406 | 2.76521 |
| 0.31667 | 0.84483 | 2.0354 | 2.76372 |
| 0.33333 | 0.84782 | 1.99815 | 2.75607 |
| 0.35 | 0.84799 | 1.97589 | 2.79086 |
| 0.36667 | 0.84969 | 1.95658 | 2.78312 |
| 0.38333 | 0.84969 | 1.95484 | 2.78485 |

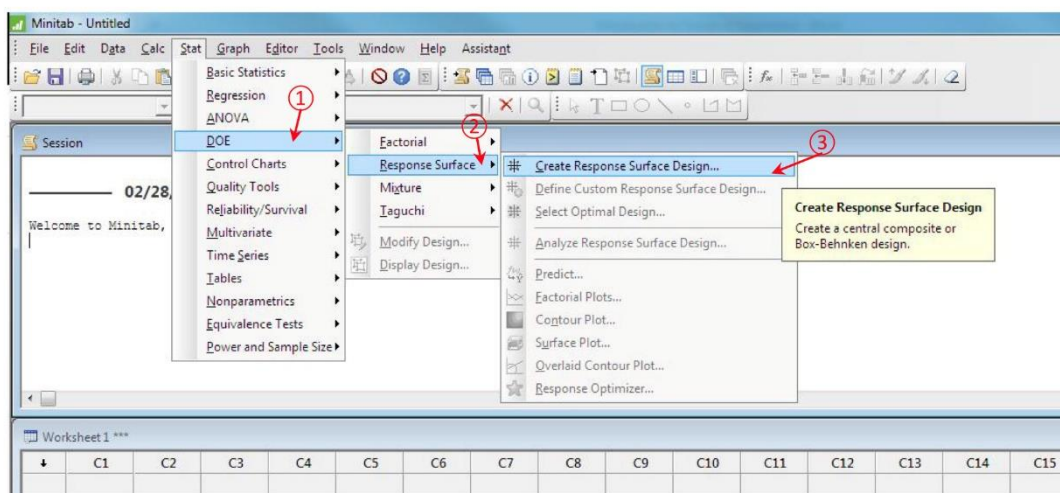
| timr(hr) | ความเข้มข้น(โมล/ลิตร) | | |
|----------|-----------------------|---------|---------|
| | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| 0.4 | 0.85103 | 1.99208 | 2.77327 |
| 0.41667 | 0.85011 | 1.96893 | 2.76754 |
| 0.43333 | 0.85165 | 1.95432 | 2.77596 |
| 0.45 | 0.85043 | 1.94409 | 2.82638 |
| 0.46667 | 0.85004 | 1.9375 | 2.88793 |
| 0.48333 | 0.85101 | 1.93113 | 2.92319 |
| 0.5 | 0.855 | 1.92766 | 2.90226 |
| 0.51667 | 0.85475 | 1.9228 | 2.8782 |
| 0.53333 | 0.85452 | 1.91879 | 2.86952 |
| 0.55 | 0.85648 | 1.91591 | 2.85973 |
| 0.56667 | 0.85907 | 1.91403 | 2.84986 |
| 0.58333 | 0.86069 | 1.91338 | 2.84078 |
| 0.6 | 0.86147 | 1.91278 | 2.83777 |
| 0.61667 | 0.86196 | 1.91156 | 2.83378 |
| 0.63333 | 0.86241 | 1.91107 | 2.82318 |
| 0.65 | 0.86305 | 1.90905 | 2.8133 |
| 0.66667 | 0.86323 | 1.90928 | 2.80982 |
| 0.68333 | 0.8632 | 1.91154 | 2.80725 |
| 0.7 | 0.86317 | 1.91111 | 2.80283 |
| 0.71667 | 0.86351 | 1.90879 | 2.80226 |
| 0.73333 | 0.86311 | 1.9074 | 2.80046 |
| 0.75 | 0.86326 | 1.9061 | 2.79446 |
| 0.76667 | 0.86462 | 1.90261 | 2.78671 |
| 0.78333 | 0.86574 | 1.90101 | 2.7846 |

| timr(hr) | ความเข้มข้น(โมล/ลิตร) | | |
|----------|-----------------------|---------|---------|
| | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| 0.8 | 0.86712 | 1.89855 | 2.78034 |
| 0.81667 | 0.86732 | 1.89923 | 2.78733 |
| 0.83333 | 0.86797 | 1.89761 | 2.78536 |
| 0.85 | 0.86889 | 1.89651 | 2.78009 |
| 0.86667 | 0.86948 | 1.89461 | 2.77174 |
| 0.88333 | 0.86974 | 1.89258 | 2.76902 |
| 0.9 | 0.87043 | 1.88962 | 2.77376 |
| 0.91667 | 0.87024 | 1.88719 | 2.77088 |
| 0.93333 | 0.87061 | 1.88448 | 2.76626 |
| 0.95 | 0.87096 | 1.88207 | 2.76595 |
| 0.96667 | 0.87169 | 1.87995 | 2.75872 |
| 0.98333 | 0.87226 | 1.87773 | 2.75638 |
| 1 | 0.87269 | 1.87615 | 2.74747 |
| 1.01667 | 0.8726 | 1.8748 | 2.75472 |
| 1.03333 | 0.87252 | 1.87368 | 2.74619 |
| 1.05 | 0.87245 | 1.87328 | 2.74995 |
| 1.06667 | 0.8726 | 1.8729 | 2.74262 |
| 1.08333 | 0.87287 | 1.87155 | 2.74005 |
| 1.1 | 0.87323 | 1.87072 | 2.73795 |
| 1.11667 | 0.87348 | 1.8693 | 2.73838 |
| 1.13333 | 0.87361 | 1.86776 | 2.73602 |
| 1.15 | 0.87352 | 1.86582 | 2.73319 |

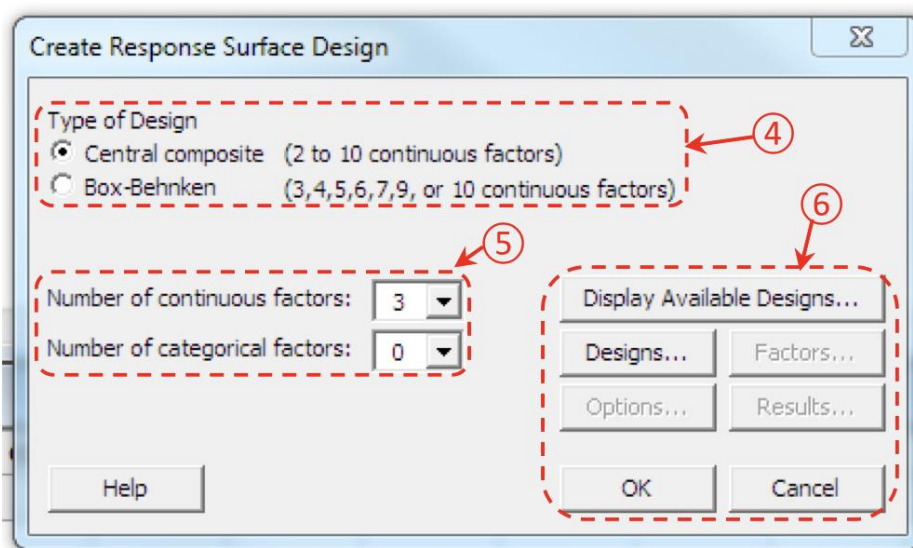
ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง (DOE) ด้วยโปรแกรม Minitab

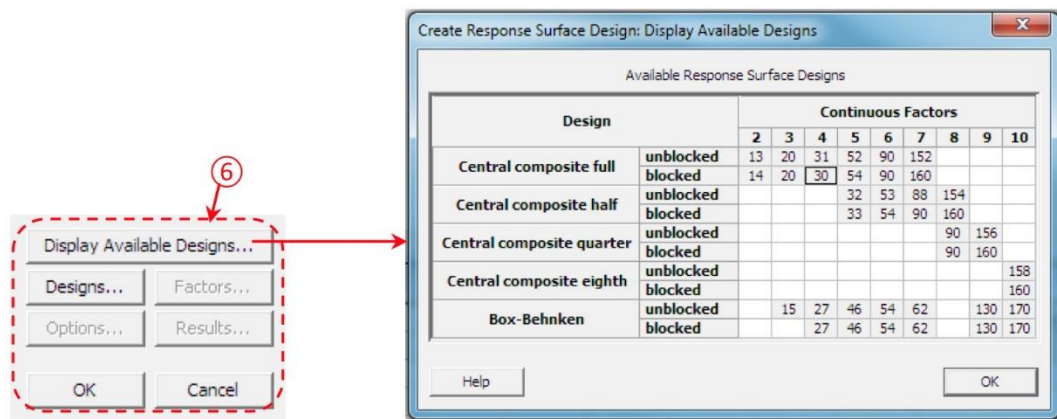
- 1) เปิดโปรแกรม Minitab
- 2) Stat > DOE (1) > Response Surface (2) > Create Response Surface Design (3)



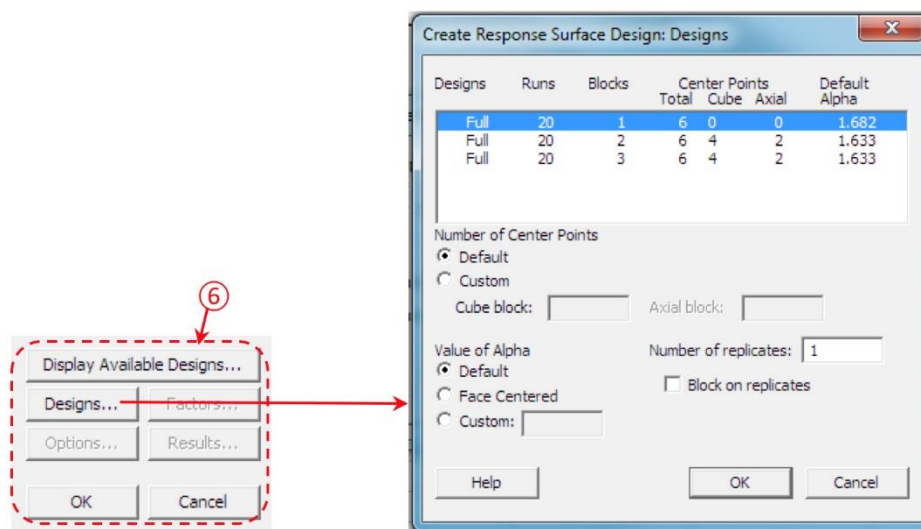
- 3) เลือก Type of Design: Central composite (4), Number of Continuous Factor = 3 (5)



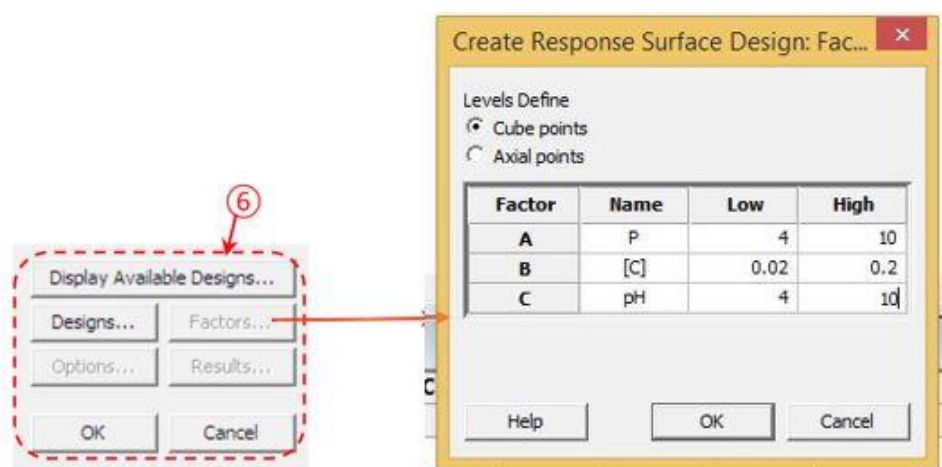
- 4) กด Display Available Designs เพื่อดูวิธีการออกแบบที่สามารถใช้ได้ (6) > OK



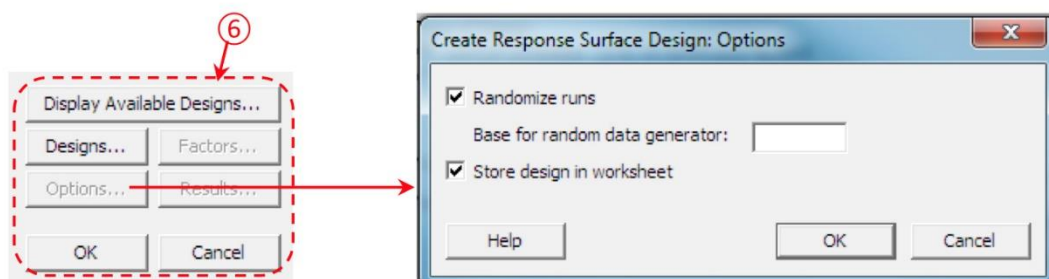
5) กดเข้าไปที่ Designs > Number of replicates = 1 > OK



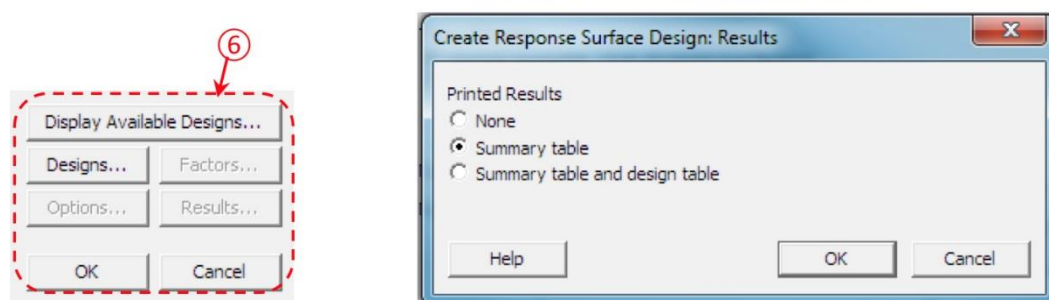
6) กดเข้าไปที่ Factor ใส่ชื่อพารามิเตอร์ และช่วงของพารามิเตอร์ > OK



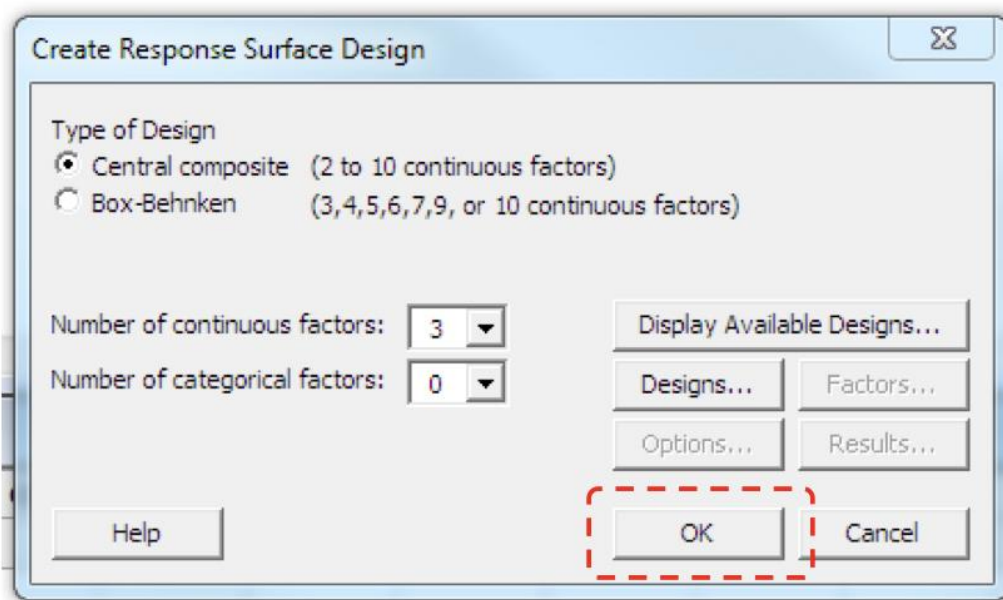
7) กดเข้าไปที่ Options กดเลือก Randomize run และ Store design in worksheet > OK



8) กดเข้าไปที่ Results กดเลือก Summary table > OK



9) กด OK จบการออกแบบ



ภาคผนวก ข

ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดเมื่อผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันจากการออกแบบการทดลอง

1) สารตั้งชนิดแมกนีเซียมซัลเฟต

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.4180 | 0.3625 | 0.0737 | 0.6334 | 0.6633 |
| 2 | 0.1258 | 0.2319 | 0.0293 | 0.6034 | 0.6208 |
| 3 | 0.2552 | 0.2037 | 0.0229 | 0.5354 | 0.5707 |
| 4 | 0.0941 | 0.1423 | 0.0176 | 0.5060 | 0.5195 |
| 5 | 0.0504 | 0.1358 | 0.0130 | 0.5222 | 0.4550 |
| 6 | 0.0407 | 0.1276 | 0.0150 | 0.4898 | 0.3894 |
| 7 | 0.0308 | 0.1235 | 0.0185 | 0.4565 | 0.3927 |
| 8 | 0.0241 | 0.1203 | 0.0180 | 0.4338 | 0.3477 |
| 9 | 0.0252 | 0.1155 | 0.0181 | 0.4014 | 0.3525 |
| 10 | 0.0270 | 0.1157 | 0.0176 | 0.3735 | 0.3555 |
| 11 | 0.0194 | 0.1093 | 0.0203 | 0.4541 | 0.3328 |
| 12 | 0.0298 | 0.1086 | 0.0168 | 0.5138 | 0.3010 |
| 13 | 0.0270 | 0.1116 | 0.0206 | 0.4487 | 0.3789 |
| 14 | 0.0206 | 0.1103 | 0.0199 | 0.4128 | 0.4466 |
| 15 | 0.0244 | 0.1086 | 0.0188 | 0.3450 | 0.4200 |
| 16 | 0.0226 | 0.1075 | 0.0180 | 0.2923 | 0.3555 |
| 17 | 0.0227 | 0.1043 | 0.0157 | 0.2647 | 0.2671 |
| 18 | 0.0208 | 0.1014 | 0.0105 | 0.2270 | 0.2186 |
| 19 | 0.0221 | 0.1005 | 0.0122 | 0.2216 | 0.2057 |
| 20 | 0.0204 | 0.0926 | 0.0134 | 0.2066 | 0.1823 |
| 21 | 0.0147 | 0.0870 | 0.0119 | 0.1892 | 0.1778 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 22 | 0.0194 | 0.0862 | 0.0058 | 0.1706 | 0.1415 |
| 23 | 0.0227 | 0.0836 | 0.0158 | 0.1766 | 0.1269 |
| 24 | 0.0166 | 0.0798 | 0.0246 | 0.1646 | 0.1140 |
| 25 | 0.0221 | 0.0806 | 0.0234 | 0.1748 | 0.1212 |
| 26 | 0.0234 | 0.0821 | 0.0229 | 0.1874 | 0.1245 |
| 27 | 0.0194 | 0.0790 | 0.0209 | 0.1616 | 0.1152 |
| 28 | 0.0209 | 0.0770 | 0.0204 | 0.1523 | 0.1068 |
| 29 | 0.0236 | 0.0781 | 0.0186 | 0.1550 | 0.1053 |
| 30 | 0.0213 | 0.0763 | 0.0171 | 0.1520 | 0.0954 |
| 31 | 0.0180 | 0.0757 | 0.0193 | 0.1338 | 0.0888 |
| 32 | 0.0203 | 0.0760 | 0.0130 | 0.1287 | 0.0894 |
| 33 | 0.0184 | 0.0737 | 0.0170 | 0.1919 | 0.0975 |
| 34 | 0.0211 | 0.0720 | 0.0155 | 0.1997 | 0.0993 |
| 35 | 0.0206 | 0.0679 | 0.0180 | 0.2048 | 0.0975 |
| 36 | 0.0213 | 0.0676 | 0.0180 | 0.2018 | 0.0969 |
| 37 | 0.0194 | 0.0714 | 0.0209 | 0.1895 | 0.1023 |
| 38 | 0.0181 | 0.0669 | 0.0226 | 0.1607 | 0.1041 |
| 39 | 0.0208 | 0.0636 | 0.0178 | 0.1523 | 0.0966 |
| 40 | 0.0180 | 0.0686 | 0.0219 | 0.1526 | 0.1062 |
| 41 | 0.0181 | 0.0671 | 0.0224 | 0.2150 | 0.0975 |
| 42 | 0.0206 | 0.0658 | 0.0175 | 0.2327 | 0.0864 |
| 43 | 0.0208 | 0.0645 | 0.0203 | 0.2195 | 0.0801 |
| 44 | 0.0186 | 0.0633 | 0.0186 | 0.1886 | 0.0825 |
| 45 | 0.0191 | 0.0636 | 0.0176 | 0.1760 | 0.0843 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 46 | 0.0175 | 0.0628 | 0.0168 | 0.1517 | 0.0753 |
| 47 | 0.0208 | 0.0603 | 0.0188 | 0.1586 | 0.0753 |
| 48 | 0.0188 | 0.0595 | 0.0185 | 0.1490 | 0.0783 |
| 49 | 0.0181 | 0.0546 | 0.0158 | 0.1694 | 0.0717 |
| 50 | 0.0353 | 0.0579 | 0.0176 | 0.1655 | 0.0771 |
| 51 | 0.0193 | 0.0562 | 0.0208 | 0.1601 | 0.0759 |
| 52 | 0.0188 | 0.0539 | 0.0224 | 0.1529 | 0.0798 |
| 53 | 0.0143 | 0.0567 | 0.0211 | 0.1377 | 0.0819 |
| 54 | 0.0156 | 0.0597 | 0.0185 | 0.1571 | 0.0684 |
| 55 | 0.0193 | 0.0534 | 0.0188 | 0.1281 | 0.0699 |
| 56 | 0.0186 | 0.0567 | 0.0168 | 0.1251 | 0.0732 |
| 57 | 0.0165 | 0.0526 | 0.0185 | 0.1119 | 0.0744 |
| 58 | 0.0171 | 0.0516 | 0.0157 | 0.1005 | 0.0672 |
| 59 | 0.0153 | 0.0498 | 0.0157 | 0.1155 | 0.0711 |
| 60 | 0.0183 | 0.0501 | 0.0158 | 0.1065 | 0.0675 |
| 61 | 0.0135 | 0.0508 | 0.0166 | 0.1062 | 0.0615 |
| 62 | 0.0153 | 0.0485 | 0.0191 | 0.1062 | 0.0807 |
| 63 | 0.0160 | 0.0460 | 0.0114 | 0.1209 | 0.0816 |
| 64 | 0.0170 | 0.0501 | 0.0201 | 0.1170 | 0.0765 |
| 65 | 0.0171 | 0.0511 | 0.0223 | 0.1239 | 0.0792 |
| 66 | 0.0211 | 0.0476 | 0.0219 | 0.1248 | 0.0732 |
| 67 | 0.0211 | 0.0509 | 0.0204 | 0.1026 | 0.0732 |
| 68 | 0.0176 | 0.0549 | 0.0195 | 0.0933 | 0.0633 |
| 69 | 0.0181 | 0.0509 | 0.0178 | 0.0999 | 0.0675 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 70 | 0.0158 | 0.0598 | 0.0188 | 0.1059 | 0.0717 |
| 71 | 0.0173 | 0.0486 | 0.0199 | 0.0942 | 0.0867 |
| 72 | 0.0191 | 0.0493 | 0.0223 | 0.0849 | 0.0759 |
| 73 | 0.0186 | 0.0425 | 0.0221 | 0.0783 | 0.0579 |
| 74 | 0.0155 | 0.0440 | 0.0211 | 0.0801 | 0.0573 |
| 75 | 0.0191 | 0.0453 | 0.0208 | 0.0657 | 0.0468 |
| 76 | 0.0122 | 0.0506 | 0.0180 | 0.0774 | 0.0588 |
| 77 | 0.0199 | 0.0435 | 0.0168 | 0.0753 | 0.0642 |
| 78 | 0.0217 | 0.0438 | 0.0163 | 0.1032 | 0.0648 |
| 79 | 0.0163 | 0.0424 | 0.0176 | 0.0645 | 0.0681 |
| 80 | 0.0173 | 0.0450 | 0.0150 | 0.0669 | 0.0594 |
| 81 | 0.0176 | 0.0420 | 0.0191 | 0.0627 | 0.0585 |
| 82 | 0.0142 | 0.0457 | 0.0216 | 0.0675 | 0.0564 |
| 83 | 0.0143 | 0.0434 | 0.0191 | 0.0687 | 0.0594 |
| 84 | 0.0188 | 0.0402 | 0.0201 | 0.0750 | 0.0576 |
| 85 | 0.0128 | 0.0402 | 0.0183 | 0.0771 | 0.0603 |
| 86 | 0.0158 | 0.0384 | 0.0213 | 0.0660 | 0.0738 |
| 87 | 0.0147 | 0.0402 | 0.0226 | 0.0774 | 0.0717 |
| 88 | 0.0105 | 0.0434 | 0.0211 | 0.1056 | 0.0648 |
| 89 | 0.0166 | 0.0405 | 0.0180 | 0.0996 | 0.0708 |
| 90 | 0.0183 | 0.0374 | 0.0190 | 0.0930 | 0.0651 |
| 91 | 0.0209 | 0.0377 | 0.0170 | 0.0816 | 0.0636 |
| 92 | 0.0193 | 0.0343 | 0.0203 | 0.1221 | 0.0657 |
| 93 | 0.0183 | 0.0361 | 0.0157 | 0.0849 | 0.0663 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 94 | 0.0206 | 0.0326 | 0.0163 | 0.0861 | 0.0678 |
| 95 | 0.0155 | 0.0343 | 0.0195 | 0.0606 | 0.0720 |
| 96 | 0.0193 | 0.0381 | 0.0214 | 0.0621 | 0.0654 |
| 97 | 0.0168 | 0.0363 | 0.0216 | 0.0621 | 0.0555 |
| 98 | 0.0153 | 0.0373 | 0.0209 | 0.0594 | 0.0576 |
| 99 | 0.0150 | 0.0340 | 0.0193 | 0.0489 | 0.0486 |
| 100 | 0.0143 | 0.0376 | 0.0195 | 0.0474 | 0.0666 |
| 101 | 0.0135 | 0.0349 | 0.0206 | 0.0537 | 0.0612 |
| 102 | 0.0181 | 0.0340 | 0.0196 | 0.0570 | 0.0621 |
| 103 | 0.0188 | 0.0330 | 0.0196 | 0.0531 | 0.0588 |
| 104 | 0.0180 | 0.0391 | 0.0206 | 0.0588 | 0.0501 |
| 105 | 0.0161 | 0.0373 | 0.0221 | 0.0417 | 0.0465 |
| 106 | 0.0222 | 0.0284 | 0.0223 | 0.0411 | 0.0444 |
| 107 | 0.0166 | 0.0284 | 0.0214 | 0.0582 | 0.0441 |
| 108 | 0.0166 | 0.0300 | 0.0203 | 0.0519 | 0.0513 |
| 109 | 0.0262 | 0.0320 | 0.0173 | 0.0435 | 0.0450 |
| 110 | 0.0161 | 0.0318 | 0.0173 | 0.0346 | 0.0444 |
| 111 | 0.0138 | 0.0328 | 0.0181 | 0.0343 | 0.0420 |
| 112 | 0.0147 | 0.0303 | 0.0157 | 0.0519 | 0.0435 |
| 113 | 0.0119 | 0.0295 | 0.0218 | 0.0393 | 0.0474 |
| 114 | 0.0140 | 0.0284 | 0.0201 | 0.0391 | 0.0307 |
| 115 | 0.0156 | 0.0265 | 0.0232 | 0.0504 | 0.0388 |
| 116 | 0.0152 | 0.0293 | 0.0204 | 0.0501 | 0.0385 |
| 117 | 0.0163 | 0.0260 | 0.0241 | 0.0423 | 0.0331 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 118 | 0.0199 | 0.0333 | 0.0209 | 0.0486 | 0.0385 |
| 119 | 0.0194 | 0.0336 | 0.0206 | 0.0564 | 0.0220 |
| 120 | 0.0156 | 0.0325 | 0.0206 | 0.0450 | 0.0408 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 0 | 0 | 0 | | | 0 |
| 1 | 0.4063 | 0.1376 | 0.4510 | 0.6498 | 0.0352 |
| 2 | 0.1141 | 0.1172 | 0.3252 | 0.4887 | 0.0474 |
| 3 | 0.2435 | 0.1618 | 0.2721 | 0.4324 | 0.0422 |
| 4 | 0.0824 | 0.1576 | 0.1726 | 0.3095 | 0.0495 |
| 5 | 0.0387 | 0.1828 | 0.2853 | 0.2966 | 0.0499 |
| 6 | 0.0290 | 0.1747 | 0.3411 | 0.2802 | 0.0485 |
| 7 | 0.0191 | 0.1555 | 0.3408 | 0.2719 | 0.0432 |
| 8 | 0.0124 | 0.1391 | 0.3309 | 0.2657 | 0.0386 |
| 9 | 0.0135 | 0.1259 | 0.2988 | 0.2561 | 0.0351 |
| 10 | 0.0153 | 0.1166 | 0.2697 | 0.2564 | 0.0319 |
| 11 | 0.0077 | 0.1085 | 0.2499 | 0.2436 | 0.0399 |
| 12 | 0.0181 | 0.1103 | 0.2254 | 0.2423 | 0.0458 |
| 13 | 0.0153 | 0.1082 | 0.2254 | 0.2482 | 0.0378 |
| 14 | 0.0089 | 0.1016 | 0.2167 | 0.2456 | 0.0335 |
| 15 | 0.0127 | 0.0929 | 0.2272 | 0.2413 | 0.0273 |
| 16 | 0.0109 | 0.0899 | 0.2257 | 0.2399 | 0.0225 |
| 17 | 0.0110 | 0.0845 | 0.2443 | 0.2337 | 0.0200 |
| 18 | 0.0091 | 0.0767 | 0.2455 | 0.2277 | 0.0170 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 19 | 0.0104 | 0.0899 | 0.2293 | 0.2261 | 0.0158 |
| 20 | 0.0087 | 0.0800 | 0.2137 | 0.2103 | 0.0153 |
| 21 | 0.0030 | 0.0779 | 0.1984 | 0.1991 | 0.0146 |
| 22 | 0.0077 | 0.0773 | 0.2008 | 0.1974 | 0.0133 |
| 23 | 0.0110 | 0.0722 | 0.1813 | 0.1921 | 0.0135 |
| 24 | 0.0049 | 0.0659 | 0.1663 | 0.1846 | 0.0130 |
| 25 | 0.0104 | 0.0683 | 0.1549 | 0.1862 | 0.0132 |
| 26 | 0.0117 | 0.0653 | 0.1612 | 0.1892 | 0.0136 |
| 27 | 0.0077 | 0.0689 | 0.1439 | 0.1829 | 0.0123 |
| 28 | 0.0092 | 0.0689 | 0.1316 | 0.1790 | 0.0118 |
| 29 | 0.0119 | 0.0638 | 0.1364 | 0.1813 | 0.0114 |
| 30 | 0.0096 | 0.0623 | 0.1307 | 0.1776 | 0.0112 |
| 31 | 0.0063 | 0.0632 | 0.1472 | 0.1763 | 0.0098 |
| 32 | 0.0086 | 0.0608 | 0.1469 | 0.1770 | 0.0090 |
| 33 | 0.0068 | 0.0492 | 0.1271 | 0.1724 | 0.0131 |
| 34 | 0.0094 | 0.0572 | 0.1277 | 0.1691 | 0.0140 |
| 35 | 0.0089 | 0.0521 | 0.1202 | 0.1608 | 0.0147 |
| 36 | 0.0096 | 0.0506 | 0.1187 | 0.1602 | 0.0141 |
| 37 | 0.0077 | 0.0515 | 0.1199 | 0.1677 | 0.0130 |
| 38 | 0.0064 | 0.0503 | 0.1154 | 0.1588 | 0.0115 |
| 39 | 0.0091 | 0.0521 | 0.1073 | 0.1523 | 0.0115 |
| 40 | 0.0063 | 0.0593 | 0.1088 | 0.1621 | 0.0106 |
| 41 | 0.0064 | 0.0530 | 0.1103 | 0.1592 | 0.0156 |
| 42 | 0.0089 | 0.0572 | 0.1094 | 0.1565 | 0.0004 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 43 | 0.0091 | 0.0501 | 0.1238 | 0.1539 | 0.0041 |
| 44 | 0.0069 | 0.0575 | 0.1304 | 0.1516 | 0.0090 |
| 45 | 0.0074 | 0.0554 | 0.1292 | 0.1523 | 0.0120 |
| 46 | 0.0058 | 0.0554 | 0.1220 | 0.1506 | 0.0110 |
| 47 | 0.0091 | 0.0527 | 0.1259 | 0.1457 | 0.0116 |
| 48 | 0.0071 | 0.0498 | 0.1211 | 0.1440 | 0.0103 |
| 49 | 0.0064 | 0.0551 | 0.1085 | 0.1341 | 0.0133 |
| 50 | 0.0236 | 0.0551 | 0.1169 | 0.1407 | 0.0115 |
| 51 | 0.0076 | 0.0536 | 0.1145 | 0.1374 | 0.0161 |
| 52 | 0.0071 | 0.0593 | 0.1403 | 0.1328 | 0.0078 |
| 53 | 0.0026 | 0.0551 | 0.1409 | 0.1384 | 0.0090 |
| 54 | 0.0040 | 0.0524 | 0.1292 | 0.1443 | 0.0093 |
| 55 | 0.0076 | 0.0444 | 0.1298 | 0.1318 | 0.0087 |
| 56 | 0.0069 | 0.0542 | 0.1364 | 0.1384 | 0.0077 |
| 57 | 0.0048 | 0.0548 | 0.1340 | 0.1302 | 0.0074 |
| 58 | 0.0054 | 0.0554 | 0.1283 | 0.1282 | 0.0074 |
| 59 | 0.0036 | 0.0626 | 0.1307 | 0.1246 | 0.0086 |
| 60 | 0.0066 | 0.0608 | 0.1271 | 0.1252 | 0.0075 |
| 61 | 0.0018 | 0.0578 | 0.1220 | 0.1265 | 0.0076 |
| 62 | 0.0036 | 0.0602 | 0.1058 | 0.1219 | 0.0082 |
| 63 | 0.0043 | 0.0620 | 0.1004 | 0.1170 | 0.0091 |
| 64 | 0.0053 | 0.0653 | 0.0959 | 0.1252 | 0.0086 |
| 65 | 0.0054 | 0.0593 | 0.0896 | 0.1272 | 0.0092 |
| 66 | 0.0094 | 0.0611 | 0.0962 | 0.1203 | 0.0095 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 67 | 0.0094 | 0.0608 | 0.0890 | 0.1269 | 0.0073 |
| 68 | 0.0059 | 0.0572 | 0.0821 | 0.1348 | 0.0061 |
| 69 | 0.0064 | 0.0551 | 0.0785 | 0.1269 | 0.0062 |
| 70 | 0.0041 | 0.0668 | 0.0788 | 0.1447 | 0.0057 |
| 71 | 0.0056 | 0.0701 | 0.0794 | 0.1223 | 0.0062 |
| 72 | 0.0074 | 0.0686 | 0.0812 | 0.1236 | 0.0053 |
| 73 | 0.0069 | 0.0590 | 0.0785 | 0.1101 | 0.0061 |
| 74 | 0.0038 | 0.0605 | 0.0821 | 0.1130 | 0.0059 |
| 75 | 0.0074 | 0.0548 | 0.0773 | 0.1157 | 0.0047 |
| 76 | 0.0005 | 0.0593 | 0.0806 | 0.1262 | 0.0047 |
| 77 | 0.0082 | 0.0599 | 0.0776 | 0.1120 | 0.0052 |
| 78 | 0.0101 | 0.0590 | 0.0731 | 0.1127 | 0.0068 |
| 79 | 0.0046 | 0.0587 | 0.0749 | 0.1097 | 0.0044 |
| 80 | 0.0056 | 0.0548 | 0.0755 | 0.1150 | 0.0041 |
| 81 | 0.0059 | 0.0533 | 0.0851 | 0.1091 | 0.0041 |
| 82 | 0.0025 | 0.0533 | 0.0776 | 0.1163 | 0.0040 |
| 83 | 0.0026 | 0.0486 | 0.0758 | 0.1117 | 0.0040 |
| 84 | 0.0071 | 0.0530 | 0.0677 | 0.1054 | 0.0046 |
| 85 | 0.0012 | 0.0390 | 0.0632 | 0.1054 | 0.0048 |
| 86 | 0.0041 | 0.0503 | 0.0725 | 0.1018 | 0.0043 |
| 87 | 0.0030 | 0.0581 | 0.0785 | 0.1054 | 0.0045 |
| 88 | -0.0012 | 0.0728 | 0.0752 | 0.1117 | 0.0052 |
| 89 | 0.0049 | 0.0674 | 0.0764 | 0.1061 | 0.0057 |
| 90 | 0.0066 | 0.0623 | 0.0716 | 0.0998 | 0.0055 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 91 | 0.0092 | 0.0554 | 0.0710 | 0.1005 | 0.0048 |
| 92 | 0.0076 | 0.0548 | 0.0737 | 0.0936 | 0.0080 |
| 93 | 0.0066 | 0.0635 | 0.0674 | 0.0972 | 0.0052 |
| 94 | 0.0089 | 0.0599 | 0.0671 | 0.0903 | 0.0060 |
| 95 | 0.0038 | 0.0635 | 0.0722 | 0.0936 | 0.0043 |
| 96 | 0.0076 | 0.0560 | 0.0626 | 0.0972 | 0.0038 |
| 97 | 0.0051 | 0.0506 | 0.0695 | 0.0975 | 0.0041 |
| 98 | 0.0036 | 0.0515 | 0.0719 | 0.0995 | 0.0041 |
| 99 | 0.0033 | 0.0539 | 0.0686 | 0.0929 | 0.0041 |
| 100 | 0.0026 | 0.0495 | 0.0686 | 0.1002 | 0.0038 |
| 101 | 0.0018 | 0.0501 | 0.0695 | 0.0949 | 0.0043 |
| 102 | 0.0064 | 0.0459 | 0.0701 | 0.0929 | 0.0044 |
| 103 | 0.0071 | 0.0477 | 0.0680 | 0.0909 | 0.0043 |
| 104 | 0.0063 | 0.0548 | 0.0632 | 0.0981 | 0.0040 |
| 105 | 0.0045 | 0.0569 | 0.0749 | 0.0995 | 0.0034 |
| 106 | 0.0105 | 0.0575 | 0.0650 | 0.0827 | 0.0044 |
| 107 | 0.0049 | 0.0569 | 0.0632 | 0.0847 | 0.0050 |
| 108 | 0.0049 | 0.0572 | 0.0773 | 0.0878 | 0.0051 |
| 109 | 0.0145 | 0.0551 | 0.0718 | 0.0890 | 0.0037 |
| 110 | 0.0045 | 0.0533 | 0.0791 | 0.0886 | 0.0030 |
| 111 | 0.0021 | 0.0512 | 0.0809 | 0.0906 | 0.0033 |
| 112 | 0.0030 | 0.0495 | 0.0827 | 0.0857 | 0.0050 |
| 113 | 0.0002 | 0.0420 | 0.0821 | 0.0840 | 0.0042 |
| 114 | 0.0023 | 0.0366 | 0.0776 | 0.0817 | 0.0043 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 115 | 0.0040 | 0.0462 | 0.0803 | 0.0831 | 0.0058 |
| 116 | 0.0035 | 0.0456 | 0.0782 | 0.0837 | 0.0052 |
| 117 | 0.0046 | 0.0414 | 0.0722 | 0.0771 | 0.0054 |
| 118 | 0.0082 | 0.0444 | 0.0776 | 0.0916 | 0.0048 |
| 119 | 0.0077 | 0.0456 | 0.0827 | 0.0923 | 0.0054 |
| 120 | 0.0040 | 0.0471 | 0.0788 | 0.0899 | 0.0046 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.7395 | 0.6540 | 0.2338 | 0.6633 | 0.6169 |
| 2 | 0.2076 | 0.6115 | 0.2134 | 0.6208 | 0.5773 |
| 3 | 0.4431 | 0.5614 | 0.2580 | 0.5707 | 0.5308 |
| 4 | 0.1500 | 0.5102 | 0.2538 | 0.5195 | 0.4831 |
| 5 | 0.0705 | 0.4457 | 0.2790 | 0.4550 | 0.4232 |
| 6 | 0.0528 | 0.3801 | 0.2709 | 0.3894 | 0.3621 |
| 7 | 0.0348 | 0.3834 | 0.2517 | 0.3927 | 0.3652 |
| 8 | 0.0225 | 0.3384 | 0.2353 | 0.3477 | 0.3234 |
| 9 | 0.0246 | 0.3432 | 0.2221 | 0.3525 | 0.3525 |
| 10 | 0.0279 | 0.3642 | 0.2128 | 0.3735 | 0.3735 |
| 11 | 0.0141 | 0.4448 | 0.2047 | 0.4541 | 0.4541 |
| 12 | 0.0330 | 0.5045 | 0.2065 | 0.5138 | 0.5138 |
| 13 | 0.0279 | 0.4394 | 0.2044 | 0.4487 | 0.4487 |
| 14 | 0.0162 | 0.4035 | 0.1978 | 0.4128 | 0.4128 |
| 15 | 0.0231 | 0.3357 | 0.1891 | 0.3450 | 0.3414 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 16 | 0.0198 | 0.2830 | 0.1861 | 0.2923 | 0.2892 |
| 17 | 0.0201 | 0.2488 | 0.1807 | 0.2581 | 0.2554 |
| 18 | 0.0165 | 0.2177 | 0.1729 | 0.2270 | 0.2246 |
| 19 | 0.0189 | 0.2123 | 0.1861 | 0.2216 | 0.2192 |
| 20 | 0.0159 | 0.1973 | 0.1762 | 0.2066 | 0.2066 |
| 21 | 0.0054 | 0.1799 | 0.1741 | 0.1892 | 0.1892 |
| 22 | 0.0141 | 0.1613 | 0.1735 | 0.1706 | 0.1706 |
| 23 | 0.0201 | 0.1673 | 0.1684 | 0.1766 | 0.1766 |
| 24 | 0.0090 | 0.1553 | 0.1621 | 0.1646 | 0.1615 |
| 25 | 0.0189 | 0.1655 | 0.1645 | 0.1748 | 0.1715 |
| 26 | 0.0213 | 0.1781 | 0.1615 | 0.1874 | 0.1839 |
| 27 | 0.0141 | 0.1523 | 0.1651 | 0.1616 | 0.1586 |
| 28 | 0.0168 | 0.1430 | 0.1651 | 0.1523 | 0.1495 |
| 29 | 0.0216 | 0.1457 | 0.1600 | 0.1550 | 0.1550 |
| 30 | 0.0174 | 0.1427 | 0.1585 | 0.1520 | 0.1520 |
| 31 | 0.0114 | 0.1245 | 0.1594 | 0.1338 | 0.1338 |
| 32 | 0.0156 | 0.0801 | 0.1570 | 0.0894 | 0.0894 |
| 33 | 0.0123 | 0.0882 | 0.1454 | 0.0975 | 0.0975 |
| 34 | 0.0171 | 0.0900 | 0.1534 | 0.0993 | 0.0993 |
| 35 | 0.0162 | 0.0882 | 0.1483 | 0.0975 | 0.0975 |
| 36 | 0.0174 | 0.0876 | 0.1468 | 0.0969 | 0.0969 |
| 37 | 0.0141 | 0.0930 | 0.1477 | 0.1023 | 0.0918 |
| 38 | 0.0117 | 0.0948 | 0.1465 | 0.1041 | 0.1041 |
| 39 | 0.0165 | 0.1430 | 0.1483 | 0.1523 | 0.1523 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 40 | 0.0114 | 0.1433 | 0.1555 | 0.1526 | 0.1491 |
| 41 | 0.0117 | 0.1404 | 0.1492 | 0.1497 | 0.1462 |
| 42 | 0.0162 | 0.1234 | 0.1534 | 0.1327 | 0.1296 |
| 43 | 0.0165 | 0.0708 | 0.1463 | 0.0801 | 0.0782 |
| 44 | 0.0126 | 0.0732 | 0.1537 | 0.0825 | 0.0806 |
| 45 | 0.0135 | 0.0750 | 0.1516 | 0.0843 | 0.0823 |
| 46 | 0.0105 | 0.0660 | 0.1516 | 0.0753 | 0.0753 |
| 47 | 0.0165 | 0.0660 | 0.1489 | 0.0753 | 0.0753 |
| 48 | 0.0129 | 0.0690 | 0.1460 | 0.0783 | 0.0783 |
| 49 | 0.0117 | 0.0624 | 0.1513 | 0.0717 | 0.0747 |
| 50 | 0.0429 | 0.0678 | 0.1513 | 0.0771 | 0.0751 |
| 51 | 0.0138 | 0.0666 | 0.1498 | 0.0759 | 0.0759 |
| 52 | 0.0129 | 0.0705 | 0.1555 | 0.0798 | 0.0728 |
| 53 | 0.0048 | 0.0726 | 0.1513 | 0.0819 | 0.0719 |
| 54 | 0.0072 | 0.0591 | 0.1486 | 0.0684 | 0.0684 |
| 55 | 0.0138 | 0.0606 | 0.1406 | 0.0699 | 0.0699 |
| 56 | 0.0126 | 0.0639 | 0.1504 | 0.0732 | 0.0732 |
| 57 | 0.0087 | 0.0651 | 0.1510 | 0.0744 | 0.0744 |
| 58 | 0.0099 | 0.0579 | 0.1516 | 0.0672 | 0.0672 |
| 59 | 0.0066 | 0.0618 | 0.1588 | 0.0711 | 0.0711 |
| 60 | 0.0120 | 0.0582 | 0.1570 | 0.0675 | 0.0675 |
| 61 | 0.0033 | 0.0522 | 0.1540 | 0.0615 | 0.0615 |
| 62 | 0.0066 | 0.0714 | 0.1564 | 0.0807 | 0.0807 |
| 63 | 0.0078 | 0.0723 | 0.1582 | 0.0816 | 0.0816 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 64 | 0.0096 | 0.0672 | 0.1615 | 0.0765 | 0.0765 |
| 65 | 0.0099 | 0.0699 | 0.1555 | 0.0792 | 0.0792 |
| 66 | 0.0171 | 0.0639 | 0.1573 | 0.0732 | 0.0732 |
| 67 | 0.0171 | 0.0639 | 0.1570 | 0.0732 | 0.0732 |
| 68 | 0.0108 | 0.0540 | 0.1534 | 0.0633 | 0.0633 |
| 69 | 0.0117 | 0.0582 | 0.1513 | 0.0675 | 0.0675 |
| 70 | 0.0075 | 0.0624 | 0.1630 | 0.0717 | 0.0717 |
| 71 | 0.0102 | 0.0774 | 0.1663 | 0.0867 | 0.0767 |
| 72 | 0.0135 | 0.0666 | 0.1648 | 0.0759 | 0.0759 |
| 73 | 0.0126 | 0.0486 | 0.1552 | 0.0579 | 0.0579 |
| 74 | 0.0069 | 0.0480 | 0.1567 | 0.0573 | 0.0573 |
| 75 | 0.0135 | 0.0375 | 0.1510 | 0.0468 | 0.0468 |
| 76 | 0.0009 | 0.0495 | 0.1555 | 0.0588 | 0.0588 |
| 77 | 0.0150 | 0.0549 | 0.1561 | 0.0642 | 0.0642 |
| 78 | 0.0183 | 0.0555 | 0.1552 | 0.0648 | 0.0650 |
| 79 | 0.0084 | 0.0588 | 0.1549 | 0.0681 | 0.0683 |
| 80 | 0.0102 | 0.0501 | 0.1510 | 0.0594 | 0.0596 |
| 81 | 0.0108 | 0.0492 | 0.1495 | 0.0585 | 0.0585 |
| 82 | 0.0045 | 0.0471 | 0.1495 | 0.0564 | 0.0564 |
| 83 | 0.0048 | 0.0501 | 0.1448 | 0.0594 | 0.0558 |
| 84 | 0.0129 | 0.0483 | 0.1492 | 0.0576 | 0.0584 |
| 85 | 0.0021 | 0.0510 | 0.1352 | 0.0603 | 0.0715 |
| 86 | 0.0075 | 0.0645 | 0.1465 | 0.0738 | 0.0694 |
| 87 | 0.0054 | 0.0624 | 0.1543 | 0.0717 | 0.0628 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 88 | -0.0021 | 0.0555 | 0.1690 | 0.0648 | 0.0686 |
| 89 | 0.0090 | 0.0615 | 0.1636 | 0.0708 | 0.0630 |
| 90 | 0.0120 | 0.0558 | 0.1585 | 0.0651 | 0.0616 |
| 91 | 0.0168 | 0.0543 | 0.1516 | 0.0636 | 0.0636 |
| 92 | 0.0138 | 0.0564 | 0.1510 | 0.0657 | 0.0666 |
| 93 | 0.0120 | 0.0570 | 0.1597 | 0.0663 | 0.0673 |
| 94 | 0.0162 | 0.0585 | 0.1561 | 0.0678 | 0.0688 |
| 95 | 0.0069 | 0.0627 | 0.1597 | 0.0720 | 0.0730 |
| 96 | 0.0138 | 0.0561 | 0.1522 | 0.0654 | 0.0663 |
| 97 | 0.0093 | 0.0462 | 0.1468 | 0.0555 | 0.0563 |
| 98 | 0.0066 | 0.0483 | 0.1477 | 0.0576 | 0.0576 |
| 99 | 0.0060 | 0.0393 | 0.1501 | 0.0486 | 0.0486 |
| 100 | 0.0048 | 0.0573 | 0.1457 | 0.0666 | 0.0666 |
| 101 | 0.0033 | 0.0519 | 0.1463 | 0.0612 | 0.0612 |
| 102 | 0.0117 | 0.0528 | 0.1421 | 0.0621 | 0.0621 |
| 103 | 0.0129 | 0.0495 | 0.1439 | 0.0588 | 0.0588 |
| 104 | 0.0114 | 0.0408 | 0.1510 | 0.0501 | 0.0501 |
| 105 | 0.0081 | 0.0372 | 0.1531 | 0.0465 | 0.0465 |
| 106 | 0.0192 | 0.0351 | 0.1537 | 0.0444 | 0.0444 |
| 107 | 0.0090 | 0.0348 | 0.1531 | 0.0441 | 0.0441 |
| 108 | 0.0090 | 0.0420 | 0.1534 | 0.0513 | 0.0513 |
| 109 | 0.0264 | 0.0357 | 0.1513 | 0.0450 | 0.0450 |
| 110 | 0.0081 | 0.0351 | 0.1495 | 0.0444 | 0.0444 |
| 111 | 0.0039 | 0.0327 | 0.1474 | 0.0420 | 0.0420 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 112 | 0.0054 | 0.0342 | 0.1457 | 0.0435 | 0.0440 |
| 113 | 0.0003 | 0.0381 | 0.1382 | 0.0474 | 0.0479 |
| 114 | 0.0042 | 0.0214 | 0.1328 | 0.0307 | 0.0309 |
| 115 | 0.0072 | 0.0295 | 0.1424 | 0.0388 | 0.0391 |
| 116 | 0.0063 | 0.0292 | 0.1418 | 0.0385 | 0.0388 |
| 117 | 0.0084 | 0.0238 | 0.1376 | 0.0331 | 0.0334 |
| 118 | 0.0150 | 0.0292 | 0.1406 | 0.0385 | 0.0388 |
| 119 | 0.0141 | 0.0127 | 0.1418 | 0.0220 | 0.0222 |
| 120 | 0.0072 | 0.0315 | 0.1433 | 0.0408 | 0.0412 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 6.5204 | 0.6633 | 0.7482 | 0.6589 | 0.6520 |
| 2 | 3.9290 | 0.6208 | 0.2251 | 0.6167 | 0.6095 |
| 3 | 2.4343 | 0.5707 | 0.4567 | 0.5670 | 0.5594 |
| 4 | 2.5644 | 0.5195 | 0.1685 | 0.5160 | 0.5082 |
| 5 | 3.3696 | 0.4550 | 0.0903 | 0.4520 | 0.4437 |
| 6 | 3.8561 | 0.3894 | 0.0729 | 0.3868 | 0.3781 |
| 7 | 3.8580 | 0.3927 | 0.0552 | 0.3901 | 0.3814 |
| 8 | 3.7808 | 0.3477 | 0.0431 | 0.3454 | 0.3364 |
| 9 | 3.4931 | 0.3525 | 0.0451 | 0.3502 | 0.3412 |
| 10 | 3.2090 | 0.3735 | 0.0484 | 0.3711 | 0.3622 |
| 11 | 2.2527 | 0.4541 | 0.0348 | 0.4511 | 0.4428 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 12 | 1.6689 | 0.5138 | 0.0534 | 0.5104 | 0.5025 |
| 13 | 1.9513 | 0.4487 | 0.0484 | 0.4458 | 0.4374 |
| 14 | 1.6670 | 0.4128 | 0.0369 | 0.4101 | 0.4015 |
| 15 | 2.1812 | 0.3450 | 0.0436 | 0.3428 | 0.3337 |
| 16 | 2.6954 | 0.2923 | 0.0404 | 0.2904 | 0.2810 |
| 17 | 2.8130 | 0.2581 | 0.0407 | 0.2564 | 0.2468 |
| 18 | 3.1950 | 0.2270 | 0.0372 | 0.2255 | 0.2157 |
| 19 | 2.8831 | 0.2216 | 0.0395 | 0.2201 | 0.2103 |
| 20 | 2.9596 | 0.2066 | 0.0366 | 0.2052 | 0.1953 |
| 21 | 2.9976 | 0.1892 | 0.0262 | 0.1880 | 0.1779 |
| 22 | 2.5611 | 0.1706 | 0.0348 | 0.1695 | 0.1593 |
| 23 | 2.5946 | 0.1766 | 0.0407 | 0.1754 | 0.1653 |
| 24 | 2.5630 | 0.1646 | 0.0298 | 0.1635 | 0.1533 |
| 25 | 1.9918 | 0.1748 | 0.0395 | 0.1737 | 0.1635 |
| 26 | 1.8718 | 0.1874 | 0.0419 | 0.1862 | 0.1761 |
| 27 | 1.8408 | 0.1616 | 0.0348 | 0.1606 | 0.1503 |
| 28 | 1.8919 | 0.1523 | 0.0374 | 0.1513 | 0.1410 |
| 29 | 1.6907 | 0.1550 | 0.0422 | 0.1540 | 0.1437 |
| 30 | 2.7171 | 0.1520 | 0.0380 | 0.1510 | 0.1407 |
| 31 | 2.4005 | 0.1338 | 0.0321 | 0.1329 | 0.1225 |
| 32 | 1.3979 | 0.0894 | 0.0363 | 0.0888 | 0.0781 |
| 33 | 1.1234 | 0.0975 | 0.0330 | 0.0968 | 0.0862 |
| 34 | 1.0445 | 0.0993 | 0.0377 | 0.0986 | 0.0880 |
| 35 | 1.1201 | 0.0975 | 0.0369 | 0.0968 | 0.0862 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 36 | 0.9797 | 0.0969 | 0.0380 | 0.0963 | 0.0856 |
| 37 | 1.0342 | 0.1023 | 0.0348 | 0.1016 | 0.0910 |
| 38 | 1.1795 | 0.1041 | 0.0324 | 0.1034 | 0.0928 |
| 39 | 1.0828 | 0.1523 | 0.0372 | 0.1513 | 0.1410 |
| 40 | 1.0902 | 0.1526 | 0.0321 | 0.1516 | 0.1413 |
| 41 | 0.7921 | 0.1497 | 0.0324 | 0.1488 | 0.1384 |
| 42 | 0.7474 | 0.1327 | 0.0369 | 0.1318 | 0.1214 |
| 43 | 0.8742 | 0.0801 | 0.0372 | 0.0796 | 0.0688 |
| 44 | 1.0463 | 0.0825 | 0.0333 | 0.0820 | 0.0712 |
| 45 | 1.0790 | 0.0843 | 0.0342 | 0.0837 | 0.0730 |
| 46 | 1.2452 | 0.0753 | 0.0313 | 0.0748 | 0.0640 |
| 47 | 1.0965 | 0.0753 | 0.0372 | 0.0748 | 0.0640 |
| 48 | 1.0944 | 0.0783 | 0.0336 | 0.0778 | 0.0670 |
| 49 | 0.9571 | 0.0717 | 0.0324 | 0.0712 | 0.0604 |
| 50 | 0.8942 | 0.0771 | 0.0631 | 0.0766 | 0.0658 |
| 51 | 0.9672 | 0.0759 | 0.0345 | 0.0754 | 0.0646 |
| 52 | 1.0838 | 0.0798 | 0.0336 | 0.0793 | 0.0685 |
| 53 | 1.3610 | 0.0819 | 0.0256 | 0.0814 | 0.0706 |
| 54 | 1.0353 | 0.0684 | 0.0280 | 0.0680 | 0.0571 |
| 55 | 1.2978 | 0.0699 | 0.0345 | 0.0695 | 0.0586 |
| 56 | 1.4215 | 0.0732 | 0.0333 | 0.0727 | 0.0619 |
| 57 | 1.5068 | 0.0744 | 0.0295 | 0.0739 | 0.0631 |
| 58 | 1.5716 | 0.0672 | 0.0307 | 0.0668 | 0.0559 |
| 59 | 1.3354 | 0.0711 | 0.0274 | 0.0706 | 0.0598 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 60 | 1.7691 | 0.0675 | 0.0327 | 0.0671 | 0.0562 |
| 61 | 0.8057 | 0.0615 | 0.0242 | 0.0611 | 0.0502 |
| 62 | 1.0385 | 0.0807 | 0.0274 | 0.0802 | 0.0694 |
| 63 | 0.8750 | 0.0816 | 0.0286 | 0.0811 | 0.0703 |
| 64 | 0.8618 | 0.0765 | 0.0304 | 0.0760 | 0.0652 |
| 65 | 0.8280 | 0.0792 | 0.0307 | 0.0787 | 0.0679 |
| 66 | 0.7711 | 0.0732 | 0.0377 | 0.0727 | 0.0619 |
| 67 | 0.9164 | 0.0732 | 0.0377 | 0.0727 | 0.0619 |
| 68 | 0.8888 | 0.0633 | 0.0315 | 0.0629 | 0.0520 |
| 69 | 0.7999 | 0.0675 | 0.0324 | 0.0671 | 0.0562 |
| 70 | 0.8069 | 0.0717 | 0.0283 | 0.0712 | 0.0604 |
| 71 | 0.8729 | 0.0867 | 0.0310 | 0.0861 | 0.0754 |
| 72 | 0.9477 | 0.0759 | 0.0342 | 0.0754 | 0.0646 |
| 73 | 0.9917 | 0.0579 | 0.0333 | 0.0575 | 0.0466 |
| 74 | 1.0069 | 0.0573 | 0.0277 | 0.0570 | 0.0460 |
| 75 | 1.1556 | 0.0468 | 0.0342 | 0.0465 | 0.0355 |
| 76 | 1.0663 | 0.0588 | 0.0218 | 0.0584 | 0.0475 |
| 77 | 0.9769 | 0.0642 | 0.0357 | 0.0638 | 0.0529 |
| 78 | 0.7178 | 0.0648 | 0.0389 | 0.0644 | 0.0535 |
| 79 | 1.2062 | 0.0681 | 0.0292 | 0.0677 | 0.0568 |
| 80 | 1.1929 | 0.0594 | 0.0310 | 0.0590 | 0.0481 |
| 81 | 1.3007 | 0.0585 | 0.0315 | 0.0581 | 0.0472 |
| 82 | 1.0424 | 0.0564 | 0.0254 | 0.0561 | 0.0451 |
| 83 | 1.0607 | 0.0594 | 0.0256 | 0.0590 | 0.0481 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 84 | 0.8283 | 0.0576 | 0.0336 | 0.0573 | 0.0463 |
| 85 | 0.7546 | 0.0603 | 0.0230 | 0.0599 | 0.0490 |
| 86 | 0.9372 | 0.0738 | 0.0283 | 0.0733 | 0.0625 |
| 87 | 0.9334 | 0.0717 | 0.0262 | 0.0712 | 0.0604 |
| 88 | 0.6775 | 0.0648 | 0.0189 | 0.0644 | 0.0535 |
| 89 | 0.6560 | 0.0708 | 0.0298 | 0.0704 | 0.0595 |
| 90 | 0.6834 | 0.0651 | 0.0327 | 0.0647 | 0.0538 |
| 91 | 0.7662 | 0.0636 | 0.0374 | 0.0632 | 0.0523 |
| 92 | 0.5318 | 0.0657 | 0.0345 | 0.0653 | 0.0544 |
| 93 | 0.6429 | 0.0663 | 0.0327 | 0.0659 | 0.0550 |
| 94 | 0.6774 | 0.0678 | 0.0369 | 0.0674 | 0.0565 |
| 95 | 1.0003 | 0.0720 | 0.0277 | 0.0715 | 0.0607 |
| 96 | 0.7885 | 0.0654 | 0.0345 | 0.0650 | 0.0541 |
| 97 | 0.9295 | 0.0555 | 0.0301 | 0.0552 | 0.0442 |
| 98 | 0.8455 | 0.0576 | 0.0274 | 0.0573 | 0.0463 |
| 99 | 1.0293 | 0.0486 | 0.0268 | 0.0483 | 0.0373 |
| 100 | 0.9592 | 0.0666 | 0.0256 | 0.0662 | 0.0553 |
| 101 | 0.9635 | 0.0612 | 0.0242 | 0.0608 | 0.0499 |
| 102 | 0.8779 | 0.0621 | 0.0324 | 0.0617 | 0.0508 |
| 103 | 0.8452 | 0.0588 | 0.0336 | 0.0584 | 0.0475 |
| 104 | 0.9080 | 0.0501 | 0.0321 | 0.0498 | 0.0388 |
| 105 | 1.4154 | 0.0465 | 0.0289 | 0.0462 | 0.0352 |
| 106 | 1.1996 | 0.0444 | 0.0398 | 0.0442 | 0.0331 |
| 107 | 0.7640 | 0.0441 | 0.0298 | 0.0439 | 0.0328 |

| เวลา(นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 108 | 1.1331 | 0.0513 | 0.0298 | 0.0510 | 0.0400 |
| 109 | 1.5913 | 0.0450 | 0.0469 | 0.0447 | 0.0337 |
| 110 | 1.4764 | 0.0444 | 0.0289 | 0.0442 | 0.0331 |
| 111 | 1.4925 | 0.0420 | 0.0248 | 0.0418 | 0.0307 |
| 112 | 1.2022 | 0.0435 | 0.0262 | 0.0433 | 0.0322 |
| 113 | 1.3856 | 0.0474 | 0.0212 | 0.0471 | 0.0361 |
| 114 | 1.2772 | 0.0307 | 0.0251 | 0.0305 | 0.0194 |
| 115 | 1.1832 | 0.0388 | 0.0280 | 0.0385 | 0.0275 |
| 116 | 1.1713 | 0.0385 | 0.0271 | 0.0382 | 0.0272 |
| 117 | 1.2734 | 0.0331 | 0.0292 | 0.0328 | 0.0218 |
| 118 | 1.2410 | 0.0385 | 0.0357 | 0.0382 | 0.0272 |
| 119 | 0.1269 | 0.0220 | 0.0348 | 0.0218 | 0.0107 |
| 120 | 1.2003 | 0.0408 | 0.0280 | 0.0406 | 0.0295 |

2) สารตั้งชนิดอีดีทีเอ

| เวลา (นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.00042342 | 0.001060619 | 0.000215597 | 0.001036986 | 0.001085218 |
| 2 | 0.000318819 | 0.000678623 | 8.58528E-05 | 0.000988754 | 0.001016728 |
| 3 | 0.000391978 | 0.000596146 | 6.70423E-05 | 0.000879267 | 0.000936181 |
| 4 | 0.000159228 | 0.000416241 | 5.16081E-05 | 0.000832 | 0.000853704 |
| 5 | 0.000162462 | 0.000397431 | 3.81032E-05 | 0.000858045 | 0.000750006 |
| 6 | 0.000145705 | 0.000373315 | 4.3891E-05 | 0.000805955 | 0.000644378 |
| 7 | 0.000152073 | 0.000361257 | 5.40197E-05 | 0.000752417 | 0.000649684 |

| เวลา (นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 8 | 0.000137192 | 0.000352093 | 5.25728E-05 | 0.000715761 | 0.000577336 |
| 9 | 0.00014079 | 0.000338106 | 5.30551E-05 | 0.000663671 | 0.000585053 |
| 10 | 0.000149871 | 0.000338588 | 5.16081E-05 | 0.000618815 | 0.000589876 |
| 11 | 0.000144917 | 0.000319777 | 5.93252E-05 | 0.000748559 | 0.00055322 |
| 12 | 0.0001411 | 0.000317848 | 4.91965E-05 | 0.00084454 | 0.000502094 |
| 13 | 0.000176859 | 0.00032653 | 6.02899E-05 | 0.000739877 | 0.000627497 |
| 14 | 0.000250493 | 0.000322671 | 5.83606E-05 | 0.000681999 | 0.000736501 |
| 15 | 0.000221554 | 0.000317848 | 5.49844E-05 | 0.000572995 | 0.000693575 |
| 16 | 0.000175937 | 0.000314472 | 5.25728E-05 | 0.000488107 | 0.000589876 |
| 17 | 0.000147796 | 0.000305308 | 4.58203E-05 | 0.000443733 | 0.000447592 |
| 18 | 0.000121505 | 0.000296626 | 3.08684E-05 | 0.000382961 | 0.000369456 |
| 19 | 0.00012052 | 0.000294215 | 3.56916E-05 | 0.000374279 | 0.000348717 |
| 20 | 9.61693E-05 | 0.000271063 | 3.90678E-05 | 0.000350164 | 0.000311096 |
| 21 | 8.79609E-05 | 0.000254664 | 3.4727E-05 | 0.000322189 | 0.000303861 |
| 22 | 9.19089E-05 | 0.000252253 | 1.68812E-05 | 0.000292285 | 0.0002455 |
| 23 | 6.94206E-05 | 0.000244536 | 4.63026E-05 | 0.000301932 | 0.000221867 |
| 24 | 5.97307E-05 | 0.000233442 | 7.18655E-05 | 0.000282639 | 0.000201127 |
| 25 | 7.23307E-05 | 0.000235854 | 6.84893E-05 | 0.000299038 | 0.000212703 |
| 26 | 7.82756E-05 | 0.000240195 | 6.70423E-05 | 0.000319295 | 0.000218008 |
| 27 | 7.31859E-05 | 0.000231031 | 6.12545E-05 | 0.000277816 | 0.000203056 |
| 28 | 6.26916E-05 | 0.000225243 | 5.98075E-05 | 0.000262864 | 0.000189551 |
| 29 | 7.16564E-05 | 0.000228619 | 5.4502E-05 | 0.000267205 | 0.00018714 |
| 30 | 3.88962E-05 | 0.000223314 | 5.01612E-05 | 0.000262381 | 0.000171223 |
| 31 | 5.18797E-05 | 0.000221384 | 5.64313E-05 | 0.00023296 | 0.000160612 |
| 32 | 9.31088E-05 | 0.000222349 | 3.81032E-05 | 0.000224761 | 0.000161577 |
| 33 | 7.2399E-05 | 0.000215597 | 4.96788E-05 | 0.00032653 | 0.000174599 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 34 | 7.48557E-05 | 0.000210773 | 4.5338E-05 | 0.00033907 | 0.000177493 |
| 35 | 5.95489E-05 | 0.000198715 | 5.25728E-05 | 0.00034727 | 0.000174599 |
| 36 | 6.74789E-05 | 0.000197751 | 5.25728E-05 | 0.000342446 | 0.000173635 |
| 37 | 7.59798E-05 | 0.000208844 | 6.12545E-05 | 0.000322671 | 0.000182317 |
| 38 | 7.13429E-05 | 0.000195821 | 6.60777E-05 | 0.000276369 | 0.00018521 |
| 39 | 6.75736E-05 | 0.000186175 | 5.20904E-05 | 0.000262864 | 0.000173152 |
| 40 | 7.97279E-05 | 0.000200645 | 6.41484E-05 | 0.000263346 | 0.000188587 |
| 41 | 7.29599E-05 | 0.000196304 | 6.55954E-05 | 0.000363668 | 0.000174599 |
| 42 | 6.26073E-05 | 0.000192445 | 5.11258E-05 | 0.000392125 | 0.000156754 |
| 43 | 5.862E-05 | 0.000188587 | 5.93252E-05 | 0.000370903 | 0.000146625 |
| 44 | 6.00059E-05 | 0.00018521 | 5.4502E-05 | 0.000321224 | 0.000150483 |
| 45 | 6.305E-05 | 0.000186175 | 5.16081E-05 | 0.000300967 | 0.000153377 |
| 46 | 5.30299E-05 | 0.000183763 | 4.91965E-05 | 0.000261899 | 0.000138908 |
| 47 | 5.72525E-05 | 0.000176529 | 5.49844E-05 | 0.000272992 | 0.000138908 |
| 48 | 5.97096E-05 | 0.000174117 | 5.40197E-05 | 0.000257558 | 0.000143731 |
| 49 | 4.61382E-05 | 0.000159648 | 4.63026E-05 | 0.000290356 | 0.00013312 |
| 50 | 6.13717E-05 | 0.000169294 | 5.16081E-05 | 0.000284086 | 0.000141802 |
| 51 | 5.49494E-05 | 0.000164471 | 6.07722E-05 | 0.000275404 | 0.000139872 |
| 52 | 6.27147E-05 | 0.000157718 | 6.55954E-05 | 0.000263828 | 0.000146143 |
| 53 | 5.95307E-05 | 0.000165918 | 6.17368E-05 | 0.00023923 | 0.000149519 |
| 54 | 5.71512E-05 | 0.000174599 | 5.40197E-05 | 0.000270581 | 0.000127815 |
| 55 | 5.04453E-05 | 0.000156271 | 5.49844E-05 | 0.000223796 | 0.000130226 |
| 56 | 5.46574E-05 | 0.000165918 | 4.91965E-05 | 0.000218973 | 0.000135532 |
| 57 | 5.27678E-05 | 0.00015386 | 5.40197E-05 | 0.000197751 | 0.000137461 |
| 58 | 4.79936E-05 | 0.000150966 | 4.58203E-05 | 0.000179423 | 0.000125885 |
| 59 | 5.13654E-05 | 0.00014566 | 4.58203E-05 | 0.000203539 | 0.000132155 |

| เวลา (นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 60 | 3.90524E-05 | 0.000146625 | 4.63026E-05 | 0.000189069 | 0.000126368 |
| 61 | 7.73121E-05 | 0.000148554 | 4.87142E-05 | 0.000188587 | 0.000116721 |
| 62 | 6.2886E-05 | 0.000141802 | 5.5949E-05 | 0.000188587 | 0.00014759 |
| 63 | 6.03507E-05 | 0.000134567 | 3.328E-05 | 0.00021222 | 0.000149037 |
| 64 | 6.21404E-05 | 0.000146625 | 5.88429E-05 | 0.00020595 | 0.000140837 |
| 65 | 6.03284E-05 | 0.000149519 | 6.51131E-05 | 0.000217044 | 0.000145178 |
| 66 | 6.00746E-05 | 0.00013939 | 6.41484E-05 | 0.00021849 | 0.000135532 |
| 67 | 5.98275E-05 | 0.000149037 | 5.98075E-05 | 0.000182799 | 0.000135532 |
| 68 | 5.90066E-05 | 0.000160612 | 5.69136E-05 | 0.000167847 | 0.000119615 |
| 69 | 5.78472E-05 | 0.000149037 | 5.20904E-05 | 0.000178458 | 0.000126368 |
| 70 | 6.75897E-05 | 0.000175082 | 5.49844E-05 | 0.000188104 | 0.00013312 |
| 71 | 6.71268E-05 | 0.000142284 | 5.83606E-05 | 0.000169294 | 0.000157236 |
| 72 | 6.2514E-05 | 0.000144213 | 6.51131E-05 | 0.000154342 | 0.000139872 |
| 73 | 4.24639E-05 | 0.000124438 | 6.46307E-05 | 0.000143731 | 0.000110933 |
| 74 | 4.39544E-05 | 0.000128779 | 6.17368E-05 | 0.000146625 | 0.000109969 |
| 75 | 3.73709E-05 | 0.000132638 | 6.07722E-05 | 0.000123474 | 9.30875E-05 |
| 76 | 4.93574E-05 | 0.000148072 | 5.25728E-05 | 0.000142284 | 0.00011238 |
| 77 | 4.92457E-05 | 0.000127332 | 4.91965E-05 | 0.000138908 | 0.000121062 |
| 78 | 4.85041E-05 | 0.000128297 | 4.77496E-05 | 0.000183763 | 0.000122027 |
| 79 | 4.5052E-05 | 0.000123956 | 5.16081E-05 | 0.000121544 | 0.000127332 |
| 80 | 4.21007E-05 | 0.000131673 | 4.3891E-05 | 0.000125403 | 0.000113345 |
| 81 | 4.23354E-05 | 0.000122991 | 5.5949E-05 | 0.00011865 | 0.000111898 |
| 82 | 4.77152E-05 | 0.000133602 | 6.31838E-05 | 0.000126368 | 0.000108522 |
| 83 | 4.47593E-05 | 0.00012685 | 5.5949E-05 | 0.000128297 | 0.000113345 |
| 84 | 4.29825E-05 | 0.000117686 | 5.88429E-05 | 0.000138426 | 0.000110451 |
| 85 | 4.4743E-05 | 0.000117686 | 5.35374E-05 | 0.000141802 | 0.000114792 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 86 | 5.35413E-05 | 0.00011238 | 6.22191E-05 | 0.000123956 | 0.000136496 |
| 87 | 5.1683E-05 | 0.000117686 | 6.60777E-05 | 0.000142284 | 0.00013312 |
| 88 | 5.1185E-05 | 0.00012685 | 6.17368E-05 | 0.000187622 | 0.000122027 |
| 89 | 5.7128E-05 | 0.00011865 | 5.25728E-05 | 0.000177976 | 0.000131673 |
| 90 | 4.69757E-05 | 0.000109486 | 5.54667E-05 | 0.000167365 | 0.000122509 |
| 91 | 4.6171E-05 | 0.000110451 | 4.96788E-05 | 0.000149037 | 0.000120097 |
| 92 | 4.48212E-05 | 0.000100322 | 5.93252E-05 | 0.00021415 | 0.000123474 |
| 93 | 5.00036E-05 | 0.000105628 | 4.58203E-05 | 0.000154342 | 0.000124438 |
| 94 | 4.30072E-05 | 9.54991E-05 | 4.77496E-05 | 0.000156271 | 0.00012685 |
| 95 | 4.69414E-05 | 0.000100322 | 5.69136E-05 | 0.000115274 | 0.000133602 |
| 96 | 5.18462E-05 | 0.000111416 | 6.27015E-05 | 0.000117686 | 0.000122991 |
| 97 | 4.04869E-05 | 0.00010611 | 6.31838E-05 | 0.000117686 | 0.000107075 |
| 98 | 5.05304E-05 | 0.000109004 | 6.12545E-05 | 0.000113345 | 0.000110451 |
| 99 | 3.68882E-05 | 9.93577E-05 | 5.64313E-05 | 9.64638E-05 | 9.59815E-05 |
| 100 | 5.84844E-05 | 0.000109969 | 5.69136E-05 | 9.40522E-05 | 0.000124921 |
| 101 | 4.6061E-05 | 0.000102252 | 6.02899E-05 | 0.000104181 | 0.000116239 |
| 102 | 4.7723E-05 | 9.93577E-05 | 5.73959E-05 | 0.000109486 | 0.000117686 |
| 103 | 4.7318E-05 | 9.64638E-05 | 5.73959E-05 | 0.000103216 | 0.00011238 |
| 104 | 3.90606E-05 | 0.00011431 | 6.02899E-05 | 0.00011238 | 9.83931E-05 |
| 105 | 3.51744E-05 | 0.000109004 | 6.46307E-05 | 8.48881E-05 | 9.26052E-05 |
| 106 | 2.67843E-05 | 8.29588E-05 | 6.51131E-05 | 8.39235E-05 | 8.9229E-05 |
| 107 | 3.06514E-05 | 8.29588E-05 | 6.27015E-05 | 0.000111416 | 8.87467E-05 |
| 108 | 3.31373E-05 | 8.7782E-05 | 5.93252E-05 | 0.000101287 | 0.000100322 |
| 109 | 3.48557E-05 | 9.35699E-05 | 5.06435E-05 | 8.7782E-05 | 9.01936E-05 |
| 110 | 3.39E-05 | 9.30875E-05 | 5.06435E-05 | 7.33125E-05 | 8.9229E-05 |
| 111 | 3.40455E-05 | 9.59815E-05 | 5.30551E-05 | 7.28302E-05 | 8.53704E-05 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 112 | 2.95281E-05 | 8.87467E-05 | 4.58203E-05 | 0.000101287 | 8.7782E-05 |
| 113 | 3.31404E-05 | 8.63351E-05 | 6.36661E-05 | 8.10296E-05 | 9.40522E-05 |
| 114 | 2.34377E-05 | 8.29588E-05 | 5.88429E-05 | 8.05473E-05 | 6.70423E-05 |
| 115 | 2.38271E-05 | 7.76533E-05 | 6.8007E-05 | 9.88754E-05 | 8.00649E-05 |
| 116 | 2.58972E-05 | 8.58528E-05 | 5.98075E-05 | 9.83931E-05 | 7.95826E-05 |
| 117 | 1.96188E-05 | 7.62064E-05 | 7.04186E-05 | 8.58528E-05 | 7.09009E-05 |
| 118 | 2.40606E-05 | 9.74284E-05 | 6.12545E-05 | 9.59815E-05 | 7.95826E-05 |
| 119 | 2.68567E-05 | 9.83931E-05 | 6.02899E-05 | 0.000108522 | 5.30551E-05 |
| 120 | 3.22312E-05 | 9.50168E-05 | 6.02899E-05 | 9.01936E-05 | 8.34412E-05 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.001188916 | 0.00022138 4 | 0.00072781 9 | 0.00190790 2 | 0.01137657 5 |
| 2 | 0.000333765 | 0.00018858 7 | 0.00052524 5 | 0.00114964 7 | 0.01532829 2 |
| 3 | 0.000712385 | 0.00026045 2 | 0.00043987 5 | 0.00071229 3 | 0.01362846 3 |
| 4 | 0.000241159 | 0.0002537 | 0.00027974 5 | 0.00075036 5 | 0.01601386 1 |
| 5 | 0.000113345 | 0.00029421 5 | 0.00046109 7 | 0.00098595 4 | 0.01611718 2 |
| 6 | 8.48881E-05 | 0.00028119 2 | 0.00055080 8 | 0.00112831 6 | 0.01569091 4 |
| 7 | 5.5949E-05 | 0.00025032 | 0.00055032 | 0.00112887 | 0.01395913 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | 4 | 6 | 4 | 6 |
| 8 | 3.61739E-05 | 0.00022379 6 | 0.00053440 9 | 0.00110627 1 | 0.01249423 3 |
| 9 | 3.95501E-05 | 0.00020257 4 | 0.00048280 1 | 0.00102209 3 | 0.01135977 9 |
| 10 | 4.48557E-05 | 0.00018762 2 | 0.00043601 6 | 0.00093898 1 | 0.01029919 7 |
| 11 | 2.2669E-05 | 0.00017459 9 | 0.00040418 3 | 0.00065914 2 | 0.01288870 5 |
| 12 | 5.30551E-05 | 0.00017749 3 | 0.00036463 3 | 0.00048832 9 | 0.01481857 |
| 13 | 4.48557E-05 | 0.00017411 7 | 0.00036463 3 | 0.00057095 7 | 0.01223403 2 |
| 14 | 2.60452E-05 | 0.00016350 6 | 0.00035064 6 | 0.00048778 | 0.01084467 8 |
| 15 | 3.71386E-05 | 0.00014951 9 | 0.00036752 7 | 0.00063822 2 | 0.00882998 8 |
| 16 | 3.1833E-05 | 0.00014469 6 | 0.00036511 5 | 0.00078867 8 | 0.00727139 5 |
| 17 | 3.23154E-05 | 0.00013601 4 | 0.00039501 9 | 0.0008231 | 0.00646105 2 |
| 18 | 2.65275E-05 | 0.00012347 4 | 0.00039694 8 | 0.00093487 9 | 0.00548892 9 |
| 19 | 3.03861E-05 | 0.00014469 6 | 0.00037090 3 | 0.00084361 4 | 0.00509588 5 |
| 20 | 2.55629E-05 | 0.00012877 | 0.00034582 | 0.00086598 | 0.00495337 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | 9 | 3 | 6 | 8 |
| 21 | 8.68174E-06 | 0.00012540 3 | 0.00032122 4 | 0.00087711 6 | 0.00473251 9 |
| 22 | 2.2669E-05 | 0.00012443 8 | 0.00032508 3 | 0.00074940 7 | 0.00430060 2 |
| 23 | 3.23154E-05 | 0.00011623 9 | 0.00029373 2 | 0.00075919 9 | 0.00437515 4 |
| 24 | 1.44696E-05 | 0.00010611 | 0.00026961 6 | 0.00074995 6 | 0.00421192 8 |
| 25 | 3.03861E-05 | 0.00010996 9 | 0.00025128 8 | 0.00058282 6 | 0.00427546 7 |
| 26 | 3.42446E-05 | 0.00010514 6 | 0.00026141 7 | 0.00054771 2 | 0.00438804 3 |
| 27 | 2.2669E-05 | 0.00011093 3 | 0.00023344 2 | 0.00053862 | 0.00397332 7 |
| 28 | 2.70099E-05 | 0.00011093 3 | 0.00021366 7 | 0.00055357 5 | 0.00380326 5 |
| 29 | 3.4727E-05 | 0.00010273 4 | 0.00022138 4 | 0.00049471 8 | 0.0036805 |
| 30 | 2.79745E-05 | 0.00010032 2 | 0.00021222 | 0.00079504 6 | 0.00363155 2 |
| 31 | 1.83281E-05 | 0.00010176 9 | 0.00023874 8 | 0.00070240 3 | 0.00317758 9 |
| 32 | 2.50806E-05 | 9.79107E-05 | 0.00023826 6 | 0.00040904 | 0.00290865 |
| 33 | 1.97751E-05 | 7.91003E-05 | 0.00020643 | 0.00032870 | 0.00425027 |

| เวลา (นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | | 2 | 6 | 8 |
| 34 | 2.74922E-05 | 9.21229E-05 | 0.00020739 7 | 0.00030563 8 | 0.00453530 8 |
| 35 | 2.60452E-05 | 8.39235E-05 | 0.00019533 9 | 0.00032773 6 | 0.00476863 6 |
| 36 | 2.79745E-05 | 8.15119E-05 | 0.00019292 8 | 0.00028667 4 | 0.00457417 7 |
| 37 | 2.2669E-05 | 8.29588E-05 | 0.00019485 7 | 0.00030262 5 | 0.00419598 5 |
| 38 | 1.88104E-05 | 8.10296E-05 | 0.00018762 2 | 0.00034512 | 0.00370511 |
| 39 | 2.65275E-05 | 8.39235E-05 | 0.00017459 9 | 0.00031684 2 | 0.00371121 6 |
| 40 | 1.83281E-05 | 9.54991E-05 | 0.00017701 1 | 0.00031900 9 | 0.00343716 8 |
| 41 | 1.88104E-05 | 8.53704E-05 | 0.00017942 3 | 0.00023177 4 | 0.00503121 3 |
| 42 | 2.60452E-05 | 9.21229E-05 | 0.00017797 6 | 0.00021869 3 | 0.00011857 9 |
| 43 | 2.65275E-05 | 8.05473E-05 | 0.00020112 7 | 0.00025579 | 0.00132260 3 |
| 44 | 2.02574E-05 | 9.26052E-05 | 0.00021173 8 | 0.00030616 2 | 0.00291583 4 |
| 45 | 2.17044E-05 | 8.9229E-05 | 0.00020980 9 | 0.00031572 2 | 0.00386763 5 |
| 46 | 1.68812E-05 | 8.9229E-05 | 0.00019823 | 0.00036434 | 0.00356641 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | | 3 | | 8 |
| 47 | 2.65275E-05 | 8.48881E-05 | 0.00020450 3 | 0.00032084 6 | 0.00376484 2 |
| 48 | 2.07397E-05 | 8.00649E-05 | 0.00019678 6 | 0.00032023 8 | 0.00331902 1 |
| 49 | 1.88104E-05 | 8.87467E-05 | 0.00017652 9 | 0.00028004 1 | 0.00429835 5 |
| 50 | 6.89716E-05 | 8.87467E-05 | 0.00019003 4 | 0.00026165 9 | 0.00371091 3 |
| 51 | 2.21867E-05 | 8.63351E-05 | 0.00018617 5 | 0.00028301 2 | 0.00521344 1 |
| 52 | 2.07397E-05 | 9.54991E-05 | 0.00022765 5 | 0.00031713 5 | 0.00253646 5 |
| 53 | 7.7171E-06 | 8.87467E-05 | 0.00022861 9 | 0.00039824 | 0.00292285 5 |
| 54 | 1.15757E-05 | 8.44058E-05 | 0.00020980 9 | 0.00030293 2 | 0.00301123 9 |
| 55 | 2.21867E-05 | 7.13832E-05 | 0.00021077 3 | 0.00037975 5 | 0.00281509 5 |
| 56 | 2.02574E-05 | 8.72997E-05 | 0.00022138 4 | 0.00041594 9 | 0.00247907 7 |
| 57 | 1.39872E-05 | 8.82644E-05 | 0.00021752 6 | 0.00044088 8 | 0.00238518 2 |
| 58 | 1.59165E-05 | 8.9229E-05 | 0.00020836 2 | 0.00045985 2 | 0.00239004 1 |
| 59 | 1.0611E-05 | 0.00010080 | 0.00021222 | 0.00039074 | 0.00276937 |

| เวลา (นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | 5 | | 7 | 9 |
| 60 | 1.92928E-05 | 9.79107E-05 | 0.00020643 2 | 0.00051766 1 | 0.00243467 9 |
| 61 | 5.30551E-06 | 9.30875E-05 | 0.00019823 3 | 0.00023575 | 0.00245849 5 |
| 62 | 1.0611E-05 | 9.69461E-05 | 0.00017218 8 | 0.00030386 1 | 0.00264436 3 |
| 63 | 1.25403E-05 | 9.984E-05 | 0.00016350 6 | 0.00025603 6 | 0.00293178 9 |
| 64 | 1.54342E-05 | 0.00010514 6 | 0.00015627 1 | 0.00025215 7 | 0.00277467 4 |
| 65 | 1.59165E-05 | 9.54991E-05 | 0.00014614 3 | 0.00024227 2 | 0.00296139 7 |
| 66 | 2.74922E-05 | 9.83931E-05 | 0.00015675 4 | 0.00022561 5 | 0.003066 |
| 67 | 2.74922E-05 | 9.79107E-05 | 0.00014517 8 | 0.00026813 9 | 0.00235550 3 |
| 68 | 1.73635E-05 | 9.21229E-05 | 0.00013408 5 | 0.00026007 8 | 0.00197654 8 |
| 69 | 1.88104E-05 | 8.87467E-05 | 0.00012829 7 | 0.00023405 5 | 0.00201696 1 |
| 70 | 1.2058E-05 | 0.00010755 7 | 0.00012877 9 | 0.00023609 5 | 0.00184445 9 |
| 71 | 1.63988E-05 | 0.00011286 3 | 0.00012974 4 | 0.00025542 2 | 0.00198880 5 |
| 72 | 2.17044E-05 | 0.00011045 | 0.00013263 | 0.00027729 | 0.00172661 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | 1 | 8 | 6 | 6 |
| 73 | 2.02574E-05 | 9.50168E-05 | 0.00012829 7 | 0.00029017 5 | 0.00196799 3 |
| 74 | 1.10933E-05 | 9.74284E-05 | 0.00013408 5 | 0.00029463 3 | 0.00191049 6 |
| 75 | 2.17044E-05 | 8.82644E-05 | 0.00012636 8 | 0.00033813 2 | 0.00152592 |
| 76 | 1.44696E-06 | 9.54991E-05 | 0.00013167 3 | 0.00031199 8 | 0.00151917 9 |
| 77 | 2.41159E-05 | 9.64638E-05 | 0.00012685 | 0.00028585 3 | 0.00168590 4 |
| 78 | 2.94215E-05 | 9.50168E-05 | 0.00011961 5 | 0.00021003 3 | 0.00219964 9 |
| 79 | 1.35049E-05 | 9.45345E-05 | 0.00012250 9 | 0.00035294 3 | 0.00140756 |
| 80 | 1.63988E-05 | 8.82644E-05 | 0.00012347 4 | 0.00034905 | 0.00133326 1 |
| 81 | 1.73635E-05 | 8.58528E-05 | 0.00013890 8 | 0.00038058 5 | 0.00132556 3 |
| 82 | 7.23478E-06 | 8.58528E-05 | 0.00012685 | 0.00030502 1 | 0.00127824 5 |
| 83 | 7.7171E-06 | 7.81357E-05 | 0.00012395 6 | 0.00031035 6 | 0.00129817 4 |
| 84 | 2.07397E-05 | 8.53704E-05 | 0.00011093 3 | 0.00024235 3 | 0.00150212 3 |
| 85 | 3.37623E-06 | 6.27015E-05 | 0.00010369 | 0.0002208 | 0.00154655 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | | 9 | | 2 |
| 86 | 1.2058E-05 | 8.10296E-05 | 0.00011865 | 0.00027423 5 | 0.00137651 5 |
| 87 | 8.68174E-06 | 9.35699E-05 | 0.00012829 7 | 0.00027312 | 0.00146190 9 |
| 88 | -3.3762E-06 | 0.00011720 3 | 0.00012299 1 | 0.00019824 1 | 0.00168326 7 |
| 89 | 1.44696E-05 | 0.00010852 2 | 0.00012492 1 | 0.00019195 1 | 0.00183315 6 |
| 90 | 1.92928E-05 | 0.00010032 2 | 0.00011720 3 | 0.00019995 5 | 0.00177424 9 |
| 91 | 2.70099E-05 | 8.9229E-05 | 0.00011623 9 | 0.00022420 2 | 0.00153997 7 |
| 92 | 2.21867E-05 | 8.82644E-05 | 0.00012058 | 0.00015561 3 | 0.00258111 7 |
| 93 | 1.92928E-05 | 0.00010225 2 | 0.00011045 1 | 0.00018811 2 | 0.00166762 |
| 94 | 2.60452E-05 | 9.64638E-05 | 0.00010996 9 | 0.00019821 5 | 0.00193103 1 |
| 95 | 1.10933E-05 | 0.00010225 2 | 0.00011816 8 | 0.00029270 1 | 0.00137452 5 |
| 96 | 2.21867E-05 | 9.01936E-05 | 0.00010273 4 | 0.00023073 | 0.00121916 5 |
| 97 | 1.49519E-05 | 8.15119E-05 | 0.00011382 7 | 0.00027197 3 | 0.00132315 3 |
| 98 | 1.0611E-05 | 8.29588E-05 | 0.00011768 | 0.00024739 | 0.00132792 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | | 6 | 1 | 3 |
| 99 | 9.64638E-06 | 8.68174E-05 | 0.00011238 | 0.00030117 9 | 0.00133717 7 |
| 100 | 7.7171E-06 | 7.95826E-05 | 0.00011238 | 0.00028066 3 | 0.00123048 5 |
| 101 | 5.30551E-06 | 8.05473E-05 | 0.00011382 7 | 0.00028193 3 | 0.00137692 6 |
| 102 | 1.88104E-05 | 7.37948E-05 | 0.00011479 2 | 0.00025689 1 | 0.00141081 6 |
| 103 | 2.07397E-05 | 7.66887E-05 | 0.00011141 6 | 0.00024730 1 | 0.00138375 8 |
| 104 | 1.83281E-05 | 8.82644E-05 | 0.00010369 9 | 0.0002657 | 0.00128729 8 |
| 105 | 1.30226E-05 | 9.16406E-05 | 0.00012250 9 | 0.00041416 4 | 0.00111538 4 |
| 106 | 3.08684E-05 | 9.26052E-05 | 0.00010659 2 | 0.00035102 | 0.00143582 6 |
| 107 | 1.44696E-05 | 9.16406E-05 | 0.00010369 9 | 0.00022355 8 | 0.00162828 8 |
| 108 | 1.44696E-05 | 9.21229E-05 | 0.00012636 8 | 0.00033156 4 | 0.00163767 9 |
| 109 | 4.24441E-05 | 8.87467E-05 | 0.00016881 2 | 0.00046562 3 | 0.00118897 4 |
| 110 | 1.30226E-05 | 8.58528E-05 | 0.00012926 1 | 0.00043200 5 | 0.00098285 6 |
| 111 | 6.27015E-06 | 8.24765E-05 | 0.00013215 | 0.00043672 | 0.00107452 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | | 5 | 5 | |
| 112 | 8.68174E-06 | 7.95826E-05 | 0.00013504 9 | 0.00035177 1 | 0.00162725 8 |
| 113 | 4.82319E-07 | 6.75246E-05 | 0.00013408 5 | 0.00040544 6 | 0.00135334 2 |
| 114 | 6.75246E-06 | 5.88429E-05 | 0.00012685 | 0.00037371 3 | 0.00138434 1 |
| 115 | 1.15757E-05 | 7.42771E-05 | 0.00013119 1 | 0.00034621 6 | 0.00188131 1 |
| 116 | 1.01287E-05 | 7.33125E-05 | 0.00012781 5 | 0.00034271 8 | 0.00169333 5 |
| 117 | 1.35049E-05 | 6.656E-05 | 0.00011816 8 | 0.00037906 7 | 0.00175924 6 |
| 118 | 2.41159E-05 | 7.13832E-05 | 0.00012685 | 0.00042580 8 | 0.00153838 6 |
| 119 | 2.2669E-05 | 7.33125E-05 | 0.00013504 9 | 0.00024188 8 | 0.00175442 1 |
| 120 | 1.15757E-05 | 7.57241E-05 | 0.00012877 9 | 0.00035121 6 | 0.00147924 1 |

| time(min) | การทดลองที่ | | | | |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.0007617 | 0.001085217 | 0.002718349 | 0.001036986 | 0.001085217 |
| 2 | 0.0005401 | 0.001016728 | 0.002164165 | 0.000988786 | 0.001016728 |

| time(min) | การทดลองที่ | | | | |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 3 | 0.0004683 | 0.000936181 | 0.001423805 | 0.000879073 | 0.000936181 |
| 4 | 0.000287 | 0.000853704 | 0.00223169 | 0.000832 | 0.000853704 |
| 5 | 0.000403 | 0.000750006 | 0.001834741 | 0.000858045 | 0.000750006 |
| 6 | 0.0004404 | 0.000644378 | 0.001650978 | 0.000805955 | 0.000644378 |
| 7 | 0.0004752 | 0.00064971 | 0.00154342 | 0.000752417 | 0.00064971 |
| 8 | 0.0004311 | 0.000577336 | 0.001481684 | 0.000715697 | 0.000577336 |
| 9 | 0.0004256 | 0.000585053 | 0.001404995 | 0.000663671 | 0.000585053 |
| 10 | 0.0004156 | 0.000589876 | 0.001332647 | 0.000618883 | 0.000589876 |
| 11 | 0.0002987 | 0.00055322 | 0.001220749 | 0.000748559 | 0.00055322 |
| 12 | 0.0002168 | 0.000502094 | 0.001131038 | 0.00084454 | 0.000502094 |
| 13 | 0.0003092 | 0.000627496 | 0.00115853 | 0.000739877 | 0.000627496 |
| 14 | 0.0003787 | 0.000736501 | 0.000948721 | 0.000681999 | 0.000736501 |
| 15 | 0.0004449 | 0.000693573 | 0.000995024 | 0.000572995 | 0.000693573 |
| 16 | 0.0004412 | 0.000589876 | 0.001054349 | 0.00048811 | 0.000589876 |
| 17 | 0.0003985 | 0.000447592 | 0.000924605 | 0.000443733 | 0.000447592 |
| 18 | 0.0003829 | 0.000369456 | 0.000901936 | 0.000382961 | 0.000369456 |
| 19 | 0.0003456 | 0.000348717 | 0.000851293 | 0.000374279 | 0.000348717 |
| 20 | 0.0003072 | 0.000311096 | 0.000876856 | 0.000350164 | 0.000311096 |
| 21 | 0.000303 | 0.00030386 | 0.00087975 | 0.000322221 | 0.00030386 |
| 22 | 0.000273 | 0.0002455 | 0.000673799 | 0.000292285 | 0.0002455 |
| 23 | 0.0002155 | 0.000221867 | 0.000780392 | 0.000301932 | 0.000221867 |
| 24 | 0.0001919 | 0.000201127 | 0.00078618 | 0.00028264 | 0.000201127 |
| 25 | 0.0001787 | 0.000212702 | 0.000693575 | 0.000299038 | 0.000212703 |
| 26 | 0.0001785 | 0.000218008 | 0.000668976 | 0.000319295 | 0.000218008 |
| 27 | 0.0001706 | 0.000203056 | 0.000641002 | 0.000277816 | 0.000203056 |
| 28 | 0.0001541 | 0.000189551 | 0.000681034 | 0.000262864 | 0.000189551 |

| time(min) | การทดลองที่ | | | | |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 29 | 0.0001551 | 0.00018716 | 0.000597111 | 0.000267205 | 0.00018716 |
| 30 | 0.0001385 | 0.00017121 | 0.000982966 | 0.000262381 | 0.00017121 |
| 31 | 0.0001646 | 0.000160612 | 0.000685375 | 0.00023296 | 0.000160612 |
| 32 | 0.0001713 | 0.000161577 | 0.000385855 | 0.000224761 | 0.000161577 |
| 33 | 0.0001104 | 0.0001746 | 0.00051994 | 0.00032653 | 0.0001746 |
| 34 | 0.0001085 | 0.000177461 | 0.000499682 | 0.00033907 | 0.000177461 |
| 35 | 9.821E-05 | 0.000174599 | 0.000582641 | 0.00034727 | 0.000174599 |
| 36 | 9.782E-05 | 0.000173635 | 0.000508846 | 0.000342447 | 0.000173635 |
| 37 | 0.0001101 | 0.000182317 | 0.000501129 | 0.000322671 | 0.000182317 |
| 38 | 0.0001257 | 0.00018521 | 0.000508364 | 0.000276369 | 0.00018521 |
| 39 | 0.000115 | 0.000173151 | 0.000477013 | 0.000262864 | 0.000173151 |
| 40 | 0.0001268 | 0.000188587 | 0.000474602 | 0.000263346 | 0.000188587 |
| 41 | 8.614E-05 | 0.000174602 | 0.000469779 | 0.000363668 | 0.000174602 |
| 42 | 7.115E-05 | 0.000156754 | 0.000481837 | 0.000392125 | 0.000156754 |
| 43 | 7.951E-05 | 0.000146625 | 0.000471708 | 0.000370871 | 0.000146625 |
| 44 | 9.919E-05 | 0.000150483 | 0.000464473 | 0.000321224 | 0.000150483 |
| 45 | 0.0001069 | 0.000153377 | 0.000452897 | 0.000300967 | 0.000153377 |
| 46 | 0.0001051 | 0.000138908 | 0.000481354 | 0.000261899 | 0.000138908 |
| 47 | 0.0001041 | 0.000138908 | 0.000428299 | 0.000272992 | 0.000138908 |
| 48 | 0.0001098 | 0.000143731 | 0.000419135 | 0.000257558 | 0.000143731 |
| 49 | 8.093E-05 | 0.000133118 | 0.000460615 | 0.000290356 | 0.000133118 |
| 50 | 9.486E-05 | 0.000141802 | 0.000391161 | 0.000284086 | 0.000141802 |
| 51 | 9.455E-05 | 0.000139872 | 0.000418653 | 0.000275404 | 0.000139872 |
| 52 | 0.0001261 | 0.000146143 | 0.000367527 | 0.000263828 | 0.000146143 |
| 53 | 0.0001429 | 0.000149519 | 0.000416724 | 0.00023923 | 0.000149519 |
| 54 | 9.916E-05 | 0.000127815 | 0.000390678 | 0.000270581 | 0.000127815 |

| time(min) | การทดลองที่ | | | | |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 55 | 0.0001226 | 0.000130226 | 0.000403219 | 0.000223796 | 0.000130226 |
| 56 | 0.000137 | 0.000135531 | 0.000411418 | 0.000218973 | 0.000135531 |
| 57 | 0.0001512 | 0.000137461 | 0.000400807 | 0.000197751 | 0.000137461 |
| 58 | 0.0001462 | 0.000125884 | 0.000395984 | 0.000179423 | 0.000125884 |
| 59 | 0.0001378 | 0.000132155 | 0.000374762 | 0.000203539 | 0.000132155 |
| 60 | 0.0001379 | 0.000126278 | 0.000474119 | 0.000189069 | 0.000126278 |
| 61 | 0.0001227 | 0.000116721 | 0.000224278 | 0.000188587 | 0.000116721 |
| 62 | 0.0001348 | 0.00014759 | 0.0003328 | 0.000188587 | 0.00014759 |
| 63 | 0.0001148 | 0.000149038 | 0.000332318 | 0.00021222 | 0.000149038 |
| 64 | 0.0001069 | 0.000140837 | 0.000332318 | 0.00020595 | 0.000140837 |
| 65 | 9.775E-05 | 0.000145177 | 0.00035981 | 0.000217044 | 0.000145177 |
| 66 | 9.724E-05 | 0.000135532 | 0.000314472 | 0.00021849 | 0.000135532 |
| 67 | 0.0001076 | 0.000135532 | 0.000337623 | 0.000182799 | 0.000135532 |
| 68 | 9.555E-05 | 0.000119609 | 0.000325565 | 0.000167847 | 0.000119609 |
| 69 | 9.085E-05 | 0.000126368 | 0.000325565 | 0.000178458 | 0.000126368 |
| 70 | 9.114E-05 | 0.000133121 | 0.000344858 | 0.000188104 | 0.000133121 |
| 71 | 0.0001205 | 0.000157236 | 0.000333282 | 0.000169294 | 0.000157236 |
| 72 | 0.0001202 | 0.000139872 | 0.000322671 | 0.000154342 | 0.000139872 |
| 73 | 9.902E-05 | 0.000110933 | 0.000325083 | 0.000143731 | 0.000110933 |
| 74 | 0.0001006 | 0.000109968 | 0.000322189 | 0.000146625 | 0.000109968 |
| 75 | 9.527E-05 | 9.30875E-05 | 0.000330388 | 0.000123474 | 9.30875E-05 |
| 76 | 0.000104 | 0.00011238 | 0.000337141 | 0.000142284 | 0.00011238 |
| 77 | 0.0001106 | 0.000121062 | 0.000313025 | 0.000138908 | 0.000121062 |
| 78 | 7.941E-05 | 0.000122027 | 0.000322671 | 0.000183763 | 0.000122027 |
| 79 | 0.0001283 | 0.000127332 | 0.000350164 | 0.000121544 | 0.000127332 |
| 80 | 0.0001116 | 0.000113345 | 0.000354504 | 0.000125403 | 0.000113345 |

| time(min) | การทดลองที่ | | | | |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 81 | 0.000131 | 0.000111898 | 0.000325083 | 0.00011865 | 0.000111898 |
| 82 | 0.0001089 | 0.000108522 | 0.000303861 | 0.000126368 | 0.000108522 |
| 83 | 0.0001095 | 0.000113345 | 0.000321224 | 0.000128297 | 0.000113345 |
| 84 | 8.851E-05 | 0.000110451 | 0.000302414 | 0.000138426 | 0.000110451 |
| 85 | 8.395E-05 | 0.000114791 | 0.000301932 | 0.000141802 | 0.000114791 |
| 86 | 0.0001307 | 0.000136496 | 0.000286497 | 0.000123956 | 0.000136496 |
| 87 | 0.0001199 | 0.00013312 | 0.000302896 | 0.000142284 | 0.00013312 |
| 88 | 7.999E-05 | 0.000122027 | 0.000302414 | 0.000187622 | 0.000122027 |
| 89 | 9.242E-05 | 0.000131673 | 0.000273475 | 0.000177976 | 0.000131673 |
| 90 | 8.579E-05 | 0.000122509 | 0.000285533 | 0.000167365 | 0.000122509 |
| 91 | 9.372E-05 | 0.000120098 | 0.000287462 | 0.000149037 | 0.000120098 |
| 92 | 6.952E-05 | 0.000123474 | 0.000276369 | 0.00021415 | 0.000123474 |
| 93 | 8.905E-05 | 0.000124438 | 0.000262864 | 0.000154342 | 0.000124438 |
| 94 | 8.926E-05 | 0.00012685 | 0.000281674 | 0.000156271 | 0.00012685 |
| 95 | 0.000137 | 0.000133602 | 0.000285533 | 0.000115273 | 0.000133602 |
| 96 | 0.0001074 | 0.000122991 | 0.000264311 | 0.000117686 | 0.000122991 |
| 97 | 0.0001038 | 0.000107075 | 0.000281192 | 0.000117686 | 0.000107075 |
| 98 | 0.0001147 | 0.000110451 | 0.000238266 | 0.000113345 | 0.000110451 |
| 99 | 0.0001118 | 9.59809E-05 | 0.000258523 | 9.64638E-05 | 9.59809E-05 |
| 100 | 0.0001493 | 0.000124921 | 0.000234889 | 9.40522E-05 | 0.000124921 |
| 101 | 0.000127 | 0.000116239 | 0.000258041 | 0.000104181 | 0.000116239 |
| 102 | 0.0001234 | 0.000117686 | 0.000245018 | 0.000109486 | 0.000117686 |
| 103 | 0.0001213 | 0.00011238 | 0.000229101 | 0.000103216 | 0.00011238 |
| 104 | 9.079E-05 | 9.83931E-05 | 0.000287944 | 0.00011238 | 9.83931E-05 |
| 105 | 0.0001336 | 9.26052E-05 | 0.00028698 | 8.48883E-05 | 9.26052E-05 |
| 106 | 0.0001133 | 8.9229E-05 | 0.000276369 | 8.39234E-05 | 8.9229E-05 |

| time(min) | การทดลองที่ | | | | |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 107 | 8.26E-05 | 8.87467E-05 | 0.000240195 | 0.000111416 | 8.87467E-05 |
| 108 | 0.0001252 | 0.000100322 | 0.000265758 | 0.000101287 | 0.000100322 |
| 109 | 0.0001734 | 9.01936E-05 | 0.000242124 | 8.77824E-05 | 9.01936E-05 |
| 110 | 0.0001573 | 8.9229E-05 | 0.000245018 | 7.33124E-05 | 8.9229E-05 |
| 111 | 0.0001549 | 8.53704E-05 | 0.000240677 | 7.28302E-05 | 8.53704E-05 |
| 112 | 0.000117 | 8.7782E-05 | 0.000263828 | 0.000101287 | 8.7782E-05 |
| 113 | 0.0001556 | 9.40522E-05 | 0.000245018 | 8.10296E-05 | 9.40522E-05 |
| 114 | 0.0001056 | 6.70432E-05 | 0.000237301 | 8.05473E-05 | 6.70432E-05 |
| 115 | 0.0001062 | 8.00649E-05 | 0.000260935 | 9.88757E-05 | 8.00649E-05 |
| 116 | 0.0001034 | 7.95826E-05 | 0.000263828 | 9.83931E-05 | 7.95826E-05 |
| 117 | 9.759E-05 | 7.09009E-05 | 0.000275404 | 8.58528E-05 | 7.09009E-05 |
| 118 | 0.0001052 | 7.95826E-05 | 0.000322189 | 9.59815E-05 | 7.95826E-05 |
| 119 | 6.602E-05 | 5.30551E-05 | 0.000194375 | 0.000108522 | 5.30551E-05 |
| 120 | 0.0001191 | 8.34412E-05 | 0.000245983 | 9.01936E-05 | 8.34412E-05 |

| เวลา (นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.001907902 | 0.001085217 | 0.0007617 | 0.001085217 | 0.001085217 |
| 2 | 0.001149647 | 0.001016732 | 0.0005401 | 0.001016729 | 0.001016732 |
| 3 | 0.000712293 | 0.000936182 | 0.0004683 | 0.000936181 | 0.000936181 |
| 4 | 0.000750365 | 0.000853704 | 0.000287 | 0.000853704 | 0.000853703 |
| 5 | 0.000985954 | 0.000750006 | 0.000403 | 0.000750006 | 0.000750006 |
| 6 | 0.001128316 | 0.000644378 | 0.0004404 | 0.000644378 | 0.000644378 |
| 7 | 0.001128874 | 0.00064971 | 0.0004752 | 0.00064971 | 0.000649709 |
| 8 | 0.001106271 | 0.000577336 | 0.0004311 | 0.000577336 | 0.000577336 |

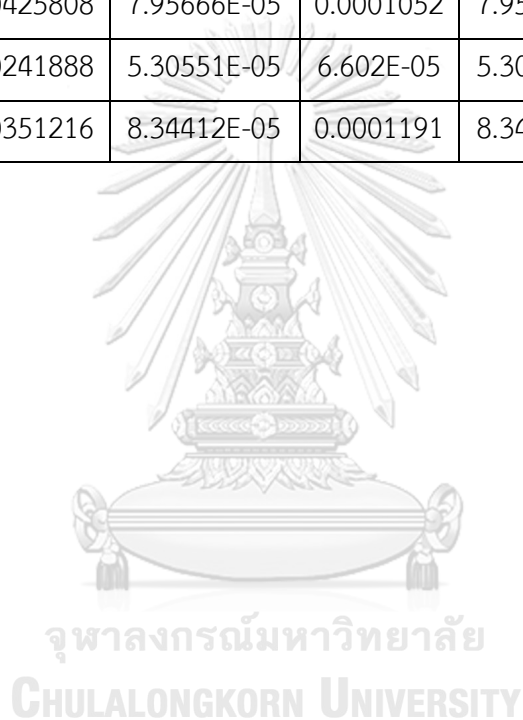
| เวลา (นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 9 | 0.001022093 | 0.000585053 | 0.0004256 | 0.000585053 | 0.000585053 |
| 10 | 0.000938981 | 0.000589876 | 0.0004156 | 0.000589876 | 0.000589876 |
| 11 | 0.000659142 | 0.00055322 | 0.0002987 | 0.00055322 | 0.00055322 |
| 12 | 0.000488329 | 0.000502094 | 0.0002168 | 0.000502094 | 0.000502094 |
| 13 | 0.000570957 | 0.000627496 | 0.0003092 | 0.000627496 | 0.000627496 |
| 14 | 0.00048778 | 0.000736501 | 0.0003787 | 0.000736501 | 0.000736501 |
| 15 | 0.000638222 | 0.000693574 | 0.0004449 | 0.000693574 | 0.000693566 |
| 16 | 0.000788678 | 0.000589876 | 0.0004412 | 0.000589876 | 0.000589876 |
| 17 | 0.0008231 | 0.000447592 | 0.0003985 | 0.000447592 | 0.000447592 |
| 18 | 0.000934879 | 0.000369456 | 0.0003829 | 0.000369456 | 0.000369456 |
| 19 | 0.000843614 | 0.000348717 | 0.0003456 | 0.000348717 | 0.000348716 |
| 20 | 0.000865986 | 0.000311096 | 0.0003072 | 0.000311096 | 0.000311096 |
| 21 | 0.000877116 | 0.000303865 | 0.000303 | 0.000303865 | 0.000303865 |
| 22 | 0.000749407 | 0.0002455 | 0.000273 | 0.0002455 | 0.000245499 |
| 23 | 0.000759199 | 0.000221543 | 0.0002155 | 0.000221543 | 0.000221543 |
| 24 | 0.000749956 | 0.000201159 | 0.0001919 | 0.000201159 | 0.000201159 |
| 25 | 0.000582826 | 0.000212703 | 0.0001787 | 0.000212703 | 0.000212702 |
| 26 | 0.000547712 | 0.000218008 | 0.0001785 | 0.000218008 | 0.000218008 |
| 27 | 0.00053862 | 0.000203056 | 0.0001706 | 0.000203056 | 0.000203056 |
| 28 | 0.000553575 | 0.000189552 | 0.0001541 | 0.000189551 | 0.000189552 |
| 29 | 0.000494718 | 0.000187153 | 0.0001551 | 0.000187153 | 0.000187153 |
| 30 | 0.000795046 | 0.00017121 | 0.0001385 | 0.00017121 | 0.00017121 |
| 31 | 0.000702403 | 0.000160612 | 0.0001646 | 0.000160612 | 0.000160612 |
| 32 | 0.00040904 | 0.000161577 | 0.0001713 | 0.000161577 | 0.000161577 |
| 33 | 0.000328706 | 0.0001746 | 0.0001104 | 0.0001746 | 0.0001746 |
| 34 | 0.000305638 | 0.000177461 | 0.0001085 | 0.000177461 | 0.000177461 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 35 | 0.000327736 | 0.0001746 | 9.821E-05 | 0.000174599 | 0.0001746 |
| 36 | 0.000286674 | 0.000173635 | 9.782E-05 | 0.000173635 | 0.000173635 |
| 37 | 0.000302625 | 0.000182317 | 0.0001101 | 0.000182317 | 0.000182317 |
| 38 | 0.00034512 | 0.00018521 | 0.0001257 | 0.00018521 | 0.00018521 |
| 39 | 0.000316842 | 0.000173135 | 0.000115 | 0.000173151 | 0.000173135 |
| 40 | 0.000319009 | 0.000188587 | 0.0001268 | 0.000188587 | 0.000188587 |
| 41 | 0.000231774 | 0.000174602 | 8.614E-05 | 0.000174602 | 0.000174602 |
| 42 | 0.000218693 | 0.000156754 | 7.115E-05 | 0.000156754 | 0.000156753 |
| 43 | 0.00025579 | 0.000146625 | 7.951E-05 | 0.000146625 | 0.000146625 |
| 44 | 0.000306162 | 0.000150483 | 9.919E-05 | 0.000150483 | 0.000150484 |
| 45 | 0.000315722 | 0.000153378 | 0.0001069 | 0.000153377 | 0.000153378 |
| 46 | 0.00036434 | 0.000138908 | 0.0001051 | 0.000138908 | 0.000138908 |
| 47 | 0.000320846 | 0.000138908 | 0.0001041 | 0.000138908 | 0.000138908 |
| 48 | 0.000320238 | 0.000143733 | 0.0001098 | 0.000143731 | 0.000143733 |
| 49 | 0.000280041 | 0.000133118 | 8.093E-05 | 0.000133118 | 0.000133118 |
| 50 | 0.000261659 | 0.000141802 | 9.486E-05 | 0.000141802 | 0.000141802 |
| 51 | 0.000283012 | 0.000139871 | 9.455E-05 | 0.000139871 | 0.000139871 |
| 52 | 0.000317135 | 0.000146143 | 0.0001261 | 0.000146143 | 0.000146143 |
| 53 | 0.00039824 | 0.000149519 | 0.0001429 | 0.000149519 | 0.000149519 |
| 54 | 0.000302932 | 0.00012788 | 9.916E-05 | 0.000127815 | 0.00012788 |
| 55 | 0.000379755 | 0.000130161 | 0.0001226 | 0.000130161 | 0.000130161 |
| 56 | 0.000415949 | 0.000135531 | 0.000137 | 0.000135531 | 0.000135531 |
| 57 | 0.000440888 | 0.000137461 | 0.0001512 | 0.000137461 | 0.000137461 |
| 58 | 0.000459852 | 0.000125887 | 0.0001462 | 0.000125884 | 0.000125887 |
| 59 | 0.000390747 | 0.000132155 | 0.0001378 | 0.000132155 | 0.000132155 |
| 60 | 0.000517661 | 0.000126278 | 0.0001379 | 0.000126278 | 0.000126278 |

| เวลา (นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 61 | 0.00023575 | 0.000116721 | 0.0001227 | 0.000116721 | 0.000116721 |
| 62 | 0.000303861 | 0.00014759 | 0.0001348 | 0.00014759 | 0.00014759 |
| 63 | 0.000256036 | 0.000149038 | 0.0001148 | 0.000149038 | 0.000149038 |
| 64 | 0.000252157 | 0.000140838 | 0.0001069 | 0.000140837 | 0.000140838 |
| 65 | 0.000242272 | 0.000145177 | 9.775E-05 | 0.000145177 | 0.000145177 |
| 66 | 0.000225615 | 0.000135532 | 9.724E-05 | 0.000135532 | 0.000135532 |
| 67 | 0.000268139 | 0.000135532 | 0.0001076 | 0.000135532 | 0.000135532 |
| 68 | 0.000260078 | 0.000119608 | 9.555E-05 | 0.000119609 | 0.000119608 |
| 69 | 0.000234055 | 0.000126365 | 9.085E-05 | 0.000126365 | 0.000126365 |
| 70 | 0.000236095 | 0.000133131 | 9.114E-05 | 0.000133121 | 0.000133131 |
| 71 | 0.000255422 | 0.000157236 | 0.0001205 | 0.000157236 | 0.000157236 |
| 72 | 0.000277296 | 0.000139872 | 0.0001202 | 0.000139872 | 0.000139872 |
| 73 | 0.000290175 | 0.000110933 | 9.902E-05 | 0.000110933 | 0.000110933 |
| 74 | 0.000294633 | 0.000109968 | 0.0001006 | 0.000109968 | 0.000109968 |
| 75 | 0.000338132 | 9.30875E-05 | 9.527E-05 | 9.30875E-05 | 9.30875E-05 |
| 76 | 0.000311998 | 0.00011238 | 0.000104 | 0.00011238 | 0.00011238 |
| 77 | 0.000285853 | 0.000121062 | 0.0001106 | 0.000121062 | 0.000121062 |
| 78 | 0.000210033 | 0.00012199 | 7.941E-05 | 0.000122027 | 0.00012199 |
| 79 | 0.000352943 | 0.000127268 | 0.0001283 | 0.000127332 | 0.000127268 |
| 80 | 0.00034905 | 0.000113348 | 0.0001116 | 0.000113345 | 0.000113346 |
| 81 | 0.000380585 | 0.000111898 | 0.000131 | 0.000111898 | 0.000111898 |
| 82 | 0.000305021 | 0.000108522 | 0.0001089 | 0.000108522 | 0.000108522 |
| 83 | 0.000310356 | 0.000113345 | 0.0001095 | 0.000113345 | 0.000113345 |
| 84 | 0.000242353 | 0.000110451 | 8.851E-05 | 0.000110451 | 0.000110451 |
| 85 | 0.0002208 | 0.000114791 | 8.395E-05 | 0.000114791 | 0.000114791 |
| 86 | 0.000274235 | 0.000136496 | 0.0001307 | 0.000136496 | 0.000136496 |

| เวลา (นาทื) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 87 | 0.00027312 | 0.00013302 | 0.0001199 | 0.00013312 | 0.00013302 |
| 88 | 0.000198241 | 0.000122027 | 7.999E-05 | 0.000122027 | 0.000122027 |
| 89 | 0.000191951 | 0.000131673 | 9.242E-05 | 0.000131673 | 0.000131673 |
| 90 | 0.000199955 | 0.000122509 | 8.579E-05 | 0.000122509 | 0.000122509 |
| 91 | 0.000224202 | 0.000120166 | 9.372E-05 | 0.000120166 | 0.000120166 |
| 92 | 0.000155613 | 0.000123474 | 6.952E-05 | 0.000123474 | 0.000123474 |
| 93 | 0.000188112 | 0.000124438 | 8.905E-05 | 0.000124438 | 0.000124438 |
| 94 | 0.000198215 | 0.00012685 | 8.926E-05 | 0.00012685 | 0.00012685 |
| 95 | 0.000292701 | 0.000133602 | 0.000137 | 0.000133602 | 0.000133602 |
| 96 | 0.00023073 | 0.000122995 | 0.0001074 | 0.000122995 | 0.000122995 |
| 97 | 0.000271973 | 0.00010729 | 0.0001038 | 0.00010729 | 0.00010729 |
| 98 | 0.000247391 | 0.000110451 | 0.0001147 | 0.000110451 | 0.000110451 |
| 99 | 0.000301179 | 9.59809E-05 | 0.0001118 | 9.59809E-05 | 9.59809E-05 |
| 100 | 0.000280663 | 0.000124921 | 0.0001493 | 0.000124921 | 0.000124921 |
| 101 | 0.000281933 | 0.000116239 | 0.000127 | 0.000116239 | 0.000116239 |
| 102 | 0.000256891 | 0.000117686 | 0.0001234 | 0.000117686 | 0.000117686 |
| 103 | 0.000247301 | 0.00011238 | 0.0001213 | 0.00011238 | 0.00011238 |
| 104 | 0.0002657 | 9.8393E-05 | 9.079E-05 | 9.83931E-05 | 9.8393E-05 |
| 105 | 0.000414164 | 9.26052E-05 | 0.0001336 | 9.26053E-05 | 9.26052E-05 |
| 106 | 0.00035102 | 8.9229E-05 | 0.0001133 | 8.9229E-05 | 8.9229E-05 |
| 107 | 0.000223558 | 8.87466E-05 | 8.26E-05 | 8.87467E-05 | 8.87466E-05 |
| 108 | 0.000331564 | 0.000100322 | 0.0001252 | 0.000100322 | 0.000100322 |
| 109 | 0.000465623 | 9.01936E-05 | 0.0001734 | 9.01936E-05 | 9.01936E-05 |
| 110 | 0.000432005 | 8.92291E-05 | 0.0001573 | 8.92291E-05 | 8.92291E-05 |
| 111 | 0.000436725 | 8.53704E-05 | 0.0001549 | 8.53704E-05 | 8.53702E-05 |
| 112 | 0.000351771 | 8.7782E-05 | 0.000117 | 8.7782E-05 | 8.7782E-05 |

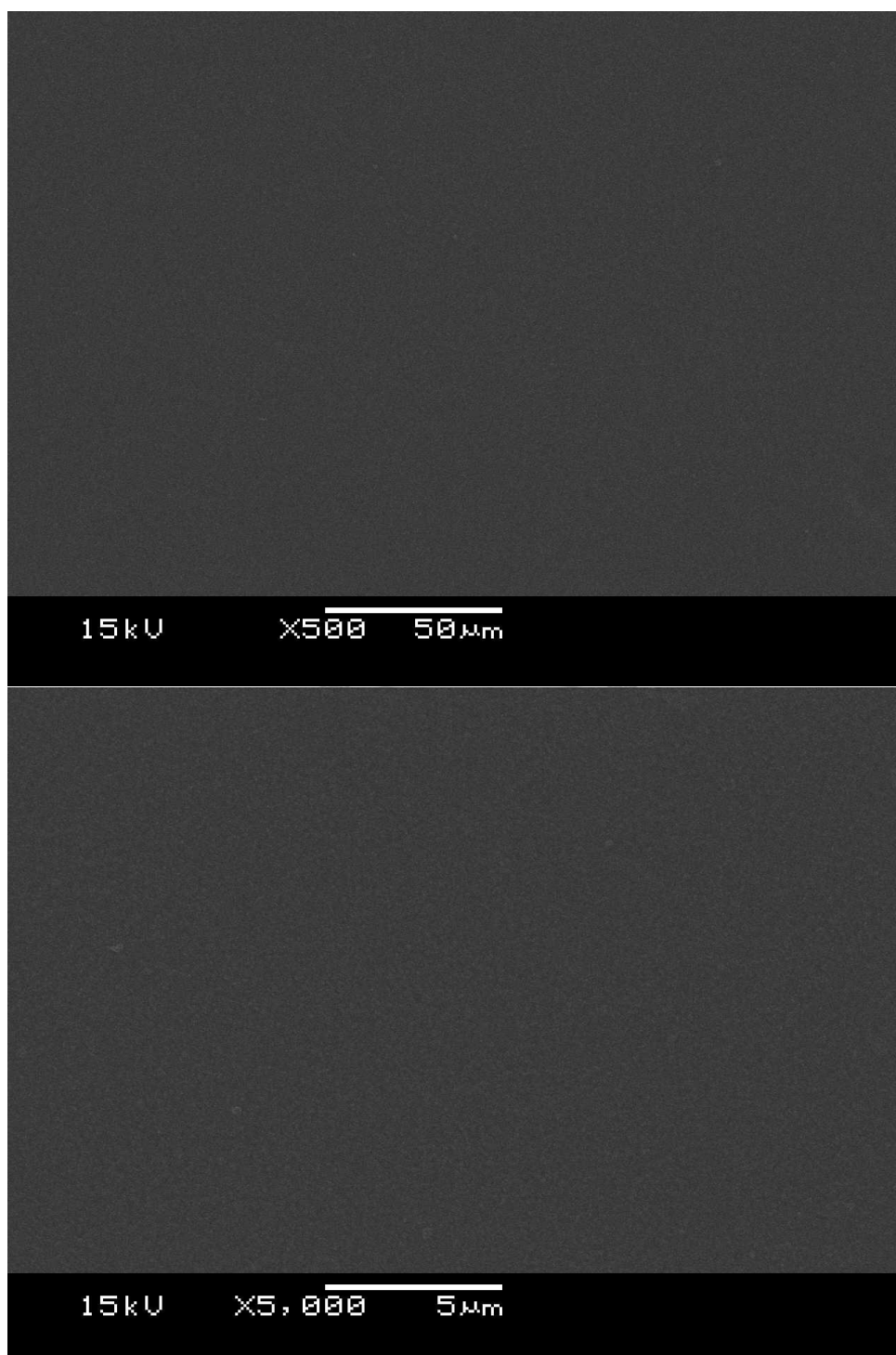
| เวลา (นาที) | การทดลองที่ | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 113 | 0.000405446 | 9.40522E-05 | 0.0001556 | 9.40522E-05 | 9.40522E-05 |
| 114 | 0.000373713 | 6.70427E-05 | 0.0001056 | 6.70432E-05 | 6.70427E-05 |
| 115 | 0.000346216 | 8.00649E-05 | 0.0001062 | 8.00649E-05 | 8.00649E-05 |
| 116 | 0.000342718 | 7.95829E-05 | 0.0001034 | 7.95829E-05 | 7.95829E-05 |
| 117 | 0.000379067 | 7.09009E-05 | 9.759E-05 | 7.09009E-05 | 7.09002E-05 |
| 118 | 0.000425808 | 7.95666E-05 | 0.0001052 | 7.95826E-05 | 7.95666E-05 |
| 119 | 0.000241888 | 5.30551E-05 | 6.602E-05 | 5.30551E-05 | 5.30551E-05 |
| 120 | 0.000351216 | 8.34412E-05 | 0.0001191 | 8.34412E-05 | 8.34412E-05 |



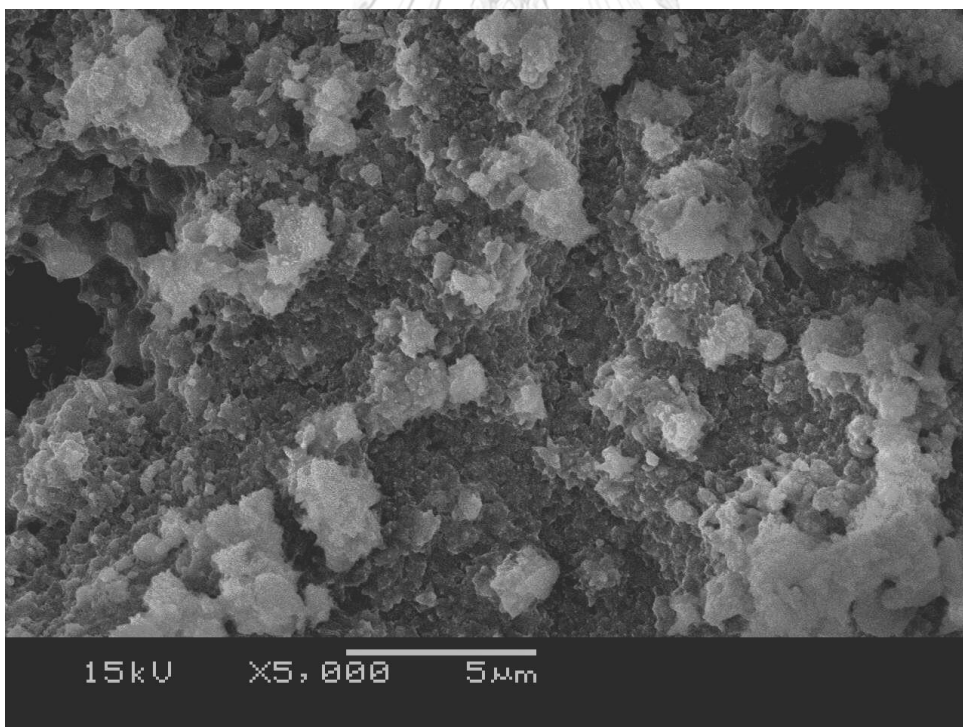
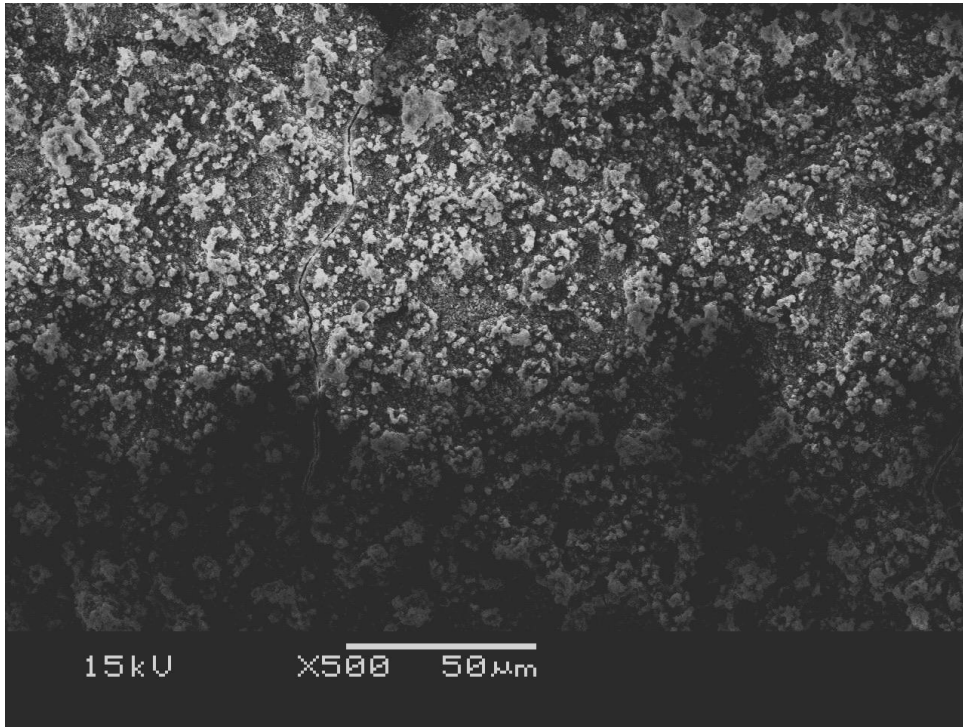
ภาคผนวก ด

SEM-EDX ของนาโนฟิลเตอร์ชั้นเมมเบรนที่ไม่ผ่านการใช้งานและหลังการใช้งาน
จากการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นสารตั้ง

เมมเบรนที่ไม่ผ่านการใช้งาน



เมมเบรนหลังผ่านการใช้งาน



ภาคผนวก ต
มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม
และเขตประกอบการ

| ดัชนีคุณภาพน้ำ | หน่วย | ค่ามาตรฐาน |
|---|------------|--|
| ความเป็นกรดและด่าง (pH) | - | 5.5-9.0 |
| อุณหภูมิ | °C | <40 |
| สี | เอดีเอ็มไอ | 300 |
| ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids, TDS) | มก./ล. | (1) กรณีระบายลงแหล่งน้ำ ต้องไม่เกิน 3,000 มก./ล. (2) กรณีระบายลงแหล่งน้ำที่มีค่า TDS เกินกว่า 3,000 มก./ล. ค่า TDS ในน้ำทิ้งที่จะระบายได้ ต้องมีค่าเกินกว่าค่า TDS ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำนั้น ไม่เกิน 5,000 มก./ล. |
| ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids) | มก./ล. | <50 |
| บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) | มก./ล. | <20 |

| ดัชนีคุณภาพน้ำ | หน่วย | ค่ามาตรฐาน |
|---------------------------------------|--------|---------------|
| ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) | มก./ล. | <120 |
| ซัลไฟต์ | มก./ล. | <1 |
| ไซยาไนด์ | มก./ล. | <0.2 |
| น้ำมันและไขมัน | มก./ล. | <5 |
| ฟอร์มาลดีไฮด์ | มก./ล. | <1 |
| สารประกอบฟีนอล | มก./ล. | <1 |
| คลอรีนอิสระ | มก./ล. | <1 |
| สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ | มก./ล. | ต้องตรวจไม่พบ |
| ทีเคเอ็น (Total Kjeldent Nitrogen) | มก./ล. | <100 |
| โลหะหนัก | มก./ล. | <5.0 |
| - สังกะสี | มก./ล. | <5.0 |
| - โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ | มก./ล. | <0.25 |
| - โครเมียมไตรวาเลนต์ | มก./ล. | <0.75 |
| - สารหนู | มก./ล. | <0.25 |

| ดัชนีคุณภาพน้ำ | หน่วย | ค่ามาตรฐาน |
|----------------|--------|------------|
| - ทองแดง | มก./ล. | <2.0 |
| - พรอท | มก./ล. | <0.005 |
| - แคลเมียม | มก./ล. | <0.03 |
| - แบริียม | มก./ล. | <1.0 |
| - ซีลีเนียม | มก./ล. | <0.02 |
| - ตะกั่ว | มก./ล. | <0.2 |
| - นิกเกิล | มก./ล. | <1.0 |
| - แมงกานีส | มก./ล. | <5.0 |

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ



ภาคผนวก ก
 มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทาน
 ในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน

| ดัชนีคุณภาพน้ำ | หน่วย | ค่ามาตรฐาน |
|---|--------------|------------|
| ความเป็นกรด-ด่าง (pH) | - | 6.5-8.5 |
| ความนำไฟฟ้า | ไมโครโมล/ซม. | 2,000 |
| ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS) | มก./ล. | 1,300 |
| บีโอดี (BOD ₅) | มก./ล. | 20 |
| สารแขวนลอย (SS) | มก./ล. | 30 |
| ซัลไฟด์คิดเทียบเป็น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S) | มก./ล. | 1.0 |
| ไซยาไนด์คิดเทียบเป็นไฮโดรเจน ไซยาไนด์ (cyanide as HCN) | มก./ล. | 0.2 |
| น้ำมันและไขมัน (Fat ,Oil and Grease) | มก./ล. | 5.0 |
| ฟอर्मัลดีไฮด์ (formaldehyde) | มก./ล. | 1.0 |

| ดัชนีคุณภาพน้ำ | หน่วย | ค่ามาตรฐาน |
|--|--------|-----------------------|
| ฟีนอลและ/หรือครีโซลส (Phenol & Cresols) | มก./ล. | 1.0 |
| คลอรีนอิสระ (Free chlorine) | มก./ล. | 1.0 |
| ยาฆ่าแมลงและสารกัมมันตรังสี | มก./ล. | ไม่มีเลย |
| สี และกลิ่นที่ระบายนสู่ทางน้ำ ชลประทาน (Colour and Odor) | - | ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ |
| น้ำมันทาร์ (Tar) | - | ไม่มีเลย |
| ค่าอุณหภูมิ | °C | 40 |
| Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) | มก./ล. | 35 |
| Dissolved Oxygen (DO) | มก./ล. | 2.0 |
| Chemical Oxygen Demand (COD) | มก./ล. | 100 |
| โลหะ | | |
| - สังกะสี | มก./ล. | 0.5 |

| ดัชนีคุณภาพน้ำ | หน่วย | ค่ามาตรฐาน |
|----------------|--------|------------|
| - โครเมียม | มก./ล. | 0.3 |
| - อาร์เซนิก | มก./ล. | 0.25 |
| - ทองแดง | มก./ล. | 1.0 |
| - พรอท | มก./ล. | 0.005 |
| - แคดเมียม | มก./ล. | 0.003 |
| - แบเรียม | มก./ล. | 1.0 |
| - เซลิเนียม | มก./ล. | 0.02 |
| - ตะกั่ว | มก./ล. | 0.1 |
| - นิเกิล | มก./ล. | 0.2 |
| - แมงกานีส | มก./ล. | 5.0 |

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ

ภาคผนวก ท

ราคาสารเคมี

| สารเคมี | ราคา | หน่วย | อ้างอิง |
|--|------|----------------|--------------|
| โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) | 77.8 | บาทต่อกิโลกรัม | ผู้ประกอบการ |
| แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO ₄) | 600 | บาทต่อกิโลกรัม | ผู้ประกอบการ |
| อีดีทีเอ (EDTA di-sodium salt) | 800 | บาทต่อกิโลกรัม | ผู้ประกอบการ |



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



สำนักงานใหญ่ : 556 ซอยนพเก้า แขวงวงสีสว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
 Head Office : 556 Soi Nopphakao, Wong Sawang, Bang Sue, Bangkok 10800, Thailand
 TEL : 0-2910-0134 FAX : 0-2910-0415 เลขประจำตัวผู้เสียภาษี (TAX ID NO.): 0105557150403

ใบเสนอราคา
 QUOTATION

| | |
|--|----------------------------------|
| เรียน : | เลขที่ / NO. : SK60110009 |
| ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | วันที่ / DATE |
| 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 | พนักงานขาย / SALESMAN : กิตติชัย |
| | โทร / TEL. : 090-9870928 |
| | kittitouch.s@hotmail.com |

ทางบริษัทฯ มีความยินดีขอเสนอราคาสินค้า/บริการ ดังรายการต่อไปนี้

| ลำดับ NO. | สินค้าเลขที่ CODE | รายการสินค้า DESCRIPTION | จำนวน QUANTITY | ราคาต่อหน่วย UNIT PRICE | จำนวนเงิน - บาท AMOUNT - BAHT |
|---|-------------------|--|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 1 | 482 | Ajax, Sodium Hydroxide, Pellets, Ar, 1 kg | 1 EACH | 350.00 | 350.00 |
| 2 | 503 | Ajax, Sodium Sulphate Anhydrous, Ar, 1 kg | 1 EACH | 625.00 | 625.00 |
| 3 | 180 | Ethylenediaminetetra-Acetic Acid [EDTA] di-sodium salt | 6 EACH | 800.00 | 4,800.00 |
| กำหนดยื่นราคาภายใน 30 วัน นับจากรวันที่เสนอราคา | | | รวมราคาสินค้า / TOTAL | | 5,775.00 |
| กำหนดส่งของภายใน 30 วัน นับจากรวันที่ได้รับใบสั่งซื้อ | | | ภาษีมูลค่าเพิ่ม / VAT 7% | | 404.25 |
| (หากพินหนึ่งร้อยเจ็ดสิบเก้าบาทที่ยี่สิบห้าสตางค์) | | | รวมทั้งสิ้น / GRAND TOTAL | | 6,179.25 |

หมายเหตุ : กำหนดชำระเงิน : 30 วัน

ทางบริษัทฯ หวังว่าจะได้รับการพิจารณาสั่งซื้อสินค้า/บริการ จากท่าน และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

การออกใบเสนอราคาเสร็จให้ที่นี่ →

O สั่งซื้อทุกรายการ O สั่งซื้อเฉพาะรายการที่

ออกบิลในนาม

เลขประจำตัวผู้เสียภาษี.....

เลขรหัสสาขาสถานประกอบการ.....

ติดต่อขอเก็บเงินที่

..... โทร.

ลงชื่อ ผู้อนุมัติสั่งซื้อ วันที่

(.....) (ลายเซ็นพร้อมตัวบรรจง)

*กรณียืนยันการสั่งซื้อ ขอความกรุณาส่งอีเมล/แฟกซ์ กลับหรือติดต่อผู้แทนจำหน่าย

ขอแสดงความนับถือ

นายกิตติชัย แสงรัตน์
 (กรรมการผู้จัดการ)

ห้างหุ้นส่วนจำกัด ที.เอส.อินเตอร์แล็บ

T.S. INTERLAB LIMITED PARTNERSHIP

7 ซอยรามคำแหง 58/2 แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ 10240 email : tsinterlab@yahoo.com

TEL. (02) 3793680 , (02) 3794093 FAX.(02) 3795524 เลขประจำตัวผู้เสียภาษีอากร : 0103548014843

Page 1 of 1

ใบเสนอราคา QUOTATION

เรียน / Attn : คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท

แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

TEL. Tax ID 0994000158319

เลขที่ /No. : SO62012402

วันที่ /Date :

ผู้เสนอราคา : คุณวันณา เลี้ยงรักษา

ข้าฯ มีความยินดีขอเสนอราคาสินค้ามาเพื่อพิจารณาต่อไปนี้


| ลำดับ | รายการ | จำนวน | ราคา / หน่วย | จำนวนเงิน |
|-------|--|-------|--------------|-----------|
| 1 | Magnesium sulphate 7 hydrate 1kg 'Ajax' #302-2 | 3 bot | 600.00 | 1,800.00 |
| | | | VAT 7.00% | 126.00 |
| | | | TOTAL | 1,926.00 |

กำหนดยื่นราคา / Validity : 30 วัน

กำหนดส่งของ / Delivery : 10 วัน

กำหนดชำระเงิน / Payment : 30 วัน

ขอแสดงความนับถือ



ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|---|
| ชื่อ-สกุล | นางสาวเอื้ออนุช ศรีน้อย |
| วัน เดือน ปี เกิด | 8 มีนาคม 2535 |
| วุฒิการศึกษา | สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต (IUP) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2557 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | บ้านเลขที่ 6 ซอยงามวงศ์วาน 23 แยก 2/1 ถนนงามวงศ์วาน ตำบลบางเขน อำเภอเมือง นนทบุรี 11000 |
| ผลงานตีพิมพ์ | การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 17 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี เมื่อวันที่ 24 - 25 พฤษภาคม 2561 ในบทความเรื่อง การกำจัดความกระด้างออกจากน้ำบาดาลด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส |