

การพัฒนากระบวนการร่วมทางกายภาพ-เคมีเพื่อผลิตน้ำหล่อเย็นและน้ำในหม้อไอน้ำจากน้ำใต้ดิน



นางสาวสุพัตรา ศรีสันต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of combined physico-chemical processes for cooling and boiler water  
production from groundwater



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการร่วมทางกายภาพ-เคมีเพื่อผลิตน้ำ หล่อเย็นและน้ำในหม้อไอน้ำจากน้ำใต้ดิน
โดย	นางสาวสุพัตรา ศรีสันต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. ญัฐวิญญ์ ขวเลิศพรศิยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ รัชฎาวงศ์)  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. ญัฐวิญญ์ ขวเลิศพรศิยา)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. มรุตพัชร จำนงค์วงศ์)

สุพัตรา ศรีสันต์ : การพัฒนากระบวนการร่วมทางกายภาพ-เคมีเพื่อผลิตน้ำหล่อเย็นและน้ำในหม้อไอน้ำจากน้ำใต้ดิน (Development of combined physico-chemical processes for cooling and boiler water production from groundwater) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. ณิชฎวิญญู ชาวเลิศพรศิยา, 245 หน้า.

ปัญหาหนึ่งที่มีกพบในการนำน้ำบาดาลมาใช้เป็นน้ำทดแทน (Makeup Water) ในระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำ คือ ความกระด้างของน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดตะกอนในระบบ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำบาดาลด้วยกระบวนการผสมผสานระหว่างกระบวนการทางเคมีและนาโนฟิลเตรชัน โดยทำการทดลองกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีคุณภาพคล้ายกับน้ำบาดาลตัวอย่าง สารเคมีที่ใช้ในการทดลองกระบวนการทางเคมี ได้แก่ 1) ปูนขาว 2) สารส้ม 3) PACl 4) ปูนขาวร่วมกับสารส้ม และ 5) ปูนขาวร่วมกับ PACl โดยตัวแปรที่พิจารณาในการศึกษานี้ ได้แก่ คุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน และการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้ 1) ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ถูกเทียบค่าด้วยน้ำ DI (Normality Flux,  $J/J_0$ ) 2) อัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ถูกเทียบค่า (Normalized Permeate Flow, NPF) และ 3) การวิเคราะห์พื้นผิวเมมเบรนด้วย SEM-EDX

ผลการศึกษาพบว่า ในกระบวนการทางเคมี ที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. (mg/l) และ PACl  $1.2 \times 10^{-4}$  โมลอลูมินัม/ล. (mol Al/l) มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดความกระด้างทั้งหมดและซิลิกา ทั้งนี้กระบวนการผสมผสานระหว่างกระบวนการทางเคมีและนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดความกระด้างทั้งหมดและซิลิกาโดยรวมได้มากกว่า  $96.3 \pm 0.0$  และ  $70.8 \pm 0.1$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยน้ำหลังผ่านการบำบัดมีความกระด้างและปริมาณซิลิกาผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับระบบหล่อเย็นของ Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRA) นอกจากนี้กระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl ยังช่วยลดการเกิดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน ส่งผลให้นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนมีอัตราการนำน้ำกลับสูงที่สุด ที่มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราการนำกลับดังกล่าว  $\%J/J_0$  และ  $\%NPF$  ลดลง 6.0 และ 0.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นผิวของเมมเบรนด้วย SEM-EDX พบว่าฟาวเลนที่ผิวเมมเบรนมีลักษณะเป็นคราบ ไม่เห็นเป็นผลึกที่ชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากกรณีน้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี ซึ่งจะเห็นผลึกได้ชัดและรวมตัวเป็นชั้นหนา

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	.....
ปีการศึกษา	2560	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม	.....

# # 5870261021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: CHEMICAL TREATMENT PROCESS / NANOFILTRATION / HARDNESS / SILICA / GROUNDWATER

SUPATTRA SRISAN: Development of combined physico-chemical processes for cooling and boiler water production from groundwater. ADVISOR: ASSOC. PROF. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: NATTAWIN CHAWALOESPHONSIYA, Ph.D., 245 pp.

Hardness is one of major problem in producing makeup water for cooling system and boiler from groundwater since it generates scale. This research therefore aims to study the effectiveness of hardness and silica removal from groundwater by chemical and nanofiltration processes. Synthetic groundwater, prepared to match the real ground water sample, was applied in the laboratory-scale experiments. Chemicals those are used namely 1) lime 2) alum 3) PACl 4) lime with alum and 5) lime with PACl. The analytical parameters of this work are water quality after treatment, membrane fouling in terms of %Normality Flux ( $J/J_0$ ), % Normalized Permeate Flow (NPF) and SEM-EDX of membrane surface.

The study revealed that the chemical process with Calcium hydroxide 360 mg/L and PACl of  $1.2 \times 10^{-4}$  mol Al/L gave the most effective in removing hardness and silica. The combined chemical-nanofiltration process then can remove overall hardness and silica more than  $96.3 \pm 0.0\%$  and  $70.8 \pm 0.1\%$ , respectively. The quality of treated water was compatible with the standard of the Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRA). Moreover the chemical process with lime and PACl can reduce membrane fouling. The highest %recovery of membrane process was higher than 80%, while  $J/J_0$  and %NPF were reduced of 6.0% and 0.6%, respectively. The result of  $J/J_0$  and %NPF were in accordance to SEM-EDX.

Department:	Environmental Engineering	Student's Signature .....
		Advisor's Signature .....
Field of Study:	Environmental Engineering	Co-Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ณัฐวิญญู ชวเลิศพรศิยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ชี้แนะแนวทางการดำเนินงานวิจัยอย่างถูกต้องและมีแบบแผน ให้คำปรึกษาและความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน และ ดร. มรุตพร จ่านวงศ์ ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเพื่อสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และชี้แนะข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ในการทำงานวิจัย

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

ขอขอบคุณ น.ส.สุทัสชา เจียมโชติพานิชย์ นายอติตินนท์ ภูพาดทอง และ น.ส.ชนมน วิริยะจารุ ที่คอยช่วยเหลือและดูแลกันและกันในระหว่างการทำงานวิจัย

และสุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจมาตลอด จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบความสำเร็จตามที่ตั้งใจ

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หม้อไอน้ำ (Steam Boiler).....	5
2.2 ระบบหล่อเย็น (Cooling System).....	10
2.3 น้ำบาดาล (Groundwater).....	14
2.4 ความกระด้างของน้ำ.....	14
2.5 ซิลิกา (SiO <sub>2</sub> ) ในน้ำธรรมชาติ.....	20
2.6 กระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟลอคคูเลชัน (Coagulation/Flocculation).....	23
2.6.2 สารประกอบอลูมิเนียม และอลูมิเนียมซิลิเกต.....	30
2.7 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF).....	31
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	55
3.1 ข้อมูลพื้นฐานของโรงงานผลิตเอทานอลที่สนับสนุนข้อมูลสำหรับงานวิจัย.....	59

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	61
3.3 ขั้นตอนการทดลอง .....	70
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	76
4.1 การทดลองที่ 1 : การวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลจริงและสังเคราะห์น้ำบาดาลเพื่อใช้ในการทดลอง .....	76
4.2 การทดลองที่ 2 : การศึกษากระบวนการทางเคมีในการกำจัดความกระด้างและซัลเฟต .....	80
4.3 การทดลองที่ 3 : ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซัลเฟตของน้ำบาดาลด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันของน้ำที่ผ่าน/ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี.....	121
4.4 การทดลองที่ 4 : ศึกษาปริมาณของเสียและวิธีการจัดการน้ำเข้มข้นที่ได้จากกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน .....	151
4.5 การทดลองที่ 5 : ประยุกต์ใช้กระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันกับน้ำบาดาลจริง.....	162
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	176
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	176
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	178
รายการอ้างอิง .....	179
ภาคผนวก.....	185
ภาคผนวก ก : เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ กราฟมาตรฐานของซัลเฟต และกราฟมาตรฐานของอลูมิเนียม.....	186
ภาคผนวก ข : อุปกรณ์จับยึดเมมเบรน (Test cell).....	190
ภาคผนวก ค : คุณภาพน้ำบาดาลจริงของโรงงานผลิตเอทานอล.....	191
ภาคผนวก ง คุณภาพน้ำบาดาลสังเคราะห์.....	192
ภาคผนวก จ : ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง แคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟต และคุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาว.....	195



ภาคผนวก ฉ : ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง แคลเซียม แมกนีเซียม และซิลิกา และ คุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมโคแอกกูแลนต์ .....	200
ภาคผนวก ช : ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง แคลเซียม แมกนีเซียม และซิลิกา และ คุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาวที่ปริมาณ 360 มก./ล. ร่วมกับโคแอกกูแลนต์.....	208
ภาคผนวก ซ : ราคาสารเคมี.....	216
ภาคผนวก ฅ : ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา ที่ ความดันผ่านเมมเบรนต่าง ๆ ของน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันทั้ง 3 ประเภท.....	218
ภาคผนวก ฎ : ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา และ ประสิทธิภาพการกำจัด TDS ค่า $J/J_0$ ค่า $J/J_0$ (กรณี $R_f=0$ ) ที่อัตราการนำน้ำกลับคืนต่าง ๆ ของน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันทั้ง 3 ประเภท.....	223
ภาคผนวก ฏ : SEM-EDX ผิวหน้าของแผ่นนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่ไม่ผ่านการใช้งานและที่ ผ่านการใช้งานกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ทั้ง 3 ประเภท.....	229
ภาคผนวก ฐ : มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการ.....	237
ภาคผนวก ฑ : มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำ ชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน .....	239
ภาคผนวก ฒ : SEM-EDX ผิวหน้าของแผ่นนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานกับน้ำ บาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี และผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACL.....	241
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	245

**สารบัญตาราง**

ตารางที่ 2.1 การจัดประเภทของหม้อไอน้ำตามความดันที่ใช้ในการดำเนินการ ..... 5

ตารางที่ 2.2 น้ำในระบบหม้อไอน้ำ..... 6

ตารางที่ 2.3 คุณภาพน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันต่ำ-ปานกลาง ตามมาตรฐาน Indian Standard (IS)..... 8

ตารางที่ 2.4 คุณภาพน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูง ตามมาตรฐาน Indian Standard (IS)..... 9

ตารางที่ 2.5 น้ำในระบบน้ำหล่อเย็น..... 11

ตารางที่ 2.6 มาตรฐานน้ำทดแทนและน้ำหล่อเย็นในกระบวนการหล่อเย็นแบบระบบเปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับที่กำหนดขึ้นโดย The Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association Microbial (JRA)..... 12

ตารางที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของรอบการใช้น้ำและเปอร์เซ็นต์น้ำทดแทนที่ลดได้ ..... 13

ตารางที่ 2.8 ค่าคงที่ผลคูณในการละลาย ( $K_{sp}$ ) ของสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียม ..... 16

ตารางที่ 2.9 รูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียม..... 24

ตารางที่ 2.10 รูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียมของสารส้มและ PACl ..... 25

ตารางที่ 2.11 อัตราการไหลและความดันที่สัมพันธ์กับชนิดของเมมเบรนแบบต่าง ๆ ..... 32

ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนทางพาณิชย์ สำหรับบำบัดน้ำ..... 38

ตารางที่ 2.13 ค่าความขรุขระของเมมเบรนทางการค้าทั่วไป ที่ทดสอบกับพื้นที่ 5x5 ไมโครตารางเมตร..... 42

ตารางที่ 2.14 ประเภทของการอุดตันและชนิดของสารอุดตัน ..... 46

ตารางที่ 3.1 น้ำดิบและน้ำเข้ารีเวอร์สออสโมซิสของกระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำหล่อเย็นและน้ำในหม้อไอน้ำของโรงงานผลิตเอทานอลแห่งหนึ่งใน จ.ขอนแก่น ..... 61

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่จะทำการวิเคราะห์ในงานวิจัย..... 62

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์และสารเคมีที่ใช้สังเคราะห์น้ำบาดาลสำหรับการทดลอง ..... 63

ตารางที่ 3.4 แสดงลักษณะทางกายภาพและเคมีของเมมเบรน DK ของบริษัท GE water and process technologies จำกัด ..... 64

ตารางที่ 3.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์ยัดจับเมมเบรน (Test cell) ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech.....	66
ตารางที่ 3.6 ชุดทดสอบที่ใช้ในการทดลองกระบวนการนาโนฟิลเตชัน.....	68
ตารางที่ 4.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับระบบหล่อเย็นตาม The Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association Microbial (JRA) และคุณภาพน้ำบาดาลจริง ก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของโรงงานผลิตเอทานอล.....	76
ตารางที่ 4.2 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำบาดาล .....	78
ตารางที่ 4.3 คุณภาพน้ำบาดาลสังเคราะห์ .....	78
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการหาสภาวะการผันกวนเร็ว-กวนช้าที่เหมาะสม.....	80
ตารางที่ 4.5 เกณฑ์การออกแบบกระบวนการบำบัดน้ำ (S. Kawamura, 2000).....	81
ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซัลเฟตด้วยปูนขาวที่ปริมาณต่าง ๆ.....	83
ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	87
ตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นของ $\text{HCO}_3^-$ , $\text{CO}_3^{2-}$ และ $\text{OH}^-$ จากค่าสภาพต่างพี (P Alkalinity) สภาพต่างเอ็ม (M Alkalinity).....	88
ตารางที่ 4.9 ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณของปูนขาว 250, 300, 350, 360 และ 500 มก./ล. ....	90
ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซัลเฟตด้วยสารส้มที่ปริมาณต่าง ๆ.....	94
ตารางที่ 4.11 ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณของสารส้ม $10^{-7}$ , $10^{-6}$ , $10^{-5}$ , $10^{-4}$ และ $10^{-3}$ โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม.....	95
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองของการเติม PACl ที่ปริมาณต่าง ๆ .....	98
ตารางที่ 4.13 ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณของ PACl $10^{-7}$ , $10^{-6}$ , $10^{-5}$ , $10^{-4}$ , $10^{-3}$ และ $10^{-2}$ โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม .....	99
ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองของการเติมปูนขาว 360 มก./ล. และสารส้มที่ปริมาณต่าง ๆ .....	104
ตารางที่ 4.15 ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณของสารส้ม $10^{-7}$ , $10^{-6}$ , $10^{-5}$ , $10^{-4}$ , $10^{-3}$ และ $10^{-2}$ โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม หลังเติมปูนขาวที่ 360 มก./ล.....	107
ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองของการเติมปูนขาว 360 มก./ล. และ PACl ที่ปริมาณต่าง ๆ .....	111

ตารางที่ 4.17	ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณของ PACl $10^{-7}$ , $10^{-6}$ , $10^{-5}$ , $10^{-4}$ , $10^{-3}$ และ $10^{-2}$ โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม หลังเติมปูนขาวที่ 360 มก./ล. ....	114
ตารางที่ 4.18	ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา ปริมาณสารเคมี และราคาสารเคมี ของน้ำที่ผ่านสารเคมีแต่ละชนิด .....	117
ตารางที่ 4.19	ค่าใช้จ่ายสารเคมีต่าง ๆ .....	117
ตารางที่ 4.20	ความหมายของค่า SDI <sub>15</sub> สำหรับนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน (NF) และรีเวอร์ออสโมซิส (RO) .....	118
ตารางที่ 4.21	ค่า SDI <sub>15</sub> ที่แนะนำก่อนเข้านาโนฟิลเตรชันเมมเบรน (NF) และรีเวอร์ออสโมซิส (RO) .....	119
ตารางที่ 4.22	ค่า SDI <sub>15</sub> ของน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีแต่ละกระบวนการ .....	120
ตารางที่ 4.23	ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา ที่ความดันผ่านเมมเบรนต่าง ๆ ของน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันทั้ง 3 ประเภท .....	121
ตารางที่ 4.24	สมการความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำสะอาดกับ TMP ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันของน้ำทั้ง 3 ประเภท .....	124
ตารางที่ 4.25	ค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตันของเมมเบรน (Fouling Resistane, R <sub>f</sub> ) ของน้ำแต่ละประเภทที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 10-80 เปอร์เซ็นต์ .....	128
ตารางที่ 4.26	องค์ประกอบธาตุบนนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำทั้ง 3 ประเภท .....	137
ตารางที่ 4.27	มาตรฐานคุณภาพน้ำทดแทนของน้ำหล่อเย็นและน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูง คุณภาพน้ำบาดาลสังเคราะห์ กับคุณภาพน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการบำบัดต่าง ๆ .....	144
ตารางที่ 4.28	ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา ปริมาณสารเคมี ราคาสารเคมี และรอบการใช้น้ำของน้ำทดแทนสำหรับใช้ในระบบหล่อเย็นของกระบวนการต่าง ๆ .....	147
ตารางที่ 4.29	ความเข้มข้นของตะกอนที่ได้รับแต่ละวิธี .....	153
ตารางที่ 4.30	น้ำเข้มข้น (Concentrate) ที่อัตราการนำน้ำกลับคืนของกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl - นาโนฟิลเตรชัน .....	155
ตารางที่ 4.31	คุณภาพน้ำเพื่อการเกษตรกรรม ตามระบบของสหรัฐอเมริกา (USSL,1954) .....	157

**ตารางที่ 4.32** ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการบำบัดน้ำบาดาลเพื่อใช้ใน  
ภาคอุตสาหกรรม..... 159

**ตารางที่ 4.33** คุณภาพน้ำบาดาลสังเคราะห์และน้ำบาดาลจริง..... 163

**ตารางที่ 4.34** ประสิทธิภาพและปริมาณความกระด้างและซิลิกาที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการ  
ต่าง ๆ..... 166

**ตารางที่ 4.35** องค์ประกอบธาตุนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80  
เปอร์เซ็นต์ ของน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี และน้ำบาดาลจริงที่ผ่านการเติมปูนขาว  
ร่วมกับ PACL..... 169

**ตารางที่ 4.36** ความเข้มข้นของน้ำเข้า (Feed) น้ำสะอาด (Permeate) และน้ำเข้มข้น  
(Concentrate) และปริมาณน้ำของการต่อระบบนาโนฟิลเตรชันแบบ Two stage NF with 2:1  
arrays..... 175



## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 สมดุลน้ำในระบบของหม้อไอน้ำ.....	7
รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของหอหล่อเย็น.....	10
รูปที่ 2.3 ปริมาณของ $H_2CO_3$ $HCO_3^-$ $CO_3^{2-}$ $H^+$ $OH^-$ ที่ระดับค่าพีเอชต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	19
รูปที่ 2.4 การแตกตัวของซิลิกาที่มีความเข้มข้น 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับค่าพีเอชต่าง ๆ.....	21
รูปที่ 2.5 โพลีเมอไรเซชันของ Monosilicic acid .....	22
รูปที่ 2.6 กลไกของกระบวนการโคแอกกูเลชันที่ใช้สารส้มและ PACl เป็นโคแอกกูแลนต์ .....	26
รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม .....	27
รูปที่ 2.8 เขตของการเกิดกลไกในกระบวนการโคแอกกูเลชันที่ปริมาณโคแอกกูแลนต์และระดับค่า พีเอชต่าง ๆ ของสารส้ม และ PACl ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส.....	28
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นที่เหลือในน้ำกับปริมาณสารส้มและ PACl ที่ความเข้มข้นของ อนุภาคซิลิกาเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร และค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 6.5.....	29
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นที่เหลือในน้ำกับปริมาณสารส้มและ PACl ที่ความเข้มข้นของ อนุภาคซิลิกาเริ่มต้นเท่ากับ 5 กรัมต่อลิตร และค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 6.5 .....	30
รูปที่ 2.11 แผนภูมิความสามารถในการละลาย (Solubility diagram) ของอลูมินัม ที่อุณหภูมิ 25 ที่ความเข้มข้นของซิลิกามีค่า 40 มก./ล. (เส้นประสีเขียว) และที่ความเข้มข้นของซิลิกามีค่า 80 มก./ล. (เส้นสีเขียว) .....	31
รูปที่ 2.12 ความสามารถในการแยกของกระบวนการเมมเบรนแต่ละชนิด ๆ .....	32
รูปที่ 2.13 กลไกการเคลื่อนที่ของไอออนหรือตัวถูกละลายโดยแบบจำลองของ Nernst-Planck (Nernst-Planck Model) .....	37
รูปที่ 2.14 ค่ามุมสัมผัสของเมมเบรนแต่ละประเภท แบ่งตามวัสดุที่ใช้ผลิตเมมเบรน .....	39
รูปที่ 2.15 ประจุของกรดอินทรีย์ที่จุดต่ำกว่าและสูงกว่าจุดไอโซอิเล็กทริก.....	40
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดของกรดอินทรีย์กับค่าพีเอช ในกระบวนการกรองด้วย NF270.....	41

รูปที่ 2.17	เปอร์เซ็นต์การกำจัดอื้ออนและฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ระดับความดันของระบบต่าง ๆ ในกระบวนการบำบัดน้ำบาดาล.....	43
รูปที่ 2.18	ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน .....	47
รูปที่ 3.1	แนวคิดโดยรวมของกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันเพื่อใช้กระบวนการบำบัดขั้นต้น.....	56
รูปที่ 3.2	แนวทางการคัดเลือกกระบวนการบำบัดขั้นต้นที่ดีที่สุดสำหรับใช้ในระบบผลิตน้ำทดแทน .....	58
รูปที่ 3.3	แสดงกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลของโรงงานผลิตเอทานอล .....	60
รูปที่ 3.4	ชุดอุปกรณ์หาค่าดัชนีความหนาแน่นตะกอน (Slit Density Index, SDI).....	64
รูปที่ 3.5	นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนรุ่น DK ลักษณะเป็นแผ่นขนาด 42 ตร.ซม. ....	65
รูปที่ 3.6	Test cell ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech .....	66
รูปที่ 3.7	แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ของชุดทดสอบที่ใช้ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน.....	69
รูปที่ 3.8	ลำดับการทดลองกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันทั้ง 5 ช่วง .....	70
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา ปริมาณค่าความเป็นต่างของ 2P-M และค่าพีเอช ที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ .....	85
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา และค่าพีเอช ที่ปริมาณสารส้ม และ PACl ต่าง ๆ .....	101
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา ความเป็นต่างของ 2P-M และค่าพีเอช ที่ปริมาณสารส้มต่าง ๆ หลังเติมปูนขาวที่ 360 มก./ล. ....	106
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา ปริมาณค่าความเป็นต่างของ 2P-M และค่าพีเอช ที่ปริมาณ PACl ต่าง ๆ หลังเติมปูนขาวที่ 360 มก./ล.....	112
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันผ่านเมมเบรนกับค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา.....	124
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $J/J_0$ กับอัตราการนำน้ำกลับคืน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา ของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี.....	129

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $J/J_0$ กับอัตราการนำน้ำกลับคืน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา ของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว .....	130
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $J/J_0$ กับอัตราการนำน้ำกลับคืน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา ของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl .....	132
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $J/J_0$ กับอัตราการนำน้ำกลับคืน เปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา และ % NPF ที่ลดลง ของน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันทั้ง 3 ประเภท .....	133
รูปที่ 4.10 ภาพ SEM ของเมมเบรนสะอาด (New membrane) ที่กำลังขยาย (ก) 500 และ (ข) 5,000 .....	136
รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ของเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี ที่กำลังขยาย (ก) 500 และ (ข) 5,000 .....	136
รูปที่ 4.12 ภาพ SEM ของเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว ที่กำลังขยาย (ก) 500 และ (ข) 5,000 .....	138
รูปที่ 4.13 ภาพ SEM ของเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl ที่กำลังขยาย (ก) 500 และ (ข) 5,000 .....	140
รูปที่ 4.14 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา และรอบการใช้น้ำของน้ำทดแทนสำหรับใช้ในระบบหล่อเย็นของแต่ละกระบวนการ .....	150
รูปที่ 4.15 ระบบโดยรวมของกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน .....	151
รูปที่ 4.16 ตะกอนเคมีจากกระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวและ PACl หลังจากนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C .....	152
รูปที่ 4.17 สถานีสูบน้ำและบำบัดน้ำบาดาลของโรงงานผลิตพลาสติกแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม	162
รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ของเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี ที่กำลังขยาย (ก) 500 และ (ข) 5,000 .....	169
รูปที่ 4.19 ภาพ SEM ของเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลจริงที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl ที่กำลังขยาย (ก) 500 และ (ข) 5,000 .....	171
รูปที่ 4.20 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl-นาโนฟิลเตรชัน .....	172



- รูปที่ 4.21 สมุดน้ำของระบบนาโนฟิลเตรชันเป็นแบบ Single stage NF..... 174
- รูปที่ 4.22 สมุดน้ำของระบบนาโนฟิลเตรชันเป็นแบบ Two stage NF with 2:1 arrays..... 174



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

น้ำบาดาลถูกใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคบริโภค การเกษตร และภาคอุตสาหกรรม สำหรับการนำน้ำบาดาลมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม ปัญหาหนึ่งที่มีักพบในการนำน้ำบาดาลมาใช้เป็นน้ำทดแทนระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำ คือ ความกระด้างของน้ำ (Water Hardness) ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดตะกรันในระบบท่อ ในระบบหล่อเย็น และในระบบหม้อไอน้ำ ตะกรันที่เกิดขึ้นจะเป็นฉนวนขัดขวางการถ่ายเทความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลดลง สิ้นเปลืองพลังงาน โดยเฉพาะการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำอาจเป็นสาเหตุของการระเบิดในหม้อไอน้ำได้ ทั้งนี้ ตะกรันที่พบในระบบมักเป็นสารประกอบของแคลเซียมและแมกนีเซียมจากความกระด้างของน้ำ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมซัลเฟต แคลเซียมซิลิเกต และแมกนีเซียมซิลิเกต เป็นต้น เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดความกระด้าง ออกจากน้ำบาดาลก่อนจะนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำทดแทน (Makeup Water) สำหรับระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำ

ระบบกำจัดความกระด้างในปัจจุบันที่นิยมใช้ ได้แก่ กระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนโซดา โดยการเติมปูนขาวและโซดาแอช วิธีการนี้มีราคาถูกและง่ายต่อการดำเนินการ แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถกำจัดความกระด้างออกได้หมด เนื่องจากตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) มีความสามารถในการละลายน้ำได้ตามธรรมชาติ จึงมีความกระด้างตกค้างในน้ำประมาณ 60-70 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเทอมของหินปูน ( $\text{mg/L as CaCO}_3$ ) ทั้งนี้ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) สามารถกำจัดความกระด้างได้เช่นกันโดยมีความกระด้างตกค้างในน้ำน้อยกว่ากระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูน-โซดา แต่มีข้อจำกัดคือ ก่อให้เกิดของเสียจากการใช้สารเคมีเพื่อทำความสะอาดระบบ ทั้งในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) การล้างย้อน (Backwash) และการชะล้างสารเคมี (Rinse) ซึ่งมีปริมาณมากและไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ อีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการกำจัดความกระด้าง คือ กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) โดยการใช้แรงดันให้น้ำผ่านเยื่อเมมเบรนที่มีความสามารถในการกรองไอออนและโมเลกุล

ของสารละลายที่อยู่ในน้ำได้ ทำให้ได้น้ำที่มีความบริสุทธิ์มาก แต่มีข้อจำกัด คือ เกิดการอุดตันของเมมเบรน (Fouling) บ่อยครั้ง มีอัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) ต่ำ สิ้นเปลืองพลังงานเพราะต้องใช้แรงดันในการเดินระบบที่สูงมาก เมื่อเทียบกับเมมเบรนชนิดอื่น ๆ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมีราคาสูง

ทั้งนี้ มาตรฐานความกระด้างของน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำมีค่าแตกต่างกัน โดยมาตรฐานความกระด้างของน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นมีค่าไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเทอมของหินปูน (คุณภาพน้ำทดแทนของน้ำหล่อเย็นที่กำหนดขึ้นโดย Japanese Refrigeration Association) ขณะที่มาตรฐานความกระด้างของน้ำทดแทนสำหรับหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันต่ำ-ปานกลาง และหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูง มีค่าน้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเทอมของหินปูน และมีค่า 0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเทอมของหินปูน ตามลำดับ (คุณภาพน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำตามมาตรฐาน Indian Standard) ดังนั้น การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสไปใช้เป็นน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นอาจเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน เนื่องจากการกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสใช้แรงดันในการเดินระบบที่สูงตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันซึ่งสามารถกำจัดความกระด้าง ( $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$ ) ในน้ำได้ จึงน่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างออกจากน้ำเกือบเท่ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส โดยใช้ความดันในการเดินระบบที่ต่ำกว่า (ความดันเดินระบบของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและรีเวอร์สออสโมซิสเท่ากับ 5 - 20 บาร์ และ 50 - 100 บาร์ ตามลำดับ) ซึ่งหากคุณภาพของน้ำหลังผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีคุณภาพเพียงพอสำหรับใช้เป็นน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำส่วนนี้ลดลงจากการผลิตน้ำทดแทนด้วยกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส อย่างไรก็ตาม กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสยังคงจำเป็นสำหรับการผลิตน้ำทดแทนสำหรับหม้อไอน้ำ เนื่องจากกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสสามารถกำจัดไอออนเดี่ยว (Monovalent ion) ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ในน้ำมีค่าต่ำ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับมาตรฐานน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ

ดังนั้น ในการผลิตน้ำทดแทน (Makeup Water) สำหรับระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำจากน้ำบาดาล ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเสนอกระบวนการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) ก่อนกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส เพื่อลดภาระการกรอง (Loading) ของเมมเบรนรีเวอร์สออสโมซิส แก้ไขปัญหาการอุดตันของเมมเบรน สามารถเดินระบบได้นานขึ้น และลดค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำทดแทนสำหรับน้ำหล่อ

เย็น สำหรับกระบวนการขั้นต้นที่เลือกใช้ ได้แก่ กระบวนการทางเคมี (Chemical treatment process) และกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) โดยมีวัตถุประสงค์ในการกำจัดความกระด้างซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดตะกอนในระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างของน้ำบาดาลด้วยกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน (Chemical treatment process - Nanofiltration) สำหรับใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ในระบบผลิตน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำจากน้ำบาดาล โดยเปรียบเทียบคุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันกับคุณภาพน้ำก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของระบบผลิตน้ำทดแทนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันของสถานประกอบการที่สนับสนุนข้อมูลในการวิจัย

1.2.2 เพื่อศึกษาชนิดของสารเคมี ปริมาณสารเคมี และสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดความกระด้างของน้ำบาดาลด้วยกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบการเกิดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนในระบบกำจัดความกระด้างของน้ำบาดาล ระหว่าง กระบวนการนาโนฟิลเตรชันเพียงอย่างเดียว และกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน

1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบปริมาณของเสียระหว่างระบบผลิตน้ำทดแทนของกระบวนการผสมผสาน กับระบบผลิตน้ำทดแทนของสถานประกอบการที่สนับสนุนข้อมูลในการวิจัย

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้ทำการทดสอบกับน้ำบาดาลสังเคราะห์จากลักษณะของน้ำบาดาลจริงที่ใช้ในการผลิตน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำของโรงงานผลิตเอทานอลแห่งหนึ่งในจ.ขอนแก่น โดยมีพารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ ความกระด้างทั้งหมด ปริมาณแคลเซียม ปริมาณแมกนีเซียม ค่าความเป็นด่าง ปริมาณซิลิกา และค่าพีเอชของน้ำ

1.3.2 งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการทางเคมีและนาโนฟิลเตรชัน สำหรับใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสในระบบกำจัดความกระด้างของน้ำบาดาล

1.3.3 ทำการทดลองกระบวนการทางเคมีและนาโนฟิลเตรชันในระดับห้องปฏิบัติการแบบทีละเท (Batch Lab-Scale) ที่อุณหภูมิตั้งที่ ๓๐ องศาเซลเซียส ห้องปฏิบัติการ ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.4 พารามิเตอร์ที่สนใจในกระบวนการทางเคมี ได้แก่ ปริมาณปูนขาว ชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม เพื่อให้คุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีมีความกระด้าง ปริมาณซิลิกา และสารเคมีตกค้างในน้ำต่ำที่สุด

1.3.5 ปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการทดลองครอบคลุมการเติมปริมาณปูนขาวที่น้อยเกินไปในการกำจัด ความกระด้างจนถึงการเติมปริมาณปูนขาวที่มากเกินไป

1.3.6 โคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ สารส้ม (Alum) และ โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminium Chloride, PACl) โดยโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดทดลองที่ปริมาณโคแอกกูแลนต์ 5 ค่า ได้แก่  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม (mol Al/L)

1.3.7 เมมเบรนที่ใช้ในการทดลองกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน มีลักษณะเป็นแผ่น (Flat-Sheet) โดยมี Test cell เป็นอุปกรณ์ร่วมสำหรับยึดเมมเบรน และมีลักษณะการเดินระบบของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเป็นแบบไหลตามขวาง (Crossflow filtration)

1.3.8 ความดันที่ใช้ในการเดินระบบของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันจะทำการศึกษาค่าความดันที่ช่วง 4 ถึง 15 บาร์

1.3.9 เดินระบบของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันแบบต่อเนื่อง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและการเกิดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน (Fouling) ของน้ำขาเข้า (Feed water) 3 ประเภท ได้แก่ น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว และน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับโคแอกกูแลนต์

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หม้อไอน้ำ (Steam Boiler)

หม้อไอน้ำเป็นเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ชนิดภาชนะปิดที่ใช้ในการผลิตไอน้ำโดยการถ่ายเทความร้อนซึ่งได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงให้แก่น้ำจนกระทั่งน้ำกลายเป็นไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อนำไอน้ำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม (ประสิทธิ์ เกี้ยวสุนทร, 2555) สามารถแบ่งประเภทของหม้อไอน้ำตามความดันที่ใช้ในการดำเนินการของหม้อไอน้ำ เป็น 3 ประเภท ได้แก่ หม้อไอน้ำที่ใช้ความดันต่ำ (Low Pressure Boilers) หม้อไอน้ำที่ใช้ความดันปานกลาง (Medium Pressure Boilers) และหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูง (High Pressure Boilers) นอกจากนี้สามารถแบ่งประเภทของหม้อไอน้ำตามการออกแบบ เป็น 2 ประเภท ได้แก่ หม้อไอน้ำแบบหลอดไฟ (Fire Tube Boilers) และหม้อไอน้ำแบบหลอดน้ำ (Water Tube Boilers) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจัดประเภทของหม้อไอน้ำตามความดันที่ใช้ในการดำเนินการ

ประเภทของหม้อไอน้ำ	ความดันที่ใช้ในการดำเนินการ ( $\text{kg/cm}^2$ )		
	ความดันต่ำ	ความดันปานกลาง	ความดันสูง
ช่วงความดัน (Pressure Range)	0-1.0	1.0-24.5	มากกว่า 24.5
ประเภทของหม้อไอน้ำตามการออกแบบ	แบบหลอดไฟ	แบบหลอดไฟ	แบบหลอดน้ำ
		แบบหลอดน้ำ	

ที่มา: (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และคณะ, 2554)

น้ำในระบบหม้อไอน้ำมี 6 ประเภท ดังตารางที่ 2.2 โดยมีสมมูลน้ำในระบบของหม้อไอน้ำ ดังรูปที่ 2.1 ในการทำงานของหม้อไอน้ำจะมีสูญเสียน้ำจากการระเหยเป็นไอ (Steam) ทำให้น้ำในหม้อไอน้ำ (Boiler Water) มีความเข้มข้นของอ็อกซิเจนต่าง ๆ สูงขึ้น ซึ่งเอื้อต่อการตกผลึกและการสร้าง

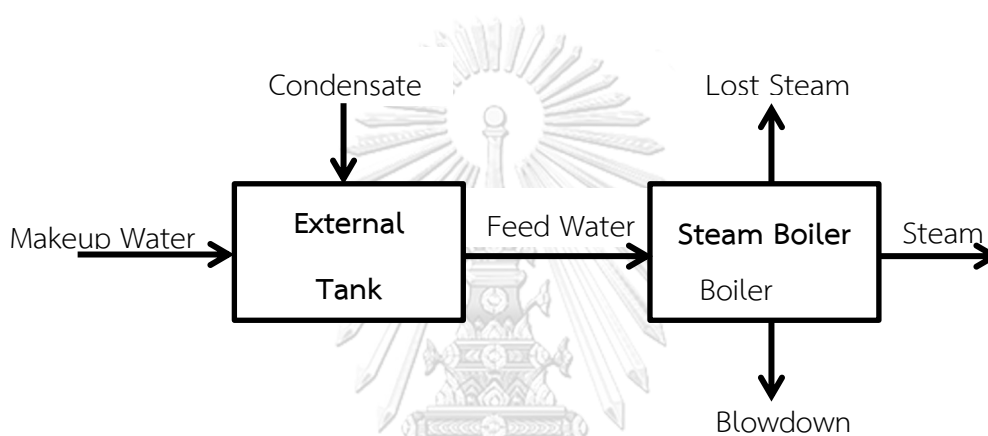
ตะกรัน เช่น ตะกรันของสารประกอบซิลิเกต ตะกรันของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมซัลเฟต และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ตะกรันเหล่านี้จะขัดขวางการถ่ายเทความร้อน จึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มความร้อนสูงขึ้นเพื่อให้น้ำเดือดกลายเป็นไอ ทำให้ผนังของหม้อไอน้ำได้รับความร้อนสูงเกินขีดจำกัดที่โลหะทนได้ ผนังหม้อไอน้ำจะขยายตัวและเกิดการระเบิดขึ้น จึงต้องมีการระบายน้ำโบลดาวน์ (Blowdown) เพื่อควบคุมความเข้มข้นของอ็อกไซด์ต่าง ๆ ของน้ำในหม้อไอน้ำให้มีค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน ทั้งนี้ การระเหยของน้ำกลายเป็นไอและการโบลดาวน์ ส่งผลให้ปริมาณน้ำในหม้อไอน้ำลดลง จึงต้องมีการเติมน้ำเลี้ยง (Feed Water) เพื่อทดแทนน้ำที่สูญเสียไป

ตารางที่ 2.2 น้ำในระบบหม้อไอน้ำ

น้ำในระบบหม้อไอน้ำ	รายละเอียด
น้ำทดแทน (Makeup Water)	น้ำที่ใช้ส่งเข้าระบบหม้อไอน้ำเพื่อทดแทนน้ำที่กลายเป็นไอและน้ำโบลดาวน์ ซึ่งน้ำผิวดินหรือน้ำบาดาลหรือน้ำประปาอาจนำมาใช้เป็นน้ำทดแทนได้ หากมีคุณภาพไม่เหมาะสมที่จะส่งเข้าหม้อไอน้ำ จะต้องมีการบำบัดน้ำก่อน
น้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ (Feed Water)	น้ำทดแทนที่บำบัดแล้วและพร้อมที่จะส่งเข้าหม้อไอน้ำ น้ำคอนเดนเสทอาจถูกนำมาผสมกับน้ำทดแทนและใช้เป็นน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ
น้ำหม้อไอน้ำ (Boiler Water)	น้ำร้อนที่อยู่ในหม้อไอน้ำ เกิดขึ้นจากการต้มน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำให้ร้อนจนกลายเป็นไอ น้ำหม้อไอน้ำจะมีคุณภาพต่ำเนื่องจากน้ำบางส่วนระเหยกลายเป็นไอ ทำให้มีการสะสมของแข็งละลาย
น้ำโบลดาวน์ (Blowdown)	น้ำหม้อไอน้ำที่ถูกระบายทิ้งเพื่อควบคุมความเข้มข้นของน้ำหม้อไอน้ำให้อยู่ในระดับสูงสุดที่ยอมรับได้
ไอน้ำ (Steam)	ไอน้ำเกิดจากการต้มน้ำเลี้ยงให้กลายเป็นไอกายใต้แรงดันที่สูงกว่าแรงดันบรรยากาศ ไอน้ำถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ เช่น ให้ความร้อน หรือใช้เป็นพลังงาน

น้ำในระบบหม้อไอน้ำ	รายละเอียด
น้ำควบแน่น (Condensate)	ไอน้ำที่ถูกใช้ประโยชน์แล้วทำให้เย็นเพื่อให้ควบแน่นเป็นน้ำร้อนซึ่งอาจถูกระบายทิ้งเป็นน้ำเสียหรือถูกนำมาใช้ใหม่เป็นน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ

ที่มา: (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และคณะ, 2554)



รูปที่ 2.1 สมดุลน้ำในระบบของหม้อไอน้ำ

สำหรับระบบหม้อไอน้ำที่ไม่มีการนำน้ำควบแน่น (Condensate) กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ น้ำเลี้ยงและน้ำทดแทนจะเป็นน้ำตัวเดียวกัน สำหรับคุณภาพน้ำทดแทนไม่ได้มีกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำไว้ น้ำทดแทนอาจเป็นน้ำบาดาลหรือน้ำผิวดิน แต่โดยปกติแล้วจำเป็นต้องมีการปรับแต่งสภาพน้ำเหล่านั้นก่อนใช้เป็นน้ำเลี้ยงในหม้อไอน้ำ ซึ่งมาตรฐานคุณภาพน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำจะแตกต่างกันไปตามประเภทของหม้อไอน้ำและความดันที่ใช้ในการดำเนินการ สำหรับตามมาตรฐานคุณภาพน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ (Boiler feed water) ของหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันต่ำ-ปานกลาง (Low and Medium Pressure Boilers) และหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูง (High Pressure Boilers) ตามมาตรฐาน Indian Standard (IS) ดังตารางที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ จากมาตรฐานคุณภาพน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำพบว่า หม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูงต้องการน้ำเลี้ยงที่มีคุณภาพดีกว่าหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันต่ำ เช่น ค่าความกระด้างและปริมาณซิลิกา เนื่องจากหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูงจะเสี่ยงต่อการระเบิดของหม้อไอน้ำและปัญหา



อื่น ๆ มากกว่าหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันต่ำ ดังนั้นระบบบำบัดน้ำทดแทนสำหรับหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูงควรเป็นแบบที่ใช้ผลิตน้ำบริสุทธิ์ เช่น กระบวนการ RO หรือกระบวนการ RO - Mixed Bed เป็นต้น

**ตารางที่ 2.3** คุณภาพน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันต่ำ-ปานกลาง ตามมาตรฐาน Indian Standard (IS)

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 2.4 คุณภาพน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูง ตามมาตรฐาน Indian Standard (IS)

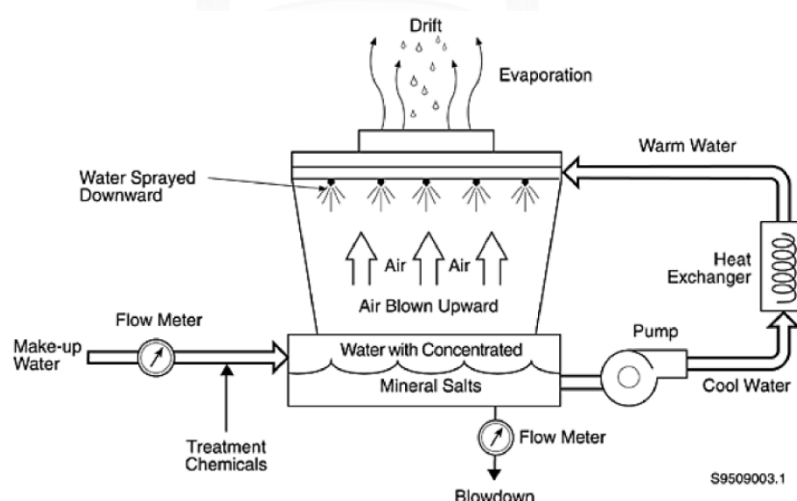
พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเกณฑ์ควบคุมตามความดัน ที่ใช้ในการดำเนินการ (บาร์)			
		ความดัน 60-78	ความดัน 79-98	ความดัน 99-118	ความดัน > 118
ค่าพีเอช (pH)	-	8.5-9.5	8.5-9.5	8.5-9.5	8.5-9.5
ค่าความกระด้าง	มก./ล. ในเทอม ของหินปูน	Nil	Nil	Nil	Nil
ซิลิกา (Silica)	มก./ล.	0.05	0.02	0.02	0.02
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่ 25 °C	ไมโครซีเมนต์/ ซม.	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)

## 2.2 ระบบหล่อเย็น (Cooling System)

ระบบน้ำหล่อเย็น น้ำถูกใช้เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เพื่อระบายความร้อนจากเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม เรียกน้ำที่เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนว่า “น้ำหล่อเย็น (Cooling Water)” ซึ่งน้ำเป็นตัวกลางที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูกกว่าตัวกลางชนิดอื่น และมีค่าความจุความร้อนสูง โดยมีค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอเท่ากับ 2,431 กิโลจูลต่อกิโลกรัม หรือ 1,000 บีทียูต่อปอนด์ (เอกลิชชัน เซ็มเพอร์, 2556)

ในระบบหล่อเย็นที่มีการหมุนเวียนน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่เพื่อประหยัดน้ำ จะต้องมีหอหล่อเย็น (Cooling Tower) เพื่อระบายความร้อนให้กับน้ำหล่อเย็นที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการกลายเป็นไอ (Evaporation) ดังรูปที่ 2.2 โดยน้ำในระบบน้ำหล่อเย็นมี 5 ประเภท ดังตารางที่ 2.5 ทั้งนี้ ระบบหล่อเย็นจะมีการสูญเสียน้ำจากการกลายเป็นไอ (Evaporation) และน้ำบางส่วนถูกลมพัดไป (Windage หรือ Drift Off) ทำให้น้ำหล่อเย็น (Cooling Water) มีความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ สูงขึ้น ซึ่งเอื้อต่อการเกิดตะกอน ส่งผลให้เกิดการอุดตันในท่อน้ำ อุปกรณ์ในระบบเสียหาย และลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน จึงต้องมีระบบน้ำโบลดาวน์ (Blowdown) เพื่อควบคุมความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ ของน้ำหล่อเย็นไม่ให้มีค่าสูงเกินไป จากการสูญเสียน้ำดังกล่าว จึงต้องมีการเติมน้ำทดแทน (Makeup Water) เพื่อทดแทนน้ำที่สูญเสียไป



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของหอหล่อเย็น

ตารางที่ 2.5 น้ำในระบบน้ำหล่อเย็น

น้ำในระบบหม้อไอน้ำ	รายละเอียด
น้ำทดแทน (Makeup Water)	น้ำที่เติมให้กับหอหล่อเย็นเพื่อทดแทนให้กับปริมาณน้ำที่สูญเสีย อัตราการเติมน้ำทดแทนประมาณ 6 - 10% ของอัตราหมุนเวียนของน้ำหล่อเย็น
น้ำหล่อเย็น (Cooling Water)	น้ำที่หมุนเวียนอยู่ในระบบที่ใช้ในการระบายความร้อน
น้ำโบลดาวน์ (Blowdown)	น้ำหล่อเย็นที่ถูกระบายทิ้งเพื่อควบคุมความเข้มข้นของน้ำหล่อเย็นไม่ให้มีค่าสูงเกินไป
น้ำระเหย (Evaporation)	น้ำหล่อเย็นที่ระเหยกลายเป็นไอออกจากหอหล่อเย็น ปริมาณน้ำระเหยมีค่าประมาณ 0.85 - 1% ของอัตราน้ำหล่อเย็นต่อทุก ๆ 10 องศาเซลเซียสของอุณหภูมิที่เย็นลง
ละอองน้ำ (Windage หรือ Drift Off)	น้ำหล่อเย็นที่ถูกกระแสนลมพัดออกจากหอหล่อเย็นกลายเป็นละอองน้ำ

ที่มา: (มันสิน ตันฑุลเวศม์ และคณะ, 2554)

ในปัจจุบันไม่มีมาตรฐานสากลสำหรับคุณภาพน้ำทดแทนและน้ำหล่อเย็นที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป อย่างไรก็ตามมาตรฐานกำหนดค่าน้ำทดแทนและน้ำหล่อเย็นของระบบหล่อเย็นที่มียังมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละมาตรฐาน ตัวอย่างของมาตรฐานที่มี เช่น มาตรฐานน้ำทดแทนและน้ำหล่อเย็นในกระบวนการหล่อเย็นแบบระบบเปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับที่กำหนดขึ้นโดย The Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association Microbial (JRA) ดังตารางที่ 2.6

**ตารางที่ 2.6** มาตรฐานน้ำทดแทนและน้ำหล่อเย็นในกระบวนการหล่อเย็นแบบระบบเปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับที่กำหนดขึ้นโดย The Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association Microbial (JRA)

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำทดแทน (Makeup Water)	น้ำที่ผ่านการใช้ หล่อเย็น (Cooling Water)
<b>Basic Items</b>			
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
<b>Reference Items</b>			
เหล็ก	มก./ล.	น้อยกว่า 0.3	น้อยกว่า 1.0
ซิลไฟด์	มก./ล.	วัดไม่พบ	วัดไม่พบ
แอมโมเนียม	มก./ล.	น้อยกว่า 0.2	น้อยกว่า 1.0
ซิลิกา	มก./ล.	น้อยกว่า 30	น้อยกว่า 50

### 2.2.1 รอบการใช้น้ำหรือวัฏจักรความเข้มข้น (Cycle of concentration; CC)

ระบบหล่อเย็นที่มีการระบายความร้อน โดยน้ำเย็นจะถูกส่งไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อน้ำร้อนออกมาจะส่งไปที่หอหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อนและถูกส่งกลับไปแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ ในช่วงที่น้ำระบายความร้อนให้อากาศจะเกิดการสูญเสียน้ำจากการระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งไอน้ำที่ระเหยออกไปนั้นเป็นน้ำบริสุทธิ์ ดังนั้นความเข้มข้นของน้ำหล่อเย็นในระบบก็จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้ รอบการใช้น้ำของน้ำทดแทน หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของน้ำหล่อเย็นกับน้ำทดแทนเริ่มต้น หรือจำนวนรอบของความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจากการใช้

ระบายความร้อน กล่าวคือ น้ำทดแทนนั้น ๆ สามารถใช้หล่อเย็นได้โดยไม่เกิดปัญหาตะกอน อย่างไรก็ตามการใช้น้ำไม่ใช่จำนวนรอบของการหมุนเวียนน้ำ สำหรับวิธีการหารอบการใช้น้ำ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

รอบการใช้น้ำ = ความเข้มข้นของน้ำหล่อเย็น/ความเข้มข้นของน้ำทดแทน (สมการที่ 2.1)

ทั้งนี้ น้ำทดแทนที่มีรอบการใช้น้ำสูง น้ำดังกล่าวก็จะสามารถใช้ในระบบหล่อเย็นได้นาน ลดอัตราการโบลวดาวน์ และทำให้อัตราการเติมน้ำทดแทนลดลงด้วย ดังนั้น น้ำทดแทนที่มีรอบการใช้น้ำสูงย่อมมีความเหมาะสมกว่าน้ำทดแทนที่มีรอบการใช้น้ำต่ำ ซึ่งน้ำทดแทนที่มีรอบการใช้น้ำมากกว่า 1 รอบก็จะสามารถลดการใช้น้ำลงไปด้วย โดยความสัมพันธ์รอบการใช้น้ำและปริมาณน้ำที่ประหยัดได้แสดงในตารางที่ 2.7 ลักษณะที่สำคัญของน้ำทดแทน (Makeup Water) คือ รอบการใช้น้ำควรมีค่าประมาณ 4-6 หรือมากกว่า นั่นคือน้ำทดแทนไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 4-6 รอบ แต่ถ้ามีรอบการใช้น้ำมากกว่า 4-6 รอบ เวลาใช้งานสามารถควบคุมให้มีรอบการใช้น้ำ 4-6 รอบได้ เพราะการใช้รอบการใช้น้ำมากกว่า 6 รอบ ก็ต้องเติมสารห้ามตะกอนมาก ดังนั้นแม้จะประหยัดน้ำได้แต่ไม่คุ้มค่ากับค่าสารเคมีที่ต้องใช้เพิ่มขึ้น

**ตารางที่ 2.7** ความสัมพันธ์ของรอบการใช้น้ำและเปอร์เซ็นต์น้ำทดแทนที่ลดได้

New concentration											
Initial concentration	2	2.5	3	3.5	4	5	6	7	8	9	10
1.5	33%	44%	50%	53%	56%	58%	60%	61%	62%	62.5%	63%
2	-	17%	25%	30%	33%	38%	40%	42%	43%	43.8%	44%
2.5	-	-	10%	16%	20%	25%	28%	30%	31%	32.5%	33%
3	-	-	-	7%	11%	17%	20%	22%	24%	25%	26%
3.5	-	-	-	-	5%	11%	14%	17%	18%	20%	21%
4	-	-	-	-	-	6%	10%	13%	14%	16%	17%
5	-	-	-	-	-	-	4%	7%	9%	10%	11%
6	-	-	-	-	-	-	-	3%	5%	6%	7%
7	-	-	-	-	-	-	-	-	2%	4%	5%

หมายเหตุ: (1) ให้รอบการใช้น้ำเริ่มต้นเท่ากับ 1.5 รอบในการคำนวณเปอร์เซ็นต์การประหยัดน้ำ (M. Seneviratne, 2006)

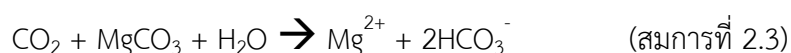
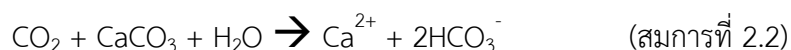
### 2.3 น้ำบาดาล (Groundwater)

น้ำบาดาล หมายถึง น้ำที่ถูกกักขังในช่องว่าง รอยแยก รอยแตกของหินที่แข็งตัวและยังไม่แข็งตัวภายใต้เปลือกโลก ในการนำน้ำบาดาลมาใช้ประโยชน์ จะต้องมีการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เมื่อได้ข้อมูลแล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน เพื่อประเมินความเหมาะสมของการใช้ประโยชน์ของแต่ละประเภท โดยทั่วไปอาจจำแนกการใช้น้ำบาดาลได้เป็น 3 ประเภท คือ การใช้เพื่อการอุปโภคบริโภค การใช้เพื่อการเกษตรกรรมหรือการชลประทาน และการใช้เพื่อการอุตสาหกรรม บางครั้งคุณภาพของน้ำบาดาล ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น ถ้านำน้ำบาดาลไปใช้ในหม้อไอน้ำความดันสูงคุณภาพน้ำต้องคงที่แน่นอน ไม้มีความกระด้างสูง จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้ตามวัตถุประสงค์ (ฟองสวาท สุวคนธ์ สิงหราชวรพันธ์, 2548)

โดยปกติแล้ว คุณภาพของน้ำบาดาลมักมีคุณภาพดีกว่าน้ำผิวดินเนื่องจากถูกกรองด้วยชั้นดินและหิน แต่อาจมีแร่ธาตุและสารเคมีบางชนิดเจือปนอยู่ในปริมาณมากกว่าน้ำผิวดิน เนื่องจากการชะละลายของดินและหินจากการไหลของน้ำบาดาลตามธรรมชาติ

### 2.4 ความกระด้างของน้ำ

ความกระด้างของน้ำเกิดจากอิออนโลหะที่มีประจุ +2 เช่น  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$   $\text{Fe}^{2+}$   $\text{Sr}^{2+}$  เป็นต้น แต่ในน้ำบาดาลจะมีแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นส่วนใหญ่ น้ำบาดาลมักมีความกระด้างสูงกว่าน้ำผิวดิน เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำบาดาลทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายให้กับแร่แคลเซียมและแมกนีเซียมที่อยู่ในดิน ดังสมการที่ 2.2 และ 2.3 ทำให้มี  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  ละลายอยู่ในน้ำสูง (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และ มั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์, 2551)



เช่น คุณภาพน้ำบาดาลแอ่งน้ำบาดาลนครราชสีมา-อุบลราชธานี มีค่าความกระด้างทั้งหมดเฉลี่ยในชั้นหินแข็งประมาณ 16-460 มก./ล. บางบริเวณมีค่ามากกว่า 500 มก./ล. จนถึง 3,000 มก./ล. (สำนัก

อนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2558)

2.4.1 ประเภทของความกระด้าง โดยความกระด้างแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

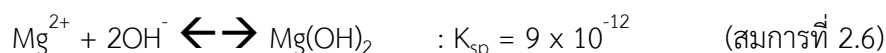
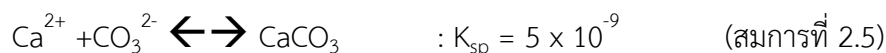
2.4.1.1 ความกระด้างชั่วคราวหรือความกระด้างคาร์บอเนต (Carbonate hardness) เกิดจากไบคาร์บอเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียม เช่น  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  และ  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$  สามารถกำจัดความกระด้างประเภทนี้ด้วยการต้มน้ำให้เดือด ดังสมการ 2.4 ไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) จะแตกตัวเป็นคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และเกิดผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ตกตะกอนออกมา ทำให้ความกระด้างของน้ำลดลง



2.4.1.2 ความกระด้างถาวรหรือความกระด้างไม่ใช่คาร์บอเนต (Non-Carbonate hardness) เกิดจากคลอไรด์และซัลเฟตของแคลเซียมและแมกนีเซียม เช่น  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$  และ  $\text{MgSO}_4$  เป็นต้น ความกระด้างประเภทนี้ไม่สามารถกำจัดออกด้วยการต้มน้ำให้เดือด

2.4.2 การตกผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ

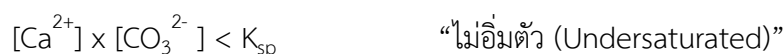
การตกผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) เกี่ยวข้องกับความกระด้าง ( $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$ ) กับระบบคาร์บอเนต (Carbonate System) ของน้ำ โดยระบบคาร์บอเนตประกอบด้วย  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , และ  $\text{CO}_3^{2-}$  ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดจากการทำปฏิกิริยากันของแคลเซียมและคาร์บอเนต และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของแมกนีเซียมและไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ



ทั้งนี้ การตกผลึกของ  $\text{CaCO}_3$  จะเกิดขึ้นเมื่อผลคูณของความเข้มข้น (ในหน่วยของโมลาร์) ของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{CO}_3^{2-}$  ในสารละลายมีค่าสูงกว่าค่าคงที่ผลคูณในการละลาย (Solubility product constants,  $K_{sp}$ ) ของ  $\text{CaCO}_3$  ดังตารางที่ 2.8







สถานะที่ผลคูณของความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{CO}_3^{2-}$  สูงกว่าค่า  $K_{sp}$  น้ำจะอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร จึงเกิดการสร้างผลึก  $\text{CaCO}_3$  เพื่อลดความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{CO}_3^{2-}$  จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลหรืออิ่มตัว เมื่อถึงจุดนี้จะไม่มีการตกผลึกของ  $\text{CaCO}_3$  อีก เช่นเดียวกัน การตกผลึกจะไม่เกิดขึ้นเมื่อ ผลคูณของความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{CO}_3^{2-}$  ต่ำกว่าค่า  $K_{sp}$  น้ำที่อยู่ในสภาวะนี้สามารถละลาย  $\text{CaCO}_3$  ได้ เรียกว่าสภาวะไม่อิ่มตัว เช่นเดียวกัน  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  จะตกผลึกเมื่อผลคูณของความเข้มข้นของ  $[\text{Mg}^{2+}]$  และ  $[\text{OH}^-]^2$  ในสารละลายมีค่าสูงกว่าค่าคงที่ผลคูณในการละลายของ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$

ดังนั้นความกระด้างของน้ำเป็นปัญหาหลักในการนำน้ำบาดาลมาใช้ในการกระบวนการอุตสาหกรรม เนื่องจากแคลเซียมและแมกนีเซียมที่ละลายอยู่ในน้ำจะก่อให้เกิดตะกอนในระบบท่อน้ำและอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหม้อไอน้ำและระบบหล่อเย็น ดังนั้น จึงต้องมีการกำจัดความกระด้างของน้ำก่อนที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้

**ตารางที่ 2.8** ค่าคงที่ผลคูณในการละลาย ( $K_{sp}$ ) ของสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียม

ชนิดของสารประกอบ	ค่าคงที่ผลคูณในการละลาย ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
$\text{CaCO}_3$	$5 \times 10^{-9}$
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$8 \times 10^{-6}$
$\text{MgCO}_3$	$4 \times 10^{-5}$
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	$9 \times 10^{-12}$

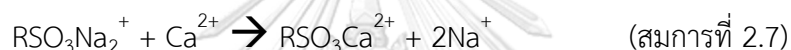
ที่มา: (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และ มันรัชช์ ตัณฑุลเวศม์, 2551)

### 2.4.3 การกำจัดความกระด้าง

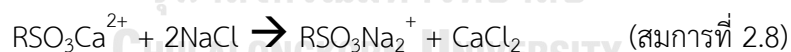
การกำจัดความกระด้างสามารถทำได้หลายวิธี (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และคณะ, 2554) ได้แก่

#### 2.4.3.1 การกำจัดความกระด้างด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

การกำจัดความกระด้างออกจากน้ำด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซินแบบกรด คือ ใช้ไอออนบวกที่ติดอยู่กับเรซิน โดยส่วนใหญ่จะเป็นไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และโซเดียมไอออน ( $Na^+$ ) แลกเปลี่ยนแคลเซียมและแมกนีเซียม ที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำได้ ในขณะที่เดียวกันเรซินก็จะปล่อย  $Na^+$  ออกมา ซึ่ง  $Na^+$  ละลายน้ำได้ดีและจะไม่ตกผลึกออกจากน้ำเหมือนแคลเซียมและแมกนีเซียม ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดแก่ที่มี  $Na^+$  เป็นไอออนบวกที่เกาะอยู่กับเรซิน ดังสมการที่ 2.7



การแลกเปลี่ยนลักษณะนี้จะเกิดขึ้นต่อไปจนกระทั่งไอออนของโซเดียมทั้งหมดถูกปล่อยออกจากเรซิน และทำให้เรซินอิ่มตัวไปด้วยแคลเซียมและแมกนีเซียม เมื่อถึงจุดนี้จำเป็นต้องทำให้เรซินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกลับมา (Regeneration) โดยการล้างเรซินด้วยสารละลายเกลือแกง ( $NaCl$ ) ทำให้เกิดน้ำเสียของ  $CaCl_2$  ปริมาณมาก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ดังสมการที่ 2.8



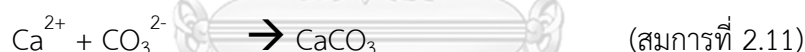
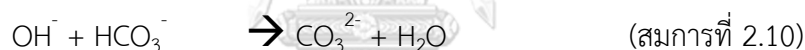
#### 2.4.3.2 การกำจัดความกระด้างด้วยกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส

ลักษณะการทำงานของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส คือยอมให้โมเลกุลของน้ำซึมผ่านเมมเบรนและกักโมเลกุลชนิดต่าง ๆ ไว้ เป็นกระบวนการที่มักใช้ในการทำน้ำให้บริสุทธิ์ ดังนั้นรีเวอร์สออสโมซิสสามารถกำจัดความกระด้างออกจากน้ำได้ แม้ว่ารีเวอร์สออสโมซิสจะมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารต่าง ๆ แต่เนื่องจากกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสต้องใช้ความดันสูงและมีอัตราการนำน้ำกลับคืนต่ำเมื่อเทียบกับเมมเบรนชนิดอื่น ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำรีเวอร์สออสโมซิสควรใช้สำหรับการจัดการของแข็งละลายน้ำ (TDS) เท่านั้น

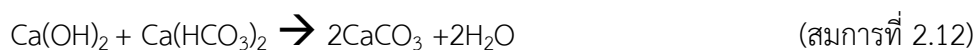
### 2.4.3.3 การกำจัดความกระด้างด้วยวิธีปูน-โซดา (มันลิน ตันกุลเวศม์ และคณะ, 2554)

การกำจัดความกระด้างด้วยวิธีปูน-โซดาเป็นวิธีที่ใช้ปฏิกิริยาตกผลึกทางเคมี (Precipitation) แคลเซียมและแมกนีเซียมจะถูกกำจัดออกจากน้ำได้โดยการเกิดปฏิกิริยาตกผลึกกับ  $\text{CO}_3^{2-}$  และ  $\text{OH}^-$  ได้ตะกอนของแข็งเป็น  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg(OH)}_2$  ตามลำดับ สารเคมีที่นิยมใช้คือ ปูนขาวและโซดาแอช บางครั้งใช้โซดาไฟ ( $\text{NaOH}$ ) บางแต่ไม่เป็นที่นิยมเพราะมีราคาแพง นอกจากนี้ถ้าน้ำกระด้างมีแต่ความกระด้างชั่วคราวหรือความกระด้างคาร์บอเนตเพียงอย่างเดียว สามารถใช้ปูนขาวเพียงอย่างเดียวกำจัดความกระด้างได้ ทั้งนี้ การกำจัดแคลเซียมด้วยกระบวนการตกผลึกในรูป  $\text{CaCO}_3$  (โดยการเติมปูนขาว) น้ำดิบจำเป็นต้องมีสภาพต่างมากเพียงพอ การกำจัดความกระด้างด้วยวิธีการนี้จึงจะเกิดผล

การเติมปูนขาวให้กับน้ำ ปูนขาวจะแตกตัวให้  $\text{OH}^-$  ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{HCO}_3^-$  ในน้ำ ทำให้เกิด  $\text{CO}_3^{2-}$  การกำจัด  $\text{Ca}^{2+}$  เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{CO}_3^{2-}$  ได้ผลึก  $\text{CaCO}_3$  ที่เป็นตะกอนแข็งสามารถตกผลึกและแยกออกจากน้ำได้ ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.11



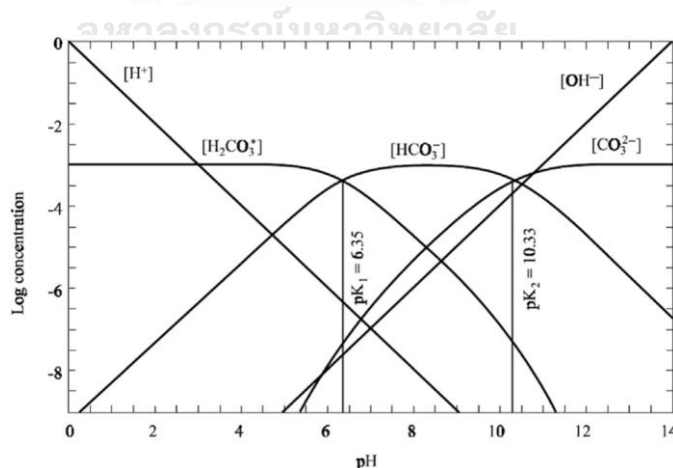
จากปฏิกิริยาดังกล่าว จะเห็นได้ว่าการกำจัด  $\text{Ca}^{2+}$  ด้วยกระบวนการตกผลึกของ  $\text{CaCO}_3$  น้ำดิบจะต้องมีปริมาณ  $\text{HCO}_3^-$  มากเพียงพอ ทั้งนี้การกำจัดความกระด้างด้วยการเติมปูนขาวสามารถกำจัดได้เพียงความกระด้างชั่วคราวหรือความกระด้างคาร์บอเนต (Carbonate hardness) เท่านั้น สรุปสมการในการกำจัด  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  ด้วยปูนขาว ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ



จากสมการ พบว่าในการกำจัด  $\text{Ca(HCO}_3)_2$  1 โมล ใช้ปูนขาว 1 โมล และเกิดตะกอน  $\text{CaCO}_3$  2 โมล เช่นเดียวกัน ในการกำจัด  $\text{Mg(HCO}_3)_2$  1 โมล ใช้ปูนขาว 2 โมล และเกิดตะกอน  $\text{CaCO}_3$  2 โมล และตะกอน  $\text{Mg(OH)}_2$  1 โมล

น้ำหลังผ่านกระบวนการตกผลึก (Precipitation) ด้วยการเติมปูนขาว มักมีค่าพีเอชสูงขึ้น ประมาณ 11 เนื่องจาก  $\text{HCO}_3^-$  ถูกเปลี่ยนเป็น  $\text{CO}_3^{2-}$  รวมถึงที่ค่าพีเอชสูงจะมีปริมาณ  $\text{CO}_3^{2-}$  และ  $\text{OH}^-$  มาก ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเอื้อต่อการตกผลึกของ  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ทั้งนี้ น้ำหลังผ่านกระบวนการตกผลึกเป็นน้ำที่ไม่เสถียรมีแนวโน้มที่จะตกผลึกได้อีก จึงจำเป็นต้องมีการปรุงแต่งน้ำเพื่อลดค่าพีเอชและทำให้น้ำมีความเสถียรเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน การลดค่าพีเอชของน้ำทำได้โดยเติมก๊าซ  $\text{CO}_2$  หรือการใช้กรดแก่ เช่น กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) กรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) เป็นต้น

ทั้งนี้ ในการกำจัดความกระด้างด้วยการทำให้ความกระด้างตกผลึกในรูปของ  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  หากไม่สามารถกำจัดตะกอนเหล่านี้ออกจากน้ำได้แล้ว น้ำก็ยังคงมีความกระด้างเหลืออยู่โดยปกติแล้ว หากมีตะกอนของ  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  จะเกิดโคแอกกูเลชันได้เอง เนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  มีประจุคนละชนิด หากมีตะกอน  $\text{CaCO}_3$  เพียงอย่างเดียว พบว่าการตกตะกอนมักเกิดได้ไม่ดี ดังนั้น การกำจัดความกระด้างด้วยวิธีการตกผลึก (Precipitation) ควรมีการโคแอกกูเลชันตามด้วย จึงจะได้ผล นอกจากนี้การกำจัดความกระด้างด้วยวิธีการตกผลึก (Precipitation) ไม่สามารถกำจัดความกระด้างออกจากน้ำได้หมด เนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  มีความสามารถละลายน้ำได้ตามธรรมชาติ โดยปกติแล้วเมื่อใช้ปริมาณปูนขาวตามสโตยชิโอเมตริก (Stoichiometry) จะมีความกระด้างตกค้างประมาณ 60-70 มก./ล. ในเทอมของหินปูน และหากเติมปริมาณปูนขาวมากเกินไป จะมีความกระด้างตกค้างประมาณ 30-40 มก./ล. ในเทอมของหินปูน



(W. Stumm และ J. J. Morgan, 2012)

**รูปที่ 2.3** ปริมาณของ  $\text{H}_2\text{CO}_3$   $\text{HCO}_3^-$   $\text{CO}_3^{2-}$   $\text{H}^+$   $\text{OH}^-$  ที่ระดับค่าพีเอชต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

## 2.5 ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) ในน้ำธรรมชาติ

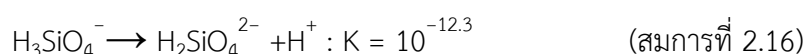
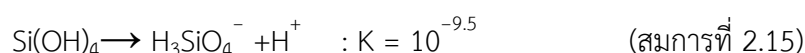
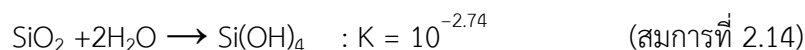
ซิลิกามีความสามารถในการละลายน้ำต่ำคือ ประมาณ 120 มก./ล. ที่พีเอช 7 และ 25 องศาเซลเซียส ซิลิกาจึงสามารถจับตัวเป็นผลึกได้ ซิลิกาอยู่ในน้ำได้ทั้งในสถานะคอลลอยด์ (Colloidal Silica) และสถานะที่ละลายน้ำ (Soluble Silica) ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของซิลิกา อุณหภูมิของสารละลาย และค่าพีเอช สำหรับน้ำธรรมชาติที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6-9 ซิลิกาจะอยู่ในรูปสารละลายมากกว่าคอลลอยด์ในลักษณะของสารประกอบซิลิเกตซึ่งสามารถสะสมตัวกลายเป็นตะกอนแข็งมากอยู่ในระบบท่อและอุปกรณ์ต่าง ๆ ตะกอนเหล่านี้กำจัดได้ยากและส่งผลกระทบต่อกระบวนการของหม้อไอน้ำและหล่อเย็นมากกว่าตะกอนของหินปูน วิธีการกำจัดซิลิกาออกจากน้ำทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการกลั่น กระบวนการเมมเบรน กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ และกระบวนการตกผลึกทางเคมีและการดูดซับ (S. D. Faust และ O. M. Aly, 1998)

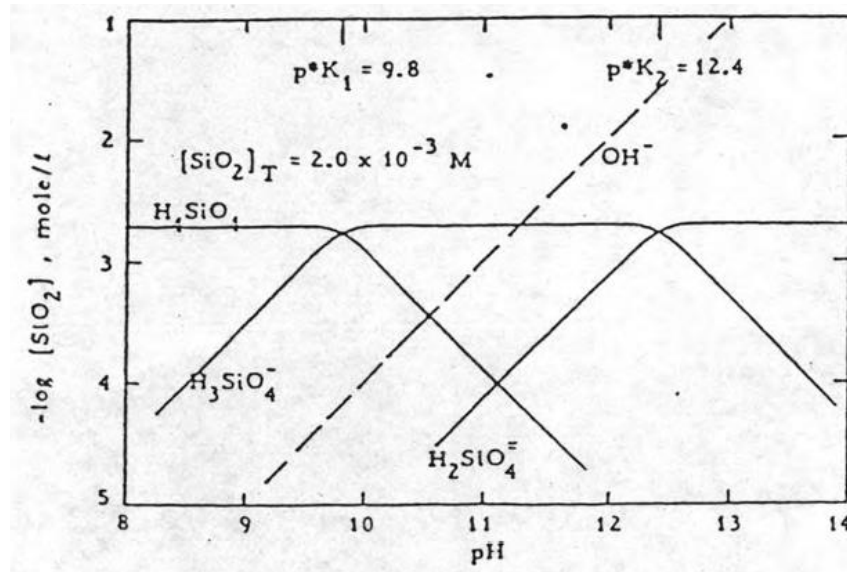
### 2.5.1 ซิลิกาที่ละลายน้ำ (Soluble Silica)

ซิลิกาที่ละลายในน้ำมีความเข้มข้นของซิลิกาดำกว่าระดับอิ่มตัว (Saturated Solution) จะอยู่ในรูปของ Monosilicic acid (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> หรือ Si(OH)<sub>4</sub>) ดังสมการที่ 2.14 โดยมีโมเลกุลของน้ำ 2 โมเลกุลมายึดเกาะกับ SiO<sub>2</sub> เกิดเป็นกลุ่ม Silanol (Si-OH) ที่พื้นผิวโมเลกุลทำให้ Si(OH)<sub>4</sub> มีคุณสมบัติทางเคมี ดังนี้

#### 2.5.1.1 คุณสมบัติการละลาย

เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมากกว่า 9 จะมีการละลายเพิ่มขึ้น และแตกตัวอยู่ในรูปของอนุภาคซิลิเกต (Silicate ion) ต่าง ๆ ดังสมการที่ 2.15 และ 2.16 สำหรับการละลายของซิลิกาที่ค่าพีเอชต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.4



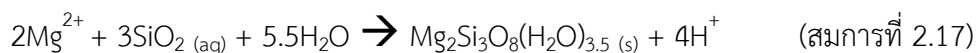


รูปที่ 2.4 การแตกตัวของซิลิกาที่มีความเข้มข้น 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับค่าพีเอชต่าง ๆ

#### 2.5.1.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง $\text{Si(OH)}_4$ กับไอออนของโลหะ

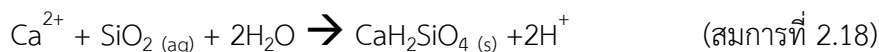
ซิลิกามีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากพื้นผิวของซิลิกาประกอบไปด้วยกลุ่ม Silanol ( $\text{Si-OH}$ ) อยู่เป็นจำนวนมาก โดยปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมและปฏิกิริยาเคมีจะเกิดอย่างว่องไวเมื่อความเข้มข้นของซิลิกาและค่าพีเอชของน้ำมีค่าสูง ซิลิกาทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะหลายชนิด ดังต่อไปนี้

- ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{Si(OH)}_4$  กับ  $\text{Mg}^{2+}$  ดังสมการที่ 2.17 จากการทดลองพบว่า การเพิ่มค่าพีเอชให้สูงขึ้น (มากกว่า 9) เป็นผลทำให้ปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาที่สภาวะสมดุล (Equilibrium) ลดต่ำลง และเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาให้เข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วขึ้น จนเกิดเป็น  $\text{Mg(OH)}_2$  และผลึก Sepiolite ( $\text{Mg}_2\text{Si}_3\text{O}_8(\text{H}_2\text{O})_{3.5}$ )

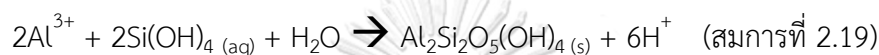


- ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{Si(OH)}_4$  กับ  $\text{Ca}^{2+}$  ดังสมการที่ 2.18 ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{Si(OH)}_4$  กับสารประกอบแคลเซียมเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกับ  $\text{Mg}^{2+}$  การเกิดผลึกแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{CaH}_2\text{SiO}_4$ ) ที่ค่าพีเอชของสารละลายประมาณ 11-12 หรือถ้าสารละลายมีค่าพีเอชต่ำกว่า

นี้ ก็จะต้องมีปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$  สูงเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะสมดุลเร็วขึ้น



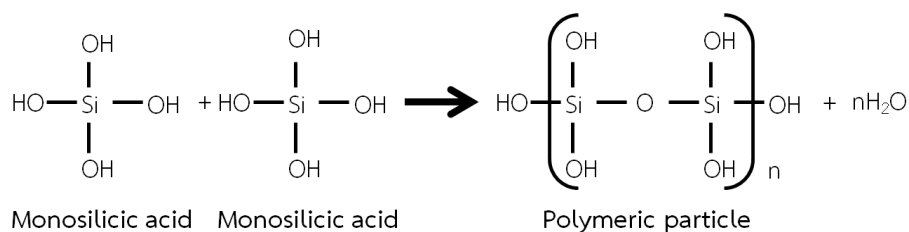
- ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{Si}(\text{OH})_4$  กับ  $\text{Al}^{3+}$  ดังสมการที่ 2.19 ปฏิกิริยาการเกิดผลึกอลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) เกิดได้ที่ค่าพีเอช 4-10 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมาก



ตะกอนของซิลิเกตที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับอ็อกไซด์ของแคลเซียม แมกนีเซียม และอลูมิเนียม เป็นตะกอนของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก จึงยากต่อการตกตะกอนในเวลาที่เหมาะสม การกำจัดซิลิกาในน้ำดิบด้วยกระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical treatment process) ที่มีประสิทธิภาพหลังจากเกิดการตกผลึกทางเคมี (Precipitate) ของสารประกอบซิลิเกตแล้วจึงน่าจะสามารถกำจัดสารประกอบเหล่านี้ออกจากน้ำได้

### 2.5.2 ซิลิกาที่อยู่ในสถานะคอลลอยด์ (Colloidal Silica)

ถ้าปริมาณความเข้มข้นของซิลิกา ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) ละลายอยู่ในน้ำมากเกินไปจนเกิดสารละลายอิ่มตัวยวดยิ่ง (Supersaturated Solution) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม จะเกิดกระบวนการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) รวมตัวเป็นคอลลอยด์ซิลิกาได้ ดังรูปที่ 2.5 คอลลอยด์ซิลิกาที่เกิดขึ้นมีประจุเป็นลบทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค เป็นสาเหตุให้อนุภาคมีความเสถียรและไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนจึงมีขนาดเล็กส่งผลให้ตกตะกอนออกจากน้ำได้ยาก



รูปที่ 2.5 โพลิเมอไรเซชันของ Monosilicic acid

### 2.5.3 การกำจัดซิลิกาด้วยกระบวนการตกผลึกทางเคมีและการดูดซับ (สุมาลี เดโชพลชัย, 2529)

กระบวนการนี้เกิดจากการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปปริมาณที่มากเกินไปจนเกิดการตกผลึกทางเคมี (Precipitation) ของสารประกอบไฮดรอกไซด์ขึ้น เช่น  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  และ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  เป็นต้น อนุภาคซิลิกาสามารถดูดซับ (Adsorbed) บนผิวของผลึกเหล่านี้ เกิดการยึดเกาะกันเป็นตะกอนใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ซิลิกายังสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนบวกของสารเคมีเหล่านี้ เช่น  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  เกิดเป็นสารประกอบซิลิเกตซึ่งตกตะกอนและเกาะติดอยู่บนผิวของผลึกไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาด้วยวิธีการตกผลึกทางเคมี ขึ้นอยู่กับ ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ ค่าพีเอช อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และไอออนต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำ

## 2.6 กระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟลอคคูเลชัน (Coagulation/Flocculation)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟลอคคูเลชัน (Coagulation/Flocculation) คือ การทำให้คอลลอยด์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.001-1 ไมครอน หรือสารแขวนลอยขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้มีประจุลบจึงเกิดการผลักกันไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นจึงต้องสะเทินประจุของอนุภาคเหล่านั้น เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ โดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน สารเคมีที่ใช้เป็นสารสร้างตะกอน (Coagulant) เช่น สารส้ม (Aluminium sulphate, Alum) และสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum chloride, PACl) ส่วนกระบวนการฟลอคคูเลชัน คือ กระบวนการที่ทำให้สารแขวนลอยที่สะเทินประจุแล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่า ฟลอค (Floc) โดยการเติมสารเคมีที่เรียกว่า ฟลอคคูแลนต์ (Flocculant)

กลไกของกระบวนการโคแอกกูเลชัน ได้แก่ กลไกการลดความหนาของชั้นกระจาย (Double-layer compression) กลไกทำให้ประจุของอนุภาคเป็นกลาง (Charge Neutralization) กลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation) และกลไกสร้างสะพานเชื่อมต่ออนุภาค (Polymer bridging) ทั้งนี้กลไกที่จะเป็นกลไกหลัก ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ ชนิดและปริมาณโคแอกกูแลนต์ ซึ่งทำให้เกิดสมดุลระหว่างไอออนโลหะหนักที่ละลายน้ำและผลึกไฮดรอกไซด์ (N. Wei และคณะ, 2015)

### 2.6.1 สารสร้างตะกอน หรือโคแอกกูแลนต์ (Coagulant)



โคแอกกูแลนต์ที่ใช้กันมีหลายประเภท เช่น สารประกอบของอลูมิเนียมและสารประกอบของเหล็ก สำหรับโคแอกกูแลนต์ประเภทสารประกอบของอลูมิเนียมที่นิยมใช้กัน ได้แก่ สารส้มและโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) โดยโคแอกกูแลนต์ดังกล่าวเมื่อละลายน้ำจะมีรูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียมได้หลายรูปแบบ ดังตารางที่ 2.9 ซึ่งสูตรทางเคมีสำหรับรูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียม คือ  $Al_x(OH)_y(H_2O)_n^{(3x-y)+}$  หรือ  $Al_xO_2(OH)_y(H_2O)_n^{(3x-y-2z)+}$  นอกจากนี้ X. Wu และคณะ (2007) กล่าวว่ารูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียมของสารส้มส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในรูปโมโนเมอร์ (Monomer) และผลึกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al(OH)_3$ ) เนื่องจากถูกไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็ว ขณะที่การใช้ PACl เป็นโคแอกกูแลนต์รูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียมจะอยู่ในรูป Low Polymer และ Middle Polymer โดยส่วนใหญ่เป็น  $AlO_4Al_{12}(OH)_{24}^{7+}$  หรือ  $Al_{13}$  ซึ่งเป็นรูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียมที่มีความเสถียรสูง ถูกไฮโดรไลซิสได้ยาก สามารถคงรูปเป็นสารประกอบอลูมิเนียมหลักของการเกิดกลไกของโคแอกกูแลนต์ สำหรับรูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียมของสารส้มและ PACl ดังตารางที่ 2.10

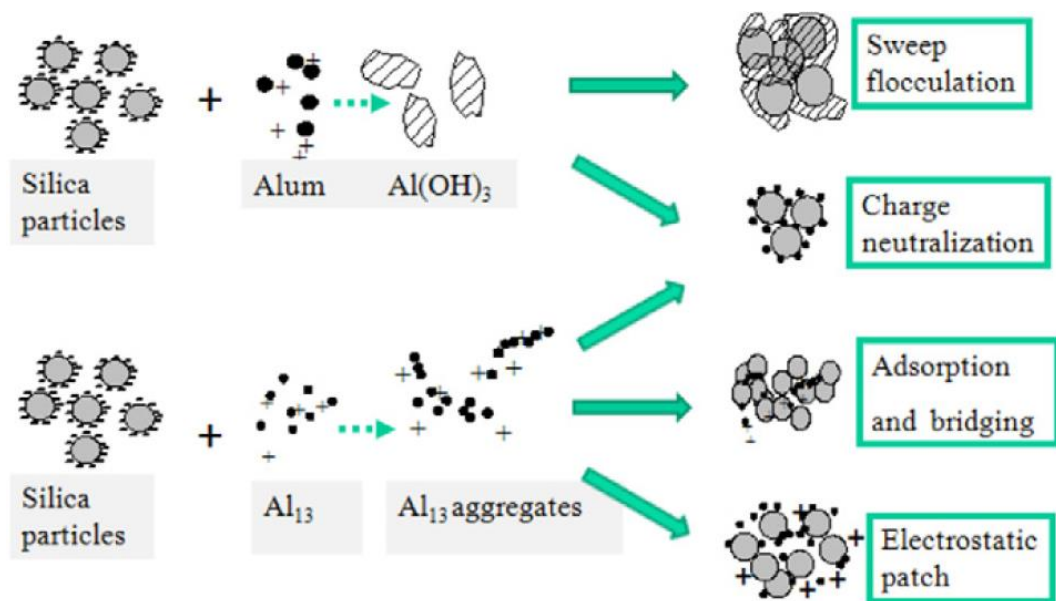
ตารางที่ 2.9 รูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียม

ระดับของการเกิดพอลิเมอร์เชชัน (Degree of Polymerization)	รูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียม (Chemical Formula)
Monomer	$Al^{3+}$ , $Al(OH)^{2+}$ , $Al(OH)_2^+$ และ $Al(OH)_4^-$
Oligomer	$Al_2(OH)_2^{4+}$ , $Al_2(OH)_5^+$ และ $Al_3(OH)_4^{5+}$
Low Polymer	$Al_6(OH)_{12}^{6+}$ , $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ และ $Al_8(OH)_{20}^{4+}$
Middle Polymer	$Al_{13}(OH)_{32}^{7+}$ และ $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ หรือ $Al_{13}$
High Polymer	$Al_{15}(OH)_{36}^{9+}$ และ $Al_{30}O_8(OH)_{56}^{15+}$ หรือ $Al_{30}$
Sol, Gel	$(Al_{30})_n$ และ $Al(OH)_3$
Precipitates	$[Al(OH)_3]_n$

ตารางที่ 2.10 รูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียมของสารส้มและ PACl

รูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียม (Chemical Formula)	เปอร์เซ็นต์ (%) ของรูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียม	
	สารส้ม (Alum)	สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)
Monomer	96.3	9.4
Low Polymer และ High Polymer	2.0	83.8
Sol, Gel	1.7	6.8

ทั้งนี้ รูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียมที่แตกต่างกันของโคแอกกูแลนต์ทั้งสองชนิดส่งผลให้เกิดกลไกของกระบวนการโคแอกกูเลชันแตกต่างกันด้วย ดังรูปที่ 2.6 สำหรับกลไกหลักของการใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ คือ กลไกทำให้ประจุของอนุภาคเป็นกลาง (Charge Neutralization) และกลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation) ขณะที่กลไกหลักของ PACl คือกลไก Electrostatic patch และ Bridge-aggregation สำหรับกลไก Electrostatic patch เกิดจาก  $Al_{13}$  ดูดซับ (Adsorb) บนผิวอนุภาคคอลลอยด์ทำให้คอลลอยด์เสถียรภาพ (Destabilization) และกลไก Bridge-aggregation เกิดจาก  $Al_{13}$  ที่มีการรวมกลุ่มกัน ( $Al_{13}$ -aggregate) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 2 นาโนเมตร ซึ่งจะเป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ ทำให้คอลลอยด์รวมตัวได้ดีขึ้น เนื่องจาก  $Al_{13}$  มีความหนาแน่นของประจุบวกสูงจึงดูดซับบนผิวอนุภาคคอลลอยด์ทำให้คอลลอยด์เสถียรภาพอย่างรวดเร็วและใช้ปริมาณ PACl ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการเติมปริมาณ PACl มากเกินไปจะทำให้เกิดคอลลอยด์กลับมามีเสถียรภาพ (Restabilization) ได้ เนื่องจากเกิดแรงผลักระหว่าง  $Al_{13}$  ที่มีการรวมกลุ่ม กับ  $Al_{13}$  ที่ดูดซับ บนผิวอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นการใช้ PACl เป็นโคแอกกูแลนต์ การหาปริมาณ PACl ที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็น

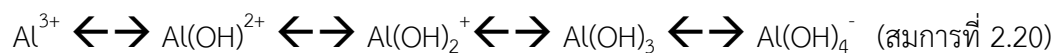


(H. Tang และคณะ, 2015)

รูปที่ 2.6 กลไกของกระบวนการโคแอกกูแลชันที่ใช้สารส้มและ PACl เป็นโคแอกกูแลนต์

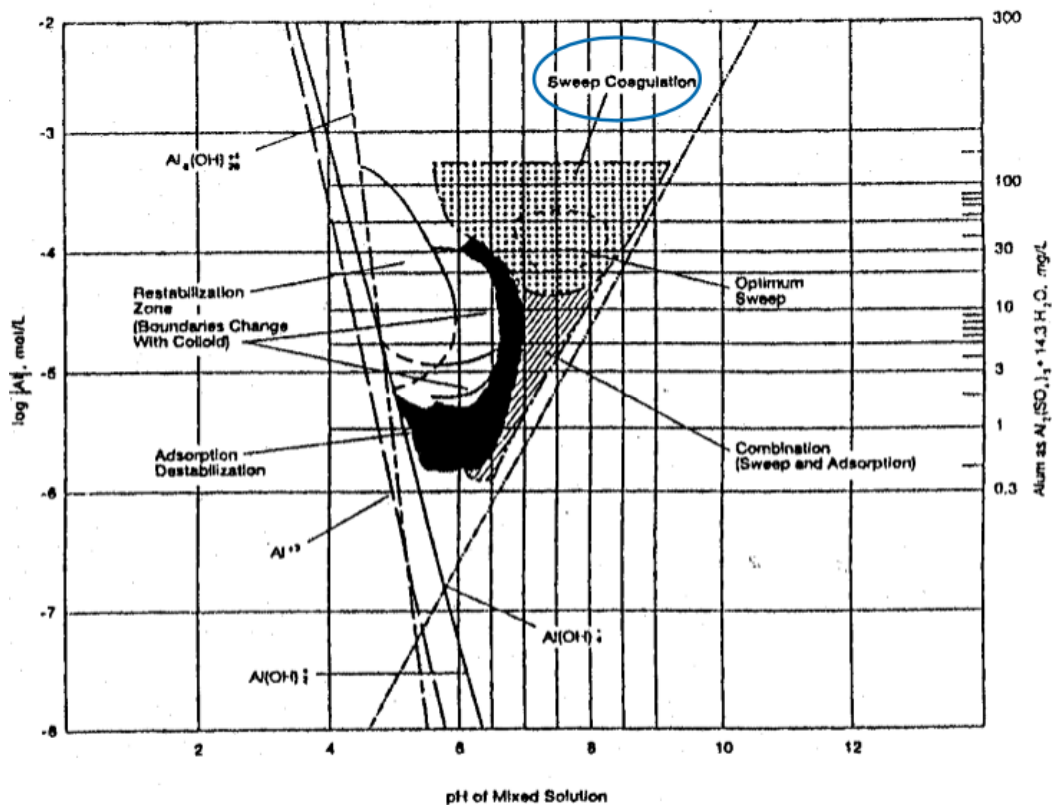
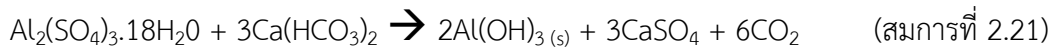
### 2.6.1.1 สารส้ม (Alum)

สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้ เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพง และใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่าง ๆ สูตรโมเลกุลของสารส้ม คือ  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$  หรือ  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$  เมื่อเติมสารส้มในน้ำ โมเลกุลของน้ำจะมาล้อมรอบ  $Al^{3+}$  ได้  $Al(H_2O)_6^{3+}$  หรืออาจเขียนเป็น  $Al^{3+}$  หลังจากนั้นจะถูกไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โดยไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ดังสมการที่ 2.20



รูปแบบของสารประกอบอลูมิเนียมที่เกิดขึ้น นอกจากปัจจัยเรื่องปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เติมแล้ว สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นประจุบวก ประจุลบ หรือผลึกไฮดรอกไซด์ก็ได้ ขึ้นกับค่าพีเอชของน้ำ แสดงดังรูปที่ 2.7 จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่ค่าพีเอช 6.5 - 8 กลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation) ของผลึกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al(OH)_3$ ) ดังสมการที่ 2.21 ทั้งนี้ คุณภาพต้องมีสภาพต่างเพียงพอ มิฉะนั้นแล้วการเติมสารส้มจะทำให้พีเอชของน้ำต่ำลงจนกระทั่งเกิดกระบวนการโคแอก

กุเลชันได้ไม่ดี อย่างไรก็ตามพีเอชของน้ำไม่ควรสูงกว่า 8 เนื่องจากในน้ำจะมี  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งไม่สามารถเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันกับคอลลอยด์ที่มีประจุลบเหมือนกันได้



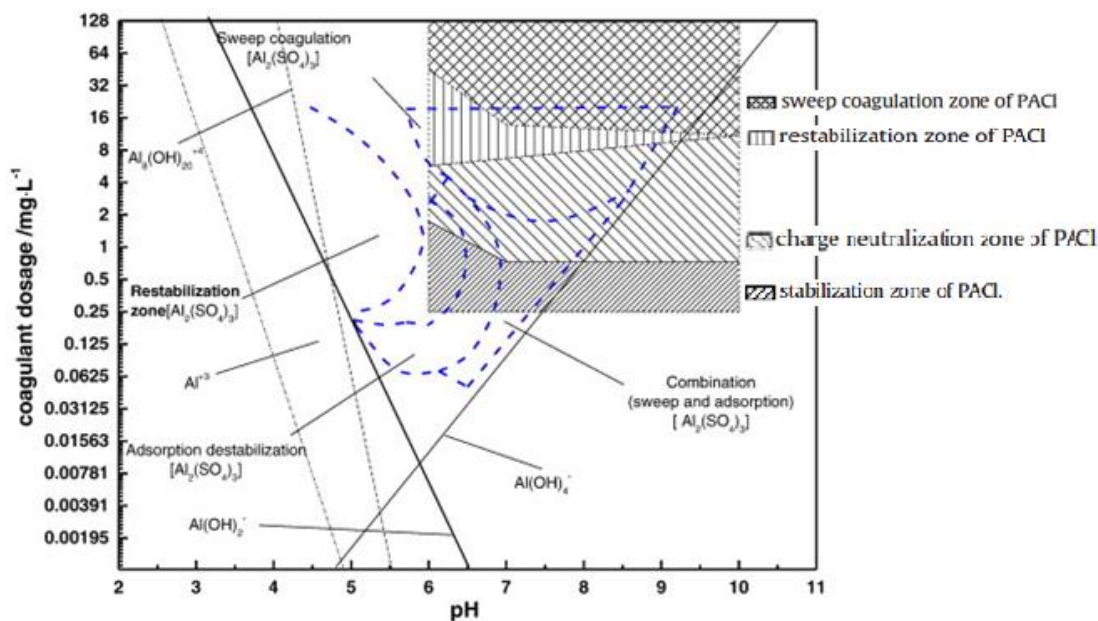
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
(A. Amirtharajah และ K. M. Mills, 1982)  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

### 2.6.1.2 สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum chloride, PACl)

PACl เริ่มถูกนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย/ฟลอคคูเลชัน/ฟลอคคูลูชัน สูตรทั่วไปของ PACl คือ  $\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{3n-m}$  เมื่อ  $0 < m < 3n$  เมื่อเติม PACl ลงในน้ำ PACl จะถูกไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ได้สารประกอบอลูมิเนียมที่มีประจุบวกสูง เช่น  $\text{AlO}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}^{7+}$  ( $\text{Al}_{13}$ ) และ  $\text{Al}_{30}\text{O}_8(\text{OH})_{56}(\text{H}_2\text{O})_{24}^{18+}$  ( $\text{Al}_{30}$ ) (N. Wei และคณะ, 2015) โดย PACl มีข้อดีกว่าโคแอกกูแลนท์ประเภทเกลือของอลูมิเนียม หรือเกลือของเหล็ก ได้แก่ สามารถทำงานได้แม้อุณหภูมิของน้ำต่ำ อลูมิเนียม

ตกค้างในน้ำน้อย ปริมาณสลัดจ์น้อยกว่า ค่าพีเอชของน้ำส่งผลต่อการทำงานของ PACl ต่ำ อัตราการเติบโตของฟลอคสูง ใช้เวลาไม่นานในการตกผลึก (Floc settling time) และไม่ต้องเติมกรดเพื่อปรับค่าพีเอชของน้ำ (A. Zouboulis และคณะ, 2008) และ (I. Zarchi และคณะ, 2013)



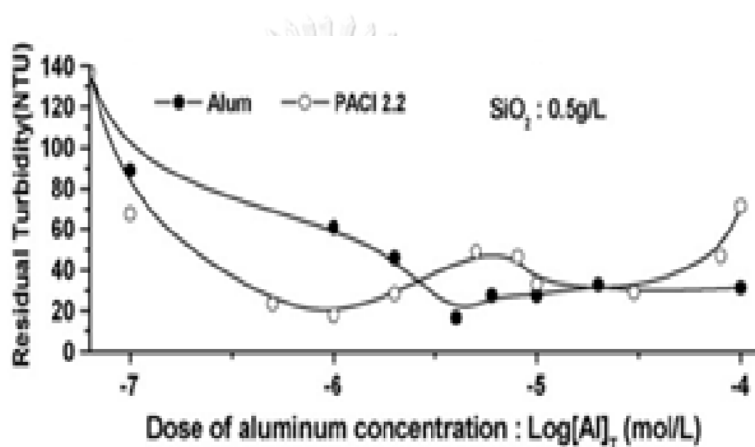
(N. Wei และคณะ, 2015)

รูปที่ 2.8 เขตของการเกิดกลไกในกระบวนการโคแอกกูเลชันที่ปริมาณโคแอกกูแลนท์และระดับค่าพีเอชต่าง ๆ ของสารส้ม และ PACl ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

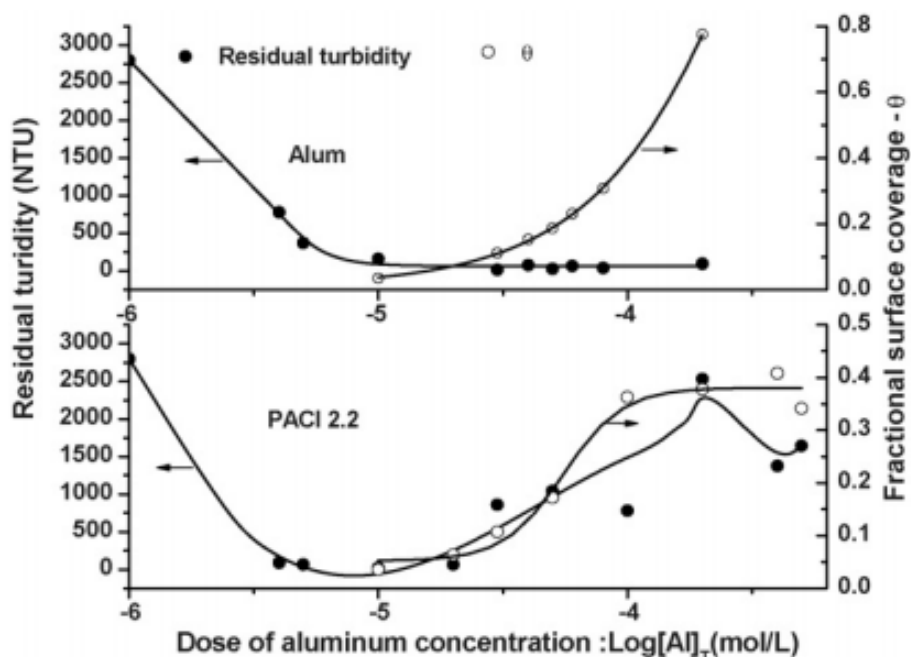
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

N. Wei และคณะ (2015) ศึกษากลไกของกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้ PACl เป็นโคแอกกูแลนท์ โดยเปรียบเทียบกับ กลไกของกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้สารส้ม (Alum) (A. Amirtharajah และ K. M. Mills, 1982) พบว่า เขตการเกิดกลไกทำให้ประจุของอนุภาคเป็นกลาง (Charge Neutralization) และกลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation) ของ PACl กว้างกว่าการใช้สารส้ม (Alum) เป็นโคแอกกูแลนท์ โดยเขตการเกิดกลไกทำให้ประจุของอนุภาคเป็นกลางและกลไกแบบกวาดของ PACl ที่ค่าพีเอช 6-10 เช่น ที่ค่าพีเอช 6 ใช้ปริมาณ PACl 2.2 มิลลิกรัมต่อลิตรของอลูมิเนียม และที่ค่าพีเอช 7-10 ใช้ปริมาณ PACl 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตรของอลูมิเนียม ให้เกิดกลไกทำให้ประจุของอนุภาคเป็นกลาง ดังรูปที่ 2.8

ดังนั้น ค่าพีเอชน้ำมากกว่า 6 ในการทดลองหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจะใช้ค่าความเข้มข้นของสารส้ม และ PACl ในช่วง  $10^{-7}$  ถึง  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม (mol Al/L) ซึ่งสอดคล้องกับไดอะแกรมของเขตการเกิดกลไกในกระบวนการโคแอกกูเลชัน (ดังรูปที่ 2.8) และการทดลองของ X. Wu และคณะ (2007) ที่ใช้สารส้มและ PACl เป็นโคแอกกูแลนต์ โดยทำการทดลองกับน้ำที่มีความขุ่นต่ำและน้ำที่มีความขุ่นสูง โดยใช้อนุภาคซิลิกา (Silica microsphere) ขนาด 3 ไมครอนเป็นตัวแทนของความขุ่นในน้ำ ทั้งนี้ น้ำที่มีความขุ่นต่ำและน้ำที่มีความขุ่นสูง มีความเข้มข้นของอนุภาคซิลิกา เท่ากับ 0.5 และ 5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10



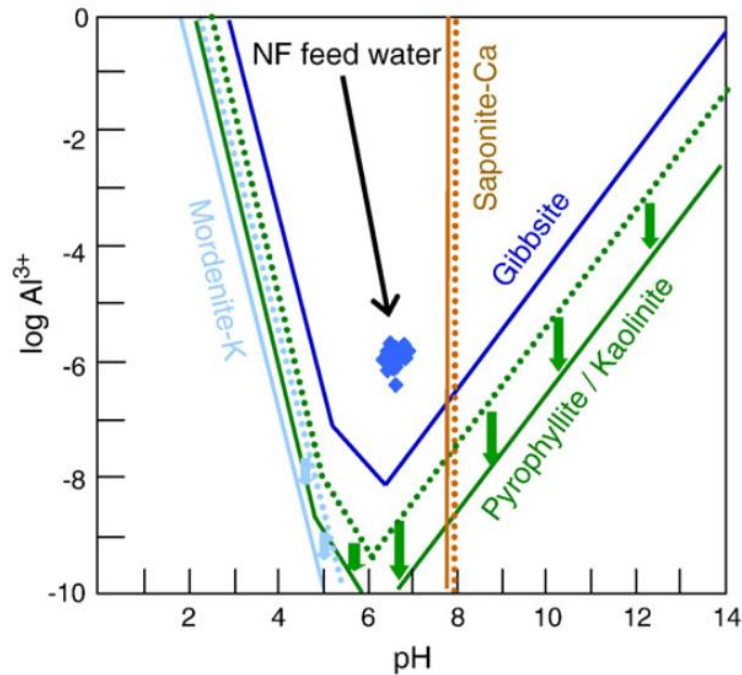
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นที่เหลือในน้ำกับปริมาณสารส้มและ PACl ที่ความเข้มข้นของอนุภาคซิลิกาเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร และค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 6.5



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นที่เหลือในน้ำกับปริมาณสารส้มและ PACI ที่ความเข้มข้นของ อนุภาคซิลิกาเริ่มต้นเท่ากับ 5 กรัมต่อลิตร และค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 6.5

## 2.6.2 สารประกอบอลูมิเนียม และอลูมิเนียมซิลิเกต

ผลึกของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์หรือ Gibbsite ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) จะเกิดเมื่อค่าความเข้มข้นของอลูมิเนียมสูงกว่าความสามารถในการละลายของสารประกอบ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ที่พีเอชของน้ำใดๆ ดังรูปที่ 2.11 แสดงแผนภูมิความสามารถในการละลาย (Solubility diagram) ของอลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยความสามารถในการละลายน้ำของ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  แสดงดังเส้นสีน้ำเงิน อย่างไรก็ตามหากในน้ำมีซิลิกาจะก่อให้เกิดสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกตได้ เช่น Pyrophyllite ( $\text{AlSi}_2\text{O}_5\text{OH}$ ), และ Kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) โดยความสามารถในการละลายน้ำของ  $\text{AlSi}_2\text{O}_5\text{OH}$  และ  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  แสดงดังเส้นประสีเขียว (ในกรณีที่ความเข้มข้นของซิลิกามีค่า 40 มก./ล.) อย่างไรก็ตามค่าความสามารถในการละลายน้ำของ  $\text{AlSi}_2\text{O}_5\text{OH}$  และ  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  จะลดลง เมื่อความเข้มข้นของซิลิกาเปลี่ยนแปลงจาก 40 มก./ล. เป็น 80 มก./ล. แสดงดังเส้นประสีเขียว (K. Ohno และคณะ, 2010)



รูปที่ 2.11 แผนภูมิความสามารถในการละลาย (Solubility diagram) ของอลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 25 ที่ ความเข้มข้นของซิลิกาที่มีค่า 40 มก./ล. (เส้นประสีเขียว) และที่ความเข้มข้นของซิลิกาที่มีค่า 80 มก./ล. (เส้นสีเขียว)

## 2.7 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันพัฒนาขึ้นมาสำหรับการใช้งานที่ไม่ได้ใช้แยกเกลือออกจากน้ำ กร่อยหรือน้ำทะเลเหมือนเมมเบรนชนิดรีเวอร์สออสโมซิส แต่กลไกการทำงานของกระบวนการกรองนาโนฟิลเตรชันจะเหมือนกับกลไกการทำงานของกระบวนการกรองรีเวอร์สออสโมซิส เมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชันส่วนใหญ่เป็นเยื่อเชิงประกอบที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 2 นาโนเมตร มีโครงสร้างที่เปิดกว่าเมมเบรนชนิดรีเวอร์สออสโมซิส และมีช่วงความดันในการดำเนินการประมาณ 5 - 20 บาร์ ซึ่งต่ำกว่าของรีเวอร์สออสโมซิสมาก (ดังตารางที่ 2.11) ทั้งนี้ กระบวนการกรองนาโนฟิลเตรชัน สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลมากกว่า 200 กรัมต่อโมล และอออนที่มีหลายวาเลนซ์ และสามารถกำจัดเกลือ ไตรฮาโลมีเทน โลหะหนัก สี ไวรัสทุกชนิด แบคทีเรีย และพาราสิต ออกจากน้ำได้ ดังรูปที่ 2.12 (ปรภาภรณ์ ผาติสุนทร, 2546)

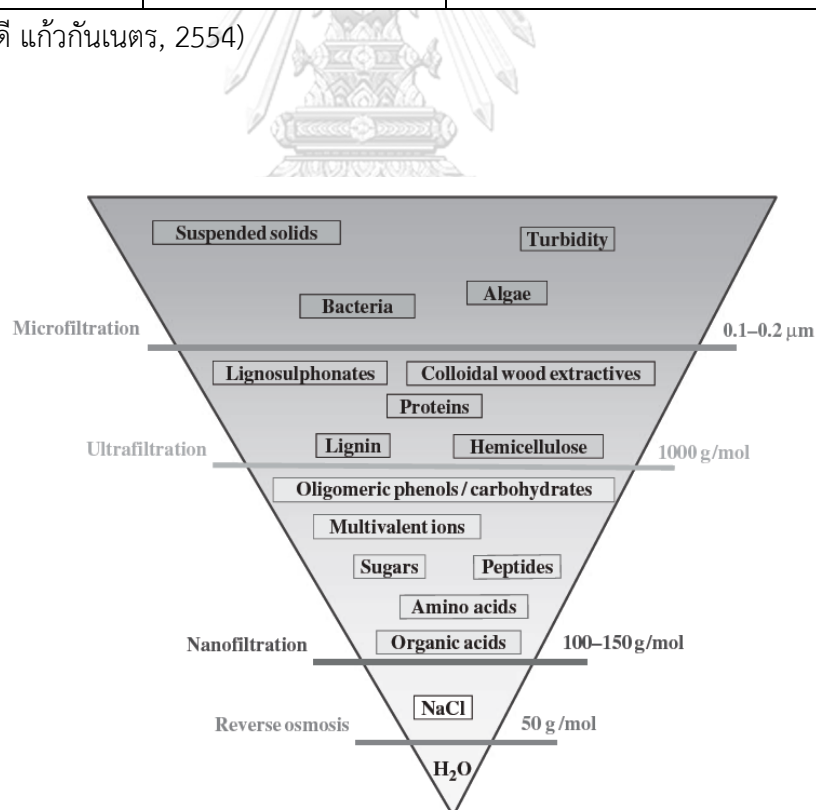


ประโยชน์ของกระบวนการเมมเบรนเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีแบบธรรมดา ได้แก่ เป็นการกรองที่แยกออกอย่างสมบูรณ์ตรงกันข้ามกับการกรองแบบติดค้างที่ชั้นกรอง การแยกของแข็งออกจากของเหลวโดยไม่มีการเติมสารเคมีเพิ่ม ขนาดกะทัดรัด ช่วยลดต้นทุนในการเดินระบบและการบำรุงรักษา ใช้เครื่องจักรทำงานแทนมนุษย์ และคุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองคงที่และมีคุณภาพสูง แม้ว่าคุณภาพแหล่งน้ำเปลี่ยน

ตารางที่ 2.11 อัตราการไหลและความดันที่สัมพันธ์กับชนิดของเมมเบรนแบบต่าง ๆ

กระบวนการเมมเบรน	แรงดันเดินระบบ (บาร์)	ฟลักซ์น้ำสะอาด (ล./ตร.ม.ชม.)
ไมโครฟิลเตรชัน (MF)	0.1-2.0	มากกว่า 50
อัลตราฟิลเตรชัน (UF)	1.0-5.0	10-50
นาโนฟิลเตรชัน (NF)	5.0-20	1.4-12
รีเวอร์สออสโมซิส (RO)	10-100	0.05-1.4

ที่มา: (ผภาวดี แก้วกันเนตร, 2554)



(M. Manttari และคณะ, 2013)

รูปที่ 2.12 ความสามารถในการแยกของกระบวนการเมมเบรนแต่ละชนิด ๆ

### 2.7.1 กลไกในการทำงานหรือการกำจัดสิ่งเจือปนของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

กลไกในการทำงานของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเหมือนกันกับการทำงานของรีเวอร์สออสโมซิส ต่างกันที่แรงขับที่ใช้ กล่าวคือ นาโนฟิลเตรชันจะใช้แรงดันที่ต่ำกว่ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ทำให้ความสามารถในการกำจัดสารละลายแตกต่างกัน ซึ่งการทำงานของเมมเบรนทั้งสองชนิดนี้เกี่ยวข้องกันโดยตรงกับกระบวนการออสโมซิส (Osmosis) สำหรับกลไกในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ได้แก่

2.7.1.1 กลไกทางกายภาพ (Steric Exclusion) เนื่องจากนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนมีขนาดรูพรุนที่เล็กมาก (ประมาณ 2 นาโนเมตร) สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 กรัมต่อโมล จะถูกกำจัดโดยวิธีกรองติดค้าง (Sieve)

2.7.1.2 กลไกเนื่องจากแรงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตย์ (Donnan Exclusion หรือ Electrostatic Interaction) เป็นแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนกับอออน เนื่องจากมีประจุทางไฟฟ้าเหมือนกัน เช่น นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีประจุลบ จะเกิดแรงผลักทางไฟฟ้ากับอออนประจุลบ ทั้งนี้ อออนลบที่มีประจุทางไฟฟ้ามาก จะถูกกำจัดได้มากกว่า เนื่องจากมีแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างเมมเบรนมากกว่า

### 2.7.2 โมเดลสำหรับการเคลื่อนที่ของตัวทำละลายและตัวถูกละลายผ่านนาโนฟิลเตรชัน

#### 2.7.2.1 แบบจำลองการละลาย-การแพร่ (Solution-Diffusion Model) (พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 2557)

แบบจำลองนี้อธิบายถึงการแพร่ (Diffusion) ผ่านเมมเบรนของตัวทำละลายหรือน้ำ และตัวถูกละลายหรืออนุภาคที่ต้องการแยก ตัวทำละลายและตัวถูกละลายมีความสามารถในการละลายในเยื่อเมมเบรนและแรงดันในการแพร่ผ่านเมมเบรนต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงกับฟลักซ์ของน้ำ (Water flux) และฟลักซ์ของตัวถูกละลาย (Solute flux) โดยแรงดันในการแพร่ผ่านเมมเบรนของตัวทำละลายขึ้นอยู่กับผลต่างของความดันคร่อมของเมมเบรน ดังสมการที่ 2.22 และแรงดันในการแพร่ผ่านเมมเบรนของตัวถูกละลายขึ้นอยู่กับผลต่างของความเข้มข้น ดังสมการที่ 2.23

$$J = K_w (TMP - \Delta \Pi)$$

(สมการที่ 2.22)

เมื่อ $J$	คือ ฟลักซ์ของน้ำสะอาด
$K_w$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของเฟสน้ำ (Water mass transfer coefficient)
TMP	คือ แรงดันที่ผ่านเมมเบรน
$\Delta T$	คือ แรงดันออสโมซิสที่ผ่านเมมเบรน

$$F_s = K_s \times (C_f - C_p) \quad (\text{สมการที่ 2.23})$$

เมื่อ $F_s$	คือ ฟลักซ์ของตัวถูกละลาย
$K_s$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของอนุภาคหรือมลสาร (Pollution mass transfer coefficient)
$C_f$	คือ ความเข้มข้นของน้ำขาเข้า (Feed water)
$C_c$	คือ ความเข้มข้นของน้ำเข้มข้น (Concentrate)

เนื่องจากความเข้มข้นของไอออนในน้ำสะอาด (Permeate) คืออัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของตัวถูกละลายกับฟลักซ์ของน้ำขาเข้า ดังสมการที่ 2.24 จึงสามารถหาเปอร์เซ็นต์การกำจัด (% Rejection) ได้ ดังสมการที่ 2.25 และ 2.26

$$C_p = \text{Salt flux/Water flux} = F_s/F_w \quad (\text{สมการที่ 2.24})$$

$$\% \text{ Rejection} = [1 - (F_s / (C_f \cdot F_w))] \times 100 \quad (\text{สมการที่ 2.25})$$

$$\% \text{ Rejection} = [(C_f - C_p) / C_f] \times 100 \quad (\text{สมการที่ 2.26})$$

### 2.7.2.2 แบบจำลองความต้านทานเชิงอนุกรม (Resistance-in-series Model) (พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 2557)

แบบจำลองนี้แสดงความสัมพันธ์ของฟลักซ์ของน้ำสะอาดกับค่าความต้านทานทั้งหมด (Total Resistance,  $R_t$ ) ความต้านทานเนื่องเมมเบรน (Membrane Resistance,  $R_m$ ) และความต้านทานเนื่องจากการอุดตัน (Fouling Resistance,  $R_f$ ) จากทดลองสามารถหาความฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ความดันผ่านเมมเบรนใด ๆ ดังสมการที่ 2.27 และ 2.28 ทั้งนี้สามารถหาค่า  $R_m$  โดยการเดินระบบโดยในน้ำ DI เป็นน้ำเข้าระบบ ( $R_f=0$ )

$$J = (\text{TMP} - \Delta\Pi) / \mu(R_t) \quad (\text{สมการที่ 2.27})$$

$$J = (\text{TMP} - \Delta\Pi) / \mu(R_m + R_f) \quad (\text{สมการที่ 2.28})$$

เมื่อ	J	คือ ฟลักซ์ของน้ำสะอาด (ชลบ.ม./ชตร.ม.นาที่)
	TMP	คือ ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)
	$\Delta\Pi$	คือ แรงดันออสโมซิสที่ผ่านเมมเบรน
	$\mu$	คือ ความหนืดของเฟสที่ต้องการกรอง ที่อุณหภูมิน้ำ 30 °C มีค่า 0.00089512 กก./ม.วินาที
	$R_t$	คือ ค่าความต้านทานทั้งหมด ( $\text{ม.}^{-1}$ )
	$R_m$	คือ ค่าความต้านทานเนื่องจากเมมเบรน ( $\text{ม.}^{-1}$ )
	$R_f$	คือ ค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตัน ( $\text{ม.}^{-1}$ )

### 2.7.2.3 แบบจำลองของ Nernst-Planck (Nernst-Planck Model) (R. Yagnaseni, 2017)

แบบจำลองนี้ใช้อธิบายค่าฟลักซ์ของไอออน (Solute flux) ดังสมการที่ 2.29 โดยเทอมแรกของสมการแสดงถึงค่าฟลักซ์เนื่องจากการแพร่ (Diffusion) เนื่องจากผลต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) เทอมที่สองแสดงถึงค่าฟลักซ์เนื่องจากอิเล็กโตรโมแกรม

(Electromigration) เนื่องจากผลต่างของศักย์ไฟฟ้า (Electrical potential gradient) ของเมมเบรน ทำให้อิออนในสารละลายเคลื่อนที่ และเทอมสุดท้ายแสดงถึงค่าฟลักซ์เนื่องจากการพา (Convection) ซึ่งมาจากผลต่างของแรงดันที่ผ่านเมมเบรน (Pressure gradient) เป็นการเคลื่อนที่ของอิออนตามตัว ทำละลายผ่านรูของเมมเบรน แสดงกลไกการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายผ่านเมมเบรน ดังรูปที่ 2.13 โดยแบบจำลองของ Nernst-Planck พัฒนามาจากแบบจำลอง Hybrid (Hybrid model, HM) และแบบจำลอง DSPM (Donnan–Steric partitioning pore model, DSPM) (W. R. Bowen และ H. Mukhtar, 1996) ทั้งนี้แบบจำลองของ Nernst-Planck กำหนดให้รูพรุนของเมมเบรนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกและอนุภาคอิออนมีลักษณะเป็นทรงกลม

$$J_i = \left( -D_{i,p} \frac{dC_i}{dx} \right) - \left( \frac{Z_i C_i D_{i,p}}{RT} F \frac{d\varphi}{dx} \right) + (K_{i,c} C_i J_w) \quad (\text{สมการที่ 2.29})$$

เมื่อ  $J_i$  คือ ฟลักซ์ของอิออน (โมล/ตร.ม.ชั่วโม่ง)

$D_{i,p}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเมมเบรน (ตร.ม/วินาที)

$C_i$  คือ ความเข้มข้นของอิออน (โมล/ลบ.ม.)

$Z_i$  คือ วาเลนซ์ของอิออน

$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (จูล/โมล.เคลวิน)

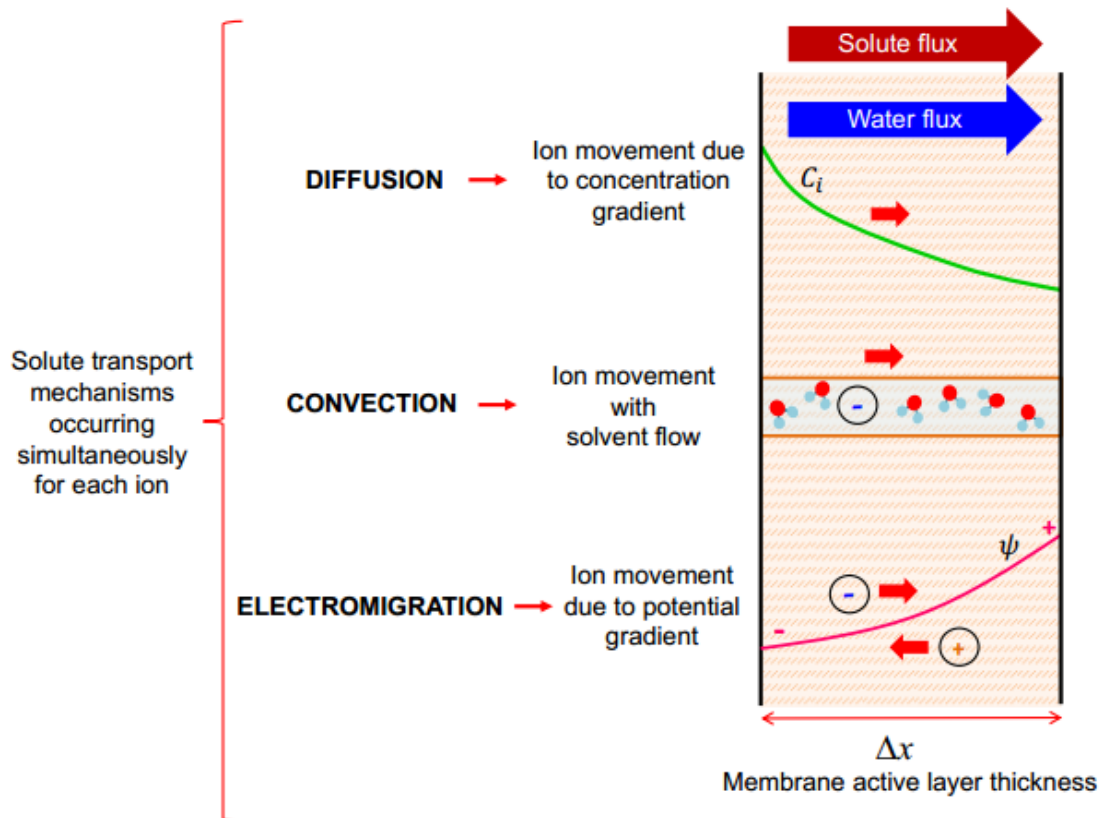
$T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

$F$  คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (คูลอมบ์/โมล)

$\varphi$  คือ ศักย์ไฟฟ้าของเมมเบรน (โวลต์)

$K_{i,c}$  คือ สัมประสิทธิ์การขัดขวางการพา

$J_w$  คือ ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด (เมตร/ชั่วโม่ง)



รูปที่ 2.13 กลไกการเคลื่อนที่ของไอออนหรือตัวถูกละลายโดยแบบจำลองของ Nernst-Planck (Nernst-Planck Model)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.7.3 นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีขายในท้องตลาด

นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีขายในท้องตลาด โดยปกติแล้วมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสองวาเลนต์ (Divalent ion) มากกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับเปอร์เซ็นต์การกำจัดโซเดียม เมมเบรนแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การนำไปใช้ โดยทั่วไปเมมเบรนส่วนใหญ่ผลิตจากพอลิเมอร์ (Polymer) เช่น พอลิเอไมด์ (Polyamide, PI), พอลิเอมีน (Polyamine, PA), พอลิอีเทอร์ซัลโฟน (Polyethersulfone, PES), พอลิซัลโฟน (Polysulfone, PS) และ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinylalcohol, PVA) เป็นต้น ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนทางพาณิชย์ สำหรับบำบัดน้ำ

ชนิดของ เมมเบรน	วัสดุ	พีเอช	อุณหภูมิ สูงสุด (°C)	ความดัน สูงสุด (บาร์)	เปอร์เซ็นต์การกักเก็บ (%)
NF270	PA	3-10	40	41	40-60 CaCl <sub>2</sub> และ > 97 MgSO <sub>4</sub>
NF90	PA	3-10	45	41	85-95 NaCl และ > 97 MgSO <sub>4</sub>
NF200	PA	3-10	45	41	35-50 CaCl <sub>2</sub> และ > 97 MgSO <sub>4</sub>
NF1	PA	3-10	50	83	80 NaCl และ 90 MgSO <sub>4</sub>
NF2	PA	3-10	50	83	55 NaCl และ 97 MgSO <sub>4</sub>
NF3	PA	3-10	50	83	50 NaCl และ 97 MgSO <sub>4</sub>
NF4	PA	3-10	50	83	35 NaCl และ 98 MgSO <sub>4</sub>
NTR 7430HG	PVA	2-11	90	30	30 NaCl
NTR 70HG	PVA	2-8	60	50	93 NaCl

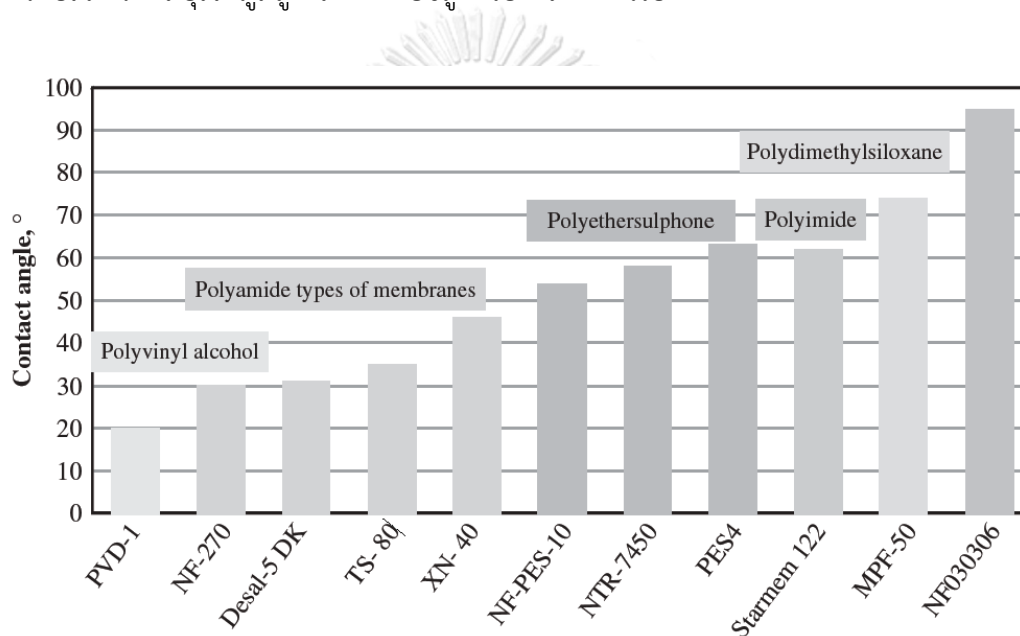
ที่มา: (M. Manttari และคณะ, 2013)

#### 2.7.4 คุณสมบัติของเมมเบรน

คุณสมบัติของเมมเบรนจะแตกต่างกันตามแต่ละบริษัทผู้ผลิตเมมเบรน แสดงดังตารางที่ 2.12 ซึ่งชนิดของเมมเบรนมีบทบาทสำคัญต่อ เปอร์เซ็นต์การกำจัด (% Rejection) ค่าฟลักซ์ของน้ำ และ สภาวะที่เหมาะสมกับเมมเบรนชนิดนั้น ๆ คุณสมบัติของเมมเบรนโดยทั่วไปพิจารณาจาก ลักษณะ ความชอบ/ไม่ชอบน้ำ และประจุของเมมเบรน ทั้งนี้ คุณสมบัติของเมมเบรนดังกล่าว ขึ้นอยู่กับหลาย ปัจจัย ได้แก่ ค่าพีเอชของน้ำ และความแรงไอออน (Ionic strength) เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.7.4.1 ลักษณะความชอบน้ำ (Hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของเมมเบรน

เมมเบรนที่ชอบน้ำจะเกิดการอุดตันของเมมเบรนน้อยกว่าเมื่อใช้กับการบำบัดน้ำ ในขณะที่เมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำจะใช้แยกน้ำมันและตัวทำละลาย (Solvent) สำหรับเมมเบรนที่ชอบน้ำ จะมีมุมสัมผัส (Contact angle) น้อยกว่า 40 องศา (มุมสัมผัสต่ำ แสดงว่าเมมเบรนมีลักษณะชอบน้ำ) เมมเบรนที่ชอบน้ำส่วนใหญ่ผลิตจากเซลลูโลส (Cellulose) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) และโพลีเอไมด์ (Polyamide, PA) ดังรูปที่ 2.14 แต่อย่างไรก็ตามเมมเบรนที่ชอบน้ำส่วนใหญ่ไม่ทนกับสถานะที่มีอุณหภูมิสูงและค่าพีเอชสูงหรือต่ำมากเกินไป



(M. Manttari และคณะ, 2013)

รูปที่ 2.14 ค่ามุมสัมผัสของเมมเบรนแต่ละประเภท แบ่งตามวัสดุที่ใช้ผลิตเมมเบรน

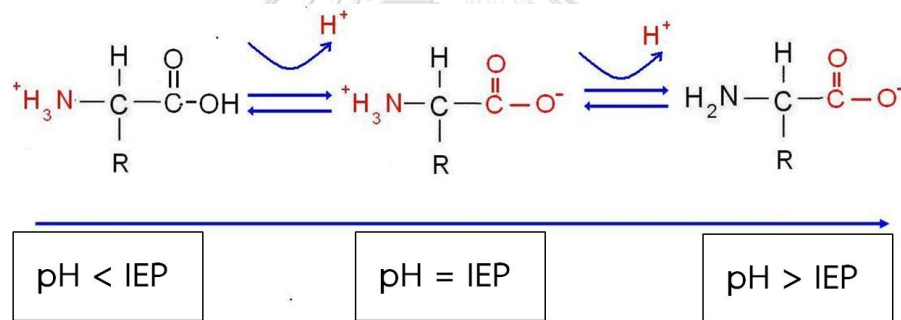
### 2.7.4.2 ประจุของเมมเบรน (Change of membrane)

ประจุของเมมเบรนขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำและจุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point, IEP) ทั้งนี้ ค่าพีเอชของน้ำสามารถเปลี่ยนประจุได้ทั้งประจุของเมมเบรนและประจุของอนุภาคที่ต้องการแยก ถ้าประจุของเมมเบรนและอนุภาคที่ต้องการแยกเป็นชนิดเดียวกันจะทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้า



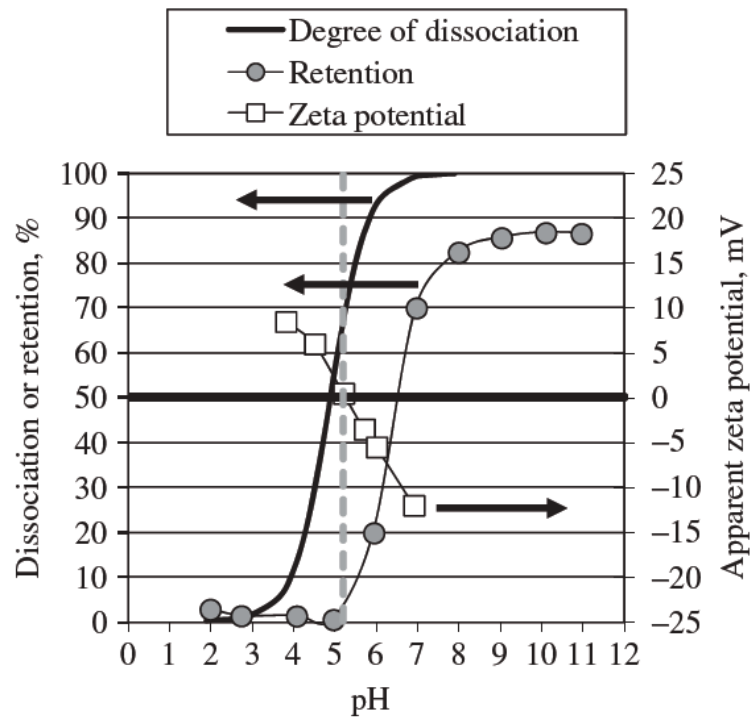
ซึ่งกันและกัน ทำให้เมมเบรนสามารถกักเก็บอนุภาคเหล่านั้นได้ในน้ำเข้มข้น (Concentrate) ไม่ผ่านมายังน้ำสะอาด (Permeate) และเมมเบรนมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตันน้อยลง

จุดไอโซอิเล็กทริก คือ ค่าพีเอชที่ประจุรวมของโมเลกุลเป็นศูนย์ ถ้าค่าพีเอชของน้ำมีค่าสูงกว่าจุดไอโซอิเล็กทริกโมเลกุลจะมีประจุเป็นลบ และถ้าค่าพีเอชของน้ำมีค่าต่ำกว่าจุดไอโซอิเล็กทริกโมเลกุลจะมีประจุเป็นบวก ดังรูปที่ 2.15 เช่นเดียวกับเมมเบรนที่มีจุดไอโซอิเล็กทริกค่าหนึ่งเช่นกันพบว่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บ (% Retention) ที่ค่าพีเอชของน้ำต่ำกว่า 5.2 มีค่าเป็นศูนย์ จนกระทั่งค่าพีเอชมากกว่า 5.2 (จุดไอโซอิเล็กทริกของ NF270 เมมเบรน คือ 5.2) เมมเบรนแสดงประจุลบ เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างเมมเบรนกับกรดอินทรีย์ (โดยปกติกรดอินทรีย์ที่พบในธรรมชาติ จะมีประจุรวมเป็นลบ) ดังรูปที่ 2.16 ทั้งนี้ โดยส่วนใหญ่แล้ว นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเอไมด์ (Polyamide) จะมีจุดไอโซอิเล็กทริกที่ค่าพีเอชประมาณ 3.5-6



(พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์, 2557)

รูปที่ 2.15 ประจุของกรดอินทรีย์ที่จุดต่ำกว่าและสูงกว่าจุดไอโซอิเล็กทริก



(M. Manttari และคณะ, 2013)

รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดของกรดอินทรีย์กับค่าพีเอช ในกระบวนการกรองด้วย NF270

#### 2.7.4.3 ลักษณะผิวหน้าของเมมเบรน (Surface topography)

เมมเบรนที่มีผิวหน้าเรียบจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตันน้อยกว่าเมมเบรนที่มีผิวหน้าขรุขระ ซึ่งสามารถบอกได้ด้วยค่า  $R_{rms}$  (Root-mean-squared Roughness) ซึ่งเมมเบรนที่มีค่า  $R_{rms}$  ต่ำ หมายถึงเมมเบรนนั้นมีผิวหน้าเรียบมีความขรุขระต่ำ โดยค่า  $R_{rms}$  ของเมมเบรนทางการค้าทั่วไป แสดงดังตารางที่ 2.13 พบว่า ชนิดของเมมเบรนที่มีผิวหน้าเรียบ ได้แก่ Sepro NF 6, NF 2A, HL, NE 70, NF 270, DL, DK และ NTR 728HL เป็นต้น

**ตารางที่ 2.13** ค่าความขรุขระของเมมเบรนทางการค้าทั่วไป ที่ทดสอบกับพื้นที่ 5x5 ไมโครตาราง

เมตร

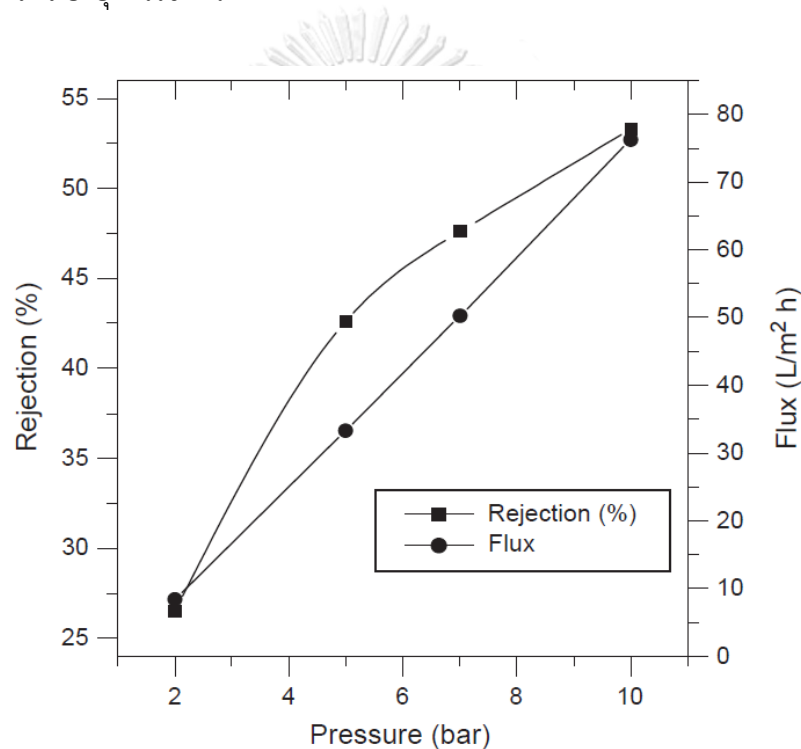
ชนิดของ NF	องค์ประกอบของพื้นผิว เมมเบรน (Top Layer)	ค่าความขรุขระของเมมเบรน (นาโนเมตร)	อ้างอิง
HL	Semi-aromatic PA	7.2	C.Y. Tang และ คณะ (2009)
NF 270	Semi-aromatic PA	9.0	
NE 90	Semi-aromatic PA	72.4	
NF 90	Semi-aromatic PA	129.5	
NTP729HL	Semi-aromatic PA	18.4	
NE 70	Semi-aromatic PA	8.0	
DK	Semi-aromatic PA	16.4	
DL	Semi-aromatic PA	13.3	
NTR7450	Hydrophillic PES	18	K. Boussu และ คณะ (2005)
N30F	Hydrophillic PES	39	
NP10	Hydrophillic PES	27	
UTC-20	Semi-aromatic PA	48	
Sepro NF 6	Semi-aromatic PA	6.31	J. Lin และคณะ (2016)
Sepro NF 2A	Semi-aromatic PA	6.67	

**2.7.5** สภาวะการเดินระบบของนาโนฟิลเตรชัน

จากแบบจำลองการละลาย-การแพร่ (Solution-diffusion Model) พบว่า ความดัน อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของอนุภาคที่ต้องการแยก มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัด (% Rejection) โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.7.5.1 ความดันในการเดินระบบ

ความดันในการเดินระบบมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัด เมื่อความดันสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำสะอาด (Permeate) เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ความดันไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของตัวถูกละลาย (Solute flux) จึงทำให้การเพิ่มความดันไม่ได้ส่งเสริมให้ตัวถูกละลายรั่วไหลไปสู่ น้ำสะอาด ความเข้มข้นของอนุภาคในน้ำสะอาดจึงมีค่าต่ำ กล่าวคือ มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดอนุภาคสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.17 แต่อย่างไรก็ตามความดันในการเดินระบบที่สูงเกินไปจะส่งผลให้เมมเบรนถูกกดอัด ส่งผลให้เมมเบรนเสียประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานต่ำ



(H. Saitua และคณะ, 2011)

รูปที่ 2.17 เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนและฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ระดับความดันของระบบต่าง ๆ ในกระบวนการบำบัดน้ำบาดาล

### 2.7.5.2 อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารละลายที่เข้าสู่ระบบจะเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำ กล่าวคือ ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความหนืด (Kinetic Viscosity) ของน้ำจะมีค่าลดลง

### 2.7.5.3 ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย

ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เข้าสู่ระบบมีผลต่อค่าฟลักซ์ของตัวถูกละลาย (Solute flux) โดยอ้างอิงแบบจำลองการละลาย-การแพร่ เมื่อผลต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) เพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์ของตัวถูกละลายจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การกำจัด (% Rejection) ลดลง ดังนั้นการสะสมของสารละลายในโมดูลทำให้ค่าฟลักซ์ของตัวถูกละลาย (Solute flux) สูงขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการระบายน้ำเข้มข้นออกจากโมดูลเพื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย

ทั้งนี้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายสัมพันธ์กับ อัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) (ตั้งสมการที่ 2.30) โดยปกติเราต้องการให้ระบบมีอัตราการผลิตน้ำสะอาด (Permeate) สูง กล่าวคือ อัตราการนำน้ำกลับคืนมีค่าสูง แต่หากอัตราการนำน้ำกลับคืนมีค่าสูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดการสะสมของสารละลายในโมดูลทำให้ค่าฟลักซ์ของตัวถูกละลาย (Solute flux) สูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัด (% Rejection) จะลดลงเช่นกัน และการสะสมของสารละลายในโมดูลก่อให้เกิดสภาวะที่เสี่ยงต่อการตกผลึกของสารประกอบเกลือ

$$\% \text{ Recovery} = (Q_p/Q_f) \times 100 \quad (\text{สมการที่ 2.30})$$

เมื่อ  $Q_p$  คือ อัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ผลิตได้ (Permeate)

$Q_f$  คือ อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ (Feed water)

### 2.7.6 การอุดตันของเมมเบรน (Fouling)

การอุดตันของเมมเบรน ส่งผลให้ฟลักซ์ของน้ำสะอาดลดลง อัตราการผลิตน้ำสะอาดลดลง มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ค่าดูแลรักษา ค่าทำความสะอาดเมมเบรน และทำ

ให้อายุการใช้งานของเมมเบรนลดลง ดังนั้น การควบคุมสถานะของระบบจึงมีความสำคัญ เพื่อป้องกันการเกิดการอุดตันของเมมเบรน

#### 2.7.6.1 กลไกการเกิดการอุดตัน

กลไกการเกิดการอุดตันเกี่ยวข้องกับโพลาริเซชันความเข้มข้น (Concentration polarization) และความดันออสโมซิส (Osmotic pressure) สำหรับโพลาริเซชันความเข้มข้น คือการสะสมของตัวถูกละลายในชั้นฟิล์มบราวเดอร์รี (Boundary layer) ของเมมเบรน ที่ด้านน้ำขาเข้า จนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำขาเข้าหลายเท่า ซึ่งโพลาริเซชันความเข้มข้นจะนำไปสู่การอุดตันของเมมเบรนเนื่องจาก การดูดซับ การเกิดชั้นเค้ก และการเกิดชั้นเจล (S. S. Sablani และคณะ, 2001) นอกจากนี้ การสะสมความเข้มข้นของตัวทำละลายทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์จะทำให้ค่าความดันออสโมซิสเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงดันผ่านเมมเบรน (Transmembrane pressure, TMP) และฟลักซ์ของน้ำสะอาด (Permeate flux) ลดลง

รูปแบบของการอุดตันของเมมเบรน แบ่งได้เป็น 4 รูปแบบ (R. Field, 2010) ได้แก่

- 1) การดูดติดผิว (Adsorption) เนื่องจากแรงปฏิกิริยาระหว่างเมมเบรนและอนุภาค รูปแบบการอุดตันลักษณะนี้ อาจพบได้บนผิวของเมมเบรนหรือในรูพรุนของเมมเบรน
- 2) การอุดตันภายในรูพรุน (Pore blocking) อนุภาคจะเข้าไปอุดตันในรูพรุนของเมมเบรน อาจพบได้ทั้งการอุดตันเพียงบางส่วนของรูพรุน หรืออนุภาคอุดตันเต็มรูพรุน
- 3) การเกิดชั้นเค้ก (Cake layer formation) เกิดชั้นเค้กอยู่บนผิวของเมมเบรน เนื่องจากการสะสมตัวของอนุภาค โดยอนุภาคจะมีขนาดใหญ่การรูพรุนของเมมเบรน
- 4) การเกิดชั้นเจล (Gel layer formation) เกิดชั้นเจลบริเวณผิวของเมมเบรนเกิดจากโพลาริเซชันความเข้มข้น (Concentration polarization)

### 2.7.6.2 ชนิดของสารอุดตัน (Foulant)

การอุดตันของเมมเบรน แบ่งได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ การอุดตันที่เกิดจากสารอินทรีย์ (Organic fouling) การอุดตันที่เกิดจากคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยต่าง ๆ (Colloidal fouling) การอุดตันที่เกิดจากผลึกของสารอนินทรีย์ (Inorganic fouling) และ การอุดตันที่เกิดจากจุลินทรีย์ (Biological fouling) ชนิดของสารอุดตัน (Foulant) ของแต่ละประเภทของการอุดตัน ดังตารางที่ 2.14

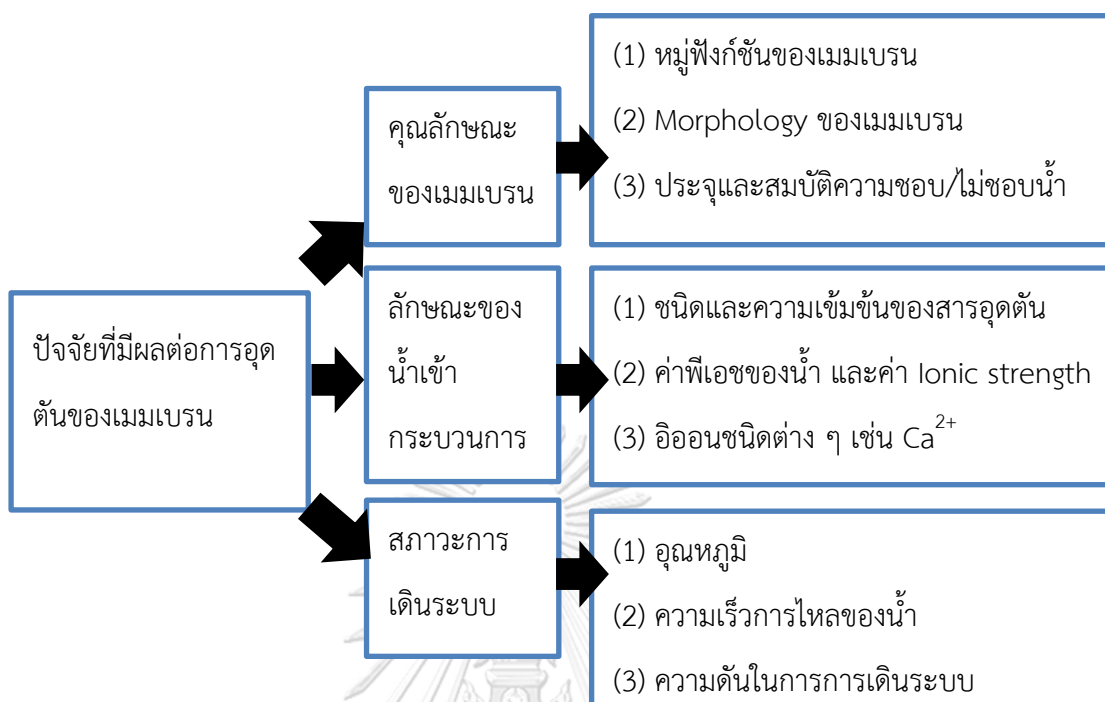
ตารางที่ 2.14 ประเภทของการอุดตันและชนิดของสารอุดตัน

ประเภทของการอุดตัน	ชนิดของสารอุดตัน (Foulant)
Organic fouling	สารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM), สารอินทรีย์ในน้ำเสีย (EfOM), โพรตีน และ พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide)
Colloidal fouling	แร่ดินเหนียว, คอลลอยด์ซิลิกา, สารประกอบโลหะออกไซด์ (Fe, Al และ Mn), คอลลอยด์ของสารอินทรีย์ สารแขวนลอย และผลึกของเกลือ
Inorganic fouling	CaSO <sub>4</sub> , CaCO <sub>3</sub> , BaSO <sub>4</sub> และตะกอนของซิลิกา
Biological fouling	แบคทีเรีย และฟองไฉ

ที่มา: (A. W. Mohammad และคณะ, 2015)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ทั้งนี้ การอุดตันของเมมเบรนเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ลักษณะของน้ำเข้ากระบวนการ คุณสมบัติของเมมเบรน และสภาวะการเดินระบบ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.18 สำหรับปัจจัยด้านลักษณะของน้ำเข้ากระบวนการ โดยทั่วไปสำหรับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและรีเวอร์สออสโมซิส จะกำหนดให้น้ำที่จะเข้ากระบวนการจะต้องมีค่าดัชนีความหนาแน่นตะกอน (Slit Density Index, SDI) มีอยู่ในช่วง 3-5 หรือน้อยกว่า เพื่อป้องกันการอุดตันเนื่องจากสารคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอย ดังนั้น การเตรียมน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันให้มีคุณสมบัติเหมาะสมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากน้ำที่มีคุณสมบัติไม่เหมาะสมอาจสร้างความเสียหายให้กับเมมเบรน ก่อให้เกิดการอุดตันของเมมเบรน และทำให้อายุการใช้งานของเมมเบรนลดลง



(C. Y. Tang และคณะ, 2011)

รูปที่ 2.18 ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน

#### 2.7.7 พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมีหรือการทำ CIP

เมมเบรนที่ผ่านการใช้งานจะค่อย ๆ เกิดการอุดตัน อย่างไรก็ตามการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาในการเดินระบบ คือ 1) อัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ถูกเทียบค่า (Normalized Permeate Flow, NPF) 2) แรงดันลดหรือแรงดันแตกต่างที่ถูกเทียบค่า (Normalized Pressure Drop, NPD) และ 3) ร้อยละของการยอมให้เกลือผ่านที่ถูกเทียบค่า (Normalized Salt Passage, NSP) โดยระบบจะหยุดเดินเพื่อทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมีหรือการทำ CIP เมื่อ 1) NPF ลดลง 10 - 15 เปอร์เซ็นต์ 2) NPD เพิ่มขึ้น 15 - 25 เปอร์เซ็นต์ และ 3) NSP เพิ่มขึ้น 5 - 10 เปอร์เซ็นต์ พารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์หนึ่งเกิดก่อนหรือระดับน้ำให้ถึงเก็บน้ำสะอาดเต็มตามเกณฑ์ของการประปานครหลวง (การประปานครหลวง, 2556) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ จะใช้ค่า NPF ในการพิจารณาเนื่องจากสามารถเก็บผลการทดลองได้แม่นยำกว่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ และสามารถคำนวณค่า NPF ได้ ดังสมการที่ 2.31



$$NPF = Qp \times (NDP_{start}/NDP_{today}) \times MC \quad (\text{สมการที่ 2.31})$$

- เมื่อ NPF คือ อัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ถูกเทียบค่า (ลบ.ม./ชม.)
- Qp คือ อัตราการไหลของน้ำสะอาดที่อุณหภูมิ 25 C (ลบ.ม./ชม.)
- MC คือ สัมประสิทธิ์การหดตัวของเมมเบรนหรือสัมประสิทธิ์อายุขัย ซึ่งผู้ผลิตสมัยใหม่จะกำหนดให้  $MC = 1$

$NDP_{start}$  คือ แรงดันขับเคลื่อนสุทธิในระหว่างการเริ่มต้นเดินระบบ (บาร์)

$NDP_{today}$  คือ แรงดันขับเคลื่อนสุทธิในขณะที่วัด (บาร์)

โดยสามารถหาคือ NDP ได้ ดังสมการที่ 2.32

$$NDP = P_{fc,avg} - P_p - P_{osm} \quad (\text{สมการที่ 2.32})$$

- เมื่อ  $P_{fc,avg}$  คือ ความดันของน้ำเข้าระบบและน้ำเข้มข้นเฉลี่ย (บาร์) โดยสามารถหา  $P_{fc,avg}$  ได้ ดังสมการที่ 2.33

$$P_{fc,avg} = (P_f + P_c)/2 \quad (\text{สมการที่ 2.33})$$

เมื่อ  $P_f$  คือ ความดันน้ำเข้าระบบ (บาร์)

$P_c$  คือ ความดันน้ำเข้มข้น (บาร์)

$P_p$  คือ ความดันน้ำสะอาด (บาร์)

$P_{osm}$  คือ ความดันออสโมซิส (บาร์) โดยสามารถหาค่า  $P_{osm}$  ได้ ดังสมการที่ 2.34

$$P_{osm} = (C_f + C_c)/2 \times (0.007/100) \quad (\text{สมการที่ 2.34})$$

เมื่อ  $C_f$  คือ ความเข้มข้นของน้ำเข้าระบบ (มก./ล.)

$C_c$  คือ ความเข้มข้นของน้ำเข้มข้น (มก./ล.)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Ghizellaoui และคณะ (2004) ศึกษากระบวนการทำน้ำอ่อน (Water Softening) ด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) ของน้ำบาดาลที่มีความกระด้างทั้งหมด 475-600 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเทอมของหินปูน และไบคาร์บอเนต 320-432 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่า นาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างชั่วคราว ณ ช่วงความดันที่จำกัด ทั้งนี้ ที่ความดันน้ำขาเข้า 2 บาร์ น้ำที่ผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน มีความเข้มข้นของแคลเซียม แมกนีเซียม และไบคาร์บอเนตลดลงร้อยละ 34 40 และ 30 ตามลำดับ

F. Elazhar และคณะ (2013) ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันสำหรับการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาล โดยทำการทดสอบกับนาโนฟิลเตรชันชนิด NF90 และ NF270 ซึ่งเป็นเมมเบรนทางพาณิชย์ (Commercial membrane) จากผลการทดลองพบว่า ที่ความดันน้ำขาเข้า 10 บาร์ คุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันด้วยเมมเบรนชนิด NF90 และ NF270 มีความเข้มข้นของความกระด้างลดลงร้อยละ 96 และ 40 ตามลำดับ เนื่องจาก NF270 มีรูพรุนมากกว่า NF90 และ NF90 มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน (Reverse Osmosis Membrane) ซึ่งสามารถกำจัดไอออนวาเลนซ์เดี่ยวได้ อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการคัดกรองของเมมเบรน (Selectivity of membrane) ขึ้นกับปรากฏการณ์ทางเคมี (Chemical phenomena) ผลของขนาดของรูพรุน (Pore size effect) และผลของประจุ (Charge effect) ของเมมเบรน ภายใต้สภาวะการเดินระบบและชนิดของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน

S. Salvador Cob และคณะ (2012) ศึกษาปัจจัยของการจำกัดอัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) และรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราการคืนน้ำกลับคืนของกระบวนการ NF-RO ให้มีค่ามากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ งานวิจัยได้มุ่งเน้นศึกษาตะกอนของซิลิกาและสารประกอบซิลิเกตซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรน (Fouling) สำหรับความกระด้างทั้งหมดถูกกำจัดโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ก่อนส่งน้ำต่อมายังกระบวนการบำบัดด้วยเมมเบรน จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราการนำน้ำกลับคืนมากกว่า 94 เปอร์เซ็นต์ เกิดการอุดตันของรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรนเนื่องจากตะกอนซิลิกา สารประกอบซิลิเกต และเหล็กออกไซด์ ดังนั้นใน

การเดินระบบที่อัตราการนำน้ำกลับมากกว่า 94 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกาควรถูกกำจัดออกก่อนกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส

S. Salvador Cob และคณะ (2014) ศึกษากระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการตกผลึกทางเคมี (Precipitation) สำหรับกำจัดซิลิกาในน้ำ เพื่อป้องกันกันอุดตันของรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน โดยเลือกใช้สารเคมี 3 ชนิด ได้แก่ เฟอร์ริคคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) อลูมิเนียมคลอไรด์ ( $AlCl_3$ ) และซิลิกาเจล (Silica gel) จากผลการทดลองพบว่าผลึกของ  $Al(OH)_3$  สามารถกำจัดซิลิกาที่ละลายอยู่ในน้ำ (Dissolved silica) ได้ดีที่สุด เมื่อกระบวนการทางเคมีดำเนินไป 10 นาที ความเข้มข้นของซิลิกา ลดลงร้อยละ 99.9 ที่ค่าพีเอช 8.5 โดยใช้ปริมาณ  $AlCl_3$  400 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเทอมของอลูมินัม ทั้งนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณ  $AlCl_3$  ตั้งแต่ 125 - 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเทอมของอลูมินัม สามารถกำจัดซิลิกาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 77.3 เป็นร้อยละ 99.9 อย่างไรก็ตามน้ำที่ผ่านกระบวนการตกผลึกทางเคมีมีปริมาณซิลิกาและอลูมินัมที่หลงเหลืออยู่ในสารละลาย 0.29 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1.27 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากค่าการละลายน้ำของสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) มีค่าน้อยกว่าซิลิกา 10 เท่า ดังนั้น อลูมินัมและซิลิกาที่เหลือจากกระบวนการทางเคมีจึงเกิดเป็นคอลลอยด์ของอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate colloids) เมื่อนำน้ำหลังผ่านกระบวนการบำบัดทางเคมีมาวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution) พบว่า อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาด 0.16 ไมครอน และ 0.52 ไมครอน ปริมาณ 55.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ 41.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ ดังนั้น ในกรณีการกำจัดซิลิกาด้วยกระบวนการทางเคมี (Precipitation) ควรศึกษาหาปริมาณของซิลิกาและอลูมินัมที่หลงเหลืออยู่ที่เพียงพอต่อการเกิดการอุดตันของรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน

Julia M. Frick และคณะ (2014) ศึกษาลักษณะกระบวนการบำบัดขั้นต้นที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis, RO) กระบวนการบำบัดขั้นต้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ กระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟลอคคูเลชัน (Coagulation/Flocculation) การกรองด้วยทราย (Sand filtration) และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular activated carbon, GAC) โดยพิจารณาการทำงานร่วมกันของกระบวนการบำบัดขั้นต้นดังกล่าว ก่อนส่งต่อไปยังกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสเพื่อบำบัดน้ำสำหรับใช้เป็นน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็น พารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ความขุ่น ความกระด้างทั้งหมด ค่าซีโอดี ปริมาณ

ซิลิกา และค่า Silt Density Index (SDI) จากผลการทดลองพบว่า กระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟลอคคูเลชันทำงานร่วมกับการกรองด้วยทรายทำให้ความขุ่นของน้ำลดลงมากที่สุด โดยใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เป็นโคแอกกูแลนต์ โดยน้ำหลังผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส มีความเข้มข้นของเกลือลดลงกว่าร้อยละ 97 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟลอคคูเลชัน โดยใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 420 ppm และ Anionic polyelectrolyte 0.5 ppm พบว่า มีค่าความเข้มข้นของซิลิกาและความกระด้างลดลงร้อยละ 50 และ 30 ตามลำดับ และค่าพีเอชก่อนและหลังผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟลอคคูเลชัน เท่ากับ 8.4 และ 7.15 ตามลำดับ ดังนั้นการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟลอคคูเลชันจึงลดโอกาสในการเกิดการอุดตันของเมมเบรน (Fouling) และคุณภาพน้ำหลังการบำบัดเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็น

M. H. Davood Abadi Farahani และคณะ (2016) ศึกษากระบวนการบำบัดขั้นต้นเพื่อป้องกันการอุดตันของเมมเบรนในกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและรีเวอร์สออสโมซิส สำหรับบำบัดน้ำระบายออก (Blowdown) จากหอหล่อเย็น โดยคุณภาพของน้ำระบายออก มีความกระด้างทั้งหมด 1350 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเทอมของหินปูน และซิลิกา 74.2 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับกระบวนการบำบัดขั้นต้นที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) และกระบวนการโคแอกกูเลชัน/การกรอง (Coagulation-Filtration) จากผลการทดลองพบว่า กระบวนการบำบัดทั้งสองกระบวนการมีประสิทธิภาพที่ดีในการบำบัด โดยน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน/การกรอง และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน มีค่า  $SDI_{15}$  เท่ากับ 2.2 และ 2.0 ตามลำดับ (ผู้ผลิตเมมเบรนแนะนำ ให้มีค่า  $SDI_{15}$  ต่ำกว่า 5) ซึ่งค่า  $SDI_{15}$  เป็นค่าที่ใช้วัดศักยภาพของน้ำของการเกิดตะกอน เพื่อใช้ระบุว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดมาเหมาะสมสำหรับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและรีเวอร์สออสโมซิส หรือไม่ สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ ใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เป็นโคแอกกูแลนต์ ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของ Anionic polyacrylamide 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชของน้ำเท่ากับ 6.5–7.5 ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของน้ำที่ผ่านนาโนฟิลเตรชันและรีเวอร์สออสโมซิส มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 และ 33 ตามลำดับ ทำให้ลดจำนวนการใช้ไมคูล และช่วยทำให้เวลาในการดำเนินระบบก่อนเกิดการอุดตันของเมมเบรนเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟิลเตรชันจึงมีความเหมาะสมในการเป็นระบบบำบัดขั้นต้นมากกว่า

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน โดยพิจารณาจาก ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้น และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

A. M. Al-Rehaili (2003) ศึกษากระบวนการกำจัดซิลิกาในน้ำบาดาล 2 แห่ง ที่มีความเข้มข้นของความกระด้างและซิลิกาแตกต่างกัน โดยผ่านกระบวนการบำบัดทางเคมีและการกรองด้วยทราย สำหรับกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว (Lime softening) ถูกนำมาใช้ในการกำจัดซิลิกา จากผลการทดลองพบว่า ค่าความเข้มข้นของซิลิกาลดลงเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อมีการเติมโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) เช่น เฟอร์ริคคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) เกลือของอลูมินัม และพอลิเมอร์ ในกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว พบว่า สามารถกำจัดซิลิกาได้มากขึ้น เช่น น้ำที่มีการเติมเฉพาะปูนขาว 110 มิลลิกรัมต่อลิตร และโซดาแอช 300 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ความเข้มข้นของซิลิกาจะลดลงร้อยละ 10 แต่เมื่อมีการเติม เฟอร์ริคคลอไรด์ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร สารส้ม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และ โซเดียมอลูมิเนต 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของซิลิกาจะลดลงร้อยละ 16.2, 26.3 และ 42.2 ตามลำดับ กล่าวสรุปได้ว่า การใช้กระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว สามารถกำจัดความกระด้างในน้ำได้ แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกาน้อย แต่หากมีการเติมโคแอกกูแลนต์ร่วมด้วย จะสามารถกำจัดได้ทั้งความกระด้างและซิลิกาในน้ำ ทั้งนี้ การเพิ่มหรือลดปริมาณโคแอกกูแลนต์ ไม่สามารถบอกได้ว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าความกระด้างทั้งหมดอย่างไร

R. Sheikholeslami และคณะ (2001) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชันของซิลิกา (Silica polymerization) รวมถึงประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างเมื่อมีการเติมโซเดียมอลูมิเนต (Sodium aluminate) และปูนขาว-โซดาแอช (Lime-soda ash) โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชันของซิลิกา ได้แก่ ความเข้มข้นของแคลเซียม แมกนีเซียม ซิลิกา และพีเอช จากผลการทดลองพบว่า การเกิดโพลิเมอร์ไรเซชันของซิลิกาเกิดขึ้นกับโมเลกุลของ Monosilicic acid โดยอัตราของการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชันของซิลิกามีค่าสูง ที่ค่าพีเอชประมาณ 5.5-9.5 และที่ 20 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่พีเอช 9 หรือมากกว่า 9 เกิดการแตกตัว (Ionization) ของ Monosilicic acid ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) อยู่ในรูปของอไอออน  $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$  และ  $\text{SiO}_2(\text{OH})_2^-$  ซึ่งอไอออนซิลิกาดังกล่าวนี้ไม่เกิดโพลิเมอร์ไรเซชัน และเมื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของแคลเซียม แมกนีเซียม และซิลิกาต่ออัตราการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชันของซิลิกา โดยทำการทดลองที่ค่าพีเอช 6.5 พบว่า ถ้าความเข้มข้นของซิลิกาสูงกว่าค่าความอิ่มตัวมาก ความเข้มข้นของซิลิกาจะลดลงอย่างรวดเร็วเพื่อเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวที่ความเข้มข้นของ

ซัลเฟต 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ พบว่าความเข้มข้นที่สูงของซัลเฟต แคลเซียม และแมกนีเซียม ส่งผลให้อัตราการเกิดโพลีเมอร์เซชันของซัลเฟตสูงด้วย สำหรับผลของการเติมปูนขาว (Lime) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมปูนขาว 102 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเข้มข้นของซัลเฟตลดลงร้อยละ 46 และ 70 ตามลำดับ โดยค่าพีเอชหลังสิ้นสุดกระบวนการ คือ 9.9

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า กระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง ( $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$ ) ของน้ำบาดาล โดยประสิทธิภาพของการกำจัดความกระด้างขึ้นอยู่กับชนิดของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน ลักษณะสมบัติของน้ำ และสภาวะการเดินระบบ สำหรับประเด็นที่ถูกนำมาพิจารณาของการเลือกใช้กระบวนการเมมเบรนสำหรับปรับปรุงคุณภาพน้ำ คือ อัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) ของระบบ และการอุดตันของเมมเบรน (Fouling) นอกจากความกระด้างของน้ำที่เป็นสาเหตุของการอุดตันของเมมเบรน ยังพบว่าซัลเฟตก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงกับการกำหนดอัตราการนำน้ำกลับคืนของกระบวนการเมมเบรน สำหรับกระบวนการทางเคมีจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า กระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว (Lime-softening) สามารถกำจัดความกระด้างและซัลเฟตในน้ำได้ เนื่องจากซัลเฟตสามารถดูดซับ (Adsorb) บนผิวของผลึก  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg(OH)}_2$  แต่ใช้เวลานานในการกำจัดซัลเฟตและมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดซัลเฟตต่ำ อาจมีสาเหตุมาจากตะกอน  $\text{CaCO}_3$  ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการกำจัดซัลเฟตออกจากน้ำ หรือสภาวะของกระบวนการทางเคมีไม่เหมาะสม เช่น ค่าพีเอช และเวลาในการทำปฏิกิริยา รวมถึงปริมาณผลึก  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg(OH)}_2$  ด้วย ทั้งนี้ เมื่อมีการเติมสารส้มซึ่งเป็นสารโคแอกกูแลนต์เพิ่มลงไป พบว่าสามารถกำจัดซัลเฟตได้เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติมปริมาณสารส้มมากเกินไปจะทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างลดลง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตด้วยกระบวนการตกผลึกทางเคมีของผลึกไฮดรอกไซด์ เนื่องจากซัลเฟตสามารถดูดซับบนผิวของผลึกได้ ซึ่งผลึก  $\text{Al(OH)}_3$  สามารถกำจัดซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ดีที่สุด ใช้เวลาน้อยและมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดซัลเฟตสูง แต่อย่างไรก็ตามยังพบคอลลอยด์อลูมิเนียมซัลเฟตหลงเหลืออยู่ จึงสรุปปัญหาของการใช้กระบวนการทางเคมีในการกำจัดความกระด้างและซัลเฟตของน้ำ ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดความกระด้างและซัลเฟตด้วยกระบวนการทางเคมี คอลลอยด์ที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการบำบัดทางเคมี ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ไม่เหมาะสมกับลักษณะสมบัติของน้ำ เช่น ค่าพีเอช และค่าความเป็นด่าง เนื่องจากกลไกการตกผลึกของ  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Mg(OH)}_2$  และ  $\text{Al(OH)}_3$

เกี่ยวข้องกับค่าพีเอชของน้ำทั้งสิ้น ซึ่งชนิดและปริมาณของสารเคมีที่เติมส่งผลโดยตรงกับค่าพีเอช ทั้งนี้ ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว (Lime softening) มีค่าสูง ขณะที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation/Flocculation) มีค่าประมาณ 6.5-8.0 ในการใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ ดังนั้นการใช้สารเคมีสองชนิดร่วมกันเพื่อลดขั้นตอนของการปรับค่าพีเอชจะถูกนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ด้วย

ดังนั้นการศึกษาระบวนการทางเคมีที่สามารถกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำบาดาลในสถานะที่เหมาะสมกับลักษณะสมบัติของน้ำจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้ การเลือกใช้กระบวนการบำบัดขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบและคุณภาพน้ำที่ต้องการเป็นสำคัญ ผู้วิจัยจึงนำเสนอกระบวนการทางเคมีและกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน สำหรับใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) ก่อนกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสในระบบผลิตน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำจากน้ำบาดาล เพื่อกำจัดความกระด้างและซิลิกา ซึ่งเป็นสาเหตุของการอุดตันของเมมเบรน (Fouling) ช่วยลดภาระการกรองของรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรนทำให้เดินระบบได้นานขึ้น

### บทที่ 3

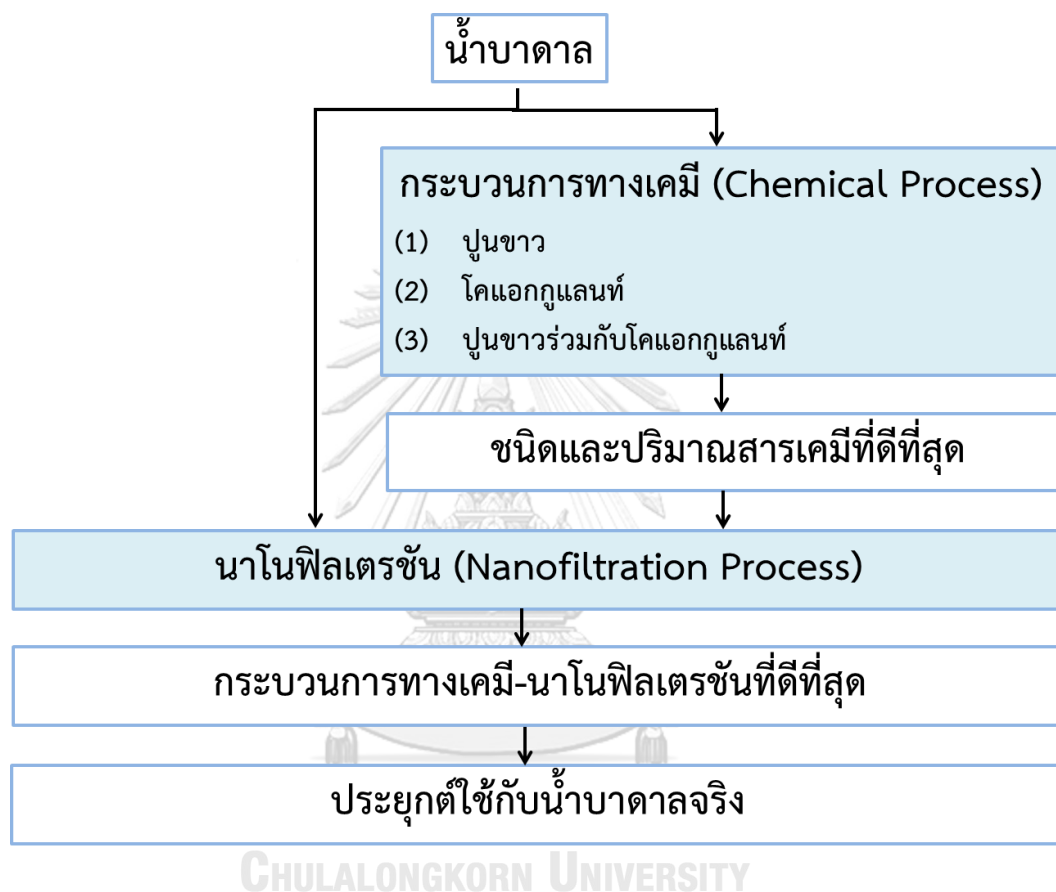
#### วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการบำบัดขั้นต้นที่เหมาะสมก่อนจะเข้าสู่กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสเพื่อผลิตน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำจากน้ำบาดาล ซึ่งกระบวนการบำบัดขั้นต้นดังกล่าวจะสนใจพารามิเตอร์ทั้งความกระด้างและซัลเฟตในน้ำ เนื่องจากความกระด้างและซัลเฟตส่งผลต่อการอุดตันของเมมเบรน รวมถึงเป็นสาเหตุของตะกอนในระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำ สำหรับกระบวนการบำบัดขั้นต้นที่เลือกศึกษา ได้แก่ กระบวนการบำบัดทางเคมี และกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน เนื่องจากสามารถกำจัดความกระด้างและซัลเฟตในน้ำได้ ซึ่งส่งผลต่อการอุดตันของรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน อย่างไรก็ตามกระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีหน้าที่ในการกำจัดความกระด้างตกค้างจากกระบวนการทางเคมีเป็นหลัก โดยการศึกษากระบวนการดังกล่าวจะพิจารณาคุณภาพของน้ำหลังผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้น และการเกิดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน ทั้งนี้ คุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้นจะถูกพิจารณาสำหรับใช้เป็นน้ำทดแทนในระบบหล่อเย็น โดยมีความกระด้างในน้ำหลังผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้นไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเทอมของหินปูน ( $\text{mg/l as CaCO}_3$ ) คุณภาพน้ำทดแทนของน้ำหล่อเย็นที่กำหนดขึ้นโดย The Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association Microbial (JRA)

ในการศึกษานี้กระบวนการบำบัดขั้นต้น แบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ดังรูปที่ 3.1 สำหรับกระบวนการทางเคมีจะทำการศึกษา 3 ลักษณะ คือ การเติมปูนขาว (Lime Softening) การเติมโคแอกกูแลนต์ (Coagulation) และการเติมปูนขาวร่วมกับโคแอกกูแลนต์ (Lime Softening-Coagulation) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซัลเฟตในน้ำด้วยกระบวนการทางเคมี จากการทดลองดังกล่าว จะได้ชนิดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำบาดาล โดยพิจารณาจาก มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซัลเฟตมากที่สุด มีปริมาณสารเคมีตกค้างในน้ำต่ำที่สุด ทั้งนี้ค่าพีเอชของน้ำหลังผ่านกระบวนการ (Final pH) อยู่ในช่วง 6.0-8.0 ยกเว้นน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่มีการเติมปูนขาว เนื่องจากค่าพีเอชของน้ำหลังผ่านการเติมปูนขาวจะมีค่าประมาณ 10 จากนั้นนำน้ำบาดาลที่ผ่านกระบวนการทางเคมีที่มีการเติมชนิดและปริมาณสารเคมีที่



เหมาะสมดังที่กล่าวไปข้างต้น ไปผ่านกระดาษกรอง GF/C ขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน ซึ่งมีขนาดรูพรุนใกล้เคียงกับความสามารถในการกำจัดสารแขวนลอยของถังกรองทราย นำน้ำที่ผ่านการกรองไปทดลองในกระบวนการนาโนฟิลเตรชันต่อไป ดังนั้นในการศึกษากระบวนการบำบัดทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันจะเป็นการทดลองแบบทีละเท (Batch Lab-Scale)



รูปที่ 3.1 แนวคิดโดยรวมของกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันเพื่อใช้กระบวนการบำบัดขั้นต้น

สำหรับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันทำการศึกษากับน้ำบาดาลที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี/ไม่ผ่านการเติมสารเคมี (Non Chemical Ground Water) และน้ำบาดาลที่ผ่านการเติมสารเคมีที่ชนิดและปริมาณที่เหมาะสม (Chemical Ground Water) ที่ความดันผ่านเมมเบรน 4 ถึง 15 บาร์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซิลิกา จากนั้นเลือกความดันผ่านเมมเบรนที่เหมาะสมใช้เดินระบบต่อเนื่องเพื่อศึกษาอัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) สูงสุดที่เป็นไปได้ก่อนการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมีหรือ CIP และศึกษาการเกิดการอุดตันของเมมเบรน

(Membrane Fouling) ระหว่างน้ำบาดาลที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการทางเคมี คุณภาพน้ำบาดาล หลังผ่านกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันจะถูกพิจารณาเปรียบเทียบคุณภาพน้ำเข้ารีเวอร์ออสโมซิส (Feed) ของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันของโรงงานที่สนับสนุนข้อมูลงานวิจัย เพื่อพิจารณาว่ากระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นสามารถช่วยลดภาระการกรอง (Loading) ความกระด้างและซัลเฟตให้กับรีเวอร์ออสโมซิสเมมเบรนได้หรือไม่ รวมถึงนำคุณภาพน้ำบาดาลหลังผ่านกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำทดแทนของน้ำหล่อเย็นที่กำหนดขึ้นโดย Japanese Refrigeration Association เพื่อพิจารณาว่ากระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซัลเฟตเพียงพอในการผลิตน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นหรือไม่

นอกจากนี้ผู้วิจัยจะเลือกกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันไปประยุกต์ใช้กับน้ำบาดาลจริง เพื่อยืนยันผลการทดลองว่าสามารถใช้กับน้ำบาดาลจริงได้หรือไม่ ทั้งนี้ เกณฑ์ในการคัดเลือกกระบวนการบำบัดขั้นต้นที่ดีที่สุดจะพิจารณาจาก ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซัลเฟตสูงที่สุด พฤติกรรมการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน โดยพิจารณาจากค่าฟลักซ์  $J/J_0$  และ % NPF ที่ลดลง ทั้งนี้ค่าพีเอชของน้ำหลังผ่านกระบวนการ (Final pH) อยู่ในช่วง 6-8 ซึ่งแนวทางการพิจารณากระบวนการบำบัดขั้นต้นที่ดีที่สุด แสดงดังรูปที่ 3.2

### กระบวนการทางเคมี

เกณฑ์การพิจารณา ปริมาณปูนขาว ชนิดและปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม

1. มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างสูงที่สุด
2. มีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกาสูงที่สุด
3. มีปริมาณสารเคมีที่ใช้ตกค้างในน้ำน้อยที่สุด
4. ค่า  $SDI_{15}$  น้อยกว่า 3

### กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

เกณฑ์การพิจารณา ความดันผ่านเมมเบรน อัตราการนำน้ำกลับคืน และประเภทน้ำเข้า  
กระบวนการที่เหมาะสม

1. มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างสูงที่สุด (ที่ความดันผ่านเมมเบรนอยู่เกณฑ์ที่แนะนำ)
2. มีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกาสูงที่สุด (ที่ความดันผ่านเมมเบรนอยู่เกณฑ์ที่แนะนำ)
3. ค่าฟลักซ์  $J/J_0$  และ % NPF ของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนลดลงน้อยที่สุด (ที่อัตราการนำน้ำกลับคืนเท่ากัน)

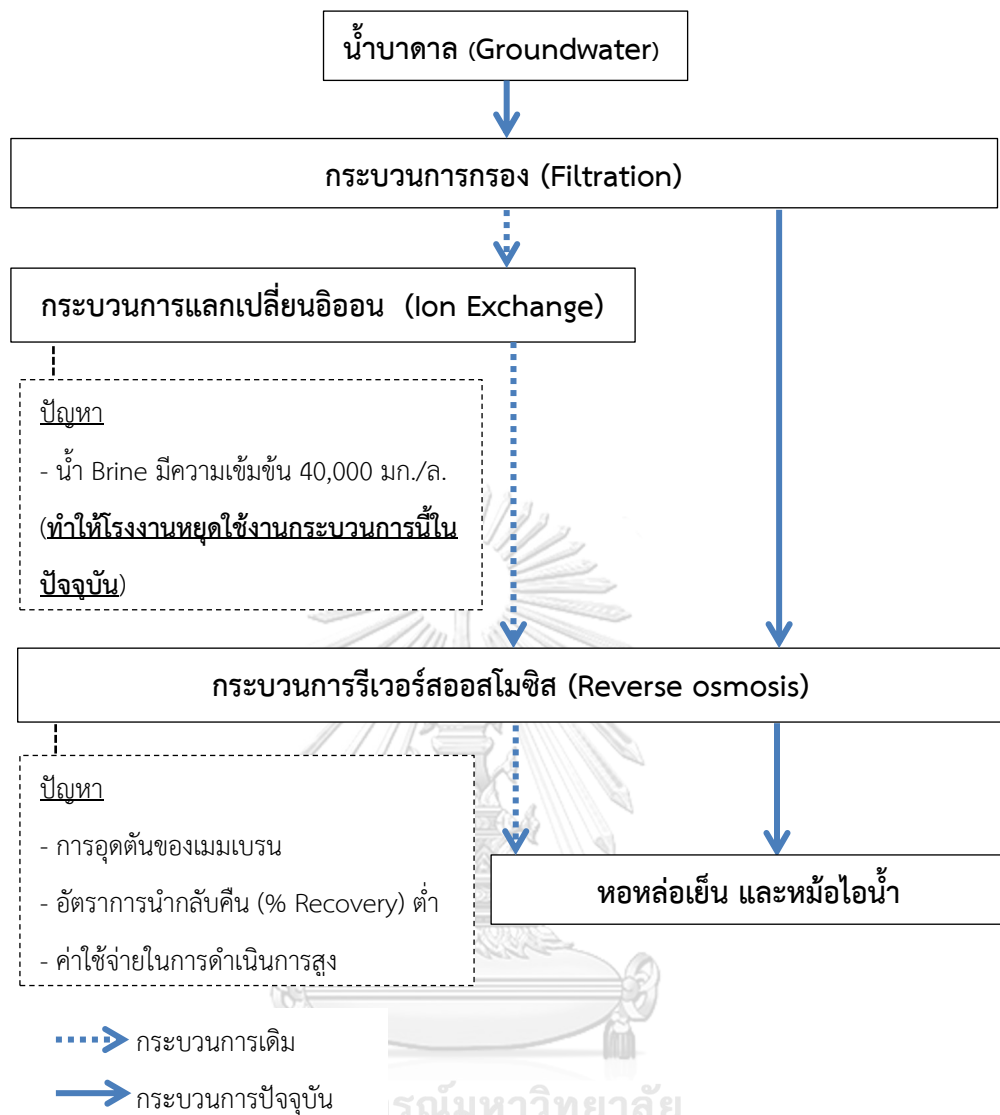
### กระบวนการบำบัดขั้นต้นที่ดีที่สุด

รูปที่ 3.2 แนวทางการคัดเลือกกระบวนการบำบัดขั้นต้นที่ดีที่สุดสำหรับใช้ในระบบผลิตน้ำทดแทน

### 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 ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำได้ (TDS) 40,000 มก./ล. เกิดขึ้นปริมาณ 50 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ( $m^3/day$ ) ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียจากค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจำนวนมาก ทำให้โรงงานหยุดใช้งานกระบวนการนี้ในปัจจุบัน ดังรูปที่ 3.3

ในปัจจุบันโรงงานใช้กระบวนการกรอง (Filtration) และกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสในการผลิตน้ำหล่อเย็นและน้ำในหม้อไอน้ำ โดยคุณภาพน้ำดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้อ้างอิงในการสังเคราะห์น้ำบาดาล คือ น้ำเข้ารีเวอร์สออสโมซิสของกระบวนการผลิตน้ำหล่อเย็นและน้ำในหม้อไอน้ำของโรงงานผลิตเอทานอลแห่งหนึ่งใน จ.ขอนแก่น โดยมี พารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ ความกระด้างทั้งหมด ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม ค่าความเป็นด่าง ปริมาณไบคาร์บอเนต ปริมาณซิลิกา และค่าพีเอชของน้ำ



รูปที่ 3.3 แสดงกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลของโรงงานผลิตเอทานอล

**ตารางที่ 3.1** น้ำดิบและน้ำเข้ารีเวอร์สออสโมซิสของกระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำหล่อเย็นและน้ำในหม้อไอน้ำของโรงงานผลิตเอทานอลแห่งหนึ่งใน จ.ขอนแก่น

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำดิบ	น้ำเข้ารีเวอร์สออสโมซิส (RO Feed)
ค่าพีเอช (pH)	-	7.0	7.7
ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity-M)	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	256	276
ไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ )	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	256	276
ความกระด้างทั้งหมด (Total hardness)	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	226	216
แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ )	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	144	132
แมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ )	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	82	84
ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ )	มก./ล.	25.9	26.5

ที่มา: บริษัท ไทยเอทานอล พาวเวอร์ จำกัด (มหาชน)

### 3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.2.1 น้ำบาดาลสังเคราะห์

คุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้ คือ น้ำบาดาลที่ใช้ในการผลิตน้ำหล่อเย็นและน้ำในหม้อไอน้ำของโรงงานผลิตเอทานอลแห่งหนึ่งใน จ.ขอนแก่น โดยมี พารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ ความกระด้างทั้งหมด ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม ค่าความเป็นด่าง ปริมาณไบคาร์บอเนต ปริมาณซิลิกา และค่าพีเอชของน้ำ เครื่องมือและวิธีการในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.2 ทั้งนี้เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ กราฟมาตรฐานของซิลิกา (Si Calibration Curve) และ กราฟมาตรฐานของอลูมิเนียม (Al Calibration Curve) แสดงดังภาคผนวก ก สำหรับสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำบาดาล ดังตารางที่ 3.3 สามารถเก็บน้ำบาดาลสังเคราะห์และน้ำหลังผ่านกระบวนการบำบัดทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และเก็บไม่เกิน 3 เดือน

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่จะทำการวิเคราะห์ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ	สารเคมีที่ใช้
SDI	Membrane filter	-
ค่าพีเอช	pH/Conductivity meter ของบริษัท EZ DO รุ่น 7200	-
ความขุ่น	Nephelometer ของบริษัท HANNA instruments รุ่น HI 98703	-
ค่าการนำไฟฟ้า	pH/Conductivity meter ของบริษัท EZ DO รุ่น 7200	-
ค่าของแข็งละลายน้ำ	pH/Conductivity meter ของบริษัท EZ DO รุ่น 7200	-
ค่าความเป็นด่าง	วิธีอินดิเคเตอร์	ฟีนอล์ฟทาลีน, เมทิลออเรนจ์, กรดซัลฟูริก
ความกระด้าง	อิตีทีเอ ไตเตรชัน	กรดไฮโดรคลอริก, 2-อะมิโนเอทานอล, 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

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ	สารเคมีที่ใช้
อลูมิเนียม	วิธี Eriochrome Cyanine R Colorimetric	อลูมิเนียมโปแตสเซียมซัลเฟต, กรดซัลฟูริก, กรด แอสคอร์บิก, โซเดียมอะเซเตต, กรดอะเซติก, อีรีโอ โครม โซยาไนต์, เมทิลออเรนจ์, อีดีทีเอไดโซเดียม ซอลท์, โซเดียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์และสารเคมีที่ใช้สังเคราะห์น้ำบาดาลสำหรับการทดลอง

พารามิเตอร์	สารเคมีที่ใช้สังเคราะห์
ค่าพีเอช (pH)	ปรับค่าพีเอชน้ำด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
ไบคาร์บอเนต (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO <sub>3</sub> )
แคลเซียม (Ca <sup>2+</sup> )	แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl <sub>2</sub> )
แมกนีเซียม (Mg <sup>2+</sup> )	แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl <sub>2</sub> )
ซิลิกา (SiO <sub>2</sub> )	โซเดียมเมตาซิลิเกต (Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )

### 3.2.2 ค่าดัชนีความหนาแน่นตะกอน (Slit Density Index, SDI)

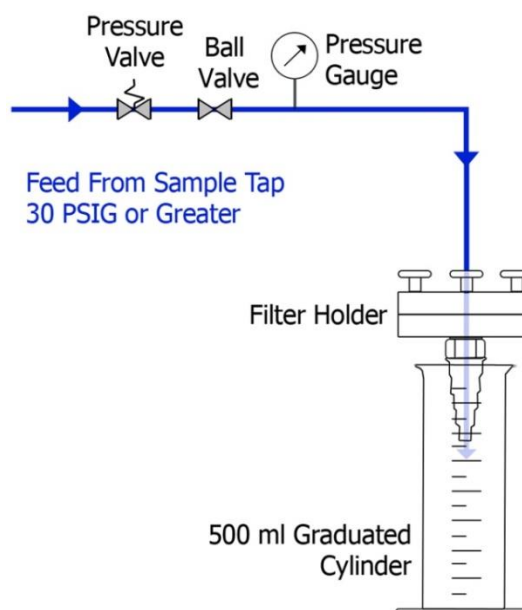
ค่า SDI ที่ใช้ในการประเมินคุณสมบัติของน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชัน จะใช้ค่า SDI<sub>15</sub> ซึ่งเป็นค่าที่ถูกต้องและได้มาตรฐานที่กำหนดโดย ASTM (D4189-95) สามารถหาค่า SDI<sub>15</sub> โดยใช้เมมเบรน Cellulose acetate membrane (CA membrane) ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน เส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มม. และใช้ความดันในเส้นท่อเท่ากับ 2 บาร์ (หรือ 30 psi) สามารถหาค่า SDI<sub>15</sub> ดังสมการที่ 3.1 และอุปกรณ์การหาค่า SDI ดังรูปที่ 3.4

$$SDI_{15} = (1 - T_f/T_i) \times (100/15) \quad (\text{สมการที่ 3.1})$$

เมื่อ  $T_i$  คือ เวลาที่น้ำผ่านเมมเบรนจนได้ปริมาตร 500 มล. ในครั้งแรก (วินาที)

$T_f$  คือ เวลาที่น้ำผ่านเมมเบรนจนได้ปริมาตร 500 มล. ในครั้งที่สองหลังผ่านการกรองไปแล้ว 15 นาที (วินาที)





รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์หาค่าดัชนีความหนาแน่นตะกอน (Slit Density Index, SDI)

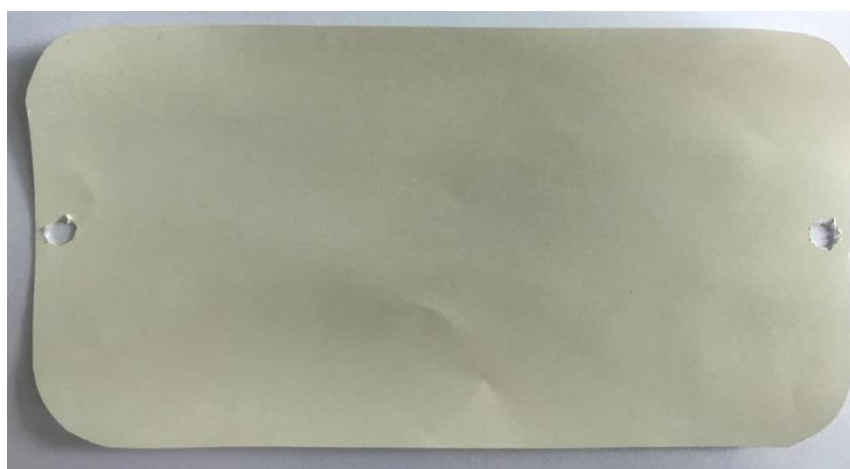
### 3.2.2 นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนและอุปกรณ์ยึดจับเมมเบรน (Test cell) ที่ใช้ในงานวิจัย

เลือกชนิดของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีลักษณะชอบน้ำ (Hydrophilic) เนื่องจากสามารถลดการอุดตันของคอลลอยด์และอนุภาคขนาดเล็กซึ่งส่วนใหญ่เป็นอนุภาคที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และมีประจุลบ (Negative particle) ทั้งนี้ จะพิจารณาจากราคาของเมมเบรนที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในสถานประกอบการร่วมด้วย ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้เมมเบรนรุ่น DK ของบริษัท GE water and process technologies จำกัด โดยเมมเบรนที่ใช้ในการทดสอบทำจากโพลีเอไมด์ (Polyamide) มีลักษณะเป็นแผ่น (Flat-sheet) และมีลักษณะทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ ดังตารางที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 แสดงลักษณะทางกายภาพและเคมีของเมมเบรน DK ของบริษัท GE water and process technologies จำกัด

ลักษณะทางกายภาพและเคมี	หน่วย	ลักษณะทางกายภาพและเคมี
บริษัทผู้ผลิต	-	GE Osmonics
วัสดุ	-	Polyamide TFC
ขนาดเมมเบรน	ตารางเซนติเมตร (cm <sup>2</sup> )	42

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

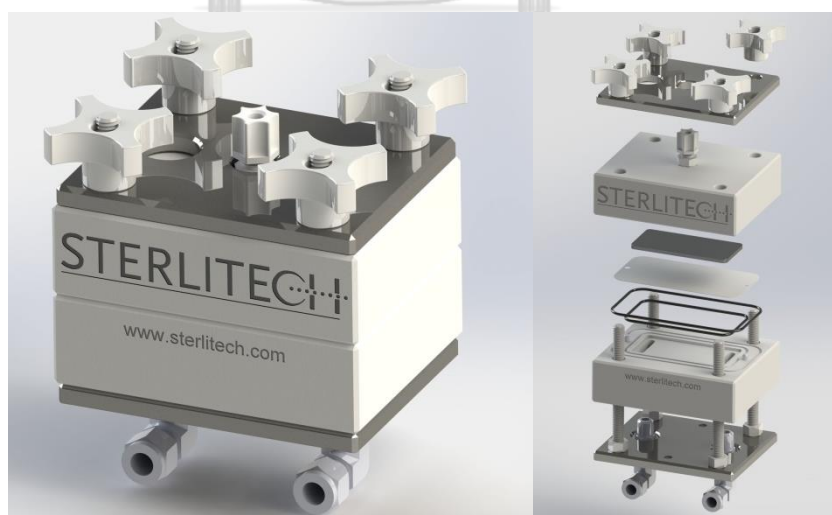


รูปที่ 3.5 นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนรุ่น DK ลักษณะเป็นแผ่นขนาด 42 ตร.ซม.

การทดลองทำในระดับห้องปฏิบัติการและมีการเดินระบบของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันแบบไหลตามขวาง (Crossflow filtration) ด้วยอุปกรณ์จับยึดเมมเบรน (Test cell) ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech รายละเอียดของ Test cell ดังตารางที่ 3.5 และ รูปที่ 3.6 (ภาคผนวก ข)

**ตารางที่ 3.5** แสดงลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์ยึดจับเมมเบรน (Test cell) ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech

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



**รูปที่ 3.6** Test cell ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech

โดยการทดลองกระบวนการนาโนฟิลเตรชันอุปกรณ์ของชุดทดสอบที่ใช้ในการเดินระบบ ดังตารางที่ 3.6 และ รูปที่ 3.7 น้ำจากถังเก็บน้ำจะถูกสูบลวด้วยปั๊ม ซึ่งสามารถปรับความดันสายน้ำเข้า ( $P_f$ ) ที่วาล์วควบคุมน้ำ Bypass (Bypass Control Valve) และปรับความดันสายน้ำเข้มข้น ( $P_c$ ) ที่ วาล์วควบคุมน้ำเข้มข้น (Concentrate Control Valve) ซึ่งน้ำเข้มข้นจะถูกเวียนกลับไปถังเก็บน้ำ ขณะที่น้ำสะอาดจะถูกวัดน้ำหนักของน้ำสะอาดด้วย เครื่องชั่งน้ำหนักแบบไฟฟ้า (Electronic balance) ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกน้ำหนักของน้ำสะอาดที่เวลาใด ๆ เพื่อหาค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด (Permeate Flux) ดังสมการที่ 3.2 ทั้งนี้กำหนดให้ความดันสายน้ำสะอาด ( $P_p$ ) มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศที่ 1 บาร์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเดินระบบเป็นเวลานานส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำเข้าระบบ (Feed) มีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากน้ำสัมผัสกับปั๊ม ซึ่งอุณหภูมิของน้ำเข้ามีผลต่อค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด ซึ่งน้ำที่มีอุณหภูมิสูง จะมีความหนืดต่ำ ส่งผลให้ค่าฟลักซ์น้ำสะอาดมีค่าสูงขึ้น เพื่อลดความผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ผู้วิจัยจึงบันทึกค่าอุณหภูมิน้ำใน ถังเก็บน้ำด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบต่อเนื่อง (Temperature Data Logger) เพื่อใช้ข้อมูลดังกล่าวปรับเปลี่ยนค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่อุณหภูมิใด ๆ เป็นค่าที่ฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ 25 °C ดังสมการที่ 3.3 ดังนั้นค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด ( $J$ ) ที่แสดงในงานวิจัยนี้หมายถึงค่าฟลักซ์ของน้ำที่ 25 °C แล้ว

$$J_0 = \Delta V / (\Delta t \times A) = (\Delta m \times \rho) / (\Delta t \times A) \quad (\text{สมการที่ 3.2})$$

เมื่อ $J$	คือ ฟลักซ์ของน้ำสะอาด (ลบ.ม./ตร.ม.วินาที)
$\Delta V$	คือ ปริมาตรของน้ำที่เปลี่ยนแปลง (ลบ.ม.)
$\Delta t$	คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลง (วินาที)
$\Delta m$	คือ มวลของน้ำที่เปลี่ยนแปลง (กิโลกรัม)
$\rho$	คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม/ลบ.ม.)
$A$	คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศการไหลของฟลักซ์ (ตร.ม.)

$$J_1 = J_2(\mu_2/\mu_1) \quad (\text{สมการที่ 3.3})$$

เมื่อ $J_1$	คือ ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ 25 °C (ลบ.ม./ตร.ม.วินาที)
-------------	-------------------------------------------------------

$J_2$  คือ ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่อุณหภูมิต่ำ ๆ (ลบ.ม./ตร.ม.วินาที)

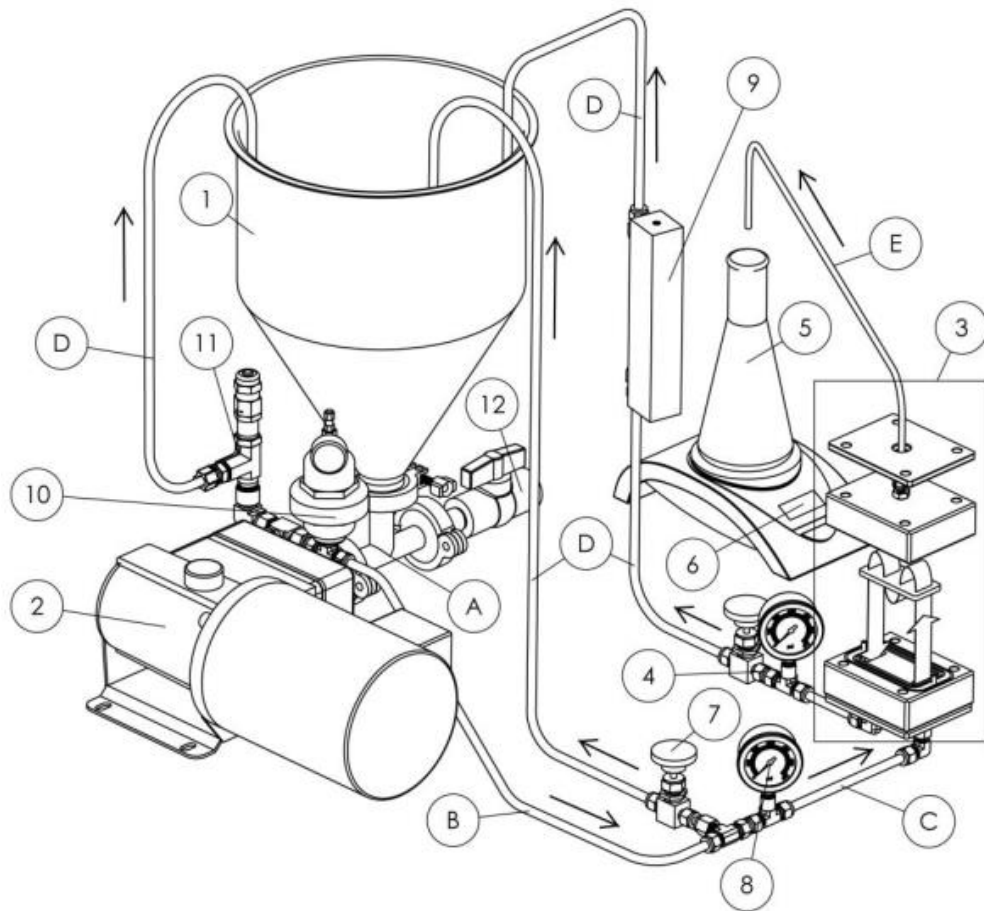
$\mu_1$  คือ ความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) ของน้ำที่ 25 °C (นิวตัน.วินาที/ตร.ม.)

$\mu_1$  คือ ความหนืดพลวัตของน้ำที่อุณหภูมิต่ำ ๆ (นิวตัน.วินาที/ตร.ม.)

สำหรับการเตรียมแผ่นเมมเบรนที่ใช้งาน ต้องนำมาแช่น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water, DI) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อล้างสารเคมีที่อาจเคลือบมาบนผิวของเมมเบรน นอกจากนี้ในการเริ่มต้นระบบทุกครั้ง จะต้องรันเมมเบรนด้วยน้ำ DI เสียก่อน เพื่อให้เมมเบรนที่ถูกกดอัดมาพร้อมสำหรับการใช้งาน และบันทึกค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่มีน้ำ DI เป็นน้ำเข้าระบบ หรือค่า  $J_0$  ใช้ในการแสดงผลการทดลองในแต่ละผลการทดลองด้วยค่า  $J/J_0$  คือฟลักซ์น้ำสะอาดของน้ำใด ๆ ต่อฟลักซ์น้ำสะอาดของน้ำ DI เพื่อลดความผิดพลาดเนื่องจากการใช้เมมเบรนคนละแผ่นในการทดลอง

### ตารางที่ 3.6 ชุดทดสอบที่ใช้ในการทดลองกระบวนการนาโนฟิลเตชัน

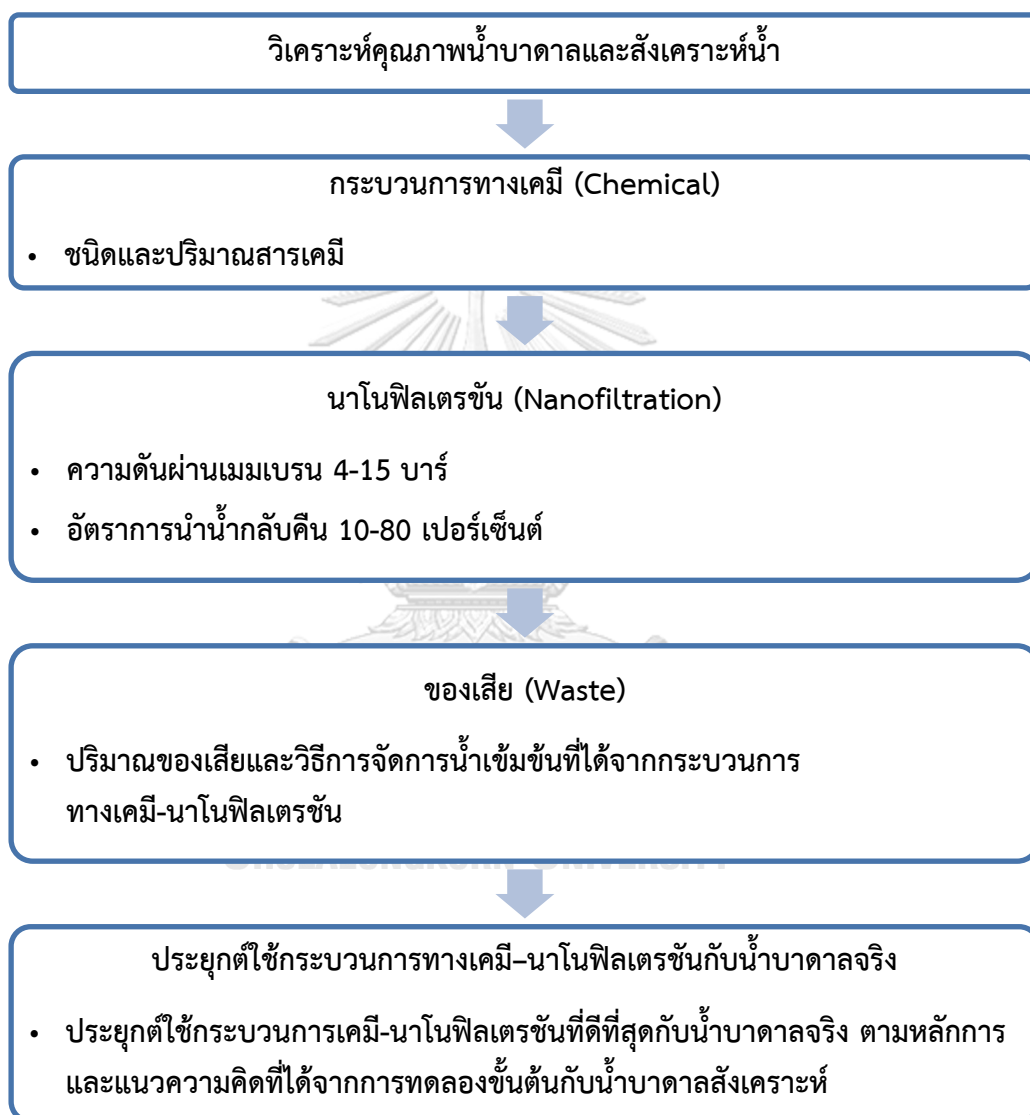
หมายเลข	ชื่ออุปกรณ์
1	ถังเก็บน้ำ (Feed tank) ขนาด 5.7 ลิตร
2	ปั๊ม (Feed pump)
3	Test cell ชนิด CF042D ของบริษัท Sterlitech
4	วาล์วควบคุมน้ำเข้มข้น (Concentrate Control Valve)
5	บีกเกอร์ (Beaker)
6	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบไฟฟ้า (Electronic balance)
7	วาล์วควบคุมน้ำ Bypass (Bypass Control Valve)
8	เกจวัดความดันน้ำเข้มข้น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



รูปที่ 3.7 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ของชุดทดสอบที่ใช้ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ ห้องปฏิบัติการ ของภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การทดลองกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันจะแบ่งการทดลองออกเป็น 5 ช่วง ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลำดับการทดลองกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันทั้ง 5 ช่วง

### **3.3.1 การทดลองที่ 1 : การวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลจริงและสังเคราะห์น้ำบาดาลเพื่อใช้ในการ**

#### **ทดลอง**

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

### **3.3.2 การทดลองที่ 2 : การศึกษากระบวนการทางเคมีในการกำจัดความกระด้างและซิลิกา**

ขั้นตอนในการทดลองประกอบด้วย การกวนเร็ว กวนช้า ตกตะกอน และกรองน้ำ โดยจะทำการเติมสารเคมีในขั้นตอนการกวนเร็ว จากนั้นให้ตะกอนรวมตัวกันในขั้นตอนการกวนช้า และตะกอนตกตะกอนที่ก้นบีกเกอร์ในขั้นตอนการตกตะกอน หลังจากนั้นรินส่วนของน้ำใสไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอนเสมือนน้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมีได้ผ่านการตกตะกอนและกรองเรียบร้อยแล้ว นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำและปรับค่าพีเอชของน้ำด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ให้มีค่าประมาณ 6.5 แล้วนำไปทดลองต่อในการทดลองที่ 3

การทดลองที่ 2.1 ศึกษากระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาว (Lime-softening) สำหรับการกำจัดความกระด้างและซิลิกา

วิเคราะห์ปริมาณปูนขาว (Lime,  $\text{Ca(OH)}_2$ ) และใช้สภาวะการเดินระบบ (ความเร็วรอบระยะเวลาของการกวนเร็ว กวนช้า และการตกตะกอนที่สอดคล้องกับระบบบำบัดน้ำจริง) ที่เหมาะสมกับลักษณะของน้ำบาดาลสังเคราะห์ในการกำจัดความกระด้างและซิลิกา โดยทำการทดลองด้วยจาร์เทส (Jar test) ที่อุณหภูมิห้อง

จากการทดลองที่ 2.1 จะได้ปริมาณปูนขาวที่น้อยที่สุดที่ทำให้ความกระด้างในน้ำเหลือน้อยที่สุด โดยปกติแล้วน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาว (Lime-softening) จะมีความกระด้างตกค้างประมาณ 40-60 มก./ล. ในเทอมของหินปูน

การทดลองที่ 2.2 ศึกษากระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) สำหรับการกำจัดความกระด้างและซิลิกา



การศึกษากระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) เพื่อกำจัดความกระด้างและซิลิกา โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ (1) การกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยสารส้ม (Alum) และ (2) การกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยโพลัลลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ที่ปริมาณของสารส้มและโพลัลลูมิเนียมคลอไรด์  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมินัม (mol Al/L) ทั้งนี้ ค่าความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ที่เลือกมาครอบคลุมโดะแกรมของเขตการเกิดกลไกในกระบวนการโคแอกกูเลชัน และการทดลองของ X. Wu และคณะ (2007) ทำการทดลองด้วยจาร์เทส โดยใช้สภาวะการเดินระบบ (ความเร็วรอบ ระยะเวลาของการกวนเร็ว กวนช้า และการตกตะกอน) ที่ได้จากการทดลองที่ 2.1

การทดลองที่ 2.3 ศึกษากระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาว (Lime-softening) และโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) สำหรับการกำจัดความกระด้างและซิลิกา

การศึกษากระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาวร่วมกับโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) เพื่อกำจัดความกระด้างและซิลิกา โดยใช้ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1 โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ (1) การกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยปูนขาวร่วมกับสารส้ม (Lime-Alum) และ (2) การกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยปูนขาวร่วมกับโพลัลลูมิเนียมคลอไรด์ (Lime-PACl) ที่ปริมาณของสารส้มและโพลัลลูมิเนียมคลอไรด์  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมินัม (mol Al/L) ทั้งนี้ในขั้นตอนของการกวนเร็ว สารเคมีที่เติม ได้แก่ ปูนขาว-สารส้ม และปูนขาว-โพลัลลูมิเนียมคลอไรด์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชนิดโคแอกกูแลนต์ในการสร้างและรวมตะกอน

หลังจากวิเคราะห์น้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมีแล้ว จะได้ปริมาณปูนขาว ชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซิลิกามากที่สุด สารเคมีตกค้างน้อยที่สุด และค่าพีเอชของน้ำหลังผ่านกระบวนการอยู่ในช่วง 6-8 เนื่องจากค่าพีเอชของน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีต้องเหมาะสมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดต่อจากกระบวนการบำบัดทางเคมี และใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 3.3.3 การทดลองที่ 3 : ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซลีกาของน้ำบาดาลด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันของน้ำที่ผ่าน/ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี

การทดลองที่ 3.1 ศึกษาค่าความดันผ่านเมมเบรน (Transmembrane pressure, TMP) ที่เหมาะสมในการเดินระบบ

ทำการศึกษาผลของความดันผ่านเมมเบรนต่อฟลักซ์ของน้ำสะอาด (Permeate Flux) และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซลีกาของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันของน้ำเข้ากระบวนการที่ผ่าน/ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี ทำการทดลองที่ความดันผ่านเมมเบรน 6 ค่า ได้แก่ 4, 5, 6, 7, 10 และ 15 บาร์ โดยมีปริมาตรน้ำในถังเก็บน้ำเริ่มต้นแต่ละการทดลองเท่ากับ 3 ลิตร บันทึกค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดทุก ๆ 1 นาที และวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่อัตราการผลิตน้ำสะอาด 30 เปอร์เซ็นต์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซลีกาที่ความดันผ่านเมมเบรนแต่ละค่าที่น้ำเข้ากระบวนการแต่ละประเภท โดยค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด (Permeate Flux) จะถูกบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์ที่ต่อเชื่อมกับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบไฟฟ้า (Electronic balance) ทั้งนี้จะพิจารณาความดันผ่านเมมเบรนที่มีประสิทธิภาพกำจัดความกระด้างและซลีกาที่สูงที่สุด โดยความดันผ่านเมมเบรนอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการเดินระบบระยะยาวในการทดลองที่ 3.2 ต่อไป

การทดลองที่ 3.2 ศึกษาผลของอัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซลีกา และการเกิดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน (Membrane Fouling) ของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่าน/ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี

ทำการทดลองที่อัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) 8 ค่า ได้แก่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยในการทดลองใช้ค่าความดันผ่านเมมเบรนที่ได้จากการทดลองที่ 3.1 และปริมาตรน้ำในถังเก็บน้ำเริ่มต้นแต่ละการทดลองเท่ากับ 3 ลิตร วิเคราะห์คุณภาพน้ำทุก ๆ อัตราการผลิตน้ำสะอาด (% Recovery) 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซลีกาที่อัตราการนำน้ำกลับคืนแต่ละค่าที่น้ำเข้ากระบวนการแต่ละประเภท สำหรับการเกิดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน (Membrane Fouling) จะพิจารณาจากค่า  $J/J_0$  และ %NPF ที่ลดลง รวมถึงทำการวิเคราะห์ SEM-EDX ผิวเมมเบรนที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามแผ่นเมมเบรนแต่ละชิ้นอาจมีความแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อที่จะให้สามารถเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ของน้ำ

สะอาดที่เปลี่ยนแปลงไปได้ของแต่ละการทดลอง ผู้วิจัยจึงแสดงข้อมูลเป็น Normalized Flux หรือ  $J/J_0$  ซึ่ง  $J$  คือ ฟลักซ์ของน้ำสะอาด และ  $J_0$  คือ ฟลักซ์น้ำสะอาดของน้ำ DI เพื่อลดความผิดพลาดเนื่องจากการใช้เมมเบรนคนละแผ่นในการทดลอง ทั้งนี้ น้ำหนักของน้ำสะอาดจะถูกบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์ที่ต่อเชื่อมกับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบไฟฟ้า (Electronic balance) ในการคำนวณค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่เวลาใด ๆ

ทั้งนี้คุณภาพน้ำบาดาลหลังผ่านกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน และน้ำหลังผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเพียงอย่างเดียว จะถูกพิจารณาเปรียบเทียบคุณภาพน้ำเข้ารีเวอร์ออสโมซิส (Feed) ของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันของโรงงานที่สนับสนุนข้อมูลงานวิจัย เพื่อพิจารณาว่ากระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นสามารถช่วยลดภาระการกรอง (Loading) ความกระด้างและซัลเฟตให้กับรีเวอร์ออสโมซิสเมมเบรนได้หรือไม่ รวมถึงนำคุณภาพน้ำบาดาลหลังผ่านกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำทดแทนของน้ำหล่อเย็นที่กำหนดขึ้นโดย Japanese Refrigeration Association เพื่อพิจารณาว่ากระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซัลเฟตเพียงพอในการผลิตน้ำทดแทนสำหรับระบบหล่อเย็นหรือไม่

ในการทดลองนี้จะได้กระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันที่ดีที่สุด ซึ่งจะพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซัลเฟต และการอุดตันของเมมเบรน ทั้งนี้คุณภาพน้ำในถังเก็บน้ำของกระบวนการที่ดีที่สุด ที่อัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) สูงสุดที่เป็นไปได้ก่อนการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมีหรือ CIP คือความเข้มข้นของน้ำเสีย (Waste water) ของกระบวนการดังกล่าว น้ำเข้มข้นนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำสำหรับใช้ในการทดลองที่ 4 เพื่อศึกษาปริมาณและวิธีการจัดการน้ำเสีย

### 3.3.4 การทดลองที่ 4 : ศึกษาปริมาณและวิธีการจัดการน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน

ของเสียที่เกิดจากกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน เกิดจาก 2 แหล่ง ได้แก่

1) ตะกอนเคมีจากกระบวนการทางเคมี : สามารถคำนวณน้ำหนักตะกอนจากการนำน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีมาผ่านกระดาษกรอง GF/C ขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน จากนั้นนำกระดาษกรองไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ซึ่งน้ำหนักกระดาษกรองที่มีตะกอนที่แห้งแล้ว คำนวณน้ำหนักของตะกอน ดังสมการ 3.4

$$\text{น้ำหนักตะกอน} = \text{น้ำหนักกระดาษกรองที่มีตะกอน} - \text{น้ำหนักกระดาษกรอง} \quad (\text{สมการ 3.4})$$

2) น้ำเข้มข้นจากกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน : วิเคราะห์คุณภาพน้ำเข้มข้นจากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันที่อัตราการนำน้ำกลับสูงสุดที่เป็นไปได้ก่อนการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมี หรือ CIP ของกระบวนการที่ดีที่สุด เนื่องจากน้ำเข้มข้นดังกล่าวคือความเข้มข้นสูงสุดที่กระบวนการนาโนฟิลเตรชันสามารถเดินระบบได้ ทั้งนี้คุณภาพน้ำที่ได้จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อหาวิธีการจัดการกับน้ำเข้มข้นดังกล่าวที่เหมาะสม

### 3.3.5 การทดลองที่ 5 : ประยุกต์ใช้กระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันกับน้ำบาดาลจริง

ประยุกต์ใช้กระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันกับน้ำบาดาลจริงของโรงงานผลิตพลาสติกแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม เพื่อยืนยันผลการทดลองของประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองที่ 1 : การวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลจริงและสังเคราะห์น้ำบาดาลเพื่อใช้ในการทดลอง

จากผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลจริงก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของโรงงานผลิตเอทานอล กล่าวคือเป็นน้ำบาดาลจริงที่ผ่านกระบวนการกรอง (Filtration) ในการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว ซึ่งจะเป็นคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้อ้างอิงในการสังเคราะห์น้ำบาดาล (ภาคผนวก ค) เมื่อพิจารณาควบคู่ไปกับมาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับระบบหล่อเย็น (Water quality standard for cooling water, cold water, hot water, makeup water ของ The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRA) ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าความกระด้างทั้งหมด แคลเซียม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความเป็นด่างมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทดแทน (Makeup Water) หรือน้ำที่เข้าสู่ระบบน้ำหล่อเย็น ซึ่งหมายความว่าคุณภาพน้ำดังกล่าวไม่สามารถใช้เป็นน้ำทดแทนได้เลย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เหมาะสมสำหรับใช้เป็นน้ำทดแทนในระบบน้ำหล่อเย็น

**ตารางที่ 4.1** มาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับระบบหล่อเย็นตาม The Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association Microbial (JRA) และคุณภาพน้ำบาดาลจริงก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของโรงงานผลิตเอทานอล

พารามิเตอร์	หน่วย	JRA Cooling water standard		น้ำบาดาลจริง ก่อนเข้า กระบวนการรี เวอร์สออสโม ซิส <sup>(1)</sup>
		น้ำทดแทนหรือน้ำที่ เข้าสู่ระบบน้ำหล่อ เย็น (Makeup Water)	น้ำหล่อเย็น (Cooling Water)	
ค่าพีเอช (ที่ 25°C)	-	6.0 – 8.0	6.5-8.2	7.7

พารามิเตอร์	หน่วย	JRA Cooling water standard		น้ำบาดาลจริง ก่อนเข้า กระบวนการรี เวอร์สออสโม ซิส <sup>(1)</sup>
		น้ำทดแทนหรือน้ำที่ เข้าสู่ระบบน้ำหล่อ เย็น (Makeup Water)	น้ำหล่อเย็น (Cooling Water)	
ค่าการนำไฟฟ้า (ที่ 25°C)	ไมโครซีเมนต์/ ชม.	น้อยกว่า 300	น้อยกว่า 800	698
คลอไรด์	มก./ล.	น้อยกว่า 50	น้อยกว่า 200	48.5
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	-
ซิลิเกต	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	-

หมายเหตุ: (1) เก็บตัวอย่างน้ำก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของระบบผลิตน้ำทดแทน (Feed RO) ของ บริษัท ไทยเอทานอล พาวเวอร์ จำกัด (มหาชน) เมื่อวันที่ 18-22 ธันวาคม 2558

สำหรับการทดลองการบำบัดน้ำบาดาลด้วยกระบวนการทางเคมีและนาโนฟิลเตรชัน จะใช้น้ำบาดาลสังเคราะห์ในการทดลองเนื่องจากคุณภาพน้ำที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าคงที่มากกว่าการใช้น้ำบาดาลจริง ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ ความกระด้างทั้งหมด ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม ค่าความเป็นด่าง ปริมาณไบคาร์บอเนต ปริมาณซิลิกา และค่าพีเอชของน้ำ เป็นต้น ทำการสังเคราะห์น้ำให้มีคุณภาพน้ำใกล้เคียงกับน้ำบาดาลจริงก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของระบบผลิตน้ำทดแทน โดยชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำ ประกอบด้วย โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ ) โซเดียมเมตาซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) (ตารางที่ 4.2) เติมสารเคมีทั้งหมดลงในน้ำปราศจากไอออน (DI Water) และปรับค่าพีเอชน้ำด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กวนเร็วเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดังกล่าว คุณภาพน้ำที่ได้ ดังตารางที่ 4.3 (ภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.2 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำบาดาล

พารามิเตอร์	สารเคมีที่ใช้สังเคราะห์	น้ำหนักโมเลกุลของสารเคมี (กรัมต่อโมล)	ปริมาณสารเคมี (มก.)	คุณภาพน้ำบาดาลสังเคราะห์ (มก./ล.)
ไบคาร์บอเนต	$\text{NaHCO}_3$	84.01	463.74	336.81
แคลเซียม	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	147.01	194.05	52.9
แมกนีเซียม	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	203.3	170.77	20.41
ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ )	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	284.2	125.35	26.5

ตารางที่ 4.3 คุณภาพน้ำบาดาลสังเคราะห์

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำบาดาลจริงก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสรีเวอร์สออสโมซิส (RO Feed) <sup>(1)</sup>	น้ำบาดาลสังเคราะห์
ค่าพีเอช (ที่ 25°C)	-	7.7	7.7±0.1

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำบาดาลจริงก่อนเข้า กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสรี เวอร์สออสโมซิส (RO Feed) <sup>(1)</sup>	น้ำบาดาล สังเคราะห์
ค่าของแข็งละลาย (ที่ 25°C)	มก./ล.	412	662.5±9.4
ค่าการนำไฟฟ้า (ที่ 25°C)	ไมโครซีเมนต์/ซม.	698	990.8±12. 4
ความขุ่น	NTU	0.4	0.6±0.2
ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity-M)	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	276	280.9±3.6
ความกระด้าง	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	216	217.0±2.5
แคลเซียม	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	132	132.1±2.0
แมกนีเซียม	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	84	84.9±2.5
ซิลิกา (SiO <sub>2</sub> )	มก./ล.	26.5	26.9±0.7

หมายเหตุ: (1) เก็บตัวอย่างน้ำก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของระบบผลิตน้ำทดแทน (Feed RO) ของ บริษัท ไทยเอทานอล พาวเวอร์ จำกัด (มหาชน) เมื่อ วันที่ 18-22 ธันวาคม 2558

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากการทดลองพบว่าค่าพีเอช ความขุ่น ค่าความเป็นด่าง ความกระด้างทั้งหมด ปริมาณ แคลเซียมและแมกนีเซียม และปริมาณซิลิกา มีค่าใกล้เคียงกับคุณภาพน้ำบาดาลจริง อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าของแข็งละลายน้ำและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำบาดาลสังเคราะห์มีค่าสูงกว่าน้ำบาดาลจริงก่อน เข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสมาก เนื่องมาจากการเติมกรดไฮโดรคลอริกเพื่อปรับพีเอชของน้ำ รวมถึงไอออนอื่น ๆ ที่มาจากสารเคมีที่เติมลงไป เช่น คลอไรด์ไอออน (Cl<sup>-</sup>) และโซเดียมไอออน (Na<sup>+</sup>) เป็นต้น อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ทั้ง 2 ไม่ได้ถูกนำมาพิจารณาจำนวนรอบการใช้งาน



## 4.2 การทดลองที่ 2 : การศึกษากระบวนการทางเคมีในการกำจัดความกระด้างและซิลิกา

### 4.2.1 ศึกษากระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาว (Lime-softening) สำหรับการกำจัดความกระด้างและซิลิกา

สำหรับสภาวะการกวนเร็ว กวนช้า และตกตะกอน ผู้วิจัยได้ทำการทดลองด้วยจาร์เทส (Jar test) โดยการเติมปูนขาวปริมาณ 350 มก./ล. แสดงผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.4 ผลการทดลองพบว่าสำหรับกระบวนการกวนเร็วที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 วินาที และการกวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที เมื่อนำน้ำใสหลังตั้งน้ำทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นรินน้ำใสมาผ่านกระดาษกรอง GF/C พบว่ามีค่าความขุ่นต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ  $0.8 \pm 0.0$  NTU ทั้งนี้สภาวะดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์การออกแบบกระบวนการบำบัดน้ำ ที่เหมาะสม (S. Kawamura, 2000) ดังตารางที่ 4.5 ใช้สภาวะดังกล่าวสำหรับกระบวนการกวนเร็ว กวนช้า และตกตะกอน ตลอดการทดลองกระบวนการทางเคมีสำหรับการกำจัดความกระด้างและซิลิกา

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการหาสภาวะการกวนเร็ว-กวนช้าที่เหมาะสม

กวนเร็ว (Coagulation)		กวนช้า (Flocculation)		ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน (Sedimentation)		ความขุ่นเฉลี่ย (NTU)
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	เวลา (วินาที)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	เวลา (นาที)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	เวลา (นาที)	
70	15	30	20	0	30	$1.4 \pm 0.2$
130	15	30	20	0	30	$0.8 \pm 0.0$
130	15	30	30	0	30	$0.8 \pm 0.0$
130	15	70	30	0	30	$2.0 \pm 0.2$
130	15	100	30	0	30	$6.9 \pm 1.3$

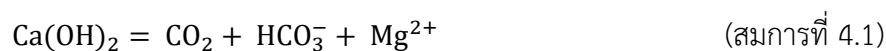
ตารางที่ 4.5 เกณฑ์การออกแบบกระบวนการบำบัดน้ำ (S. Kawamura, 2000)

รายละเอียด	กระบวนการ	
	กวนเร็ว	กวนช้า
	ค่าที่ได้จากการออกแบบ	
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	130	30
ความเร็วเกรเดียน (G) (วินาที <sup>-1</sup> )	100	10
เวลา (t) (วินาที)	15	1,200
ค่า G x t	1,500	-
	เกณฑ์การออกแบบ	
ความเร็วเกรเดียน (G) (วินาที <sup>-1</sup> )	-	10 - 70
เวลา (t) (วินาที)	-	1,200 - 1,800
ค่า G x t	500 - 1,600	-
หมายเหตุ	ใช้เกณฑ์ระบบกวนเร็วแบบใช้เครื่องจักรกล (Mechanical Flash Mixing)	ใช้เกณฑ์ระบบกวนช้าถังสี่เหลี่ยมแบบทั่วไป (Basic Rectangular Flocculation Tank)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากคุณภาพน้ำบาดาลพบว่าค่าความเป็นด่างมีค่ามากกว่าค่าความกระด้างทั้งหมด ดังนั้นความกระด้างทั้งหมดจะเป็นความกระด้างชั่วคราวหรือความกระด้างคาร์บอเนต (Carbonate Hardness) การกำจัดความกระด้างในน้ำจึงใช้ปูนขาว (Lime, Ca(OH)<sub>2</sub>) เพียงชนิดเดียวไม่จำเป็นต้องใช้โซดาแอช (Soda ash) สำหรับปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการทดลองคำนวณมาจากปริมาณปูนขาวที่ต้องใช้ในการกำจัดความกระด้างทั้งหมดที่เหมาะสมกับลักษณะของน้ำบาดาลสังเคราะห์ตามสตอยชิโอเมตริก ดังสมการที่ 4.1



$$\text{Ca(OH)}_2 = \left( \frac{0.42 \times 74}{44} \right) + \left( \frac{276 \times 74}{100} \right) + \left( \frac{20.41 \times 74}{24.3} \right)$$

$$\text{Ca(OH)}_2 = 309.27 \text{ mg/l as Ca(OH)}_2$$

เมื่อ ความเข้มข้นของ  $\text{CO}_2$  ที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C} = 0.42$  มก./ล.

ความเข้มข้นของ  $\text{HCO}_3^-$  ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ = 276 มก./ล. ในเทอมของหินปูน

ความเข้มข้นของ  $\text{Mg}^{2+}$  ในน้ำบาดาลสังเคราะห์ = 20.41 มก./ล.

จะได้ปริมาณปูนขาวประมาณ 310 มก./ล. ดังนั้นจะทำการทดลองที่ปริมาณปูนขาว 100 ถึง 500 มก./ล. เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างที่ปริมาณปูนขาวน้อยเกินไปและมากเกินไป ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6 และภาคผนวก จ

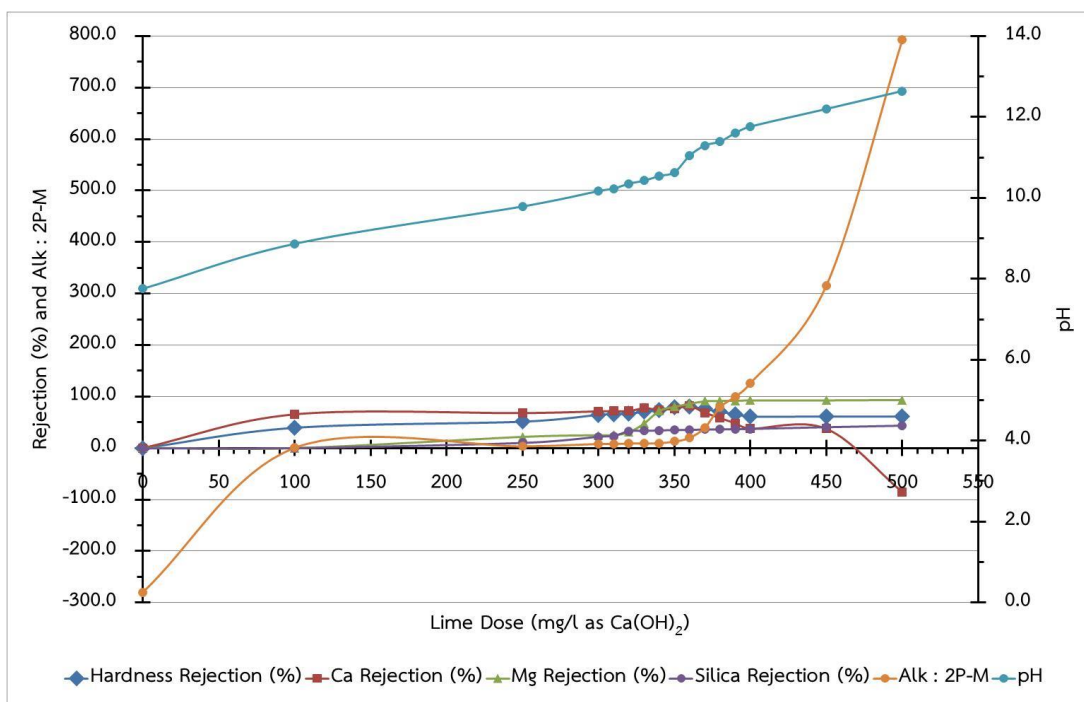


ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซัลเฟตด้วยปูนขาวที่ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณปูนขาว (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)				ค่าที่ไอซอทล์ ปฏิกิริยา	ค่าความขุ่น (NTU)	ค่าของแข็งละลาย (มก./ล.)	ค่าความเป็นค่า ของ 2P-M (มก./ล.)
	ความกระด้าง	แคลเซียม	แมกนีเซียม	ซัลเฟต				
0	0.8±0.8	1.0±1.0	0.7±0.7	0.5±0.5	7.7±0.0	0.6±0.1	664.7±4.5	-280.0±0.2
100	39.4±1.3	65.6±0.7	0.5±0.5	0.5±0.5	8.9±0.0	7.2±0.1	674.3±18.8	0.4±0.2
250	51.2±1.1	67.9±0.4	21.8±0.7	9.9±0.4	9.8±0.1	7.8±0.3	662.0±5.0	3.2±0.4
300	64.6±1.2	71.3±1.1	24.9±0.6	21.9±1.2	10.2±0.0	10.7±0.3	615.3±4.5	7.9±0.4
310	66.0±0.4	71.7±0.5	24.9±0.6	23.4±1.4	10.2±0.0	5.8±0.1	593.7±6.1	7.9±0.2
320	67.1±1.1	71.8±0.6	30.9±0.5	32.8±0.5	10.4±0.0	5.8±0.1	550.0±3.6	8.9±0.5
330	70.5±2.0	77.4±4.3	47.7±1.1	33.5±0.4	10.4±0.0	5.1±0.1	541.3±3.5	8.9±0.4
340	73.3±0.6	74.3±0.8	72.2±2.6	34.1±0.1	10.5±0.0	4.0±0.5	542.0±7.0	9.5±0.2
350	79.3±1.0	76.8±2.0	80.1±0.4	35.1±0.9	10.6±0.0	0.9±0.0	547.0±4.6	12.6±0.2
360	79.9±1.7	81.5±1.1	85.9±0.7	35.2±0.3	11.0±0.0	0.9±0.0	556.3±4.6	19.9±0.4
370	75.9±0.8	68.7±0.8	91.0±0.3	36.1±0.2	11.3±0.0	0.9±0.0	572.3±8.1	39.7±0.7
380	70.4±0.8	58.3±1.2	91.5±0.5	36.3±0.3	11.6±0.0	0.9±0.0	629.0±15.7	79.2±0.3

ปริมาณปูนขาว (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)				ค่าที่เอชหลัง ปฏิกิริยา	ค่าความชื้น (NTU)	ค่าของแข็งละลาย (มก./ล.)	ค่าความแตกต่าง ของ 2P-M (มก./ล.)
	ความกระต้าง	แคลเซียม	แมกนีเซียม	ซิลิกา				
390	66.0±1.7	48.1±0.7	92.0±0.2	36.8±0.4	11.7±0.1	0.9±0.0	688.3±10.5	99.8±0.6
400	61.2±1.1	37.7±1.6	92.3±0.2	37.2±0.7	11.8±0.1	0.9±0.1	727.0±16.4	125.6±0.3
450	61.2±1.1	37.4±1.1	92.5±0.4	40.5±0.9	12.2±0.1	0.9±0.0	869.7±22.8	315.5±0.4
500	61.4±0.5	-85.6±7.8	93.2±0.1	43.5±0.7	12.6±0.0	1.1±0.1	907.7±18.6	792.4±0.4





**รูปที่ 4.1** ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา ปริมาณค่าความเป็นด่างของ 2P-M และค่าพีเอช ที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ

นำผลการทดลองมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียม ประสิทธิภาพการกำจัดแมกนีเซียม ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา ปริมาณค่าความเป็นด่างของ 2P-M และค่าพีเอช (รูปที่ 4.1) สำหรับค่าความเป็นด่างของ 2P-M เมื่อ P คือ ค่าความเป็นด่างฟีนอล์ฟทาไลน์หรือสภาพด่างพี (P Alkalinity) และ M คือ ค่าความเป็นด่างเมธิลลอเรนจ์หรือสภาพด่างเอ็ม (M Alkalinity) พบว่าที่ปริมาณปูนขาว 350-360 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างทั้งหมดสูงที่สุด โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับ  $79.9 \pm 1.7$  เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามยังมีปริมาณความกระด้างที่เหลือ 40-60 มก./ล. ในเทอมของหินปูน ตามความสามารถในการละลายน้ำของ  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg(OH)}_2$  เนื่องจากที่ปริมาณปูนขาวดังกล่าวมีประสิทธิภาพการกำจัดแมกนีเซียมสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างทั้งหมดเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ค่าพีเอชหลังปฏิกิริยามีค่าประมาณ 10.6-11.0 ซึ่งเกิดตะกอน  $\text{Mg(OH)}_2$  ได้ดี รวมถึงการเกิดตะกอนทั้ง  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg(OH)}_2$  ซึ่งมีประจุคนละชนิดจะช่วยให้การตกตะกอนเกิดขึ้นได้ดี (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และคณะ (2554) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความขุ่นที่วิเคราะห์ได้พบว่าที่ปริมาณปูนขาว

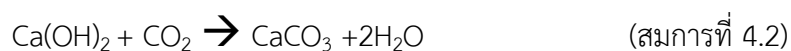
350-360 มก./ล. มีค่าความขุ่นในน้ำต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ  $0.9 \pm 0.0$  NTU นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวมากกว่า 360 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดแมกนีเซียมจะเพิ่มขึ้น ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมจะลดลง เนื่องจากปริมาณไบคาร์บอเนตที่มีอยู่ในน้ำไม่เพียงพอต่อการเกิดตะกอน  $\text{CaCO}_3$  การเติมปูนขาวมากเกินไปปริมาณไบคาร์บอเนตที่มีอยู่จึงเป็นการเพิ่มปริมาณแคลเซียมลงไปแทน แต่อย่างไรก็ตามทำให้เกิดตะกอน  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  มากขึ้น เนื่องจากการเติมปูนขาวเป็นการเติม  $\text{OH}^-$  ลงไปในน้ำ ทำให้เอื้อต่อการเกิดตะกอน  $\text{Mg}(\text{OH})_2$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนขาวกับประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากซิลิกาสามารถเกาะติด (Adsorption) กับตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ได้ หากมีปริมาณเกิดตะกอนดังกล่าวมากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกามีค่าสูงด้วย และนอกจากนี้ที่พีเอชน้ำมากกว่า 9.5 โมเลกุลซิลิกาจะแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) เกิดเป็นซิลิกาไอออน ( $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ ) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและแมกนีเซียมเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและแมกนีเซียมซิลิเกต ที่พีเอชประมาณ 11.0-12.0 และที่พีเอชมากกว่า 9 ตามลำดับ (สุมาลี เตโชพลชัย, 2529) และ (H. Cheng และคณะ, 2009) ดังนั้นกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว ตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ที่เกิดขึ้น รวมถึงแคลเซียมและแมกนีเซียมสามารถกำจัดซิลิกาที่ละลายอยู่ในน้ำได้โดยทำให้อยู่ในรูปสารประกอบซิลิเกต (Silicate) และ/หรือเกาะติดกับตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ซึ่งสามารถแยกตะกอนดังกล่าวออกจากน้ำได้ จากการทดลองจึงพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาจะเพิ่มขึ้น ตามปริมาณตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  แม้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างจะลดลง เนื่องจากการเติมปูนขาวที่มากเกินไปส่งผลให้มีแคลเซียมในน้ำเพิ่มขึ้นดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ทั้งนี้ปริมาณปูนขาวที่เติมลงในน้ำในกระบวนการกำจัดความกระด้าง (Lime Softening) ปูนขาวดังกล่าวจะถูกใช้เพื่อ 1) สะเทินกรดคาร์บอนิกในน้ำ (Neutralization of carbonic acid) และ 2) เพื่อให้เกิดผลึก  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ในการกำจัดความกระด้างคาร์บอเนต (Carbonate Hardness Removal) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การสะเทินกรดคาร์บอนิก (Neutralization of carbonic acid) หรือการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ (Carbon Dioxide Removal) เพื่อเพิ่มค่าพีเอชในน้ำ เนื่องจากน้ำตาม

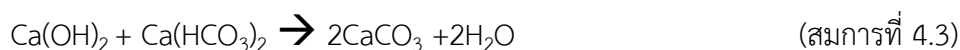
ธรรมชาติที่พีเอชน้ำสูงกว่า 4.3 – 4.5 แต่ไม่เกิน 8.3 – 8.5 จะเป็นน้ำที่มีสภาพกรดอ่อนซึ่งเป็นสภาพกรดที่เกิดจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นสำคัญ (มันซิน ตัณฑุลเวศม์ และ มันรัช ตัณฑุลเวศม์, 2551) ดังนั้นสภาพกรด (Acidity) ในน้ำจึงมีความสำคัญต่อปริมาณปูนขาวที่เติมลงไป เนื่องจากสภาพกรดของน้ำสามารถสะเทินเบสของปูนขาวได้ ดังสมการที่ 4.2 ซึ่งความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 4.7



ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	คาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ (มก./ล.)
0	1.10
10	0.76
20	0.56
25	0.48
30	0.42

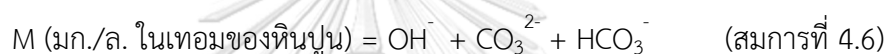
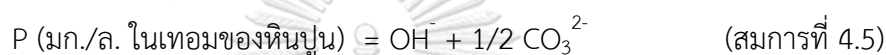
2) การกำจัดความกระด้างคาร์บอเนต (Carbonate Hardness Removal) โดยการเกิดผลึกของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)<sub>2</sub>) ซึ่งสภาพต่างในน้ำต้องเอื้อต่อการทำปฏิกิริยาดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 โดยพีเอชโดยประมาณที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึกทั้งสองต้องมีค่ามากกว่า 8.3 และ 10.5 ตามลำดับ



ดังนั้นปริมาณการปูนขาวที่เติมลงไปตามสมการ 4.1 มีวัตถุประสงค์เพื่อสะเทินสภาพกรดจากคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ รวมถึงเพื่อกำจัดความกระด้างในน้ำโดยการเกิดผลึก CaCO<sub>3</sub> และ Mg(OH)<sub>2</sub> ดังสมการที่ 4.2 ถึง 4.4 อย่างไรก็ตามผู้วิจัยไม่ได้ทำการวิเคราะห์สภาพกรด (Acidity) ในน้ำ แต่กำหนดให้ น้ำมีอุณหภูมิ 25 °C โดยความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) มีค่าเท่ากับ



0.42 มก./ล. นอกจากนี้ผู้วิจัยจะพิจารณาจากพีเอชของน้ำหลังปฏิกิริยา (Fibal pH) และค่าความเป็นด่างของ  $2P - M$  ในน้ำ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างแทน (M. C. Amiri และคณะ, 2012) เมื่อ P คือ ค่าความเป็นด่างฟีนอล์ฟทาซีนหรือสภาพด่างพี (P Alkalinity) และ M คือ ค่าความเป็นด่างเมธิลออเรนจ์หรือสภาพด่างเอ็ม (M Alkalinity) โดยหาค่าความเป็นด่างของ  $2P-M$  มากกว่า 0 มก./ล. ในเทอมของหินปูน กล่าวได้ว่าปริมาณไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) ในน้ำถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ทั้งหมดแล้ว ซึ่งเอื้อต่อการเกิดผลึก  $\text{CaCO}_3$  โดยความเข้มข้น  $\text{HCO}_3^-$   $\text{CO}_3^{2-}$  และ  $\text{OH}^-$  ที่ผลการวัดสภาพด่างพี (P Alkalinity) สภาพด่างเอ็ม (M Alkalinity) จากการไตเตรทดังสมการที่ 4.5 และ 4.6 (ตารางที่ 4.8)



**ตารางที่ 4.8** ความเข้มข้นของ  $\text{HCO}_3^-$   $\text{CO}_3^{2-}$  และ  $\text{OH}^-$  จากค่าสภาพด่างพี (P Alkalinity) สภาพด่างเอ็ม (M Alkalinity)

ผลการวัดสภาพต่าง จากการไตเตรท	ความเข้มข้น (มก./ล.)		
	$\text{HCO}_3^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{OH}^-$
$P = 0$	M	0	0
$P = M$	0	0	P
$2P = M$	0	2P	0
$2P < M$	$M - 2P$	2P	0
$2P > M$	$M - 2P$	$2(M - P)$	$2P - M$



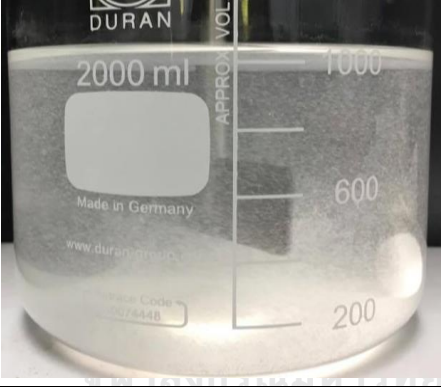
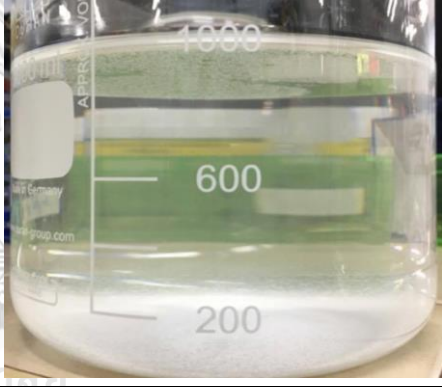

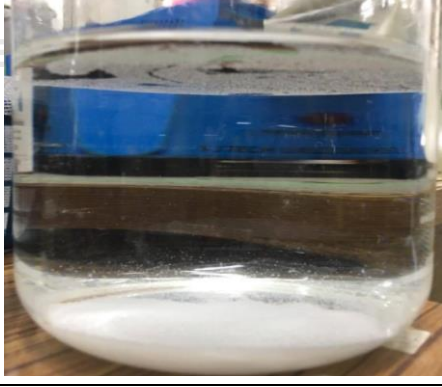
จากการทดลองกล่าวสรุปได้ว่าที่ปริมาณปูนขาว 350-360 มก./ล. หรือที่ปริมาณปูนขาวเท่ากับ 1.13-1.16 ของปริมาณปูนขาวตามตามสตอยชิโอเมตริก มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างทั้งหมดมากที่สุด ทั้งนี้ที่ปริมาณปูนขาว 350 และ 360 มก./ล. มีค่าความเป็นด่างของ  $2P-M$  เท่ากับ  $12.6 \pm 0.2$  และ  $19.9 \pm 0.4$  มก./ล. ในเทอมของหินปูน ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่การประปานครหลวง (การประปานครหลวง, 2555) และบริษัท SUEZ Water Technologies & Solutions จำกัด



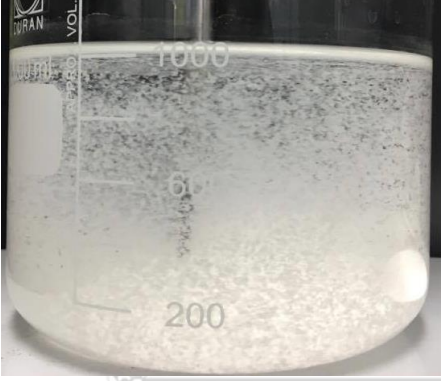
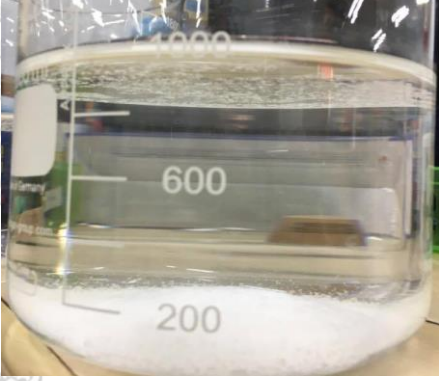
แนะนำ ที่ค่าความเป็นต่างของ 2P-M เท่ากับ 10-20 และ 5-15 มก./ล. ในเทอมของหินปูนตามลำดับ นอกจากนี้ค่าพีเอชหลังการเติมปูนขาวที่ปริมาณดังกล่าวอยู่ในช่วง 10.6-11.0 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่บริษัท SUEZ Water Technologies & Solutions จำกัด แนะนำไว้ที่พีเอชเท่ากับ 10.5

สำหรับลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนทวนซ้ำและตกตะกอนที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.9 ในขั้นตอนทวนซ้ำพบว่าที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ ฟลอกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น จนกระทั่งที่ปริมาณปูนขาว 350 – 360 มก./ล. ฟลอกที่เกิดขึ้นมีขนาดใกล้เคียงกันกับฟลอกที่เกิดจากการเติมปูนขาวที่ 500 มก./ล. ซึ่งมีขนาดใหญ่จับตัวกันตกตะกอนได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่เติมปูนขาว 350 – 360 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความขุ่นในน้ำหลังกระบวนการตกตะกอนเท่ากับ  $0.9 \pm 0.0$  NTU ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

อย่างไรก็ตามปัญหาของกระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาว (Lime-softening) สำหรับการกำจัดความกระด้างและซิลิกา คือ พีเอชหลังกระบวนการมีค่าสูง เนื่องจากการเติมปูนขาวเพื่อกำจัดทั้งแคลเซียมและแมกนีเซียม เพื่อให้เกิดตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  พีเอชของน้ำที่เหมาะสมมีค่ามากกว่า 10.6 ดังนั้นต้องมีการปรับพีเอชน้ำให้ลดลงด้วยสารละลายกรดซึ่งส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายสารเคมีและค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) ของน้ำเพิ่มขึ้น ทั้งนี้จะปรับพีเอชของน้ำให้ลดลงเหลือ 6.5 ตามมาตรฐานคุณภาพหล่อเย็นที่ระบุให้ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.2 และเพื่อป้องกันการเกิดสารประกอบซิลิเกตที่พีเอชของน้ำมากกว่า 9.5 ซึ่งส่งผลต่อการอุดตันของเมมเบรน (Fouling) (R. Sheikholeslami และคณะ, 2001) นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Julia M. Frick และคณะ (2014) พบว่าโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาได้ ซึ่งอาจจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าการเติมปูนขาว รวมถึงใช้พิจารณาค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดที่เท่ากัน และพีเอชหลังปฏิกิริยาอาจมีค่าอยู่ในช่วง 6.5-8.2 ซึ่งแตกต่างจากการเติมปูนขาวที่พีเอชหลังปฏิกิริยาจะมีค่าสูงกว่า 10

ตารางที่ 4.9 ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณของปูนขาว 250, 300, 350 และ 500 มก./ล.

ปริมาณของ ปูนขาว (มก./ล.)	ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้น	
	กวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm	ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน
250		
300		
350		

ปริมาณของ ปูนขาว (มก./ล.)	ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้น	
	กวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm	ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน
360		
500		

หมายเหตุ ผลการทดลองวันที่ 20-21 กุมภาพันธ์ 2560

#### 4.2.2 ศึกษากระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) สำหรับการกำจัดความกระด้างและซิลิกา

โดยปกติแล้วการเติมสารโคแอกกูแลนต์ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำ เช่น การปรับปรุงคุณภาพน้ำผิวดินที่มีความขุ่น เป็นต้น อย่างไรก็ตามน้ำบาดาลส่วนใหญ่และน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีค่าความขุ่นในน้ำต่ำ ดังนั้นการเติมสารโคแอกกูแลนต์ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำบาดาล โคแอกกูแลนต์ที่เป็นที่นิยมคือ สารส้ม เนื่องจากหาง่ายมีราคาถูก แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ช่วงพีเอชการทำงานของสารส้มมีค่าไม่กว้าง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกศึกษาโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ที่เป็นโคแอกกูแลนต์ที่มีองค์ประกอบของอลูมิเนียมเช่นเดียวกัน ซึ่งเริ่มเป็นที่นิยมในภาคอุตสาหกรรมและกระบวนการผลิตน้ำประปาจากน้ำผิวดิน รวมถึงโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์มีช่วงพีเอชการทำงานที่กว้างกว่าสารส้ม

การศึกษากระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) เพื่อกำจัดความกระด้างและซิลิกา ที่ปริมาณของสารส้มและโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม (mol Al/L) ทำการทดลองด้วยจาร์เทส โดยกวนเร็วที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 วินาที และการกวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที และทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นรินน้ำใสมาผ่านกระดาษกรอง GF/C และวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ (1) การกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยสารส้ม (Alum) และ (2) การกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

##### 4.2.2.1 การกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยสารส้ม (Alum)

ทำการทดลองที่ปริมาณของสารส้ม 5 ค่า ได้แก่  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-2}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม จากการทดลองพบว่าสารส้มไม่มีผลต่อการกำจัดความกระด้างในน้ำ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาที่ปริมาณสารส้ม  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม มีประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาเท่ากับ  $6.4 \pm 0.3$ ,  $9.5 \pm 0.3$  และ  $16.7 \pm 0.5$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่าพีเอชหลังปฏิกิริยา (Final pH) เท่ากับ  $7.2 \pm 0.0$ ,  $6.9 \pm 0.1$  และ  $6.6 \pm 0.0$  ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.10 และภาคผนวก ฉ ทั้งนี้ค่าพีเอชดังกล่าวอยู่ในช่วง 5.5-7.5 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al(OH)_3$ ) ละลายน้ำได้น้อยที่สุดตามแผนภาพความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบอลูมิเนียม

(Solubility Diagram) ดังนั้นกลไกหลักของกระบวนการโคแอกกูแลนซ์ที่ปริมาณสารส้มดังกล่าวเป็น “กลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation)” ซึ่งซิลิกาสามารถเกาะติดบนผลึก  $Al(OH)_3$  ได้ จึงมี ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาตั้งที่กล่าวไว้ข้างต้น (S. Salvador Cob และคณะ, 2014)



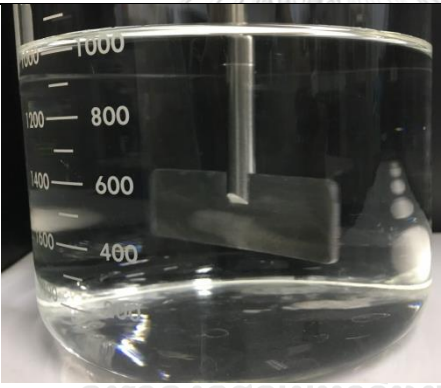
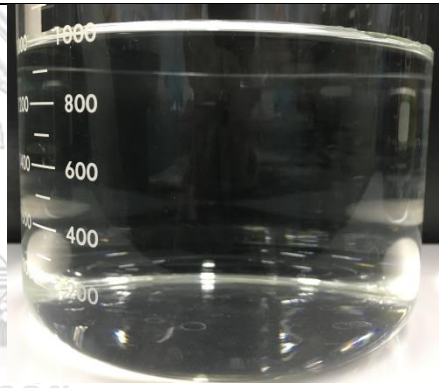


ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระต้างและซิลิกาด้วยสารส้มที่ปริมาณต่าง ๆ

ชนิดโคแอก กูแลนท์	ปริมาณสารส้ม (โมลต่อลิตร ของอลูมินัม)	ประสิทธิภาพการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)				ค่าฟอสฟอรัส ปฏิกิริยา	ค่าความขุ่น (NTU)	ค่าของแข็ง ละลาย (มก./ล.)	ค่าความเป็นด่าง ของ 2P-M (มก./ล.)
		ความกระต้าง	แคลเซียม	แมกนีเซียม	ซิลิกา				
สารส้ม	0	0.8±0.8	1.0±1.0	0.7±0.7	0.5±0.5	7.7±0.0	0.6±0.1	664.7±4.5	-280.0±0.2
	10 <sup>-7</sup>	0.7±0.7	0.9±0.9	1.1±1.1	1.5±0.2	7.7±0.0	0.6±0.0	663.7±5.5	-280.0±0.7
	10 <sup>-6</sup>	0.7±0.7	0.2±2.1	1.0±1.0	1.5±0.2	7.4±0.0	0.6±0.0	670.0±3.6	-280.0±0.8
	10 <sup>-5</sup>	0.0±1.8	0.9±0.9	0.0±1.2	6.4±0.3	7.2±0.0	0.9±0.1	678.3±3.1	-280.0±1.0
	10 <sup>-4</sup>	0.2±1.3	1.1±1.1	0.2±2.2	9.5±0.3	6.9±0.1	0.9±0.1	747.0±5.6	-278.2±0.2
	10 <sup>-3</sup>	0.9±0.9	0.2±0.2	0.9±0.9	16.7±0.5	6.6±0.0	1.0±0.0	877.0±4.2	-261.7±0.2

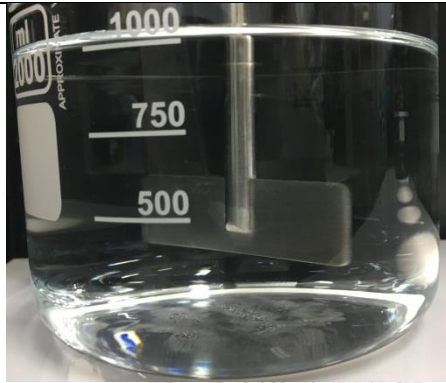
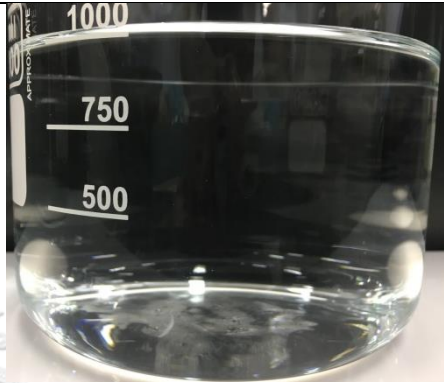
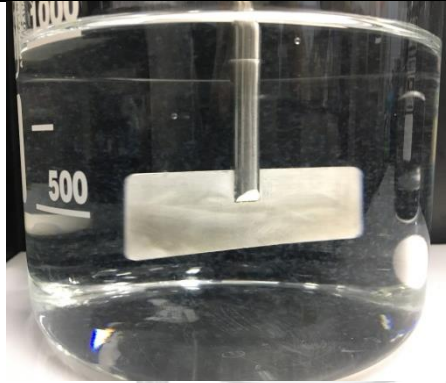
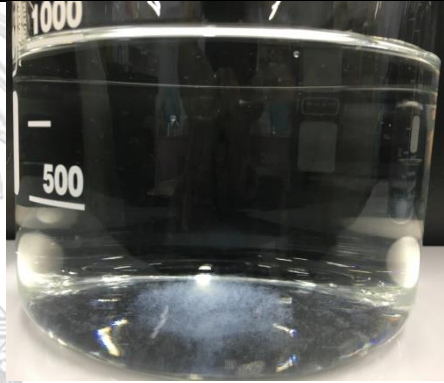
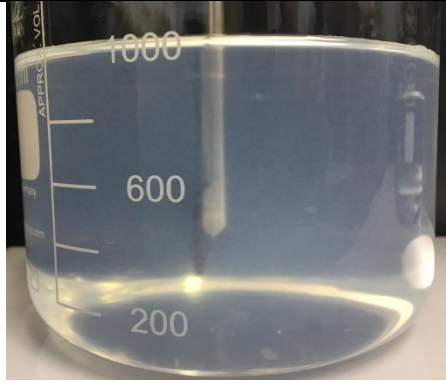



สำหรับลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.11 ในขั้นตอนกวนช้า พบว่าที่ปริมาณสารส้มตั้งแต่  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมินัมเริ่มมีฟลอคเกิดขึ้น แต่มีขนาดเล็ก ตกตะกอนยาก ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำพบว่ามีความขุ่นของน้ำหลังตกตะกอนเท่ากับ  $0.9 \pm 0.1$  และ  $1.0 \pm 0.0$  NTU ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าความขุ่นของน้ำก่อนเติมสารส้ม

**ตารางที่ 4.11** ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณของสารส้ม  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมินัม

ปริมาณของ สารส้ม (โมลต่อลิตร ของอลูมินัม)	ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้น	
	กวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm	ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน
$10^{-7}$		
$10^{-6}$		



ปริมาณของ สารส้ม (โมลต่อลิตร ของอลูมิเนียม)	ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้น	
	กวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm	ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน
$10^{-5}$		
$10^{-4}$		
$10^{-3}$		

หมายเหตุ : ผลการทดลองวันที่ 25 - 26 สิงหาคม 2560

#### 4.2.2.2 การกำจัดความกระด้างและซัลเฟตด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

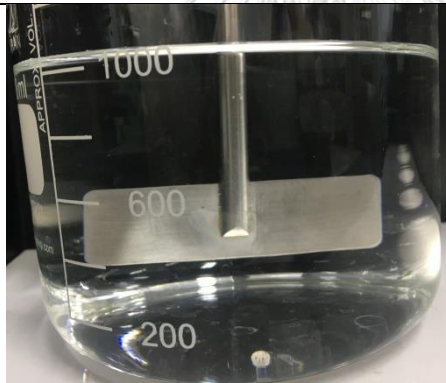
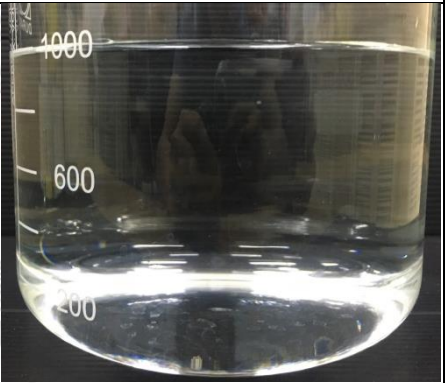
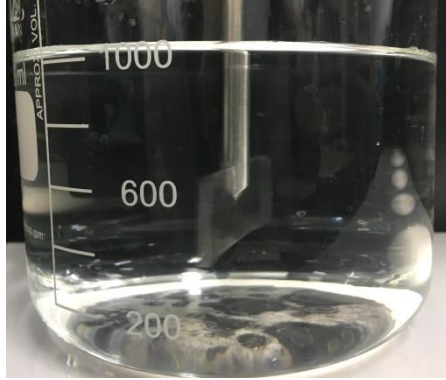

ทำการทดลองที่ปริมาณของ PACl 5 ค่า ได้แก่  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม จากการทดลองพบว่า PACl ไม่มีผลต่อการกำจัดความกระด้างในน้ำ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตที่ปริมาณ PACl  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตเท่ากับ  $13.4 \pm 0.3$ ,  $24.7 \pm 0.6$  และ  $38.8 \pm 0.3$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่าพีเอชหลังปฏิกิริยา (Final pH) เท่ากับ  $7.3 \pm 0.0$ ,  $7.1 \pm 0.1$  และ  $6.9 \pm 0.0$  ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.12 และภาคผนวก ฉ ทั้งนี้ค่าพีเอชดังกล่าวอยู่ในช่วง 5.5-7.5 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ละลายน้ำได้น้อยที่สุดตามแผนภาพความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบอลูมิเนียม (Solubility Diagram) นอกจากนี้พบว่าค่าความขุ่นของน้ำหลังตกตะกอนเท่ากับ  $0.4 \pm 0.0$ ,  $0.3 \pm 0.1$  และ  $0.3 \pm 0.0$  NTU ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าน้ำก่อนเข้าระบบ เนื่องจากสารประกอบอลูมิเนียมที่ได้จากการเติม PACl ส่วนใหญ่แล้วเป็นโพลิเมอร์โมเลกุลต่ำ (Low Polymer) และโมเลกุลสูง (High Polymer) เช่น  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{32}^{7+}$  และ  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$  หรือ  $\text{Al}_{13}$  ซึ่ง  $\text{Al}_{13}$  ดังกล่าวสามารถรวมกลุ่มกัน ( $\text{Al}_{13}$ -aggregate) โดยมีขนาดใหญ่กว่า 2 นาโนเมตร ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ ทำให้คอลลอยด์รวมตัวได้ดีขึ้น ก่อให้เกิด “กลไกแบบสะพานเชื่อม (Bridge-aggregation)” ซึ่งเป็นกลไกหลักของกระบวนการโคแอกกูแลนซ์ที่ปริมาณ PACl ดังกล่าว (H. Tang และคณะ, 2015) ทั้งนี้ซัลเฟตสามารถเกาะติดบนผลึก  $\text{Al}(\text{OH})_3$  และกลุ่มของ  $\text{Al}_{13}$  จึงมีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

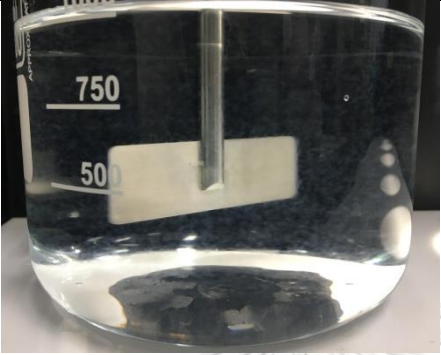
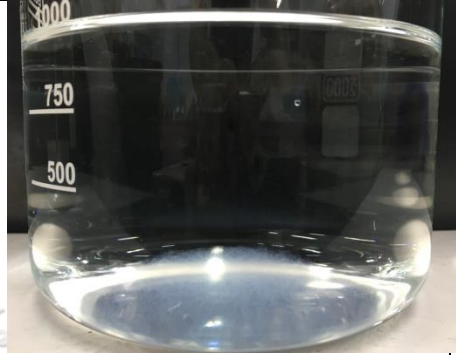
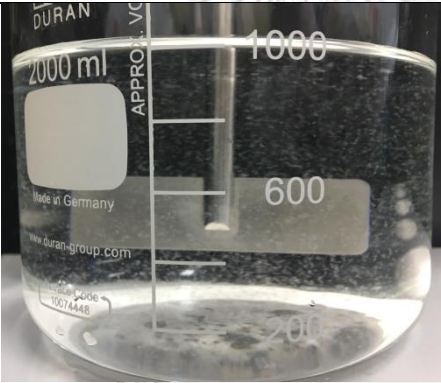
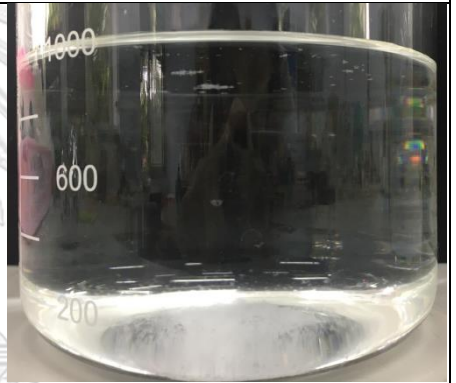
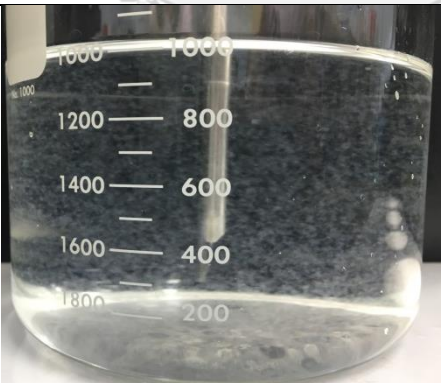
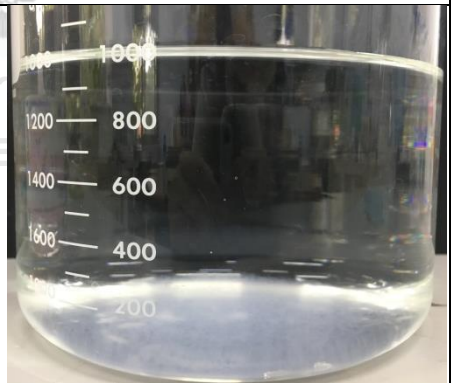
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองของการเติม PACI ที่ปริมาณต่าง ๆ

ชนิดโคแคก กุแลนที่	ปริมาณ PACI (โมลต่อลิตร ของออลูมิเนียม)	ประสิทธิภาพการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)				ค่าพีเอชหลัง ปฏิกิริยา	ค่าความขุ่น (NTU)	ค่าของแข็ง ละลาย (มก./ล.)	ค่าความเป็นต่าง ของ 2P-M (มก./ล.)
		ความกระต้าง	แคลเซียม	แมกนีเซียม	ซิลิกา				
PACI	0	0.8±0.8	1.0±1.0	0.7±0.7	0.5±0.5	7.7±0.0	0.6±0.1	664.7±4.5	-280.0±0.2
	10 <sup>-7</sup>	0.4±0.5	0.3±0.3	0.5±0.5	4.0±0.5	7.7±0.0	0.4±0.0	664.0±4.6	-280.0±0.6
	10 <sup>-6</sup>	0.3±0.3	0.4±0.3	0.6±0.6	5.8±0.1	7.4±0.0	0.4±0.0	679.7±2.3	-280.0±0.6
	10 <sup>-5</sup>	1.0±1.0	0.9±0.9	1.0±1.0	13.4±0.3	7.3±0.0	0.4±0.0	721.0±3.0	-280.0±0.3
	10 <sup>-4</sup>	0.4±0.4	0.6±0.6	0.5±0.5	24.7±0.6	7.1±0.1	0.3±0.1	828.7±6.0	-279.9±0.4
	10 <sup>-3</sup>	0.7±0.6	0.4±0.4	0.4±0.4	38.8±0.3	6.9±0.0	0.3±0.0	971.0±6.6	-279.5±0.6

สำหรับลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.13 ในขั้นตอนกวนช้า พบว่าที่ปริมาณ PACl ตั้งแต่  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม เริ่มมีฟล็อกเกิดขึ้น มีขนาดใหญ่กว่าฟล็อกที่เกิดจากการเติมสารส้ม ตกตะกอนได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำพบว่ามีความขุ่นของน้ำหลังตกตะกอนเท่ากับ  $0.4 \pm 0.0$ ,  $0.3 \pm 0.1$  และ  $0.3 \pm 0.0$  NTU ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความขุ่นของน้ำที่เติมสารส้มดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

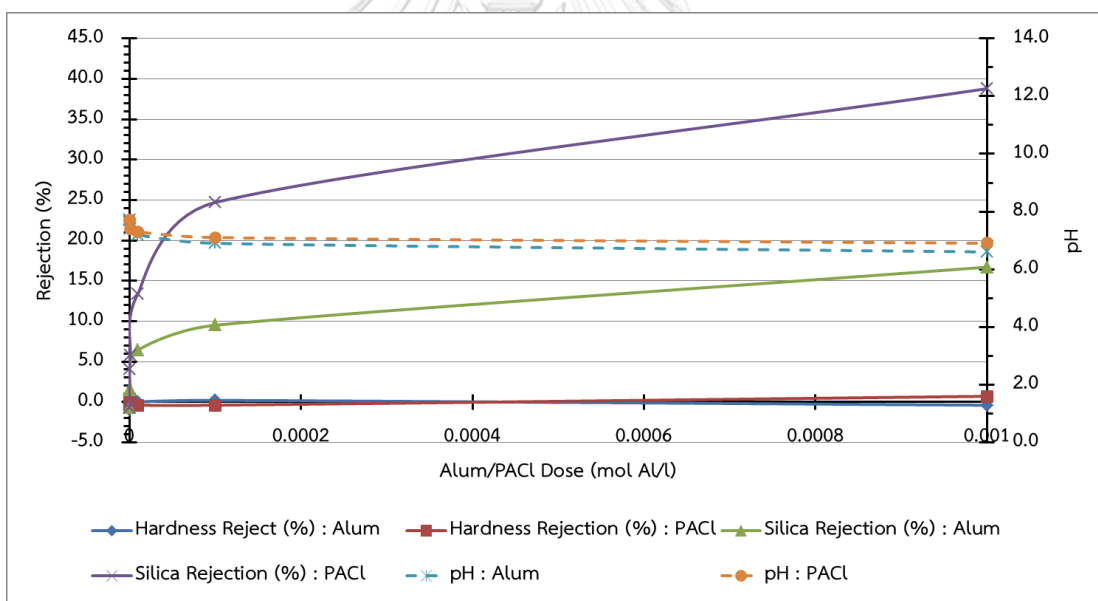
**ตารางที่ 4.13** ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณของ PACl  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$  และ  $10^{-2}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม

ปริมาณของ PACl (โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม)	ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้น	
	กวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm	ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน
$10^{-7}$		
$10^{-6}$		

ปริมาณของ PACl (โมลต่อลิตร ของอลูมิเนียม)	ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้น	
	กวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm	ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน
$10^{-5}$		
$10^{-4}$		
$10^{-3}$		

หมายเหตุ ผลการทดลองวันที่ 25 - 26 สิงหาคม 2560

จากการศึกษากระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมสารส้มและ PACl สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา ค่าพีเอช และที่ปริมาณสารส้มและ PACl ต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.2 พบว่าสารส้มและ PACl ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในน้ำ แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกา ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาของการเติม PACl มีค่าสูงกว่าการเติมสารส้มที่ปริมาณอลูมิเนียมเท่ากัน เนื่องจาก ฟลอคของ PACl มีขนาดใหญ่กว่าฟลอคของสารส้ม (M. H. Davood Abadi Farahani และคณะ, 2016) ซิลิกาจึงสามารถเกาะติดตะกอนเหล่านั้นได้มาก สอดคล้องกับค่าความขุ่นของน้ำหลังตกตะกอนพบว่าน้ำที่เติม PACl มีค่าความขุ่นต่ำกว่าน้ำที่เติมสารส้ม เนื่องจากสารประกอบอลูมิเนียมของ PACl ( $Al_{13}$ ) ส่วนใหญ่แล้วเป็นโพลิเมอร์ทำให้คอลลอยด์รวมกลุ่มกันได้ดี ทั้งนี้ น้ำหลังผ่านกระบวนการควรมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.2 ตามมาตรฐานคุณภาพหล่อเย็น และเพื่อป้องกันการเกิดสารประกอบซิลิเกตที่พีเอชของน้ำมากกว่า 9.5 ซึ่งส่งผลต่อการอุดตันของเมมเบรน (Fouling)



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา และค่าพีเอช ที่ปริมาณสารส้ม และ PACl ต่าง ๆ

#### 4.2.3 ศึกษากระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาว (Lime-softening) ร่วมกับโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) สำหรับการกำจัดความกระด้างและซิลิกา

จากการทดลองที่ 2.1 ที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างทั้งหมดได้มากที่สุดและสามารถกำจัดซิลิกาได้ อย่างไรก็ตามคุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการดังกล่าวพบว่าแม้ว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในน้ำได้ แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกาในน้ำต่ำ และค่าความขุ่นของน้ำหลังตกตะกอนมีค่าเท่ากับ  $0.9 \pm 0.0$  NTU ซึ่งมีความขุ่นสูงกว่าน้ำก่อนเข้าระบบ ทั้งนี้จากการทดลองที่ 2.2 พบว่าสารส้มและ PACl ซึ่งมีลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ มีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกาในน้ำและมีค่าความขุ่นหลังตกตะกอนต่ำกว่าน้ำก่อนเข้าระบบ โดยมีค่าเท่ากับ  $0.3 \pm 0.0$  NTU ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการทดลองด้วยการเติมปูนขาวร่วมกับโคแอกกูแลนต์ร่วมกัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา และค่าความขุ่นในน้ำหลังการตกตะกอนเมื่อเติมสารเคมีทั้งสองชนิดในขั้นตอนกวนเร็วพร้อมกัน เนื่องจากสารเคมีทั้งสองชนิดส่งผลให้ค่าความเป็นด่างและพีเอชของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา อย่างไรก็ตามการเติมปูนขาวร่วมกับโคแอกกูแลนต์ในขั้นตอนกวนเร็วพร้อมกัน จะช่วยลดขั้นตอนการตกตะกอนในการแยกตะกอน  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  และตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดจากการเติมโคแอกกูแลนต์ นอกจากนี้จากการทดลองที่ 2.2 พบว่าการเติมโคแอกกูแลนต์สามารถช่วยลดพีเอชของน้ำได้ ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากการเติมโคแอกกูแลนต์เพื่อลดปริมาณกรดที่ต้องเติมหลังกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวในการปรับพีเอชของน้ำให้มีค่า 6.0-8.0 ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทดแทนของระบบหล่อเย็นของ JRA

การศึกษากระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาวร่วมกับโคแอกกูแลนต์เพื่อกำจัดความกระด้างและซิลิกา ทำการทดลองที่ปริมาณปูนขาว 360 mg/L และที่ปริมาณโคแอกกูแลนต์  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมินัม ทำการทดลองด้วยจาร์เทส โดยกวนเร็วที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 วินาที และการกวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที และทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นรินน้ำใสมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ (1) การกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยปูนขาว (Lime-softening) และ สารส้ม (Alum) และ (2) การกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยปูนขาว (Lime-softening) และ โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

#### 4.2.3.1 การกำจัดความกระด้างและซัลเฟตด้วยปูนขาว (Lime-softening) ร่วมกับสารส้ม (Alum)

ทำการทดลองที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. ร่วมกับสารส้ม 5 ค่า ได้แก่  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมินัม ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.15 และภาคผนวก ข พบว่าที่ปริมาณสารส้ม  $10^{-7}$  โมลต่อลิตรของอลูมินัม ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเติมปูนขาว 360 มก./ล. เพียงอย่างเดียว โดยมีค่า  $72.5 \pm 0.5$  เฟอร์เซ็นต์ และที่ปริมาณสารส้ม  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$  และ  $10^{-4}$  โมลต่อลิตรของอลูมินัม ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างโดยการเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียว โดยมีค่า  $80.4 \pm 0.5$ ,  $80.4 \pm 0.5$  และ  $80.6 \pm 0.6$  เฟอร์เซ็นต์ ตามลำดับเนื่องจากพีเอชหลังปฏิกิริยามีค่าประมาณ  $10.8 \pm 0.0$ ,  $10.6 \pm 0.1$  และ  $10.5 \pm 0.0$  ตามลำดับ ซึ่งค่าพีเอชใกล้เคียงช่วง 10.6-11.0 เป็นช่วงพีเอชที่เกิดตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg(OH)}_2$  ได้ และมีค่าความเป็นด่างของ 2P-M เท่ากับ  $16.8 \pm 0.4$ ,  $14.9 \pm 0.4$  และ  $10.4 \pm 0.2$  มก./ล. ในเทอมของหินปูน ตามลำดับขณะที่ปริมาณสารส้ม  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมินัม พีเอชหลังปฏิกิริยามีค่า  $8.3 \pm 0.0$  ซึ่งตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg(OH)}_2$  เกิดได้น้อยส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างลดลงเหลือ  $28.5 \pm 1.4$  เฟอร์เซ็นต์ และมีค่าความเป็นด่างของ 2P-M เท่ากับ  $-37.9 \pm 0.3$  มก./ล. ในเทอมของหินปูน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างโดยการเติมปูนขาว ในการทดลองที่ 2.1 กล่าวว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างมีค่ามากที่สุด เมื่อค่าความเป็นด่างของ 2P-M อยู่ในเกณฑ์ที่การประปานครหลวง (การประปานครหลวง, 2555) และบริษัท SUEZ Water Technologies & Solutions จำกัด แนะนำ ที่ค่าความเป็นด่างของ 2P-M เท่ากับ 10-20 และ 5-15 มก./ล. ในเทอมของหินปูน ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าพีเอชหลังการเติมปูนขาวที่ปริมาณดังกล่าวอยู่ในช่วง 10.6-11.0 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่บริษัท SUEZ Water Technologies & Solutions จำกัด แนะนำไว้ที่พีเอชเท่ากับ 10.5

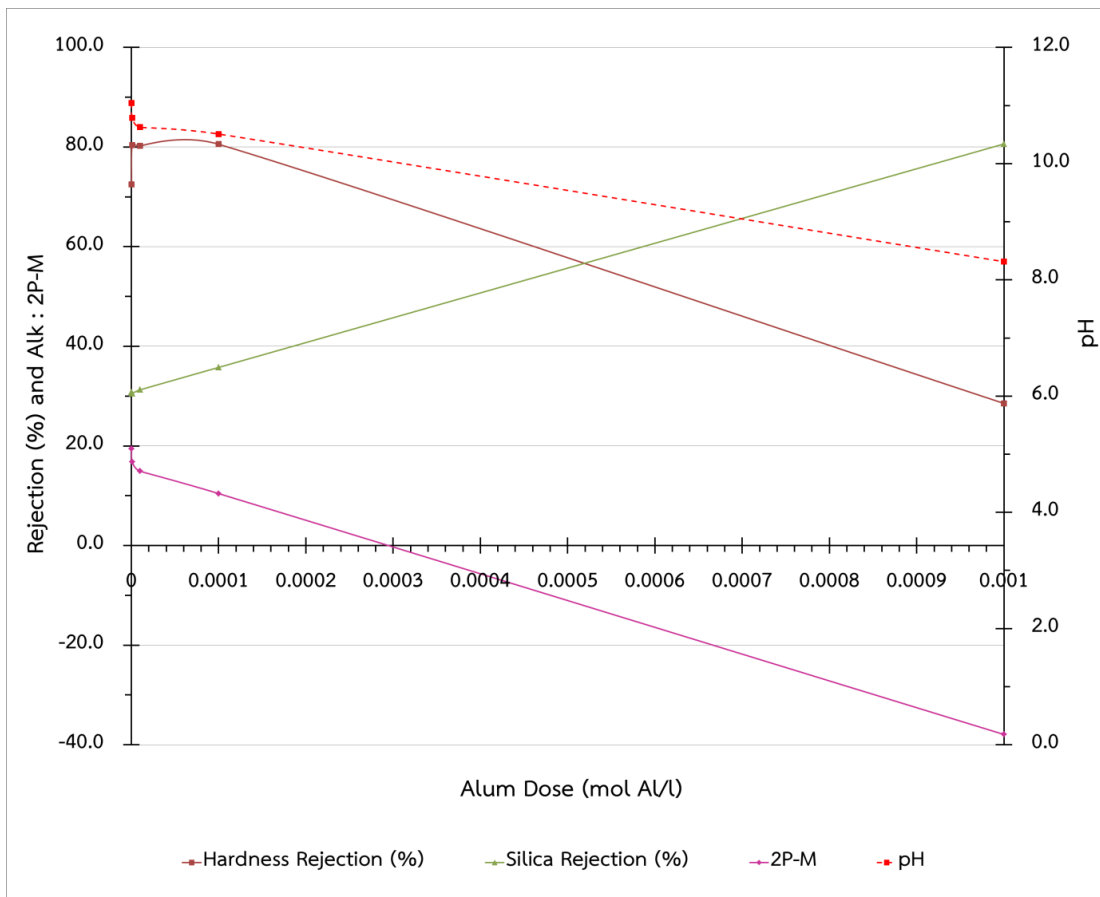


ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองของการเติมปูนขาว 360 มก./ล. และสารส้มที่ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณปูน ขาว (มก./ล.)	ปริมาณสารส้ม (โมลต่อลิตร ของอลูมิเนียม)	ประสิทธิภาพการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)				ค่าพีเอชหลัง ปฏิกิริยา	ค่าความขุ่น (NTU)	ค่าของแข็ง ละลาย (มก./ล.)	ค่าความเป็นต่าง ของ 2P-M (มก./ล.)
		ความกระด้าง	แคลเซียม	แมกนีเซียม	ซิลิกา				
0	0	0.8±0.8	1.0±1.0	0.7±0.7	0.5±0.5	7.7±0.0	0.6±0.1	664.7±4.5	-280.0±0.4
360	0	79.9±1.7	81.5±1.1	85.9±0.7	35.2±0.3	11.0±0.0	0.9±0.0	547.0±4.6	19.9±0.4
360	10 <sup>-7</sup>	72.5±0.5	72.4±0.7	74.1±0.4	30.8±0.5	11.0±0.0	1.0±0.1	584.0±3.5	19.4±0.3
360	10 <sup>-6</sup>	80.4±0.5	81.1±0.2	85.5±0.4	30.5±0.3	10.8±0.0	0.9±0.0	598.0±2.0	16.8±0.4
360	10 <sup>-5</sup>	80.3±0.4	80.8±0.7	85.3±0.4	31.3±0.1	10.6±0.1	1.0±0.1	608.7±1.2	14.9±0.4
360	10 <sup>-4</sup>	80.6±0.6	80.5±0.6	85.8±0.4	35.8±0.2	10.5±0.0	1.0±0.0	614.3±3.1	10.4±0.2
360	10 <sup>-3</sup>	28.5±1.4	24.7±0.4	33.9±0.6	80.6±0.4	8.3±0.0	1.2±0.0	601.7±3.1	-37.9±0.3

สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา พบว่าที่ปริมาณสารส้ม  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$  และ  $10^{-4}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม มีประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกัน โดยมีค่า  $30.8 \pm 0.5$ ,  $30.5 \pm 0.3$ ,  $31.3 \pm 0.1$  และ  $35.8 \pm 0.2$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับที่ปริมาณสารส้ม  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม มีประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาสูงมาก โดยมีค่า  $80.6 \pm 0.4$  เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากพีเอชหลังปฏิกิริยามีค่า  $8.3 \pm 0.0$  ซึ่งพีเอชดังกล่าวตะกอน  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ละลายน้ำได้น้อยกว่าที่พีเอชในช่วง 10.0-11.0 จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกามีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับปริมาณสารส้มนอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาของการทดลองที่ 2.2.1 ที่ปริมาณสารส้ม  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม กับ การทดลองที่ 2.3.1 ที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และ สารส้ม  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาเพิ่มสูงขึ้นจาก  $35.2 \pm 0.3$  เปอร์เซ็นต์ เป็น  $80.6 \pm 0.4$  เปอร์เซ็นต์ แม้ว่าคุณภาพหลังเติมสารส้มในการทดลองที่ 2.2.1 จะมีค่าพีเอช  $6.6 \pm 0.0$  ซึ่งที่พีเอชดังกล่าวตะกอน  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ละลายน้ำได้น้อยกว่าพีเอชของน้ำหลังเติมปูนขาว และสารส้มในการทดลองที่ 2.3.1 ที่มีค่าพีเอช  $8.3 \pm 0.0$  ทั้งนี้อาจเกิดจากการเติมปูนขาวและสารส้มที่ปริมาณดังกล่าวมีทั้งตะกอน  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  และ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  เกิดขึ้น ดังนั้นซิลิกาจึงมีโอกาสเกาะติดกับตะกอนทั้งสามได้มากกว่าการเติมสารส้มเพียงอย่างเดียว ที่มีเพียงตะกอน  $\text{Al}(\text{OH})_3$

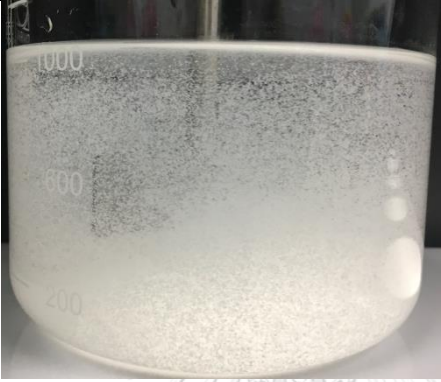
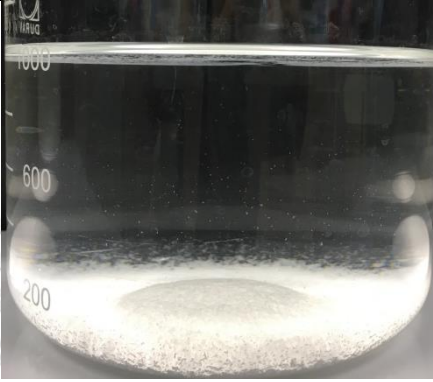
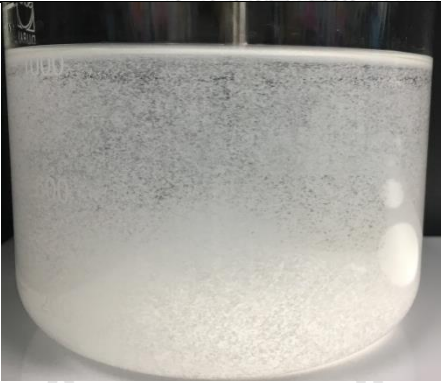
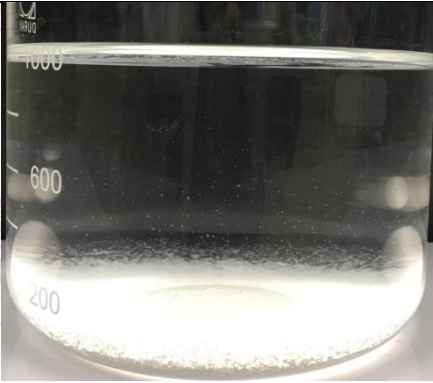
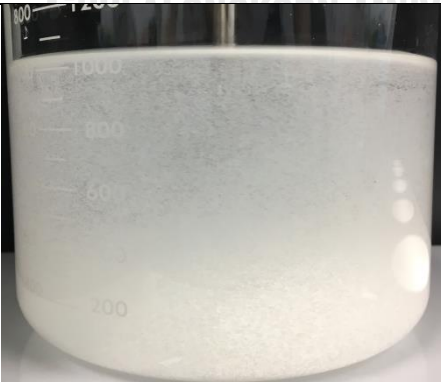
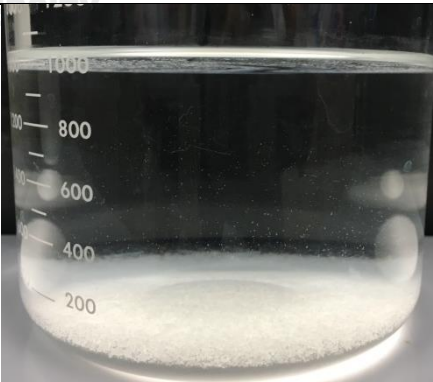
เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยปูนขาวร่วมกับสารส้ม พบว่าที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และที่ปริมาณสารส้ม  $10^{-7}$ - $10^{-4}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาใกล้เคียงกับการเติมปูนขาวที่ 360 มก./ล. ดังนั้นการเติมสารส้มไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา เสียค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและเพิ่มปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS) ในน้ำ นอกจากนี้ที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และที่ปริมาณสารส้ม  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาเพิ่มขึ้นเป็น  $80.6 \pm 0.4$  เปอร์เซ็นต์ แต่มีประสิทธิผลการกำจัดความกระด้างลดลงเหลือ  $28.5 \pm 1.4$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประสิทธิผลการกำจัดความกระด้างลดลงต่ำมาก ซึ่งไม่สมเหตุสมผลกับการเติมปูนขาว 360 มก./ล. ร่วมกับสารส้ม  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการเติมปูนขาวและสารส้มพร้อมกันไม่ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา ดังนั้นผู้วิจัยจึงไม่ได้ทำการศึกษาต่อเพื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกำจัดความกระด้างและซิลิกา

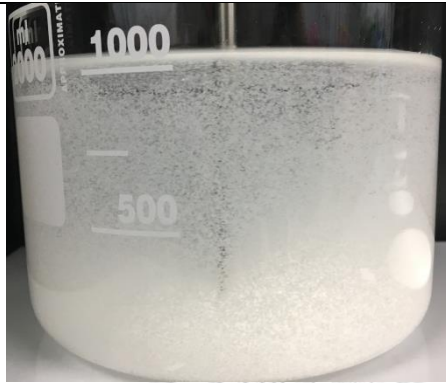
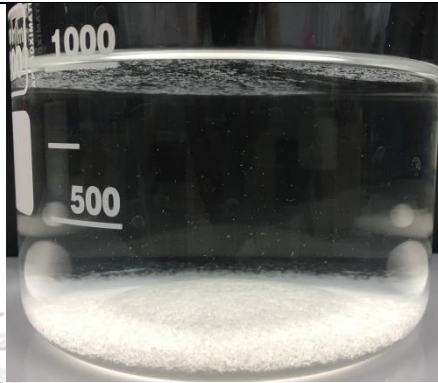
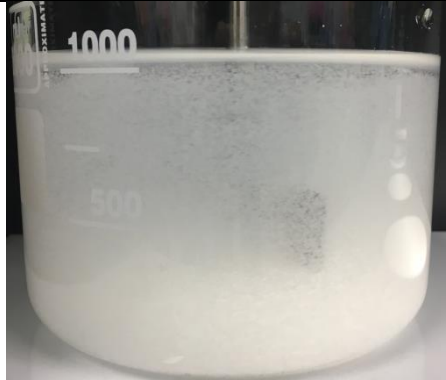



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา ความเป็นด่างของ 2P-M และค่าพีเอช ที่ปริมาณสารส้มต่าง ๆ หลังเติมปูนขาวที่ 360 มก./ล.

สำหรับลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และที่ปริมาณต่าง ๆ ของสารส้ม ดังตารางที่ 4.16 ในขั้นตอนกวนช้าพบว่าที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ ฟลอคจะมีขนาดใหญ่ และที่ทุก ๆ ปริมาณสารส้ม และขนาดฟลอคที่เกิดขึ้นมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่เติมปูนขาว 360 มก./ล. และที่ปริมาณสารส้ม  $10^{-7}$  ถึง  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม พบว่าค่าความขุ่นในน้ำหลังกระบวนการตกตะกอนมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 0.9-1.2 NTU ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.15 ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณของสารส้ม  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$  และ  $10^{-2}$  โมลต่อลิตรของอลูมินัม หลังเติมปูนขาวที่ 360 มก./ล.

ปริมาณของ สารส้ม (โมลต่อลิตร ของอลูมินัม)	ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้น	
	กวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm	ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน
$10^{-7}$		
$10^{-6}$		
$10^{-5}$		

ปริมาณของ สารส้ม (โมลต่อลิตร ของอลูมิเนียม)	ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้น	
	กวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm	ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน
$10^{-4}$		
$10^{-3}$		

หมายเหตุ : ผลการทดลองวันที่ 12 - 13 กันยายน 2560

#### 4.2.3.2 การกำจัดความกระด้างและซัลเฟตด้วยปูนขาว (Lime-softening) ร่วมกับโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

ทำการทดลองที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. ร่วมกับ PACl 5 ค่า ได้แก่  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.17 และภาคผนวก ข พบว่าที่ปริมาณ PACl  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$  และ  $10^{-4}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างโดยการเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียว โดยมีค่า  $80.3 \pm 0.4$ ,  $80.4 \pm 0.7$ ,  $80.3 \pm 0.4$  และ  $80.6 \pm 0.4$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องมาจากพีเอชหลังปฏิกิริยามีค่าประมาณ  $11.0 \pm 0.0$ ,  $10.9 \pm 0.0$ ,  $10.9 \pm 0.0$  และ  $10.7 \pm 0.0$  ตามลำดับ ซึ่งค่าพีเอชอยู่ในช่วง 10.6-11.0 เป็นช่วงพีเอชที่เกิดตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ได้ และมีค่าความเป็นด่างของ 2P-M เท่ากับ  $17.2 \pm 0.2$ ,  $16.8 \pm 0.1$ ,  $15.7 \pm 0.2$  และ  $11.2 \pm 0.1$  มก./ล. ในเทอมของหินปูน ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณ PACl  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม พีเอชหลังปฏิกิริยามีค่า  $8.6 \pm 0.1$  ซึ่งตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  เกิดได้น้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างลดลงเหลือ  $35.4 \pm 0.9$  เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความเป็นด่างของ 2P-M เท่ากับ  $-35.8 \pm 0.2$  มก./ล. ในเทอมของหินปูน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างโดยการเติมปูนขาว ในการทดลองที่ 2.1 กล่าวหาว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างทั้งหมดมากที่สุดเมื่อค่าความเป็นด่างของ 2P-M อยู่ในเกณฑ์ที่การประปานครหลวง (การประปานครหลวง, 2555) และบริษัท SUEZ Water Technologies & Solutions จำกัด แนะนำ ที่ค่าความเป็นด่างของ 2P-M เท่ากับ 10-20 และ 5-15 มก./ล. ในเทอมของหินปูน ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าพีเอชหลังการเติมปูนขาวที่ปริมาณดังกล่าวอยู่ในช่วง 10.6-11.0 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่บริษัท SUEZ Water Technologies & Solutions จำกัด แนะนำไว้ที่พีเอชเท่ากับ 10.5

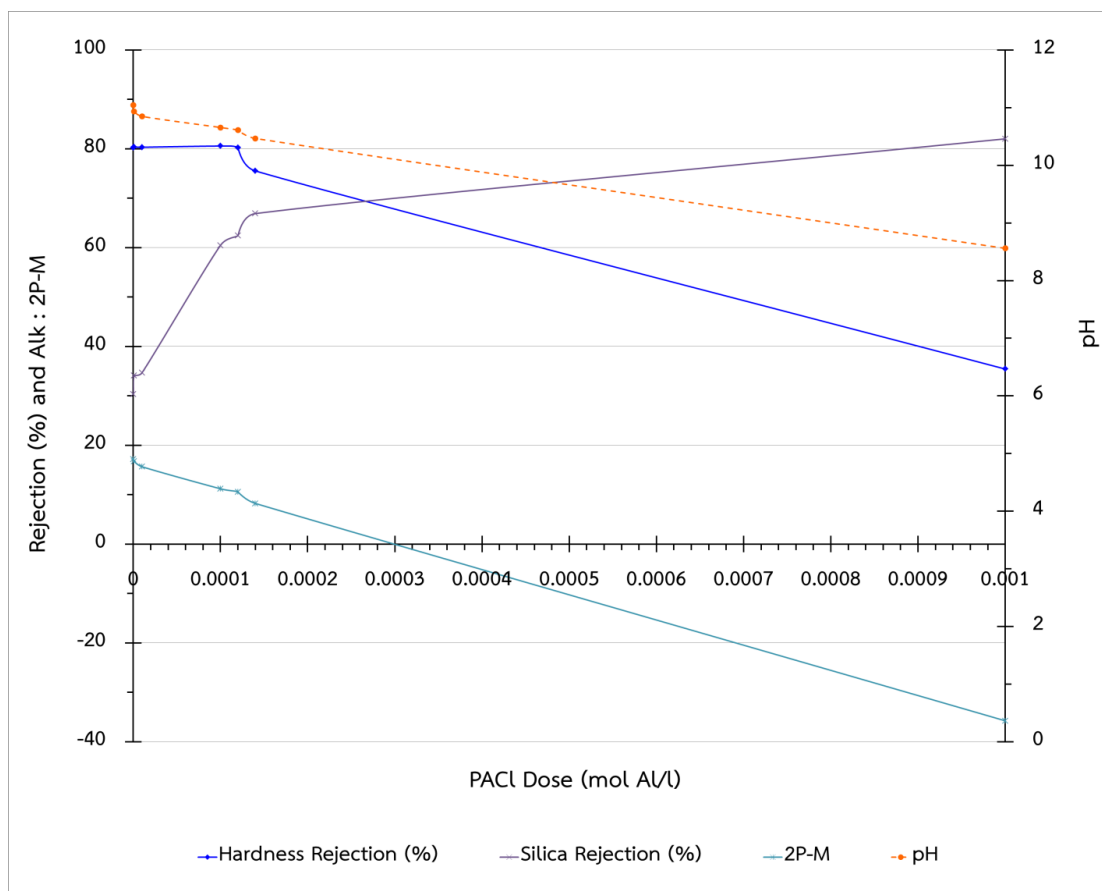
สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟต พบว่าที่ปริมาณ PACl  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$  และ  $10^{-5}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม มีประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกัน โดยมีค่า  $30.3 \pm 0.1$ ,  $34.1 \pm 0.4$  และ  $34.7 \pm 0.1$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับที่ปริมาณ PACl  $10^{-4}$  และ  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตสูงมาก โดยมีค่า  $60.5 \pm 0.4$  และ  $82.0 \pm 0.3$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากรูปที่ 4.4 จะพบว่าความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับปริมาณ PACl นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตของการทดลองที่ 2.2.1 ที่ปริมาณ PACl  $10^{-4}$

โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม กับการทดลองที่ 2.3.1 ที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และ PACl  $10^{-4}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาเพิ่มสูงขึ้นจาก  $24.7 \pm 0.6$  เปอร์เซ็นต์ เป็น  $60.5 \pm 0.4$  เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเมื่อเติมปูนขาวร่วมกับ PACl ที่ปริมาณดังกล่าวมีทั้งตะกอน  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Mg(OH)}_2$  และ  $\text{Al(OH)}_3$  เกิดขึ้น ดังนั้นซิลิกาจึงมีโอกาสเกาะติดกับตะกอนทั้งสามได้มากกว่าการเติม PACl เพียงอย่างเดียว ที่มีเพียงตะกอน  $\text{Al(OH)}_3$  เช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาของการทดลองที่ 2.2.1 ที่ปริมาณ PACl  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม กับการทดลองที่ 2.3.1 ที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. ร่วมกับ PACl  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาเพิ่มสูงขึ้นจาก  $38.8 \pm 0.3$  เปอร์เซ็นต์ เป็น  $82.0 \pm 0.3$  เปอร์เซ็นต์ แม้ว่าคุณภาพหลังเติม PACl ในการทดลองที่ 2.2.1 จะมีค่าพีเอช  $6.9 \pm 0.0$  ซึ่งที่พีเอชดังกล่าวตะกอน  $\text{Al(OH)}_3$  ละลายน้ำได้น้อยกว่าพีเอชของน้ำหลังเติมปูนขาวร่วมกับ PACl ในการทดลองที่ 2.3.1 ที่มีค่าพีเอช  $8.6 \pm 0.1$  ทั้งนี้ อาจเกิดจากการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl ที่ปริมาณดังกล่าวมีทั้งตะกอน  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Mg(OH)}_2$  และ  $\text{Al(OH)}_3$  เกิดขึ้น ดังนั้นซิลิกาจึงมีโอกาสเกาะติดกับตะกอนทั้งสามได้มากกว่าการเติม PACl เพียงอย่างเดียว ที่มีเพียงตะกอน  $\text{Al(OH)}_3$  ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองของการเติมปูนขาว 360 มก./ล. และ PACl ที่ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณปูนขาว (มก./ล.)	ปริมาณสาร (โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม)	ประสิทธิภาพการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)				ค่าพีเอชหลังปฏิกิริยา	ค่าความขุ่น (NTU)	ค่าของแข็งละลาย (มก./ล.)	ค่าความเบี่ยงต่างของ 2P-M (มก./ล.)
		ความกระด้าง	แคลเซียม	แมกนีเซียม	ซิลิกา				
0	0	0.8±0.8	1.0±1.0	0.7±0.7	0.5±0.5	7.7±0.0	0.6±0.1	664.7±4.5	-280.0±0.4
360	0	79.9±1.7	81.5±1.1	85.9±0.7	35.2±0.3	11.0±0.0	0.9±0.0	547.0±4.6	19.9±0.4
360	10 <sup>-7</sup>	80.3±0.4	81.2±0.3	85.3±0.3	30.3±0.1	11.0±0.0	0.6±0.0	586.0±2.7	17.2±0.2
360	10 <sup>-6</sup>	80.4±0.7	81.3±0.4	85.3±0.3	34.1±0.4	10.9±0.0	0.7±0.0	586.3±5.7	16.8±0.1
360	10 <sup>-5</sup>	80.3±0.4	81.2±0.4	85.5±0.1	34.7±0.1	10.9±0.0	0.6±0.0	605.0±5.3	15.7±0.2
360	10 <sup>-4</sup>	80.6±0.4	81.3±0.3	85.4±0.5	60.5±0.4	10.7±0.0	0.6±0.0	508.3±3.1	11.2±0.1
360	1.2 x 10 <sup>-4</sup>	80.2±0.4	81.5±0.3	85.7±0.2	62.4±0.2	10.6±0.0	0.6±0.0	500.7±3.1	10.6±0.2
360	1.4 x 10 <sup>-4</sup>	75.5±0.4	73.3±0.2	81.6±0.2	66.9±0.3	10.5±0.1	1.3±0.0	532.7±6.8	8.2±0.1
360	10 <sup>-3</sup>	35.4±0.9	32.1±0.4	39.6±0.5	82.0±0.3	8.6±0.1	1.2±0.1	908.0±8.2	-35.8±0.2





รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา ปริมาณค่าความเป็นด่างของ 2P-M และค่าพีเอช ที่ปริมาณ PACI ต่าง ๆ หลังเติมปูนขาวที่ 360 มก./

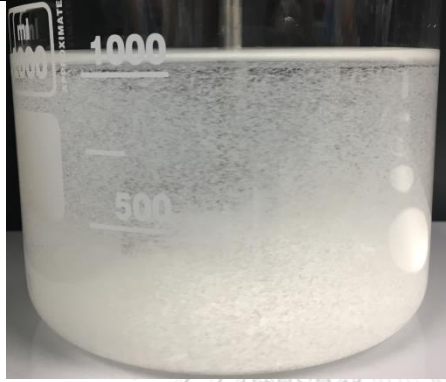
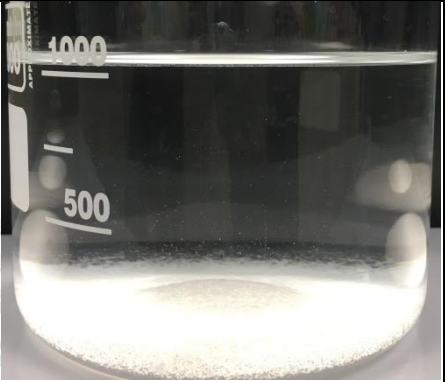
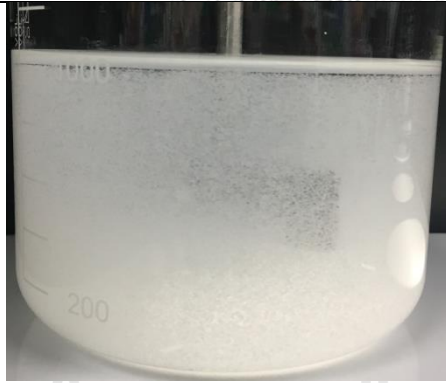
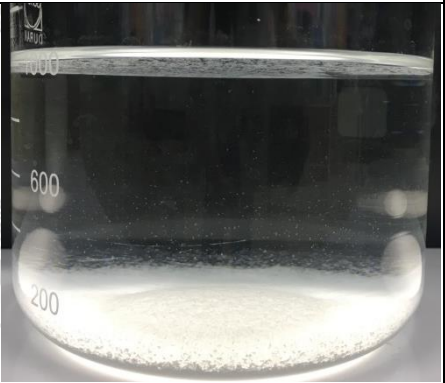
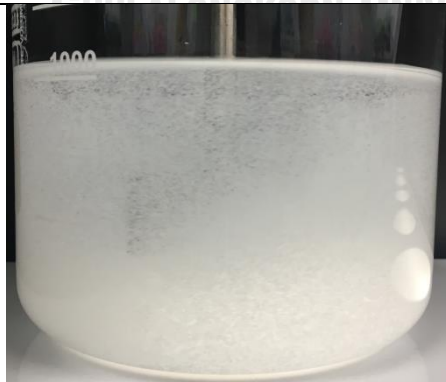
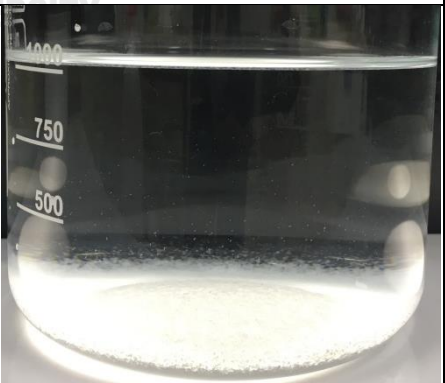
ล.  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

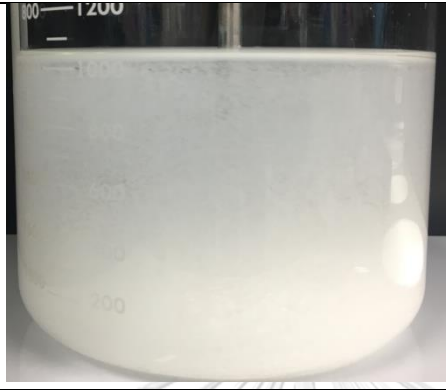
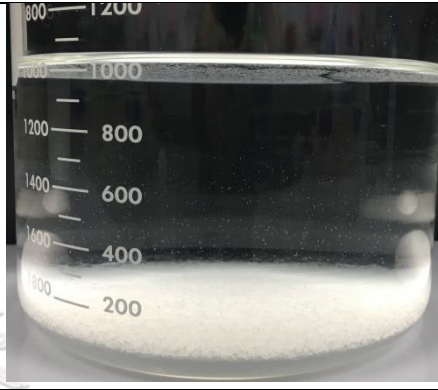
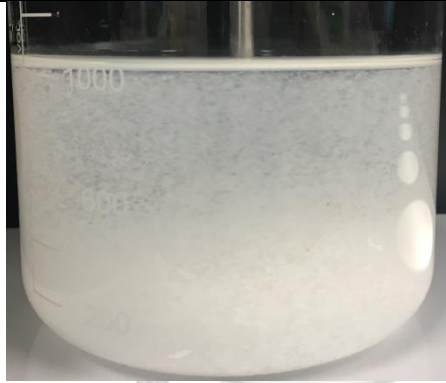
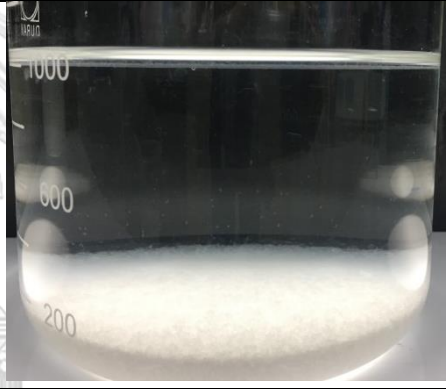
เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยปูนขาวร่วมกับ PACI พบว่าที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และที่ปริมาณร่วมกับ  $10^{-7}$ - $10^{-5}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาใกล้เคียงกับการเติมปูนขาวที่ 360 มก./ล. เพียงอย่างเดียว ดังนั้นการเติม PACI ไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา เสียค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและเพิ่มปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS) ในน้ำ อย่างไรก็ตามที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และที่ปริมาณ PACI  $10^{-4}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างมีค่าเท่ากับการเติมปูนขาวที่ 360 มก./ล. เพียงอย่างเดียว แต่มีประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาสูงขึ้นและมีค่าความขุ่นของน้ำต่ำลง ขณะที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และที่ปริมาณ PACI  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาสูงกว่าที่ปริมาณ PACI  $10^{-4}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม

แต่มีประสิทธิผลการกำจัดความกระด้างน้อยลง เนื่องจากพีเอชของน้ำหลังเกิดปฏิกิริยาไม่เหมาะสมกับการเกิดตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg(OH)}_2$  ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ดังนั้นผู้วิจัยจะศึกษาหาปริมาณ PACl ตั้งแต่  $10^{-4}$  ถึง  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม เพื่อหาปริมาณ PACl ที่เหมาะสมที่สุดที่ ยังคงทำให้กระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวมีประสิทธิภาพ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกาเพิ่มขึ้นว่าการเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียว จากการทดลองพบว่า ที่ปริมาณ PACl  $1.2 \times 10^{-4}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม มีประสิทธิผลการกำจัดความกระด้างได้ดีและมีประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ  $80.2 \pm 0.4$  และ  $62.4 \pm 0.2$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งพีเอชของน้ำหลังเกิดปฏิกิริยามีค่า  $10.6 \pm 0.0$  และค่าความเป็นด่างของ 2P-M เท่ากับ  $10.6 \pm 0.2$  มก./ล. ในเทอมของหินปูน ดังรูปที่ 4.4 ดังนั้นผู้วิจัยจึงสรุปได้ว่าปริมาณปูนขาวร่วมกับ PACl ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 360 มก./ล. และ  $1.2 \times 10^{-4}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม ตามลำดับ

สำหรับลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และที่ปริมาณต่าง ๆ ของ PACl ดังตารางที่ 4.18 ในขั้นตอนกวนช้าพบว่าที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ ฟลอคจะมีขนาดใหญ่ และที่ทุก ๆ ปริมาณ PACl และขนาดฟลอคที่เกิดขึ้นมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่เติมปูนขาว 360 มก./ล. และที่ปริมาณ PACl  $10^{-7}$  ถึง  $10^{-3}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม พบว่าค่าความขุ่นในน้ำหลังกระบวนการตกตะกอนมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 0.6-1.2 NTU ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.17 ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกวนช้าและตกตะกอนที่ปริมาณของ PACl  $10^{-7}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$  และ  $10^{-2}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม หลังเติมปูนขาวที่ 360 มก./ล.

ปริมาณของ PACl (โมลต่อลิตร ของอลูมิเนียม)	ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้น	
	กวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm	ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน
$10^{-7}$		
$10^{-6}$		
$10^{-5}$		

ปริมาณของ PACl (โมลต่อลิตร ของอลูมิเนียม)	ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้น	
	กวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm	ตั้งทิ้งให้ตกตะกอน
$10^{-4}$		
$10^{-3}$		

หมายเหตุ : ผลการทดลองวันที่ 13 กันยายน 2560

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อเปรียบเทียบกับ การเติมปูนขาวร่วมกับสารส้ม จะเห็นได้ว่าปริมาณสารส้มที่จะเติมให้เกิด  $\text{Al}(\text{OH})_3$  มากพอที่จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาเพิ่มขึ้นมากกว่าการเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียว พบว่าต้องใช้ปริมาณสารส้มสูง แต่การใช้สารส้มในปริมาณสูงส่งผลให้พีเอชของน้ำและค่าความเป็นด่างของ 2P-M มีค่าไม่เหมาะสมต่อการเกิดตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างลดลง ขณะที่การเติมปูนขาวร่วมกับ PACl พบว่าปริมาณ PACl ที่เติมลงไปเพื่อให้ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาเพิ่มขึ้นมากกว่าการเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียว ใช้ปริมาณ PACl น้อยกว่าการเติมสารส้ม เนื่องจาก PACl มีสารประกอบอลูมิเนียมของ PACl หรือ  $\text{Al}_{13}$  ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ ทำให้  $\text{Al}(\text{OH})_3$  รวมกลุ่มกันได้ดี ซิลิกาสามารถมาเกาะติดได้สูง โดยที่ปริมาณ

การเติม PACl ดังกล่าว ค่าพีเอชของน้ำและค่าความเป็นด่างของ 2P-M ยังเหมาะสมต่อการเกิดตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg(OH)}_2$  จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างยังมีค่าสูงเท่ากับการเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างสูงสุดของการเติมปูนขาว

อย่างไรก็ตามพีเอชของน้ำหลังกระบวนการยังคงมีค่าสูง เนื่องจากที่ปริมาณปูนขาวและโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมพีเอชของน้ำเพื่อให้เกิดตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg(OH)}_2$  ดังนั้นยังต้องมีการปรับพีเอชน้ำให้ลดลงด้วยสารละลายกรดซึ่งส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายสารเคมีและค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) ของน้ำเพิ่มขึ้น ให้ลดลงเหลือ 6.5 ตามมาตรฐานคุณภาพหล่อเย็นที่ระบุให้ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.2 และเพื่อป้องกันการเกิดสารประกอบซิลิเกตที่พีเอชของน้ำมากกว่า 9.5 ซึ่งส่งผลต่อการอุดตันของเมมเบรน (Fouling)

จากการทดลองกระบวนการทางเคมีของการเติมสารเคมีทั้ง 5 ประเภท ประกอบด้วย (1) ปูนขาว (2) สารส้ม (3) PACl (4) ปูนขาวร่วมกับสารส้ม และ (5) ปูนขาวร่วมกับ PACl สามารถสรุปประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา ปริมาณสารเคมีที่ใช้ และราคาสารเคมี ดังตารางที่ 4.18 ทั้งนี้รายละเอียดราคาสารเคมีแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 4.19 และ ภาคผนวก ข

**ตารางที่ 4.18** ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา ปริมาณสารเคมี และราคาสารเคมี ของน้ำที่ผ่านสารเคมีแต่ละชนิด

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา				
	ปูนขาว	สารส้ม	PACl	ปูนขาว-สารส้ม	ปูนขาว-PACl
ความกระด้าง (%)	79.9±1.7	-0.4±1.8	0.7±0.6	80.6±0.6	80.2±0.4
ซิลิกา (%)	35.2±0.3	16.7±0.5	38.8±0.3	35.8±0.2	62.4±0.2
ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (กรัม/น้ำบาดาล 1 ลบ. ม.)	ที่ปริมาณ ปูนขาว 350-360 มก./ล.	สารส้ม $10^{-3}$ โมล/ล.	PACl $10^{-3}$ โมล/ล.	ปริมาณปูน ขาว 360 มก./ล. และ สารส้ม $10^{-4}$ โมล/ล.	ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และ PACl $1.2 \times 10^{-4}$ โมล/ล.
ราคาสารเคมี (บาท/น้ำบาดาล 1 ลบ. ม.)	4.21	2.57	0.65	4.47	4.29

**ตารางที่ 4.19** ค่าใช้จ่ายสารเคมีต่างๆ

สารเคมี	ราคา	หน่วย
ปูนขาว	12.31	บาทต่อเนื้อปูนขาว 1 กิโลกรัม
สารส้ม	7.72	บาทต่อเนื้อสารส้ม 1 กิโลกรัม
PACl	12.80	บาทต่อเนื้อ PACl 1 กิโลกรัม
กรดกำมะถัน ( $H_2SO_4$ )	10.20	บาทต่อเนื้อกรดกำมะถัน 1 กิโลกรัม
กรดไฮโดรคลอริก (HCl)	25.71	บาทต่อเนื้อกรดไฮโดรคลอริก 1 กิโลกรัม
โซดาไฟ (NaOH)	30	บาทต่อเนื้อโซดาไฟ 1 กิโลกรัม

จากตารางที่ 4.18 พบว่าการเติมสารเคมีบางชนิดไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซิลิกา ได้แก่ การเติมสารส้ม การเติม PACl และการเติมปูนขาวร่วมกับสารส้ม ดังนั้นผู้วิจัยจึงไม่นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการเติมสารเคมีดังกล่าวไปทดลองต่อในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ทั้งนี้ ผู้วิจัยจะเลือกน้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี น้ำที่ผ่านการเติมปูนขาว และน้ำที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl มาทดลองต่อในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน เนื่องจากกระบวนการกำจัดความกระด้างและซิลิกาโดยการเติมสารเคมีดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซิลิกาได้ดี อย่างไรก็ตามในกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและรีเวอร์สออสโมซิส จะต้องพิจารณาค่าดัชนีความหนาแน่นตะกอน (Silt Density Index,  $SDI_{15}$ ) โดยความหมายของค่า  $SDI_{15}$  สำหรับนาโนฟิลเตรชัน เมมเบรน (NF) และรีเวอร์สออสโมซิส (RO) และเกณฑ์กำหนดของค่า  $SDI_{15}$  ของแต่ละชนิดของโมดูล แสดงดังตารางที่ 4.20 และ 4.21 สำหรับนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่ใช้โมดูลแบบเกลียว (Spiral wound module) และ โมดูลแบบใยกลวง (Hollow fiber module) ค่า  $SDI_{15}$  ควรมีค่าไม่เกิน 5 และ 3 ตามลำดับ เพื่อป้องกันการอุดตันของเมมเบรน ดังนั้นน้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมีก่อนเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันจะต้องนำมาวิเคราะห์ค่า  $SDI_{15}$  เพื่อระบุว่ากระบวนการเคมีดังกล่าวมีประสิทธิภาพเพียงพอในการบำบัดน้ำก่อนเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

**ตารางที่ 4.20** ความหมายของค่า  $SDI_{15}$  สำหรับนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน (NF) และรีเวอร์สออสโมซิส (RO)

$SDI_{15}$	ความหมาย
$SDI_{15} < 1$	ไม่มีการอุดตันของคอลลอยด์เป็นเวลาหลายปี
$SDI_{15} < 3$	ทำความสะอาดเมมเบรนไม่บ่อย (หลายเดือนต่อการทำความสะอาด 1 ครั้ง)
$SDI_{15} = 3-5$	เกิดการอุดตันของเมมเบรน ต้องทำความสะอาดเมมเบรนบ่อยครั้ง
$SDI_{15} > 5$	เป็นค่าที่ยอมรับไม่ได้ ต้องมีกระบวนการบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment)

ตารางที่ 4.21 ค่า  $SDI_{15}$  ที่แนะนำก่อนเข้านาโนฟิลเตรชันเมมเบรน (NF) และรีเวอร์ออสโมซิส (RO)

ชนิดของโมดูล	$SDI_{15}$
โมดูลแบบเกลียว (SpiralWound module)	<5
โมดูลแบบใยกลวง (Hollow fiber module)	<3

ผลการหาค่า  $SDI_{15}$  ก่อนเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชัน เพื่อลดการอุดตันของเมมเบรนตามคำแนะนำของผู้ประกอบการ จากตารางที่ 4.22 พบว่า น้ำที่ผ่านการเติมปูนขาว และน้ำที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl โดยผ่านกระบวนการกวนเร็ว กวนช้า และการตกตะกอน (Coagulation-Flocculation-Sedimentation) น้ำดังกล่าวจะไม่สามารถใช้เป็นน้ำเข้า (Feed water) ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่ใช้โมดูลแบบใยกลวง (Hollow fiber module) ได้ เพื่อป้องกันการอุดตันของเมมเบรน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ากระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) ไม่เพียงพอต่อการกำจัดสารแขวนลอยในน้ำได้ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วถึงกรองทรายถูกนำมาใช้กำจัดสารแขวนลอยขนาดเล็กหลังกระบวนการตกตะกอน ซึ่งจากทฤษฎี กล่าวไว้ว่าถึงกรองทรายสามารถกำจัดสารแขวนลอยขนาด 1-10 ไมครอน (พิสุทธิ์ เพียรมนกุล, 2557) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้กระดาษกรอง GF/C ขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน ที่มีขนาดใกล้เคียงกับความสามารถในการกำจัดสารแขวนลอยของถึงกรองทราย ซึ่งจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยเพียงตรง โดยไม่ขึ้นกับขนาดทรายและกรวด และอนุภาคอื่น ๆ ที่มาเกาะที่พื้นผิวถึงกรองทราย ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะและเวลาในการเดินระบบ และจากผลการทดลองพบว่าน้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี น้ำที่ผ่านกระบวนการกวนเร็ว กวนช้า การตกตะกอน และการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน (Coagulation-Flocculation-Sedimentation-GF/C filter pore size 1.2  $\mu$ m) ของน้ำที่เติมปูนขาว และน้ำที่เติมปูนขาวร่วมกับ PACl มีค่า  $SDI_{15}$  เท่ากับ  $1.98 \pm 0.04$ ,  $2.53 \pm 0.07$  และ  $1.96 \pm 0.17$  ตามลำดับ โดยมีค่า  $SDI_{15}$  น้อยกว่า 3 จึงสามารถใช้เป็นน้ำเข้านาโนฟิลเตรชันเมมเบรนได้ หรือกล่าวได้ว่ากระบวนการบำบัดดังกล่าวมีประสิทธิภาพเพียงพอในการบำบัดเพื่อใช้เป็นน้ำเข้าของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและรีเวอร์ออสโมซิส



ตารางที่ 4.22 ค่า SDI<sub>15</sub> ของน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีแต่ละกระบวนการ

กระบวนการ	SDI <sub>15</sub>
น้ำบาดาลที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี (Not Treatment with Chemical)	1.98±0.04
น้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาว-กวนเร็ว-กวนช้า-ตกตะกอน (Lime : Coagulation-Flocculation-Sedimentation)	5.85±0.09
น้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาว-กวนเร็ว-กวนช้า-ตกตะกอน-กรองด้วย กระดาษกรอง GF/C ขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน (Lime : Coagulation-Flocculation-Sedimentation-GF/C filter pore size 1.2 um)	2.53±0.07
น้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl-กวนเร็ว-กวนช้า-ตกตะกอน (Lime/PACl : Coagulation-Flocculation-Sedimentation)	4.12±0.04
น้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl-กวนเร็ว-กวนช้า-ตกตะกอน- กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน (Lime/PACl : Coagulation-Flocculation-Sedimentation- GF/C filter pore size 1.2 um)	1.96±0.17

หมายเหตุ : SDI measurements ASTM: D4189-95

### 4.3 การทดลองที่ 3 : ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซิลิกาของน้ำบาดาลด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันของน้ำที่ผ่าน/ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี

#### 4.3.1 ศึกษาค่าความดันผ่านเมมเบรน (Transmembrane pressure, TMP) ที่เหมาะสมในการเดินระบบ

ทำการศึกษาผลของความดันผ่านเมมเบรนต่อฟลักซ์ของน้ำสะอาด (Permeate Flux) และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกาของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันของน้ำเข้ากระบวนการทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ 1) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี 2) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว และ 3) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl ทำการทดลองที่ความดันผ่านเมมเบรน 6 ค่า ได้แก่ 4, 5, 6, 7, 10 และ 15 บาร์ โดยบันทึกค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดทุก ๆ 1 นาที กำหนดให้บันทึกค่าฟลักซ์จนกระทั่งระบบมีอัตราการผลิตน้ำสะอาด 30 เปอร์เซ็นต์ ทุก ๆ การทดลอง แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.23 และ ภาคผนวก ฅ

**ตารางที่ 4.23** ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา ที่ความดันผ่านเมมเบรนต่าง ๆ ของน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันทั้ง 3 ประเภท

ประเภทของน้ำเข้ากระบวนการ	ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)	ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ 25 °C (ลบ.ม./ตร.ม. นาที)	ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา (เปอร์เซ็นต์)
น้ำ DI	4	0.0068±0.0001	-	-
	5	0.0137±0.0002	-	-
	6	0.0236±0.0001	-	-
	7	0.0362±0.0001	-	-
	10	0.0653±0.0004	-	-
	15	0.1102±0.0001	-	-
น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่	4	0.0025±0.0004	82.6±0.1	22.1±0.4
	5	0.0119±0.0003	82.7±0.2	22.5±0.2

ประเภทของ น้ำเข้า กระบวนการ	ความดันผ่าน เมมเบรน (บาร์)	ค่าฟลักซ์ของน้ำ สะอาดที่ 25 °C (ลบ.ม./ตร.ม. นาที่)	ประสิทธิภาพการกำจัด ความกระด้าง (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพ การกำจัดซิลิกา (เปอร์เซ็นต์)
ไม่ผ่าน กระบวนการ ทางเคมี	6	0.0213±0.0004	83.0±0.5	22.9±0.2
	7	0.0311±0.0001	83.0±0.3	22.9±0.1
	10	0.0595±0.0006	83.8±0.3	23.1±0.4
	15	0.1073±0.0008	84.4±0.2	23.0±0.1
น้ำบาดาล สังเคราะห์ที่ ผ่านการเติม ปูนขาว	4	0.0037±0.0001	80.8±0.2	21.9±0.3
	5	0.0135±0.0004	81.0±0.4	22.2±0.2
	6	0.0227±0.0006	81.1±0.2	22.4±0.2
	7	0.0321±0.0003	81.3±0.3	22.5±0.3
	10	0.0611±0.0002	82.9±0.3	22.7±0.2
	15	0.1079±0.0002	84.4±0.4	22.8±0.5
น้ำบาดาล สังเคราะห์ที่ ผ่านการเติม ปูนขาว ร่วมกับ PACl	4	0.0055±0.0003	80.8±0.4	21.9±0.4
	5	0.0145±0.0001	81.1±0.4	22.1±0.5
	6	0.0246±0.0002	81.2±0.4	22.2±0.5
	7	0.0338±0.0002	81.3±0.2	22.3±0.4
	10	0.0625±0.0004	82.8±0.3	22.2±0.3
	15	0.1101±0.0006	84.4±0.4	22.3±0.5

จากรูปที่ 4.5 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำสะอาดมีค่าแปรผันตรงกับ TMP ของระบบ ดังสมการที่ 4.7 และเมื่อเปรียบเทียบฟลักซ์ของน้ำสะอาด ที่ TMP เท่ากัน ของน้ำทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ 1) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี 2) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว และ 3) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl พบว่า น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมีมีค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด ต่ำกว่าน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่าน

การเติมปูนขาว และน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl เนื่องจากมีปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total dissolved solid, TDS) ในน้ำดังกล่าวมีค่าสูงที่สุด ทำให้มีค่าผลต่างของความดันออสโมซิส ( $\Delta\Pi$ ) สูง ส่งผลให้ฟลักซ์ของน้ำสะอาดมีค่าลดลง ดังสมการที่กล่าวข้างต้น ทั้งนี้ น้ำที่ผ่านการเติมสารเคมีมีค่า TDS ในน้ำน้อยเนื่องจากตะกอนที่เกิดจากสารประกอบแคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟตถูกกำจัดออกจากน้ำโดยการตกตะกอน ทำให้ปริมาณ TDS ในน้ำมีค่าลดลงแม้ว่าจะมีการเติมสารเคมีลงไป อย่างไรก็ตาม น้ำทั้ง 3 ประเภท และน้ำ DI ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดและความดันผ่านเมมเบรนมีค่าแปรผันตรงกันโดยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง โดยมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำสะอาดกับ TMP ดังตารางที่ 4.24

$$F_w = K_w (TMP - \Delta\Pi) \quad (\text{สมการที่ 4.7})$$

เมื่อ  $F_w$  คือ ฟลักซ์ของน้ำสะอาด (ลบ.ชม./ตร.ชม.นาที่)

$K_w$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของเฟสน้ำ (ลบ.ชม./ตร.ชม.นาที่.บาร์)

$TMP - \Delta\Pi$  คือ ความดันสุทธิ (บาร์)

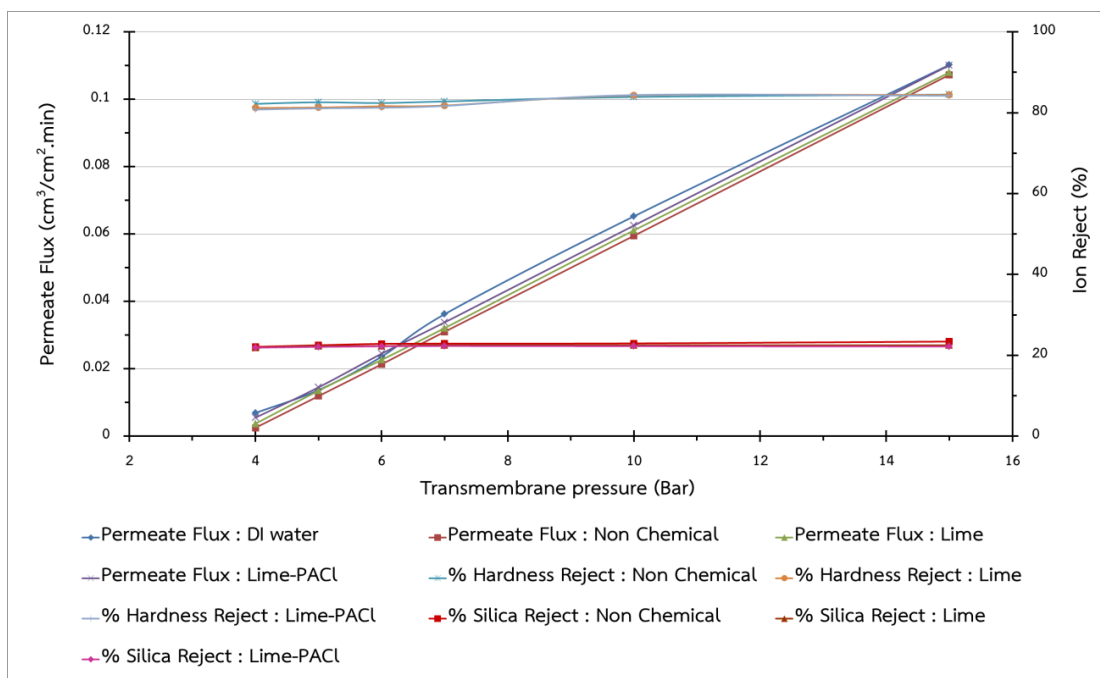
TMP คือ ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)

$\Delta\Pi$  คือ ผลต่างของความดันออสโมซิส (บาร์) หาได้จาก สมการที่ 4.5

$$\Delta\Pi = [(C_f + C_c)/2] \times (0.07/100) \quad (\text{สมการที่ 4.5})$$

เมื่อ  $C_f$  คือ ความเข้มข้นของ TDS ของน้ำเข้า (มก./ล.)

$C_c$  คือ ความเข้มข้นของ TDS ของน้ำเข้มข้น (มก./ล.)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันผ่านเมมเบรนกับค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา

ตารางที่ 4.24 สมการความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำสะอาดกับ TMP ของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันของน้ำทั้ง 3 ประเภท

ประเภทของน้ำเข้ากระบวนการ	สมการเส้นตรง
น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี	$y = 0.0095x - 0.0357$
น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว	$y = 0.0095x - 0.0341$
น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl	$y = 0.0095x - 0.0328$

หมายเหตุ : y คือ ฟลักซ์ของน้ำสะอาด และ x คือ ความดันผ่านเมมเบรน (TMP)

สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาของน้ำทั้ง 3 ประเภท พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ที่ความดันผ่านเมมเบรน 4-15 บาร์ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาประมาณ 80 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยพีเอชของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว และน้ำบาดาล

สังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวร่วมกับ PACl มีค่าพีเอชของน้ำก่อนเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันเท่ากับ 7.7, 6.5 และ 6.5 ตามลำดับ ทั้งนี้จุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point, IEP) ของเมมเบรนชนิดโพลีเอไมด์ (Polyamide, PA) มีค่าประมาณ 3.5 - 6 (M. Manttari และคณะ, 2013) โดยน้ำที่พีเอชสูงกว่าจุด IEP ของเมมเบรน ผิวหน้าของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนจะมีประจุเป็นลบ ดังนั้นไอออนลบในน้ำจะถูกผลักโดยอาศัย “กลไกการผลักทางไฟฟ้า (Donnan Exclusion หรือ Electrostatic Interaction)” อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่านาโนฟิลเตรชันเมมเบรนสามารถกำจัดไอออนบวกได้ หรือสามารถกำจัดความกระด้างในน้ำได้ดี ทั้งที่ประจุที่ผิวหน้าของเมมเบรนเป็นลบ เนื่องจากไอออนลบในน้ำมีแรงดึงดูดกับไอออนบวก ทำให้ไอออนบวกในน้ำไม่สามารถผ่านผิวหน้าของเมมเบรนไปได้เช่นกัน จึงทำให้นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างในน้ำได้ ตาม “กลไกหลักสมดุลทางไฟฟ้าที่เป็นกลาง (Electroneutrality)” (J. Nicolini และคณะ, 2016) อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา มีค่าประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากกลไกหลักของการกำจัดของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนมี 2 กลไก ได้แก่ 1) กลไกทางกายภาพ (Steric Exclusion) และ 2) กลไกการผลักทางไฟฟ้า (Donnan Exclusion หรือ Electrostatic Interaction) อย่างไรก็ตามที่พีเอชของน้ำต่ำกว่า 9.5 ส่วนใหญ่แล้วซิลิกาจะอยู่ในรูปโมเลกุล  $\text{SiO}_2$  ซึ่งไม่มีประจุทางไฟฟ้าและมีขนาดเล็กส่งผลให้นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดโมเลกุลดังกล่าว

ทั้งนี้จะเห็นได้ว่ากระบวนการเมมเบรนมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างคงที่แม้ว่าความดันผ่านเมมเบรนและประเภทของน้ำเข้ากระบวนการจะมีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามตามเกณฑ์การเดินระบบของเมมเบรนตามการประปานครหลวง แนะนำให้ฟลักซ์ของน้ำสะอาดอยู่ในช่วง 0.5-1.0 ลบ.ม./ตร.ม.วัน (การประปานครหลวง, 2556) โดยคำนวณฟลักซ์ของน้ำสะอาดของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน รุ่น DK ของบริษัท GE water and process technologies จำกัด ที่ระบุว่ามีความสามารถในการผ่านเมมเบรนของน้ำสะอาด (Permeability) = 22 GFD/100 psi กล่าวคือ ที่ 0.5 ลบ.ม./ตร.ม.วัน จะต้องใช้ความดัน 3.83 บาร์ และที่ 1.0 ลบ.ม./ม<sup>2</sup>.วัน จะต้องใช้ความดัน 7.67 บาร์ ดังนั้น ควรเดินระบบนาโนฟิลเตรชัน ในช่วงความดัน 4-7 บาร์ รวมถึงค่าความดันในการเดินระบบทั่วไป (Typical Operating Pressure) ของเมมเบรน ตามที่บริษัท GE water and process technologies จำกัด แนะนำมีค่าความดันประมาณ 6.9 บาร์ (Typical flux 22 GFD/100 psi) ซึ่ง

โดยปกติแล้วความดันที่เหมาะสมในการเดินระบบ คือ ความดันที่น้อยที่สุดที่ทำให้มีอัตราการผลิตน้ำ และเปอร์เซ็นต์การกำจัดมากที่สุด (บริษัท AXEON water technologies จำกัด) เนื่องจากการใช้ความดันที่สูงเกินไปจะเป็นการเพิ่มความหนาแน่นเนื้อเมมเบรน หรือ “เกิดการกดอัด (Compaction)” ส่งผลให้อัตราการแพร่ผ่านของน้ำลดลง (บริษัท Nitto Denko จำกัด) รวมถึงที่ความดันที่สูงเกินไปจะทำให้ค่าไฟฟ้าและอัตราการเกิดการอุดตันของเมมเบรน (Membrane fouling) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่ค่าความดันสูง ๆ แม้ว่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดจะมีค่าสูง แต่ประสิทธิภาพการกำจัดบางพารามิเตอร์มีค่าลดลง เนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนของตัวถูกละลายหรือไอออน (Solute transfer) เพิ่มขึ้น ตามปรากฏการณ์ของคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration polarization, CP) หรือการสะสมตัวของไอออนที่ผิวเมมเบรน ทำให้เกิดการแพร่ผ่านของไอออนดังกล่าวได้ จึงไม่เป็นที่นิยมในการเดินระบบสูงเกินความจำเป็นทั้งในเรื่องของคุณภาพน้ำ และค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าในการเดินระบบ จากรูปที่ 4.5 พบว่าในช่วงความดัน 4-7 บาร์ ความดัน 7 บาร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซิลิกาได้ดีที่สุด ดังนั้นจะเลือกความดันเท่ากับ 7 บาร์ มาทำการทดลองต่อในการทดลองที่ 3.2 เพื่อศึกษาการอุดตันของเมมเบรน (Membrane Fouling)

4.3.2 ศึกษาผลของอัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซิลิกา และการเกิดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน (Membrane Fouling) ของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่าน/ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี

ศึกษาอัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) ต่อการเกิดพฤติกรรมการอุดตันของเมมเบรน ในการทำการทดลองจะไม่เวียนน้ำสะอาด (Permeate) กลับมาในถังเก็บน้ำ (Feed tank) แต่จะเวียนเพียงน้ำเข้มข้น (Concentrate) ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายในถังเก็บน้ำจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป หรือกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของน้ำเข้า (Feed) จะสูงขึ้นจนได้อัตราการนำน้ำกลับคืนตามที่ต้องการศึกษา ทำการทดลองที่อัตราการนำน้ำกลับคืน (%Recovery) 8 ค่า ได้แก่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาตรน้ำในถังเก็บน้ำเริ่มต้นแต่ละการทดลองเท่ากับ 3 ลิตร และวิเคราะห์คุณภาพน้ำทุก ๆ อัตราการผลิตน้ำสะอาด (%Recovery) 10 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามแผ่นเมมเบรนแต่ละชิ้นอาจมีความแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อที่จะให้สามารถเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่เปลี่ยนแปลงไปได้ของแต่ละการทดลอง ผู้วิจัยจะแสดงข้อมูลเป็น Normalized Flux หรือ  $J/J_0$  ซึ่ง  $J$  คือ ฟลักซ์ของน้ำสะอาด และ  $J_0$  คือ ฟลักซ์น้ำสะอาดของน้ำ DI เพื่อลดความผิดพลาดเนื่องจากการใช้เมมเบรนคนละแผ่นในการทดลอง

ศึกษาการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนของน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ 1) น้ำบาดาลที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี 2) น้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาว และ 3) น้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl จากผลการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานเนื่องจากเมมเบรน (Membrane Resistance,  $R_m$ ) มีค่าประมาณ  $2.3 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $J/J_0$  กับอัตราการนำน้ำกลับคืน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา ดังรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 และผลการทดลองแสดงดัง ภาคผนวก ญ จากผลการทดลองพบว่าค่า  $J/J_0$  มีค่าลดลงเมื่ออัตราการนำน้ำกลับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่า  $J/J_0$  ที่ลดลง มาจาก 2 สาเหตุ ได้แก่ (1) ความเข้มข้นของน้ำขาเข้า (Feed) ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันออสโมซิส ( $\Delta\Pi$ ) เพิ่มขึ้น ซึ่งความดันสุทธิ (TMP- $\Delta\Pi$ ) จะมีค่าลดลง (2) การอุดตันของเมมเบรน ซึ่งจะพิจารณาได้จากค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตัน (Fouling Resistance,  $R_f$ ) โดยสามารถคำนวณค่า  $R_f$  ได้จากสมการที่ 4.8 แสดงค่า  $R_f$  ของน้ำทั้ง 3 ประเภทที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 10-80 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.25

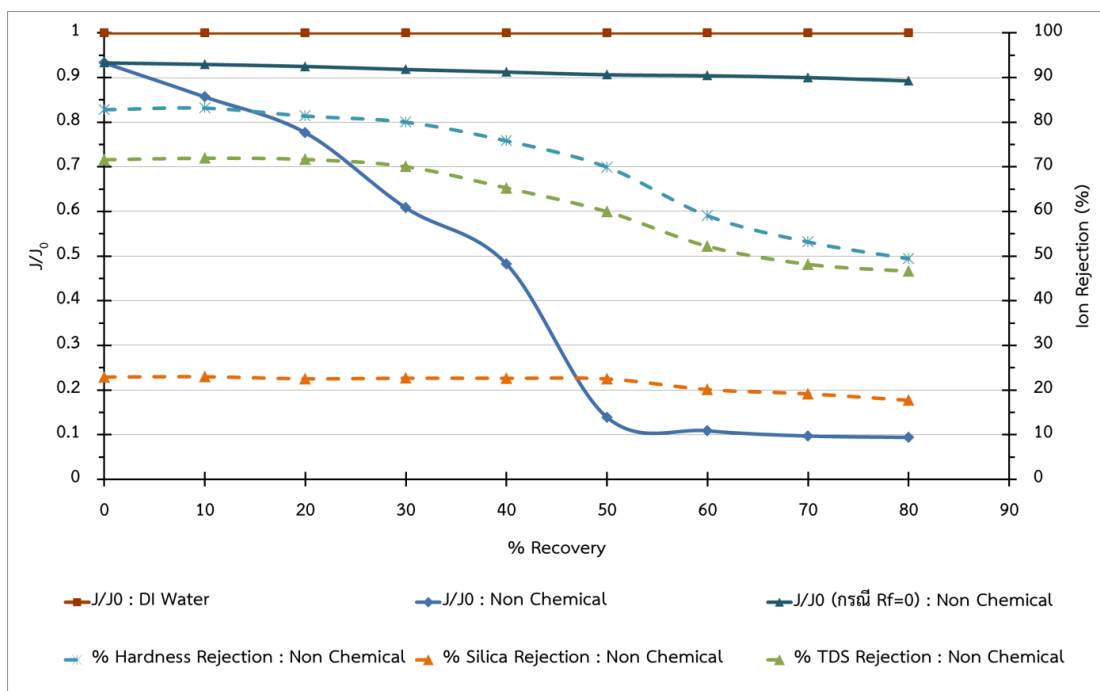


$$J = (\text{TMP} - \Delta\text{TT}) / \mu(R_m + R_f) \quad (\text{สมการที่ 4.8})$$

เมื่อ J	คือ ฟลักซ์ของน้ำสะอาด (ลบ.ชม./ตร.ชม.นาทึ)
TMP	คือ ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)
$\Delta\text{TT}$	คือ ความดันออสโมซิส (บาร์)
$\mu$	คือ ความหนืดของเฟสที่ต้องการกรอง โดยที่อุณหภูมิน้ำ 30 °C มีค่า 0.00089512 กก./ม.วินาที
$R_m$	คือ ค่าความต้านทานเนื่องจากเมมเบรน (ม. <sup>-1</sup> )
$R_f$	คือ ค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตัน (ม. <sup>-1</sup> )

**ตารางที่ 4.25** ค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตันของเมมเบรน (Fouling Resistane,  $R_f$ ) ของน้ำแต่ละประเภทที่อัตราการรณนำน้ำกลับคืน 10-80 เปอร์เซ็นต์

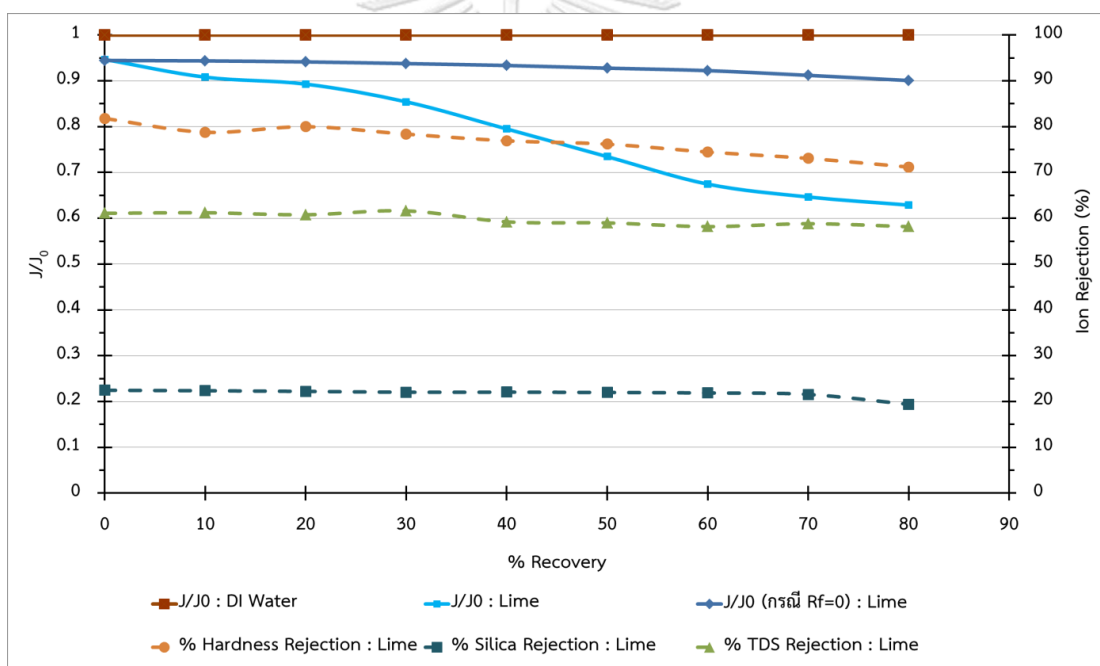
อัตราการนำน้ำกลับคืน (เปอร์เซ็นต์)	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl
10	$2.0 \times 10^{11}$	$9.0 \times 10^{10}$	$4.8 \times 10^{10}$
20	$4.5 \times 10^{11}$	$1.2 \times 10^{11}$	$5.0 \times 10^{10}$
30	$1.2 \times 10^{12}$	$2.2 \times 10^{11}$	$5.3 \times 10^{10}$
40	$2.1 \times 10^{12}$	$4.0 \times 10^{11}$	$5.5 \times 10^{10}$
50	$1.3 \times 10^{13}$	$6.0 \times 10^{11}$	$5.8 \times 10^{10}$
60	$1.7 \times 10^{13}$	$8.4 \times 10^{11}$	$6.2 \times 10^{10}$
70	$1.9 \times 10^{13}$	$9.4 \times 10^{11}$	$6.5 \times 10^{10}$
80	$2.0 \times 10^{13}$	$3.3 \times 10^{12}$	$7.1 \times 10^{10}$



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $J/J_0$  กับอัตราการนำน้ำกลับคืน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา ของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $J/J_0$  กับอัตราการนำน้ำกลับคืน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกาของน้ำบาดาลที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี (รูปที่ 4.6) พบว่า ค่า  $J/J_0$  จะลดลงอย่างรวดเร็ว ที่อัตราการนำน้ำกลับคืนคือ 0-80 เปอร์เซ็นต์ ลดลงจาก 0.9329 เหลือ 0.0940 คิดเป็น 89.9 เปอร์เซ็นต์ และสังเกตได้ว่ามีค่าห่างจากเส้นที่แสดงค่า  $J/J_0$  กรณีที่ไม่เกิดการอุดตันของเมมเบรน หรือ  $R_f = 0 \text{ m}^{-1}$  กล่าวคือเป็นกรณีที่ค่า  $J/J_0$  ลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของน้ำขาเข้า (Feed) ที่เพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว จึงพิสูจน์ได้ว่าสาเหตุหลักของค่า  $J/J_0$  ที่ลดลงเกิดจากการอุดตันของเมมเบรน ทั้งนี้ ค่า  $R_f$  ที่อัตราการนำน้ำกลับคืนตั้งแต่ 10-80 เปอร์เซ็นต์ ค่า  $R_f$  มีค่าเท่ากับ  $2.0 \times 10^{11} - 2.0 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$  (ตารางที่ 4.25) :ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความต้านทานเนื่องจากเมมเบรน (Membrane Resistance,  $R_m$ ) ที่มีค่าเท่ากับ  $2.3 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  นอกจากนี้เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดอออนในน้ำพบว่าในน้ำบาดาลที่ไม่มีการเติมสารเคมี พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด TDS มีแนวโน้มตามประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง โดยมีค่าลดลงที่อัตราการนำน้ำกลับคืนที่ 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอธิบายเหตุการณ์ดังกล่าวได้ว่าเนื่องจากความกระด้างในน้ำยังมีค่าสูง มีค่าประมาณ  $217.0 \pm 2.5$  มก./ล. ในเทอมของหินปูน ทั้งนี้ นาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างได้มากกว่า

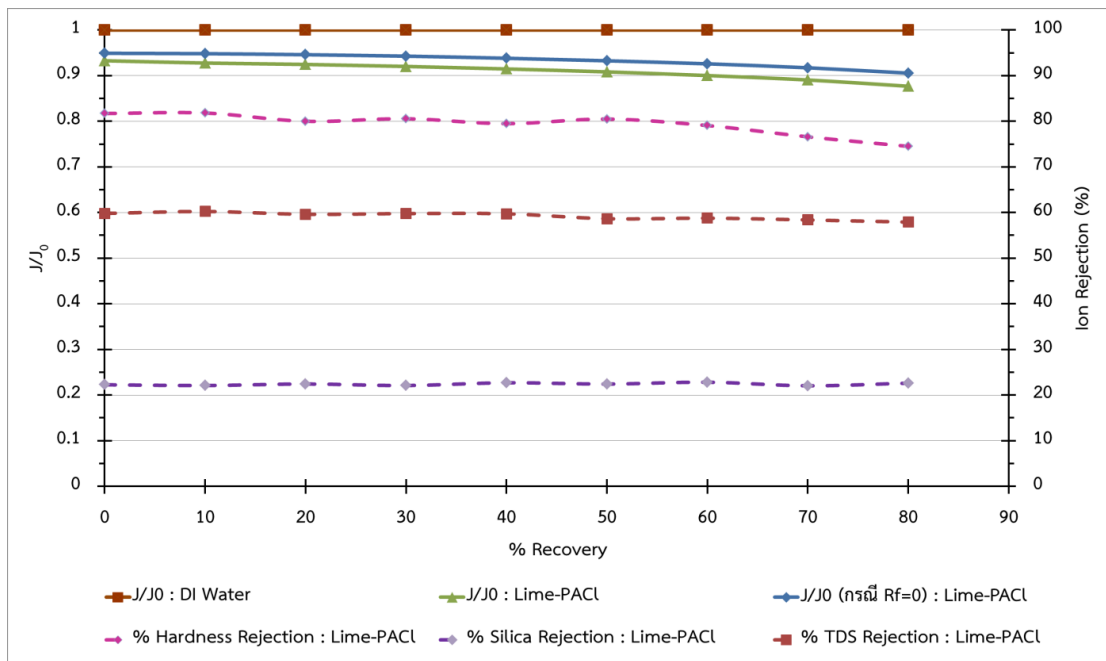
80 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น เมื่อความกระด้างถูกกำจัดออกค่า TDS ในน้ำสะอาด (Permeate) จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาไม่ได้ส่งผลต่อแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัด TDS เนื่องจากปริมาณซิลิกาในน้ำมีค่าเพียง  $26.9 \pm 0.7$  มก./ล. กล่าวสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ซิลิกา และ TDS มีค่าลดลงเมื่อเดินระบบจนมีอัตราการนำน้ำกลับคืนประมาณ 30, 50 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดของความกระด้างและซิลิกาที่ลดลงนั้น น่าจะเกิดจากการสะสมตัวของอไอออนความเข้มข้นของอไอออนที่ผิวหน้าเมมเบรนมีค่าสูงเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันความเข้มข้น (Concentration polarization, CP) ส่งผลให้ฟลักซ์ของตัวถูกละลายหรืออไอออนต่าง ๆ (Solute Flux) มีค่าสูงขึ้นหรืออไอออนต่าง ๆ สามารถผ่านเมมเบรนดังกล่าวได้มากขึ้น



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $J/J_0$  กับอัตราการนำน้ำกลับคืน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา ของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $J/J_0$  กับอัตราการนำน้ำกลับคืน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกาของน้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาว (รูปที่ 4.7) พบว่า ค่า  $J/J_0$  ที่อัตราการนำน้ำกลับคืนคือ 0-80 เปอร์เซ็นต์ ลดลงจาก 0.9467 เหลือ 0.6289 คิดเป็น 33.6 เปอร์เซ็นต์ และสังเกตได้ว่ามีค่าห่างจากเส้นที่แสดงค่า  $J/J_0$  กรณีที่ไม่เกิดการอุดตันของเมมเบรน หรือ  $R_f = 0$   $m^{-1}$  กล่าวคือ

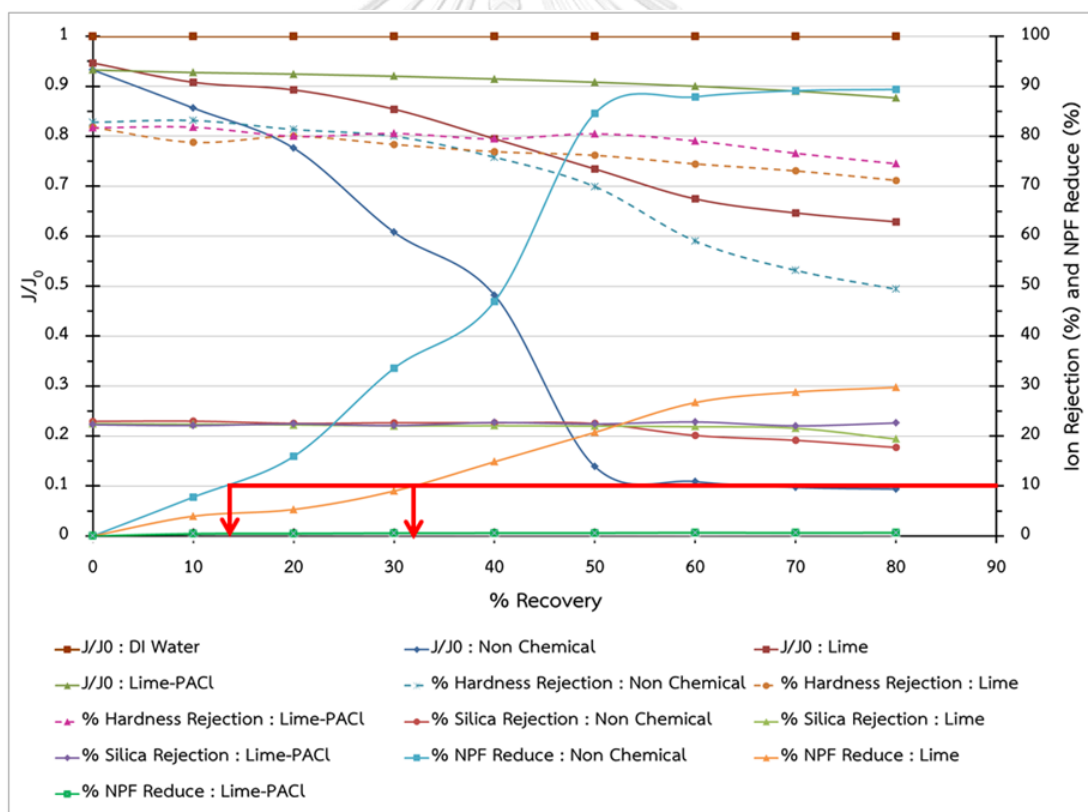
เป็นกรณีที่ค่า  $J/J_0$  ลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของน้ำขาเข้า (Feed) ที่เพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว จึงพิสูจน์ได้ว่าสาเหตุหลักของค่า  $J/J_0$  ที่ลดลงเกิดจากการอุดตันของเมมเบรน ทั้งนี้ ค่า  $R_f$  ที่อัตราการนำน้ำกลับคืนตั้งแต่ 10-80 เปอร์เซ็นต์ ค่า  $R_f$  มีค่าเท่ากับ  $9.0 \times 10^{10} - 3.3 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  (ตารางที่ 4.25) ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความต้านทานเนื่องจากเมมเบรน (Membrane Resistance,  $R_m$ ) ที่มีค่าเท่ากับ  $2.3 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  นอกจากนี้เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนในน้ำพบว่าในน้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาว พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาไม่ได้ส่งผลต่อแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัด TDS โดยประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา มีค่าลดลงเมื่อเดินระบบจนมีอัตราการนำน้ำกลับคืนประมาณ 30 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัด TDS ไม่สามารถระบุได้ ซึ่งอธิบายเหตุการณ์ดังกล่าวได้ว่า เนื่องจากความกระด้างในน้ำมีค่าต่ำแล้วจากการเติมปูนขาว โดยมีความกระด้างเหลือในน้ำประมาณ  $43.5 \pm 3.7$  มก./ล. ในเทอมของหินปูน และปริมาณซิลิกาในน้ำมีค่าเพียง  $17.4 \pm 0.1$  มก./ล. การกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำจึงไม่ส่งผลต่อปริมาณ TDS ในน้ำมากนัก อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดของความกระด้างและซิลิกาที่ลดลงนั้น น่าจะเกิดจากการสะสมตัวของแคลเซียม แมกนีเซียม และซิลิกาที่ผิวหน้าเมมเบรน เกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันส่งผลให้ฟลักซ์ของแคลเซียม แมกนีเซียม และซิลิกา มีค่าสูงขึ้นหรืออีดอนดังกล่าวสามารถผ่านเมมเบรนดังกล่าวได้มากขึ้น ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $J/J_0$  กับอัตราการนำน้ำกลับคืน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา ของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACL

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $J/J_0$  กับอัตราการนำน้ำกลับคืน และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกาของน้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACL (รูปที่ 4.8) พบว่า ค่า  $J/J_0$  ที่อัตราการนำน้ำกลับคืนคือ 0-80 เปอร์เซ็นต์ ลดลงจาก 0.9327 เหลือ 0.8768 คิดเป็น 6.0 เปอร์เซ็นต์ และสังเกตได้ว่ามีค่าไม่ห่างจากเส้นที่แสดงค่า  $J/J_0$  กรณีที่ไม่เกิดการอุดตันของเมมเบรน หรือ  $R_f = 0 \text{ m}^{-1}$  กล่าวคือเป็นกรณีที่ค่า  $J/J_0$  ลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของน้ำขาเข้า (Feed) ที่เพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว จึงพิสูจน์ได้ว่าสาเหตุของค่า  $J/J_0$  ที่ลดลงเกิดจากทั้งความเข้มข้นของน้ำขาเข้า (Feed) เพิ่มขึ้นตามอัตราการนำน้ำกลับคืนที่เพิ่มขึ้น และเกิดการอุดตันของเมมเบรนเล็กน้อย ทั้งนี้ ค่า  $R_f$  ที่อัตราการนำน้ำกลับคืนตั้งแต่ 10-80 เปอร์เซ็นต์ ค่า  $R_f$  มีค่าเท่ากับ  $4.8 \times 10^{10} - 7.1 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  (ตารางที่ 4.25) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความต้านทานเนื่องจากเมมเบรน (Membrane Resistance,  $R_m$ ) ที่มีค่าเท่ากับ  $2.3 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  นอกจากนี้เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนในน้ำพบว่าในน้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาว พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาไม่ได้ส่งผลต่อแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัด TDS โดยประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างมีค่าลดลงเมื่อเดินระบบจนมีอัตราการนำน้ำกลับคืนประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัด

ซิลิกาและ TDS ไม่สามารถระบุได้ ซึ่งอธิบายเหตุการณ์ดังกล่าวได้ว่า เนื่องจากความกระด้างและซิลิกาในน้ำยังมีค่าต่ำหลังจากการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl โดยมีความกระด้างเหลือในน้ำประมาณ  $42.9 \pm 0.9$  มก./ล. ในเทอมของหินปูน และปริมาณซิลิกาในน้ำมีค่าเพียง  $10.1 \pm 0.0$  มก./ล. การกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำจึงไม่ส่งผลต่อปริมาณ TDS ในน้ำมากนัก จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาไม่ลดลงในการเดินระบบจนมีอัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากปริมาณซิลิกาในน้ำหลังเติมปูนขาวร่วมกับ PACl มีค่าต่ำ ทำให้ฟลักซ์ของซิลิกาไอออน (Solute Flux) ไม่เพิ่มขึ้นหรือซิลิกาไม่สามารถไหลผ่านเมมเบรนได้เพิ่มขึ้น ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดของความกระด้างที่ลดลงนั้น น่าจะเกิดจากการสะสมตัวของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่ผิวหน้าเมมเบรน เกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันส่งผลให้ฟลักซ์ของแคลเซียมและแมกนีเซียม มีค่าสูงขึ้นหรือไอออนดังกล่าวสามารถผ่านเมมเบรนดังกล่าวได้มากขึ้นดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $J/J_0$  กับอัตราการนำน้ำกลับคืน เปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา และ % NPF ที่ลดลง ของน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันทั้ง 3 ประเภท

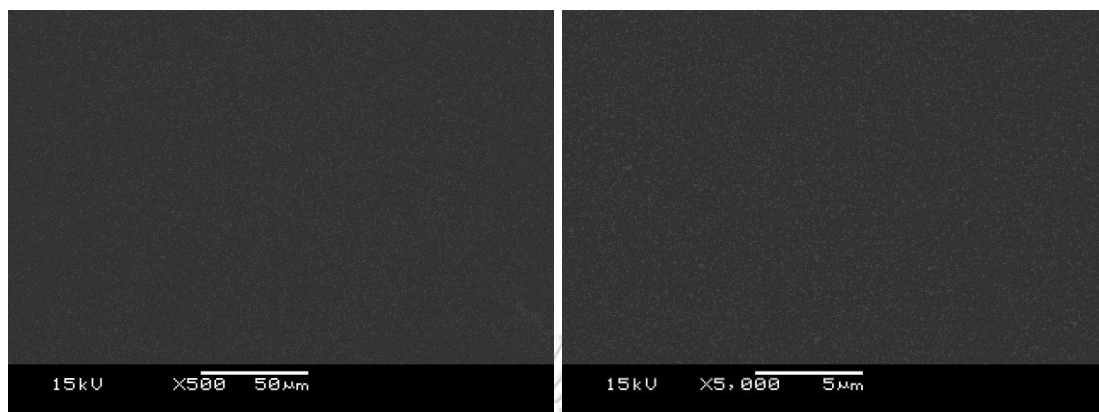
จากการทดลองสามารถกล่าวสรุปได้ ดังรูปที่ 4.9 ที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ ค่า  $J/J_0$  ของน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว และน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACI มีค่าเท่ากับ  $0.0940 \pm 0.0007$ ,  $0.5589 \pm 0.1207$  และ  $0.8768 \pm 0.0006$  ตามลำดับ และมีค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตันของเมมเบรน (Fouling Resistane,  $R_f$ ) มีค่าประมาณ  $2.0 \times 10^{13}$ ,  $9.9 \times 10^{11}$  และ  $7.1 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า น้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACI มีค่า  $J/J_0$  สูงที่สุด และมีค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตันของเมมเบรน (Fouling Resistane,  $R_f$ ) ต่ำที่สุด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของน้ำบาดาลที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี น้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาว และน้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACI มีค่าลดลงเมื่อเดินระบบจนมีอัตราการนำน้ำกลับคืนประมาณ 30, 30 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาของน้ำบาดาลที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี น้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาว ค่าลดลงเมื่อเดินระบบจนมีอัตราการนำน้ำกลับคืนประมาณ 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาของน้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACI ไม่สามารถระบุได้หรือกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาไม่ลดลงในการเดินระบบจนมีอัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลของค่า  $J/J_0$  และ ค่า  $R_f$  ของน้ำทั้ง 3 ประเภท จากการเดินระบบที่อัตราการนำน้ำกลับคืนเพิ่มขึ้น เพื่อดูผลของการอุดตันของเมมเบรนซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอออนเนื่องจากการสะสมตัวของอออนต่าง ๆ ที่ผิวเมมเบรนหรือปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ถูกเทียบค่า (Normalized Permeate Flow, NPF) ที่ NPF ลดลงประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ ต้องทำการล้างทำความสะอาดประกอบไปด้วยการล้างเมมเบรนด้วยน้ำและการล้างเมมเบรนด้วยสารเคมี หรือ “CIP” (การประปานครหลวง, 2556) จะเห็นได้ว่าที่ NPF ลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำทั้ง 3 ประเภท น้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาวและ PACI เมื่อเดินระบบจนกระทั่งอัตราการนำน้ำกลับคืนครบ 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่า NPF ลดลงเพียง 0.6 เปอร์เซ็นต์ กล่าวได้ว่าน้ำที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACI สามารถเดินระบบที่อัตราการนำน้ำกลับคืนมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ก่อนทำความสะอาดเมมเบรน ขณะที่น้ำบาดาลที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี และน้ำบาดาลที่เติมปูนขาว ค่า NPF ลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) ประมาณ 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ กล่าวได้ว่าน้ำบาดาลที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี และน้ำที่ผ่านการเติมปูนขาว สามารถเดินระบบอัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) ได้

เพียง 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ก่อนทำความสะอาดเมมเบรน ดังนั้น การเติมปูนขาวร่วมกับ PACl ใน น้ำบาดาลจึงช่วยลดภาระการกรองที่เกิดจากความกระด้างและซิลิกาในน้ำก่อนกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ซึ่งช่วยลดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนได้ดี และลดจำนวนการทำทำความสะอาดเมมเบรนเมื่อเทียบกับอัตราการนำน้ำกลับคืนเท่ากัน

นอกจากวิเคราะห์จากค่า  $J/J_0$  ในการศึกษาการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนของน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันทั้ง 3 ประเภท ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ SEM-EDX (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก) นาโนฟิลเตรชันเมมเบรน ที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้เห็นฟาวแลนท์ที่เป็นสาเหตุของค่า  $J/J_0$  ที่ลดลง รวมทั้งสามารถทราบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของฟาวแลนท์ที่ผิวหน้าเมมเบรนของการใช้น้ำเข้ากระบวนการทั้ง 3 ประเภท ซึ่งการเตรียมตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ SEM-EDX ทำโดยการตัดแผ่นเมมเบรนที่แห้งสนิทบริเวณช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงท้ายของแผ่นเมมเบรน ให้มีขนาดประมาณ  $6 \times 6$  ตร.มม. จากผลการวิเคราะห์ SEM พบว่านาโนฟิลเตรชันเมมเบรนสะอาดหรือเมมเบรนที่ไม่ผ่านการใช้งาน ไม่มีฟาวแลนท์ติดบนผิวเมมเบรนเลย ดังรูปที่ 4.10 สำหรับนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมีฟาวแลนท์ (Foulant) ปกคลุมเกือบทั่วพื้นที่เมมเบรน และมีชั้นที่หนา ก่อตัวหลายชั้นเป็นผลึกที่เห็นได้ชัดมีรูปร่างเป็นแท่งยาวแบน ความยาวประมาณ 10 ไมครอน ดังรูปที่ 4.11 พิจารณาค่า EDX (ตารางที่ 4.26) เปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุบนเมมเบรนกับเมมเบรนสะอาด (New membrane) พบว่า เมมเบรนสะอาดและเมมเบรนที่ผ่านการนำบาดาลที่ไม่มีการเติมสารเคมีมี %คาร์บอน เท่ากับ  $76.8 \pm 2.3$  และ  $20.9 \pm 2.6$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมี %ซิลไฟต์ เท่ากับ  $3.9 \pm 0.5$  และ  $0.2 \pm 0.2$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่า %คาร์บอน และ %ซิลไฟต์ ของเมมเบรนที่ผ่านการนำบาดาลที่ไม่มีการเติมสารเคมีมีค่าน้อยกว่าเมมเบรนสะอาด น่าจะเกิดจากเมมเบรนที่ผ่านการกรองถูกปกคลุมไปด้วยฟาวแลนท์ ดังนั้นธาตุที่วิเคราะห์ EDX ได้น่าจะเป็นธาตุของฟาวแลนท์ทั้งหมด ไม่ใช่ธาตุที่มีอยู่เดิมแล้วของโครงสร้างผิวเมมเบรน ไม่ได้เกิดความผิดพลาดแต่อย่างใด สำหรับธาตุที่พบหลัก ๆ บนเมมเบรนที่ผ่านการกรอง คือ แคลเซียม ออกซิเจน และคาร์บอน โดยมีเปอร์เซ็นต์อะตอมเท่ากับ  $15.2 \pm 1.4$ ,  $62.9 \pm 2.1$  และ  $20.9 \pm 2.6$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เนื่องจากที่อัตราการนำน้ำกลับคืนคือ 80 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเข้มข้นของแคลเซียมมีค่า นอกจากนี้ยังพบแมกนีเซียม ซิลิคอน และคลอไรด์ ในปริมาณไม่มาก



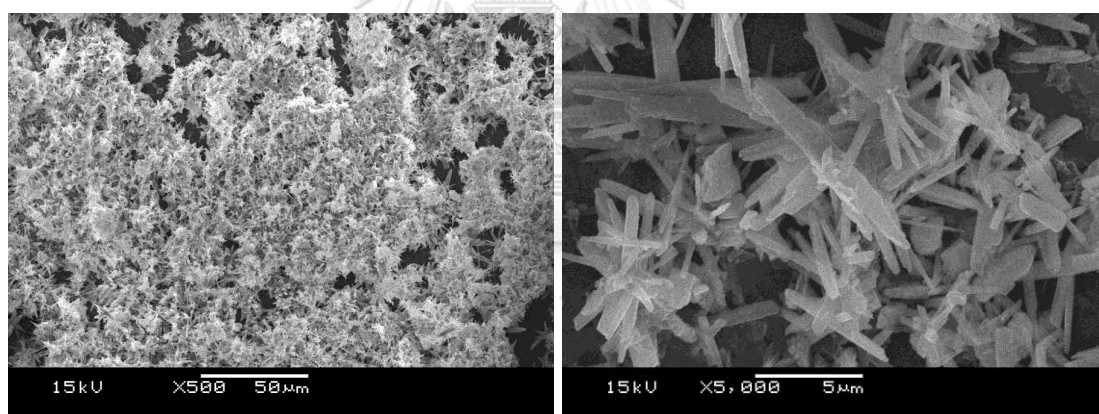
โดยมีค่า  $0.3 \pm 0.1$ ,  $0.6 \pm 0.3$  และ  $< 0.1$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้คลอไรด์ที่พบน่าจะมาจากสารประกอบ  $MgCl_2$   $CaCl_2$  และ  $HCl$  ที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำบาดาล



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.10 ภาพ SEM ของเมมเบรนสะอาด (New membrane) ที่กำลังขยาย (ก) 500 และ (ข) 5,000



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ของเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี ที่กำลังขยาย (ก) 500 และ (ข) 5,000

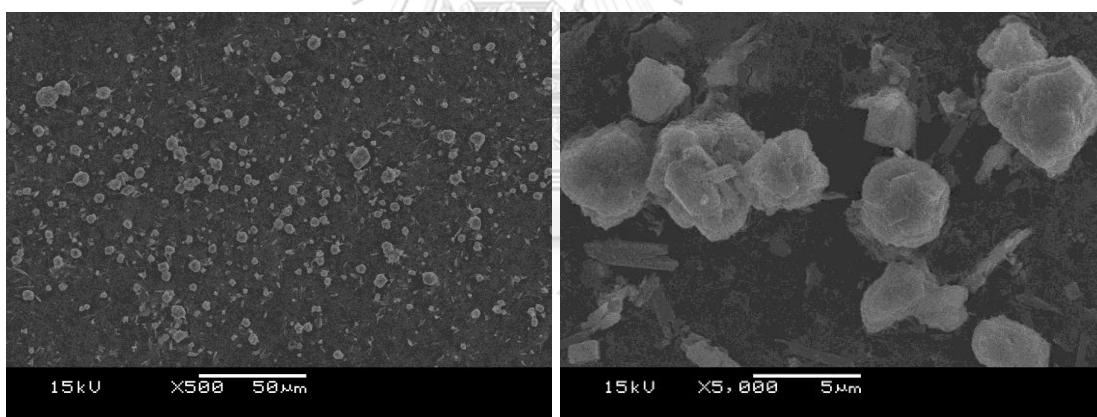
ตารางที่ 4.26 องค์ประกอบธาตุนานาโนฟิลเตรชั้นเมมเบรนที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำทั้ง 3 ประเภท

ธาตุ	องค์ประกอบธาตุ (% อะตอม)			
	เมมเบรน สะอาด	น้ำบาดาลสังเคราะห์ ที่ไม่ผ่านการเติม สารเคมี	น้ำบาดาล สังเคราะห์ที่ผ่าน การเติมปูนขาว	น้ำบาดาล สังเคราะห์ที่ผ่าน การเติมปูนขาว ร่วมกับ PACl
คาร์บอน (C)	76.8±2.3	20.9±2.6	59.6±4.6	72.0±3.2
ออกซิเจน (O)	19.3±2.0	62.9±2.1	34.6±3.3	19.9±3.4
ซิลไฟด์ (S)	3.9±0.5	0.2±0.2	3.0±0.2	3.4±0.1
แคลเซียม (Ca)	-	15.2±1.4	2.2±1.1	0.1±0.0
แมกนีเซียม (Mg)	-	0.3±0.1	0.2±0.1	0.1±0.1
ซิลิคอน (Si)	-	0.6±0.3	0.3±0.3	0.2±0.2
คลอไรด์ (Cl)	-	< 0.1	0.2±0.1	0.2±0.1
อลูมิเนียม (Al)	-	-	-	0.2±0.0
เหล็ก (Fe)	-	-	-	-

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

น้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาวพบฟาวแลนท์ (Foulant) กระจายทั่วพื้นที่เมมเบรนแต่ไม่หนาแน่น มีบางพื้นที่ ที่มีฟาวแลนท์ให้เห็นชัดเจน ผลึกที่สังเกตุได้มี 2 ลักษณะ คือ (1) ผลึกทรงกลม (2) ผลึกแท่งยาวแบน ดังรูปที่ 4.12 พิจารณาค่า EDX เปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุนานาโนฟิลเตรชั้นเมมเบรนสะอาด (New membrane) พบว่า เมมเบรนที่ผ่านน้ำบาดาลที่มีการเติมปูนขาวและเมมเบรนสะอาดมี %คาร์บอน เท่ากับ 76.8±2.3 และ 59.6±4.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมี %ซิลไฟด์ เท่ากับ 3.9±0.5 และ 3.0±0.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่า %คาร์บอนและ %ซิลไฟด์ ของเมมเบรนที่ผ่านน้ำบาดาลที่มีการเติมปูนขาวมีค่าน้อยกว่าเมมเบรนสะอาด แต่มีค่าใกล้เคียงมากกว่าเมมเบรนที่ผ่านการนำน้ำบาดาลที่ไม่มีการเติมสารเคมีดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวน่าจะเกิดจากเมมเบรนที่ผ่านน้ำบาดาลที่มีการเติมปูนขาวถูกปกคลุมไปด้วยฟาวแลนท์บางพื้นที่ ดังนั้นธาตุที่

วิเคราะห์ EDX ได้น่าจะเป็นธาตุของฟาวแลนท์และธาตุของโครงสร้างผิวเมมเบรน สำหรับธาตุที่พบหลัก ๆ บนเมมเบรนที่ผ่านการกรอง คือ แคลเซียม ออกซิเจน คาร์บอน และซิลไฟด์ โดยมีเปอร์เซ็นต์ที่พบ  $2.2 \pm 1.1$ ,  $34.6 \pm 3.3$ ,  $59.6 \pm 4.6$  และ  $3.0 \pm 0.2$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับซิลไฟด์น่าจะเป็นธาตุของโครงสร้างผิวเมมเบรน ขณะที่ แคลเซียม ออกซิเจน และคาร์บอน น่าจะเป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เนื่องจากที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเข้มข้นของแคลเซียมมีค่าสูง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมของน้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาวกับน้ำบาดาลที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี พบว่ามี %แคลเซียม ลดลงกว่า 85.5 เปอร์เซ็นต์ จึงกล่าวได้ว่าการเติมปูนขาวหรือกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว มีส่วนช่วยลดภาระการกรองของนาโนฟิลเตรชันได้ดี นอกจากนี้ยังพบ แมกนีเซียม ซิลิคอน และคลอไรด์ ในปริมาณไม่มาก โดยมีเปอร์เซ็นต์อะตอมเท่ากับ  $0.2 \pm 0.1$ ,  $0.3 \pm 0.3$  และ  $0.2 \pm 0.1$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ส่วนใหญ่แล้วสามารถผ่านเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันได้ จึงมีเพียงส่วนน้อยที่ติดอยู่ที่เมมเบรน สำหรับคลอไรด์ที่พบน่าจะมาจากสารประกอบ  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$  และ  $\text{HCl}$  ที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำบาดาล



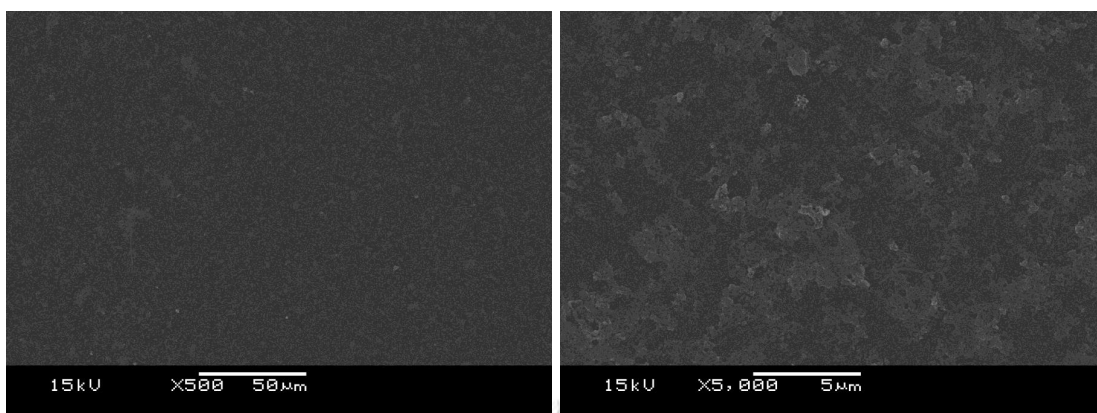
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.12 ภาพ SEM ของเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวที่กำลังขยาย (ก) 500 และ (ข) 5,000

น้ำบาดาลที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl พบฟาวแลนท์ (Foulant) เป็นคราบบางพื้นที่ไม่เห็นผลึกที่เกิดขึ้นชัดเจน ดังรูปที่ 4.13 พิจารณาค่า EDX เปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุนบนเมมเบรนกับเมมเบรนสะอาด (New membrane) พบว่า เมมเบรนที่ผ่านน้ำบาดาลที่มีการเติมปูนขาวร่วมกับ

PACl และเมมเบรนสะอาดมี %คาร์บอน เท่ากับ  $76.8 \pm 2.3$  และ  $72.0 \pm 3.2$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มี %ออกซิเจน เท่ากับ  $19.3 \pm 2.0$  และ  $19.9 \pm 3.4$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมี %ซัลไฟด์ เท่ากับ  $3.9 \pm 0.5$  และ  $3.4 \pm 0.1$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่า %คาร์บอน %ซัลไฟด์ และ %ออกซิเจนของเมมเบรนที่ผ่านน้ำบาดาลที่มีการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl มีค่าใกล้เคียงกับเมมเบรนสะอาด ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวน่าจะเกิดจากเมมเบรนที่ผ่านน้ำบาดาลที่มีการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl มีฟาวแลนท์เป็นคราบบางพื้นที่ ดังนั้นธาตุที่วิเคราะห์ EDX ได้น่าจะเป็นธาตุของฟาวแลนท์เล็กน้อย แต่เป็นธาตุของโครงสร้างผิวเมมเบรนเป็นหลัก สำหรับธาตุอื่น ๆ ที่พบแต่มีปริมาณไม่มาก ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม ซิลิคอน คลอไรด์ และอลูมิเนียม โดยมีเปอร์เซ็นต์อะตอมเท่ากับ  $0.1 \pm 0.0$ ,  $0.1 \pm 0.1$ ,  $0.2 \pm 0.2$ ,  $0.2 \pm 0.1$  และ  $0.2 \pm 0.0$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้จะพบอลูมิเนียมปริมาณเล็กน้อย เนื่องจากอลูมิเนียมมีในสารละลาย PACl ซึ่งจากการวิเคราะห์ธาตุ ผู้วิจัยคาดว่าฟาวแลนท์ที่เกิดขึ้น น่าจะเป็นสารประกอบ Gibbsite ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), Pyrophyllite ( $\text{AlSi}_2\text{O}_5\text{OH}$ ), และ Kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) หรืออลูมิเนียมซิลิเกต เนื่องจากความเข้มข้นของอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ  $6.5 \pm 0.3$  ไมโครกรัม/ล. ซึ่งมีค่าเหนือกว่าขีดจำกัดความสามารถในการละลาย (Solubility limit) ของสารประกอบทั้งสาม อย่างไรก็ตามฟาวแลนท์ที่เกิดจากสารประกอบดังกล่าวเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ยืนยันตามผลการทดลอง SEM-EDX ในงานวิจัยอื่น ๆ เช่น การทดลองของ K. Ohno และคณะ (2010) พบว่า ปริมาณอลูมิเนียมก่อนเข้านาโนฟิลเตรชันควรมีค่าต่ำกว่า 9 ไมโครกรัม/ล. ที่ปริมาณอลูมิเนียมก่อนเข้านาโนฟิลเตรชันมากกว่า 18 ไมโครกรัม/ล. จะส่งผลให้ความสามารถในการผ่านของน้ำสะอาด (Permeability) มีค่าลดลง ขณะที่ C.J. Gabelich และคณะ (2006) แนะนำว่าอลูมิเนียมควรมีค่าน้อยกว่า 50 ไมโครกรัม/ล. เพื่อป้องกันการเกิดผลึกอลูมิเนียมซิลิเกต จึงกล่าวได้ว่าการเติมปูนขาวและ PACl มีส่วนช่วยลดภาระการกรองของนาโนฟิลเตรชันได้ ทั้งนี้ซิลิกาส่วนใหญ่แล้วสามารถผ่านเมมเบรนนาโนฟิลเตรชันได้ จึงมีเพียงส่วนน้อยที่ติดอยู่ที่เมมเบรน สำหรับคลอไรด์ที่พบน่าจะมาจากสารประกอบ  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$  และ HCl ที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำบาดาล



(ก)

(ข)

**รูปที่ 4.13** ภาพ SEM ของเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl ที่กำลังขยาย (ก) 500 และ (ข) 5,000

จากผลการทดลอง SEM-EDX ของน้ำทั้ง 3 ประเภท สรุปได้ว่าเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl เกิดฟาวเลนซ์ที่ผิวหน้าเมมเบรนน้อยกว่าเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมีและเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการศึกษาการอุดตันของเมมเบรนจากค่า  $J/J_0$  ที่ลดลง กล่าวคือ น้ำบาดาลที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมีและน้ำบาดาลที่เติมปูนขาว มีค่า  $J/J_0$  ลดลงจาก  $J/J_0$  เริ่มต้น กว่า 89.9 และ 33.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ %NPF ลดลง 89.4 และ 29.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการอุดตันของเมมเบรน ขณะที่น้ำบาดาลที่เติมปูนขาวร่วมกับ PACl มีค่า  $J/J_0$  ลดลงเพียง 6.0 เปอร์เซ็นต์ และ %NPF ลดลง 0.6 เปอร์เซ็นต์ ดังที่กล่าวไปแล้ว

กระบวนการบำบัดน้ำบาดาลเพื่อกำจัดความกระด้างและซิลิกา พบว่าน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน มีคุณภาพน้ำที่ดีที่สุดโดยมีค่าความกระด้างและซิลิกาเหลือในน้ำเท่ากับ  $8.0 \pm 0.1$  มก./ล. ในเทอมของหินปูน และ  $7.8 \pm 0.1$  มก./ล. ตามลำดับ อย่างไรก็ตามกรณีที่จะใช้กระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment) ก่อนรีเวอร์สออสโมซิส

เพื่อลดภาระการกรอง และลดการอุดตันของรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรนในโรงงานที่ใช้รีเวอร์สออสโมซิสเป็นกระบวนการผลิตน้ำทดแทนในระบบหล่อเย็นและหม้อไอน้ำ กระบวนการบำบัดขั้นต้นดังกล่าวเมื่อพิจารณาจากคุณภาพน้ำหลังผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และกระบวนการนาโนฟิลเตรชันพบว่าสามารถลดภาระการกรองความกระด้างและซิลิกาได้ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการบำบัดทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ 1) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน 2) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวและกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน และ 3) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน พบว่าความกระด้างมีค่าเท่ากับ  $36.9 \pm 0.9$ ,  $8.1 \pm 0.1$  และ  $8.0 \pm 0.1$  มก./ล. ในเทอมของหินปูน ตามลำดับ และมีปริมาณซิลิกาในน้ำเท่ากับ  $20.7 \pm 0.1$ ,  $13.5 \pm 0.1$  และ  $7.8 \pm 0.1$  มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งมีค่าผ่านมาตรฐานน้ำทดแทนตาม JRA ที่กำหนดให้ความกระด้างและซิลิกามีค่าไม่เกิน 50 มก./ล. ในเทอมของหินปูน และ 30 มก./ล. ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดทั้ง 3 ประเภท ค่าความกระด้างและซิลิกาไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทดแทนในหม้อไอน้ำความดันสูง (ความดันในการดำเนินการมากกว่า 118 บาร์) ตาม Indian Standard (IS) ที่กำหนดให้ความกระด้างมีค่าน้อยมาก (Nil) และซิลิกามีค่าไม่เกิน 0.02 มก./ล. ดังตารางที่ 4.27 ดังนั้นในการผลิตน้ำทดแทนสำหรับใช้ในหม้อไอน้ำ จำเป็นต้องบำบัดน้ำโดยใช้กระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสูง เช่น กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ดังนั้นกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน สามารถใช้เป็นเพียงกระบวนการบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment Process) ก่อนกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส เพื่อลดภาระการกรองเนื่องจากความกระด้างและซิลิกาเท่านั้น

สรุปได้ว่าคุณภาพน้ำหลังกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน ไม่สามารถใช้เป็นน้ำทดแทนสำหรับใช้ในหม้อไอน้ำได้ จึงไม่ได้คำนวณรอบการใช้น้ำของน้ำทดแทนดังกล่าว อย่างไรก็ตามจะนำคุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการบำบัดมาคำนวณรอบการใช้น้ำของน้ำทดแทนสำหรับใช้ในระบบหล่อเย็นเท่านั้น ซึ่งมาตรฐานน้ำทดแทนและน้ำหล่อเย็นของระบบหล่อเย็น ที่จะใช้เป็นมาตรฐานในการหารอบการใช้น้ำของแหล่งน้ำที่จะใช้เป็นน้ำทดแทนไม่ได้ถูกกำหนดไว้เป็นสากล มีเพียงแนวทางปฏิบัติ (Guidelines) ต่าง ๆ โดยมีระดับความเข้มข้นของพารามิเตอร์แตกต่างกัน ดังนั้นในทางปฏิบัติ มั่นสิน ตันสุลเวศม์ และคณะ (2554) แนะนำให้พิจารณาปริมาณความกระด้าง ซิลิกา และค่าความเป็นด่างที่จำกัดให้มีในระบบหล่อเย็น โดยมีรายละเอียดดังนี้ 1) การจำกัดความเข้มข้นของความ

กระด้าง มีจุดมุ่งหมายเพื่อจำกัดความเข้มข้นของแคลเซียมมากกว่าความกระด้าง เพื่อป้องกันการสร้างตะกรันของ  $\text{CaSO}_4$  เนื่องจากอาจมีซัลเฟตอยู่ในน้ำเองตามธรรมชาติหรืออาจเกิดจากการเติมกรดกำมะถัน ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เพื่อปรับพีเอชก็ได้ ซึ่ง  $\text{CaSO}_4$  ละลายน้ำได้น้อยเป็นอันดับที่สองรองจากหินปูน ทั้งนี้การเติมสารห้ามตะกรันสามารถทำให้  $\text{CaSO}_4$  ละลายน้ำได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นผู้เชี่ยวชาญบางท่านจะจำกัดความเข้มข้นของแคลเซียมตามชนิดของสารป้องกันตะกรันที่ใช้กับน้ำหล่อเย็น

2) การจำกัดความเข้มข้นของซิลิกา เพื่อป้องกันการตกผลึกของตะกรันซิลิกา และ 3) การจำกัดระดับค่าความเป็นด่างมีจุดมุ่งหมายในการป้องกันไม่ให้  $\text{CaCO}_3$  ตกผลึก ทั้งนี้ เพราะคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตในน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและแมกนีเซียมเกิดเป็น  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{MgCO}_3$  แต่เนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  ละลายน้ำได้น้อยกว่ามาก  $\text{CaCO}_3$  จึงตกผลึกก่อน อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณจำนวนรอบการใช้น้ำของคุณภาพน้ำทดแทนของระบบหล่อเย็น ได้แก่ ความกระด้างและปริมาณซิลิกา ซึ่งพารามิเตอร์ที่จะกำหนดรอบการใช้น้ำของแหล่งน้ำใด ๆ คือพารามิเตอร์ที่มีรอบการใช้น้ำค่าต่ำที่สุด ทั้งนี้ไม่นำค่าความเป็นด่างมาพิจารณาด้วย เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการปรับลด/เพิ่มพีเอชของน้ำ

พิจารณารอบการใช้น้ำของน้ำทดแทนสำหรับใช้ในระบบหล่อเย็นหลังผ่านกระบวนการบำบัด ทั้ง 3 ประเภท โดยใช้มาตรฐานน้ำหล่อเย็น ที่กำหนดขึ้นโดย The Japanese Refrigeration and Air Conditioning Industry Association Microbial (JRA) โดยมีมาตรฐานน้ำหล่อเย็นของค่าความกระด้างและซิลิกา เท่ากับ 200 มก./ล. ในเทอมของหินปูน และ 50 มก./ล. ตามลำดับ จากตารางที่ 4.28 พบว่า 1) น้ำก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของระบบผลิตน้ำทดแทน (Feed RO) ของบริษัท ไทยเอทานอล พาวเวอร์ จำกัด (มหาชน) และน้ำบาดาลสังเคราะห์ก่อนการบำบัด มีจำนวนรอบการใช้น้ำเท่ากับ 0 รอบ เนื่องจากมีความกระด้างเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมจำนวนรอบ ดังนั้นหากสามารถกำจัดความกระด้างทั้งหมดจะสามารถเพิ่มจำนวนรอบการใช้น้ำได้ อย่างไรก็ตาม ซิลิกาจะกลายเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมจำนวนรอบการใช้น้ำแทนค่าความกระด้าง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงจะต้องกำจัดทั้งความกระด้างและซิลิกาในน้ำบาดาลดังกล่าวจึงจะสามารถเพิ่มจำนวนรอบการใช้น้ำได้ 2) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน พบว่ามีรอบการใช้น้ำ 2 รอบ โดยมีซิลิกาเป็นพารามิเตอร์กำหนดรอบการใช้น้ำ 3) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวและกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน พบว่ามีรอบการใช้น้ำ 3 รอบ โดยมีซิลิกาเป็นพารามิเตอร์กำหนดรอบการใช้น้ำ และ

4) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน พบว่ามีรอบการใช้น้ำ 6 รอบ โดยมีซิลิกาเป็นพารามิเตอร์กำหนดรอบการใช้น้ำ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าหากสามารถใช้น้ำที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเป็นน้ำทดแทนในระบบหล่อเย็นได้ จะมีรอบการใช้น้ำ 6 รอบ ซึ่งรอบการใช้น้ำที่เหมาะสมตามคำแนะนำของ มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และคณะ (2554) โดยน้ำทดแทนที่มีรอบการใช้น้ำ 6 รอบจะช่วยประหยัดปริมาณทดแทนที่จะเข้าระบบได้ เท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้กำหนดให้รอบการใช้น้ำเริ่มต้นเท่ากับ 1.5 รอบ ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์การประหยัดน้ำ (M. Seneviratne, 2006)





**ตารางที่ 4.27** มาตรฐานคุณภาพน้ำผุดแทนของน้ำหล่อเย็นและน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันสูง คุณภาพน้ำบาดาลสังเคราะห์ กับคุณภาพน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการบำบัดต่าง ๆ

พารามิเตอร์	หน่วย	มาตรฐาน		คุณภาพน้ำ <sup>(4)</sup>					
		น้ำทดแทนของหม้อไอน้ำ <sup>(1)</sup>	น้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ <sup>(2)</sup>	น้ำบาดาลจริงก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส <sup>(3)</sup>	น้ำบาดาลสังเคราะห์ก่อนบำบัด	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดขั้นสูง	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดขั้นสูง	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดขั้นสูง	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดขั้นสูง
ค่าที่เอช	-	6.0-8.0	8.5-9.5	7.7	7.7±0.1	6.6±0.0	6.6±0.0	6.6±0.0	6.7±0.1
ค่าของแข็งละลาย	mg/L	-	-	412	662.5±9.4	187.3±1.1	216.8±1.3	200.9±1.6	
ค่าการนำไฟฟ้า	µS/cm	300	0.3	698	990.8±12.4	279.9±1.7	325.2±1.9	301.3±2.4	
ความขุ่น	NTU	-	-	0.4	0.6±0.2	Nil	Nil	Nil	Nil
ค่าความเป็นด่าง	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	50	-	276	280.9±3.6	285.5±2.2	58.8±0.5	53.5±1.2	

พารามิเตอร์	หน่วย	มาตรฐาน		คุณภาพน้ำ <sup>(4)</sup>				
		น้ำทดแทนของน้ำหล่อเย็น <sup>(1)</sup>	น้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ <sup>(2)</sup>	น้ำบาดาลจริงก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสรีเวอร์สออสโมซิส <sup>(3)</sup>	น้ำบาดาลสังเคราะห์ก่อนบำบัด	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัด	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัด	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัด
ความกระด้างทั้งหมด	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	50	Nil	216	217.0±2.5	36.9±0.9	8.1±0.1	8.0±0.1
แคลเซียม	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	50	-	132	132.1±2.0	22.5±0.6	4.6±0.1	4.3±0.0
แมกนีเซียม	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	-	-	84	84.9±2.5	14.4±0.4	2.3±0.1	2.3±0.1

พารามิเตอร์	หน่วย	มาตรฐาน		คุณภาพน้ำ <sup>(4)</sup>				
		น้ำทดแทนของน้ำหล่อเย็น <sup>(1)</sup>	น้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ <sup>(2)</sup>	น้ำบาดาลจริงก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสรีเวอร์สออสโมซิส <sup>(3)</sup>	น้ำบาดาลสังเคราะห์ก่อนบำบัด	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการขบวนการนาโนฟิลเตรชัน	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวและการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และการขบวนการนาโนฟิลเตรชัน	
ซิลิกา	mg/L as SiO <sub>2</sub>	30	0.02	26.5	26.9±0.7	20.7±0.1	13.5±0.1	7.8±0.1

หมายเหตุ :

- (1) มาตรฐานน้ำทดแทนและน้ำหล่อเย็นในกระบวนการหล่อเย็นแบบระบบเปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับ โดย Japanese Refrigeration Association (JRA)
- (2) มาตรฐานคุณภาพน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำที่ใช้ความดันค่า-ปานกลาง (40-59 บาร์) ตามมาตรฐาน Indian Standard (IS)
- (3) เก็บตัวอย่างน้ำก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของระบบผลิตน้ำทดแทน (Feed RO) ของ บริษัท ไทยเอทานอล พาวเวอร์ จำกัด (มหาชน) เมื่อ วันที่ 18-22 ธันวาคม 2558
- (4) คุณภาพน้ำของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันที่ความดันต้นผ่านเมมเบรน 7 บาร์

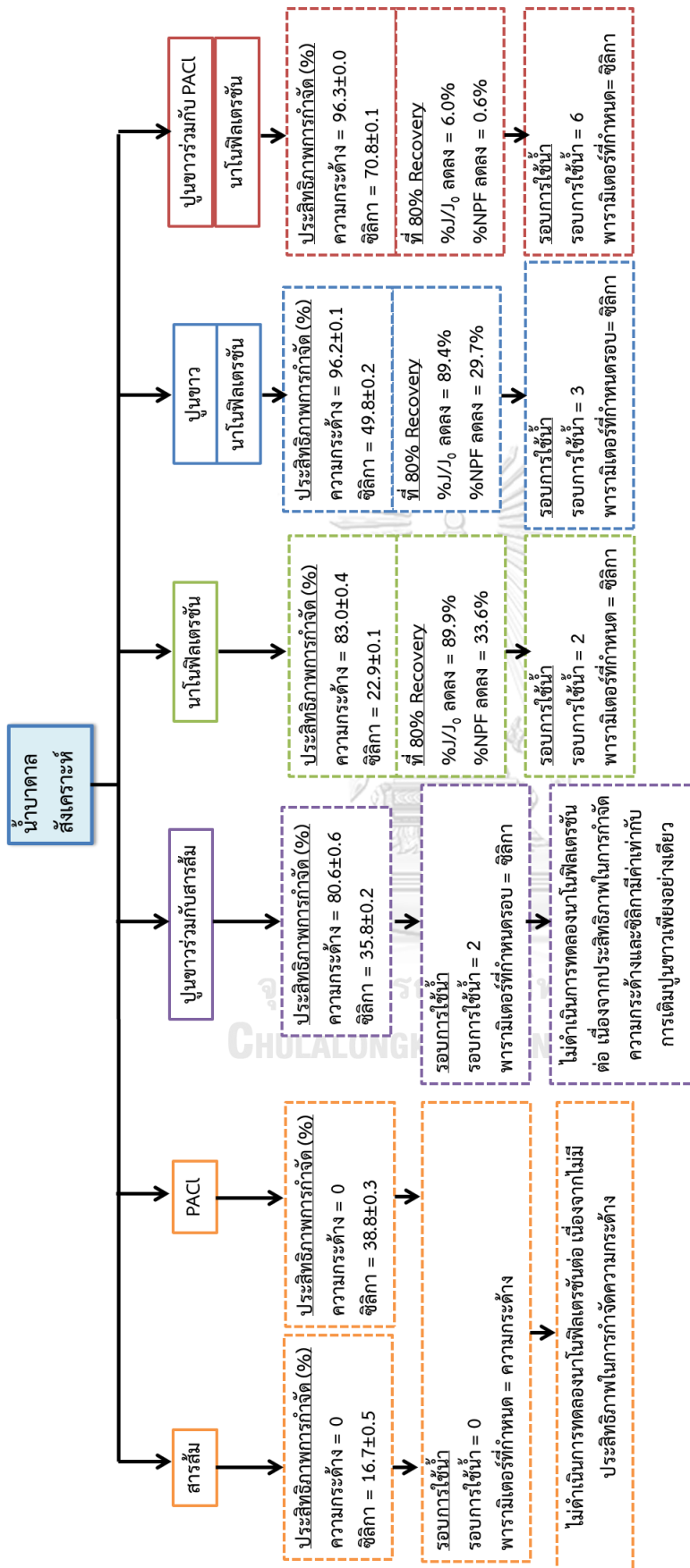
**ตารางที่ 4.28** ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซัลเฟต ปริมาณสารเคมี ราคาสารเคมี และรอบการใช้น้ำของน้ำพาดแทนสำหรับใช้ในระบบหล่อเย็นของกระบวนการต่าง ๆ

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำบาดาลจริงก่อน เข้ากระบวนการรี เวอร์สออสโมซิส	น้ำบาดาล สังเคราะห์ ก่อน บำบัด	น้ำบาดาล สังเคราะห์ที่ผ่าน กระบวนการนา โนฟิลเตรชัน	น้ำบาดาลสังเคราะห์ ที่ผ่านการเติมปูนขาว และกระบวนการนา โนฟิลเตรชัน	น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่าน การเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และกระบวนการนา โนฟิลเตรชัน
ประสิทธิภาพการ กำจัดความกระด้าง	%	-	-	83.0±0.4	96.2±0.1	96.3±0.0
ประสิทธิภาพการ กำจัดซัลเฟต	%	-	-	22.9±0.1	49.8±0.2	70.8±0.1
ปริมาณสารเคมีที่ใช้	กรัม/น้ำบาดาล 1 ลบ.ม.	-	-	-	ที่ปริมาณปูนขาว 350-360 มก./ล.	ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และ PACl 1.2 x 10 <sup>-4</sup> โมล/ ล.
ราคาสารเคมี	บาท/น้ำบาดาล 1 ลบ.ม.	-	-	-	2.59	4.29

พารามิเตอร์	หน่วย	นำบาดาลจริงก่อน เข้ากระบวนการรี เวอร์สออสโมซิส เวอร์สออสโมซิส	นำบาดาล สังเคราะห์ ก่อน บำบัด	นำบาดาล สังเคราะห์ที่ผ่าน กระบวนการ โนฟิลเตรชัน	นำบาดาลสังเคราะห์ ที่ผ่านการเติมปูนขาว และกระบวนการ โนฟิลเตรชัน	นำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่าน การเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และกระบวนการ โนฟิลเตรชัน
รอบการใช้						
- ความแตกต่าง	รอบ	0	0	5	24	25
- ซิลิกา	รอบ	1	1	2	3	6
พารามิเตอร์กำหนด รอบการใช้	-	ความแตกต่าง	ความ แตกต่าง	ซิลิกา	ซิลิกา	ซิลิกา
สรุปรอบการใช้	รอบ	0	0	2	3	6

หมายเหตุ: คุณภาพน้ำของกระบวนการโนฟิลเตรชันที่ความดันผ่านเมมเบรน 7 บาร์

จากการศึกษากระบวนการทางเคมีและนาโนฟิลเตรชันสามารถสรุปได้ว่าการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้เมมเบรนรุ่น DK ของบริษัท GE water and process technologies จำกัด สามารถกำจัดความกระด้างและซัลเฟตในน้ำได้มากที่สุด กล่าวคือเป็นกระบวนการที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 4.14 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ  $96.3 \pm 0.0$  และ  $70.8 \pm 0.1$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่งผลให้รอบการใช้งานของน้ำที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวมีค่าสูงสุดที่ 6 รอบ ช่วยลดปริมาณน้ำทดแทนได้ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยในการทดลองกระบวนการทางเคมี พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างจะมีค่ามากที่สุดเมื่อพีเอชของน้ำหลังปฏิกิริยามีค่าประมาณ 10.6-11.0 และค่าความเป็นต่างของ 2P-M มีประมาณ 5-20 มก./ล. ในเทอมของหินปูน ทั้งนี้ผู้วิจัยจะใช้เกณฑ์ดังกล่าวเพื่อประยุกต์ใช้กระบวนการทางเคมีและนาโนฟิลเตรชันกับน้ำบาดาลจริงในการทดลองต่อไป และนอกจากนี้พบว่าการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl สามารถลดความกระด้างและซัลเฟตในน้ำได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งช่วยลดภาระการกรองให้กับนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนส่งผลให้สามารถเดินระบบที่อัตราการนำน้ำกลับคืนมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ % NPF ลดลงเพียง 0.6 เปอร์เซ็นต์ ก่อนที่จะต้องทำ CIP ซึ่งถ้าหาก %NPF ลดลงประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ ต้องทำการล้างทำความสะอาดประกอบไปด้วยการล้างเมมเบรนด้วยน้ำและการล้างเมมเบรนด้วยสารเคมีหรือ “CIP” ดังนั้นการบวนการทางเคมีดังกล่าว สามารถช่วยลดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนได้ดี ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทำมาสะอาด



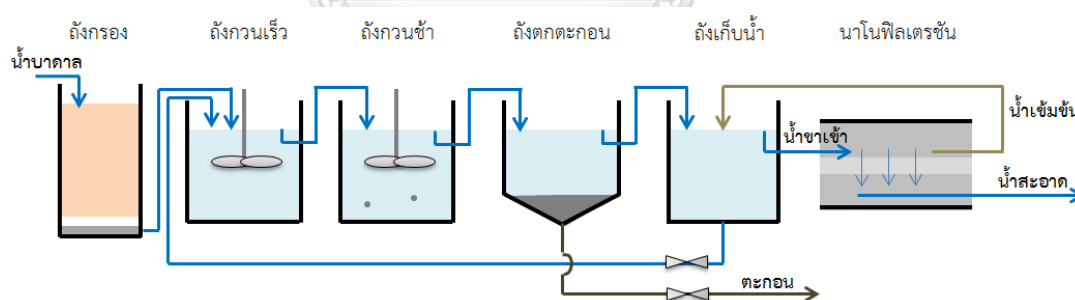
รูปที่ 4.14 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา และรอบการใช้น้ำของน้ำบาดาลแทนสำหรับใช้ในระบบหล่อเย็นของแต่ละกระบวนการ

กระบวนการ

#### 4.4 การทดลองที่ 4 : ศึกษาปริมาณของเสียและวิธีการจัดการน้ำเข้มข้นที่ได้จากกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน

ในกระบวนการบำบัดน้ำบาดาล (รูปที่ 4.15) น้ำบาดาลหลังจากสูบขึ้นมาจากใต้ดินจะถูกกรองด้วยถังกรองทรายเพื่อกำจัดสารแขวนลอยออก เช่น ตะกอนของ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  เป็นต้น จากนั้นน้ำจะเข้าสู่กระบวนการทางเคมีซึ่งประกอบไปด้วย ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า และถังตกตะกอน ซึ่งตะกอนที่กักกั้นตกตะกอนเป็นของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการ สำหรับน้ำใสที่ผ่านถังตกตะกอนแล้วจะถูกนำไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำ เพื่อสูบเข้าสู่กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน เมื่อน้ำผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันจะได้ที่มีความเข้มข้นของอออนในน้ำต่ำหรือน้ำสะอาด (Permeate) และได้น้ำที่มีความเข้มข้นของอออนในน้ำสูงหรือน้ำเข้มข้น (Concentrate) ซึ่งน้ำเข้มข้นนี้จะต้องมีการบำบัดหรือจัดการให้ถูกวิธีตามความเหมาะสม

จากขั้นตอนของกระบวนการบำบัดน้ำบาดาลที่กล่าวข้างต้น ของเสียที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และนาโนฟิลเตรชันเกิดจาก 2 แหล่ง ได้แก่ 1) ตะกอนเคมีจากกระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวและ PACl 2) น้ำเข้มข้นจากกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน โดยมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 4.15 ระบบโดยรวมของกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชัน

(1) ตะกอนเคมีจากกระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl จากการทดลองโดยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดน้ำออกจากตะกอนดังกล่าว ดังรูปที่ 4.16 โดยพบว่ามีน้ำหนักแห้ง  $0.404 \pm 0.007$  กรัมต่อปริมาณน้ำบาดาล 1 ลิตร อย่างไรก็ตามในกระบวนการแยกน้ำจากสลัดจ์ (Sludge dewatering) มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยหลักการคือ ต้องนำ



น้ำออกจากตะกอนให้ได้มากที่สุด หากมีความเข้มข้นของตะกอนเท่ากับ 35 เปอร์เซ็นต์ และ 15 เปอร์เซ็นต์ จะมีลักษณะคล้ายขนมวุ้น และยาสีฟัน ตามลำดับ เป็นต้น (การประปาส่วนภูมิภาค, 2558) ทั้งนี้การเลือกกระบวนการแยกน้ำจากสลัดจ์ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ตามลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของสลัดจ์ การดูแลและการเดินระบบ และความต้องการของพื้นที่ ซึ่งกระบวนการแยกน้ำจากสลัดจ์แต่ละวิธีจะมีปริมาตรตะกอนที่แตกต่างกัน ตัวอย่างระบบทำให้ตะกอนเข้มข้น ได้แก่ ระบบหมุนเหวี่ยง แบบ Scroll ระบบกรองแบบสุญญากาศ ระบบอัดกรองด้วยแผ่น ระบบลานทรายตากแดด และระบบบ่อตากแดด แต่ละระบบจะมีปริมาตรตะกอนเท่ากับ 1.796, 0.673, 0.735, 0.646, 0.808 และ 0.735 ลิตรต่อปริมาณน้ำบาดาล 1 ลิตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.29 ทั้งนี้ตะกอนที่ผ่านการแยกน้ำแล้วอาจนำไปกำจัดอย่างถูกวิธีโดยหน่วยงานที่ได้อนุญาตจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.16 ตะกอนเคมีจากกระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวและ PACl หลังจากนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C

ตารางที่ 4.29 ความเข้มข้นของตะกอนที่ได้รับแต่ละวิธี

ระบบกำจัดตะกอน	ตะกอนจากปูนขาว (เปอร์เซ็นต์)	ตะกอนจากปูน ขาวที่ใช้คำนวณ (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาตรตะกอน (ลิตรต่อปริมาณน้ำ บาดาล 1 ลิตร) <sup>(1)</sup>
ระบบทำให้ตะกอนเข้มข้น	15-30	22.5	1.796
ระบบหมุนเหวี่ยง แบบ Scroll	55-65	60.0	0.673
ระบบกรองแบบสุญญากาศ	45-65	55.0	0.735
ระบบอัดกรองด้วยแผ่น	55-70	62.5	0.646
ระบบลานทรายตากแดด	50	50.0	0.808
ระบบบ่อดักแดด	50-60	55.0	0.735

หมายเหตุ : (1) คำนวณที่น้ำหนักตะกอนแห้ง  $0.404 \pm 0.007$  กรัมต่อปริมาณน้ำบาดาล 1 ลิตร

(2) น้ำเข้มข้น (Concentrate) จากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ โดยมีน้ำที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl เป็นน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ซึ่งน้ำเข้มข้นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเมมเบรนมีความเข้มข้นของไอออนในน้ำสูงมาก วิธีการจัดการน้ำเข้มข้นดังกล่าวขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำ หากคุณภาพของน้ำเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ เช่น น้ำผิวดิน เป็นต้น การระบายน้ำเข้มข้นดังกล่าวสามารถช่วยคืนน้ำกลับเข้าสู่สมดุลน้ำ จึงทำการเทียบคุณภาพน้ำเข้มข้นจากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันกับ 1) มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการ และ 2) มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน ดังตารางที่ 4.30 พบว่า คุณภาพน้ำเข้มข้นจากกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน มีปริมาณ TDS ประมาณ 2,500 มก./ล. ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการ ที่กำหนดให้ค่า TDS มีค่าไม่เกิน 3,000 มก./ล. อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำเข้มข้นจากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีปริมาณ TDS สูงกว่ามาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน ที่กำหนดให้ค่า TDS มีค่าไม่เกิน 1,500 มก./ล. ดังนั้นน้ำเข้มข้นดังกล่าวไม่สามารถ

ระบายลงสู่ทางน้ำชลประทานและทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทานได้ สำหรับความกระด้าง ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม และซิลิกา ไม่มีเกณฑ์ของพารามิเตอร์ดังกล่าวในมาตรฐาน และยังมีบางพารามิเตอร์ในมาตรฐานที่ผู้วิจัยไม่ได้ทำการศึกษาอย่างก็ตามในการปฏิบัติงานจริงจำเป็นต้องวิเคราะห์คุณภาพน้ำพารามิเตอร์ทั้งหมดตามกฎหมาย ดังภาคผนวก ก และ ฐ ทั้งนี้ก่อนการปล่อยน้ำลงสู่สิ่งแวดล้อมจะต้องมีการปรับพีเอชของน้ำให้ได้ตามมาตรฐานดังกล่าวด้วย



ตารางที่ 4.30 น้ำเข้มข้น (Concentrate) ที่อัตราการนำน้ำกลับคืนของกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl - นาโนฟิลเตรชัน

พารามิเตอร์	หน่วย	คุณภาพน้ำ	มาตรฐาน	
			มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการ <sup>(1)</sup>	มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทานและทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน <sup>(2)</sup>
พีเอช	-	น้ำเข้มข้นจากกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน น้อยกว่า 9.0	5.5-9.0	6.5-8.5
TDS	มก./ล.	2,500	3,000	1,300
ความกระด้าง	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	171	-	-
แคลเซียม	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	111	-	-
แมกนีเซียม	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	60	-	-

พารามิเตอร์	หน่วย	คุณภาพ	มาตรฐาน	
			มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการ <sup>(1)</sup>	มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทานและทางน้ำที่เชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน <sup>(2)</sup>
ซัลไฟด์	มก./ล.	48	-	-

หมายเหตุ :

(1) ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ลงวันที่ 29 มีนาคม 2559

(2) คำสั่งกรมชลประทานที่ 73/2554 เรื่อง แก้ไขการระบายน้ำที่มีคุณภาพต่ำลงทางน้ำชลประทาน และและทางน้ำที่เชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน ลงวันที่ 1 เมษายน 2554

นอกจากการระบายน้ำดังกล่าวออกสู่สิ่งแวดล้อม การนำน้ำไปใช้เพื่อการเกษตรกรรมก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง การพิจารณาความเหมาะสมของน้ำบาดาลเพื่อการเกษตรกรรม พิจารณาจาก Sodium absorption Ratio (SAR) ให้อยู่เกณฑ์ที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 4.31 สำหรับน้ำเข้มข้น (Concentrate) จากกระบวนการนาโนฟิลเตรชันที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ โดยมีน้ำที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl เป็นน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชัน มีค่า SAR เท่ากับ 6.65 กล่าวคือ น้ำเข้มข้นดังกล่าวเป็นน้ำคุณภาพดี มีเกลือเล็กน้อย สามารถใช้สำหรับชลประทานได้กับพืชทุกชนิด สำหรับค่า SAR สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.9 ทั้งนี้ผู้วิจัยไม่ได้ทำการศึกษาปริมาณโซเดียม (Na) ดังนั้นจะกำหนดให้มีโซเดียมเท่ากับ 200 มก./ล. หรือ 8.7 มล.สมมูล/ล. เนื่องจากโดยทั่วไปในน้ำบาดาลมีโซเดียมน้อยกว่า 200 มก./ล. (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2558)

$$SAR = Na / \sqrt{(Ca + Mg) / 2} \quad (\text{สมการที่ 4.9})$$

เมื่อ โซเดียม(Na) แคลเซียม(Ca) และแมกนีเซียม(Mg) อยู่ในหน่วย สมมูล/ล. (meq/l)

ตารางที่ 4.31 คุณภาพน้ำเพื่อการเกษตรกรรม ตามระบบของสหรัฐอเมริกา (USSL,1954)

คุณภาพน้ำ	อัตราโซเดียมที่ถูกดูดซับ (SAR)	ผลกระทบต่อพืชและดิน
น้ำคุณภาพดี มีเกลือเล็กน้อย	0-10	ใช้สำหรับชลประทานได้กับพืชทุกชนิด
น้ำคุณภาพปานกลาง	10-18	มีผลต่อพืชไม่ทนเค็ม ใช้กับพืชทนเค็มปานกลาง ใช้ในดินที่มีการระบายน้ำได้ดี
น้ำคุณภาพต่ำ มีเกลือมาก	18-26	ใช้กับพืชทนเค็ม ต้องดูแลระมัดระวัง การระบายน้ำไม่ให้เกลือสะสมในดิน และไม่เหมาะที่จะใช้ในดินที่มีข้อจำกัดของการระบายน้ำ
น้ำคุณภาพต่ำมาก	มากกว่า 26	มีผลต่อพืชทั่วไป ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เพื่อการชลประทาน

ที่มา : กรมพัฒนาที่ดิน

ทั้งนี้สามารถสรุปปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และนาโนฟิลเตรชัน เปรียบเทียบกับปริมาณของเสียที่เกิดจากการกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) และกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส จากกระบวนการเติมที่ใช้ในโรงงานผลิตเอทานอลที่สนับสนุนข้อมูลสำหรับงานวิจัย ดังตารางที่ 4.32 มีรายละเอียดดังนี้

### กระบวนการที่ใช้ในงานวิจัย

(1) กระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และนาโนฟิลเตรชันที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ โดยกระบวนการทางเคมีมีอัตราการนำน้ำกลับคืน 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการผลิตน้ำทดแทน 2,400 ลบ.ม./วัน จะต้องมีน้ำบาดาลเข้าระบบบำบัด 3,158 ลบ.ม./วัน โดยของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัด ประกอบด้วย 1) ตะกอนเคมีแห้ง 127.6 กก. 2) น้ำจากตะกอนเคมี 158 ลบ.ม. ความเข้มข้น 500 มก./ล. และ 3) น้ำเข้มข้นจากกระบวนการเมมเบรน 600 ลบ.ม. ความเข้มข้น 2,500 มก./ล.

### กระบวนการเติมที่ใช้ในโรงงาน

โรงงานผลิตเอทานอลใช้น้ำทดแทนสำหรับหล่อเย็น ประมาณ 50 - 100 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ( $m^3/hr$ ) โดยใช้กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ เพื่อผลิตน้ำทดแทนสำหรับหล่อเย็น ทั้งนี้ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส คือ การอุดตันของเมมเบรน (Fouling) มีอัตราการนำกลับคืน (% Recovery) ต่ำ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหการอุดตันของเมมเบรน โรงงานเลือกใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment) เพื่อกำจัดความกระด้างซึ่งเป็นต้นเหตุของปัญหาการอุดตันของเมมเบรน ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน คือ มีน้ำ Brine ความเข้มข้น 40,000 มก./ล. เกิดขึ้นปริมาณ 50 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ( $m^3/day$ ) ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียจากค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจำนวนมาก ทำให้โรงงานหยุดใช้งานกระบวนการนี้ในปัจจุบัน โดยสามารถคำนวณปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นของแต่ละกระบวนการที่เคยใช้ในโรงงานและกระบวนการที่ใช้ผลิตน้ำทดแทนอยู่ในปัจจุบัน

ตารางที่ 4.32 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการบำบัดน้ำบาดาลเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรม

กระบวนการทาง	ประเภทของเสีย	ปริมาณของเสีย	ความเข้มข้นของ TDS (มก./ล.)	หมายเหตุ	
กระบวนการที่ใช้ในงานวิจัย	กระบวนการทางเคมีโดย การเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และนาโนฟิลเตรชัน ที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์	- ตะกอนเคมี - น้ำจากตะกอนเคมี - น้ำเข้มข้น	127.6 กก. 158 <u>ลบ.ม.</u> 600 <u>ลบ.ม.</u>	- 500 2,500	กำหนดให้กระบวนการทางเคมี โดยการเติมปูนขาวรวมกับ PACl มีอัตราการนำน้ำกลับคืน 95 เปอร์เซ็นต์
	กระบวนการ เติมที่ใช้ใน โรงงาน	- น้ำ brine - น้ำเข้มข้น	42 <u>ลบ.ม.</u> 2,400 <u>ลบ.ม.</u>	40,000 410	กำหนดให้กระบวนการ แลกเปลี่ยนไอออนมี ประสิทธิภาพการกำจัด TDS 50 เปอร์เซ็นต์



กระบวนการทาง	ประเภทของเสีย	ปริมาณของเสีย	ความเข้มข้นของ TDS (มก./ล.)	หมายเหตุ
กระบวนการ เติมที่ใช้ใน โรงงาน	กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 50 เปอร์เซ็นต์	2,400 ลบ.ม. - น้ำเข้มข้น	810	กระบวนการผลิตน้ำทดแทนในปัจจุบันของโรงงาน
	กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 60 เปอร์เซ็นต์	960 ลบ.ม. - น้ำเข้มข้น	1,407	กระบวนการผลิตน้ำทดแทนในปัจจุบันของโรงงาน

หมายเหตุ : กำหนดปริมาณน้ำทดแทนในระบบหล่อเย็นที่ผลิต 100 ลบ.ม./ชม. หรือ 2,400 ลบ.ม./วัน ตามข้อมูลของผู้ประกอบการระบุไว้



- (1) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน และรีเวอร์สออสโมซิสที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการผลิตน้ำทดแทน 2,400 ลบ.ม./วัน จะต้องมีน้ำบาดาลเข้าระบบบำบัด 4,800 ลบ.ม./วัน โดยของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัด ประกอบด้วย 1) น้ำ brine 42 ลบ.ม. ความเข้มข้น 40,000 มก./ล. และ 2) น้ำเข้มข้นจากกระบวนการเมมเบรน 2,400 ลบ.ม. ความเข้มข้น 410 มก./ล. ทั้งนี้ปริมาณน้ำ brine และความเข้มข้นของน้ำ brine ผู้ประกอบการได้แจ้งข้อมูลมา
- (2) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน และรีเวอร์สออสโมซิสที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 60 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการผลิตน้ำทดแทน 2,400 ลบ.ม./วัน จะต้องมีน้ำบาดาลเข้าระบบบำบัด 3,360 ลบ.ม./วัน โดยของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัด ประกอบด้วย 1) น้ำ brine 42 ลบ.ม. ความเข้มข้น 40,000 มก./ล. และ 2) น้ำเข้มข้นจากกระบวนการเมมเบรน 960 ลบ.ม. ความเข้มข้น 712 มก./ล. ทั้งนี้ปริมาณน้ำ brine และความเข้มข้นของน้ำ brine ผู้ประกอบการได้แจ้งข้อมูลมา
- (3) กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการผลิตน้ำทดแทน 2,400 ลบ.ม./วัน จะต้องมีน้ำบาดาลเข้าระบบบำบัด 4,800 ลบ.ม./วัน โดยของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัด ได้แก่ น้ำเข้มข้นจากกระบวนการเมมเบรน 2,400 ลบ.ม. ความเข้มข้น 810 มก./ล.
- (4) กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 60 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการผลิตน้ำทดแทน 2,400 ลบ.ม./วัน จะต้องมีน้ำบาดาลเข้าระบบบำบัด 3,360 ลบ.ม./วัน โดยของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัด ได้แก่ น้ำเข้มข้นจากกระบวนการเมมเบรน 960 ลบ.ม. ความเข้มข้น 1407 มก./ล.

## 4.5 การทดลองที่ 5 : ประยุกต์ใช้กระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันกับน้ำบาดาลจริง

### 4.5.1 วิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลจริง

สำหรับการประยุกต์ใช้กระบวนการกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันที่ดีที่สุดที่ได้จากงานวิจัยกับน้ำบาดาลก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์ออสโมซิสของโรงงานที่สนับสนุนงานวิจัยไม่สามารถดำเนินการได้ เนื่องจากโรงงานไม่สะดวกให้เก็บน้ำจากโรงงานมาทำการทดลองได้ อย่างไรก็ตามได้ประยุกต์ใช้กระบวนการดังกล่าวกับน้ำบาดาลจากโรงงานอื่น โดยเลือกใช้น้ำบาดาลของโรงงานผลิตพลาสติกแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม ดังรูปที่ 4.17 จากคุณภาพน้ำบาดาลจริง ดังตารางที่ 4.33 พบว่ามีค่าความกระด้าง แคลเซียม แมกนีเซียม และความขุ่น น้อยกว่าน้ำบาดาลสังเคราะห์ สำหรับความเป็นต่าง ค่าของแข็งละลาย และค่าการนำไฟฟ้า มีค่ามากกว่าน้ำบาดาลสังเคราะห์ และสำหรับปริมาณซิลิกา และพีเอชของน้ำ มีค่าใกล้เคียงกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ นอกจากนี้พบว่าความกระด้างของน้ำบาดาลจริงเป็นความกระด้างชั่วคราวหรือความกระด้างคาร์บอเนตเช่นเดียวกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ จากคุณภาพน้ำบาดาลจริงที่กล่าวไปข้างต้นน้ำบาดาลจริงของโรงงานผลิตพลาสติกแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐมสามารถใช้เป็นตัวแทนของน้ำจากโรงงานที่สนับสนุนงานวิจัยได้ ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการทดลองกระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันกับน้ำบาดาลจริงของโรงงานผลิตพลาสติกแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม เพื่อยืนยันผลการทดลองว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้กับน้ำบาดาลจริงได้หรือไม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 สถานีสูบน้ำและบำบัดน้ำบาดาลของโรงงานผลิตพลาสติกแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม

ตารางที่ 4.33 คุณภาพน้ำบาดาลสังเคราะห์และน้ำบาดาลจริง

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำบาดาลจริง ก่อนเข้า กระบวนการรี เวอร์สออสโมซิส รีเวอร์สออสโม ซิส <sup>(1)</sup>	น้ำบาดาล สังเคราะห์	น้ำ บาดาล จริง <sup>(2)</sup>
ความกระด้าง	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	216	217.0±2.5	132.5
แคลเซียม	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	132	132.1±2.0	57.5
แมกนีเซียม	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	84	84.9±2.5	75
ค่าความเป็นด่าง M	มก./ล. ในเทอมของหินปูน	276	280.9±3.6	436
ซิลิกา (SiO <sub>2</sub> )	มก./ล.	26.5	26.9±0.7	26.0
ค่าพีเอช (ที่ 25°C)	-	7.7	7.7±0.1	7.8
ค่าของแข็งละลาย (ที่ 25°C)	มก./ล.	412	662.5±9.4	1044
ค่าการนำไฟฟ้า (ที่ 25°C)	ไมโครซีเมนต์/ซม.	698	990.8±12. 4	1569
ความขุ่น	NTU	0.4	0.6±0.2	0.1

หมายเหตุ :

(1) เก็บตัวอย่างน้ำก่อนเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของระบบผลิตน้ำทดแทน (Feed RO) ของบริษัท ไทยเอทานอล พาวเวอร์ จำกัด (มหาชน) เมื่อวันที่ 18-22 ธันวาคม 2558

(2) เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลจริงของโรงงานผลิตพลาสติกแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม เมื่อวันที่ 29 เมษายน 2561

#### 4.5.2 ประยุกต์ใช้กระบวนการทางเคมี-นาโนฟิลเตรชันกับน้ำบาดาลจริง

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลจริง พบว่า ความกระด้างของน้ำบาดาลจริงเป็นความกระด้างชั่วคราวหรือความกระด้างคาร์บอเนต ดังนั้นสามารถใช้ปูนขาวเพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ สำหรับกระบวนการทางเคมีในการเติมปูนขาวและ PACl ซึ่งเป็นสารเคมีที่ดีที่สุดจากการทดลองเริ่มต้นกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ การหาปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมสำหรับคุณภาพน้ำที่แตกต่างกันนั้น ปริมาณปูนขาวที่เติมลงไปขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่างและปริมาณแมกนีเซียม (โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของ  $\text{CO}_2$  ที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิ  $25\text{ }^{\circ}\text{C} = 0.42\text{ มก./ล.}$ ) จะได้ปริมาณปูนขาวที่ต้องเติมตามทฤษฎีค่าเท่ากับ  $380\text{ มก./ล.}$  อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าปริมาณปูนขาวที่มากเกินไปเพื่อให้ความกระด้างในน้ำเหลือน้อยที่สุด คือ  $435\text{ มก./ล.}$  หรือประมาณ  $1.15$  เท่าของปริมาณปูนขาวตามทฤษฎี ซึ่งอยู่ในช่วง  $1.13-1.16$  ตามการทดลองเริ่มต้นกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ โดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl พบว่า ที่ปริมาณปูนขาว  $435\text{ มก./ล.}$  ในเทอมของหินปูน และ PACl เท่ากับ  $1.6 \times 10^{-4}$  โมลต่อลิตรของอลูมินัม โดยมีความกระด้างที่เหลืออยู่ในน้ำ  $45.2 \pm 1.2\text{ มก./ล.}$  ในเทอมของหินปูน คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง  $65.9 \pm 1.4$  เปอร์เซ็นต์ และมีซิลิกาที่เหลืออยู่ในน้ำ  $9.5 \pm 0.3\text{ มก./ล.}$  คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา  $63.3 \pm 1.0$  เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้พีเอชหลังปฏิกิริยาประมาณ  $10.6 \pm 0.0$  และค่าความเป็นด่างของ 2P-M เท่ากับ  $11.5 \pm 0.8\text{ มก./ล.}$  ในเทอมของหินปูน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างโดยการเติมปูนขาว ในการทดลองที่ 2.1 กล่าวว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าความเป็นด่างของ 2P-M อยู่ในเกณฑ์ที่การประปานครหลวง (การประปานครหลวง, 2555) และบริษัท SUEZ Water Technologies & Solutions จำกัด แนะนำ ที่ค่าความเป็นด่างของ 2P-M เท่ากับ  $10-20$  และ  $5-15\text{ มก./ล.}$  ในเทอมของหินปูน ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าพีเอชหลังการเติมปูนขาวที่ปริมาณดังกล่าวอยู่ในช่วง  $10.6-11.0$  ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่บริษัท SUEZ Water Technologies & Solutions จำกัด แนะนำไว้ที่พีเอชเท่ากับ  $10.5$

จะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของกระบวนการ ขึ้นอยู่กับปริมาณความกระด้างในน้ำเริ่มต้น หากมีความกระด้างในน้ำสูงจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างสูงด้วย เนื่องจากข้อจำกัดของกระบวนการดังกล่าวคือจะมีความกระด้างตกค้างในน้ำเหลือประมาณ  $40-60$

มิลลิกรัมต่อลิตร ในเทอมของหินปูน ตามความสามารถการละลายของสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียม จากตารางที่ 4.34 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของน้ำบาดาลสังเคราะห์ และน้ำบาดาลจริงมีค่า  $62.4 \pm 0.2$  และ  $61.3 \pm 1.0$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณความกระด้างในน้ำสังเคราะห์มีค่ามากกว่าในน้ำบาดาลจริง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างที่ผู้วิจัยศึกษาเป็นความกระด้างชั่วคราวเท่านั้น สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาของกระบวนการขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกามีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง เนื่องจากกลไกการกำจัดซิลิกาคือซิลิกาสามารถเกาะติดกับตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  หากตะกอนเหล่านั้นถูกแยกออกจากน้ำ ซิลิกาในน้ำก็จะลดลงด้วย



ตารางที่ 4.34 ประสิทธิภาพและปริมาณความกระด้างและซึบซึมที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการต่าง ๆ

พารามิเตอร์	หน่วย	คุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการ															
		ไม่ผ่านการบำบัด				กระบวนการนำโนฟิลเตรชัน				บุคลากรร่วมกับ PACI				บุคลากรร่วมกับ PACI และนาโนฟิลเตรชัน			
		น้ำบาดาล สังเคราะห์		น้ำบาดาล จริง		น้ำบาดาล สังเคราะห์		น้ำบาดาล จริง		น้ำบาดาล สังเคราะห์		น้ำบาดาล จริง		น้ำบาดาล สังเคราะห์		น้ำบาดาล จริง	
ความกระด้าง	มก./ล. ไนเทอมของหินปูน	217.0±2.5	132.5	36.9±0.9	23.5±0.7	42.9±0.9	45.2±1.2	8.0±0.1	23.0±0.6	8.0±0.1	8.0±0.1	8.0±0.1	8.0±0.1	8.0±0.1	8.0±0.1	7.8±0.2	
ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง	เปอร์เซ็นต์	-	-	83.0±0.4	82.3±0.5	80.2±0.4	65.9±1.4	81.3±0.2	82.7±0.5	96.3±0.0	96.3±0.0	96.3±0.0	96.3±0.0	96.3±0.0	96.3±0.0	94.1±0.2	

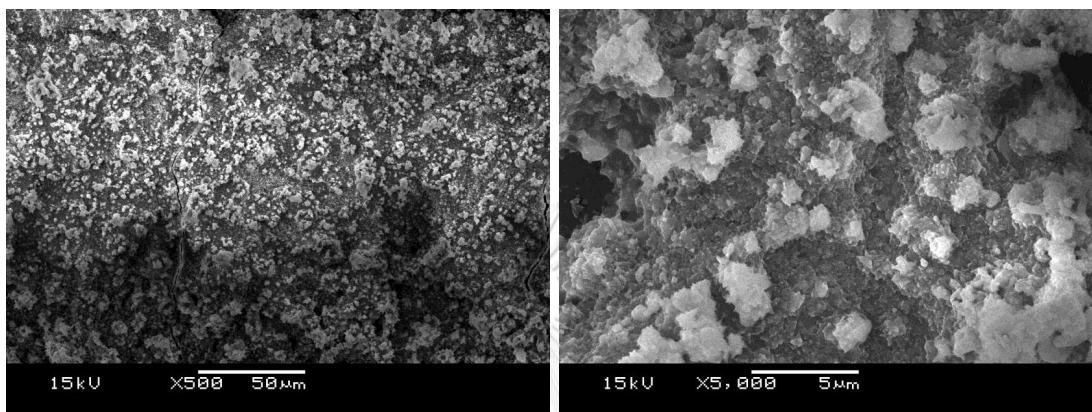
		คุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการ													
พารามิเตอร์	หน่วย	ไม่ผ่านการบำบัด		กระบวนการบำบัดน้ำในฟิเตอร์ชั้น				ปูนขาวร่วมกับ PACI				กระบวนการบำบัดน้ำในฟิเตอร์ชั้น		รวม	
		น้ำบาดาล สังเคราะห์	น้ำบาดาล จริง	น้ำบาดาล สังเคราะห์	น้ำบาดาล จริง	น้ำบาดาล สังเคราะห์	น้ำบาดาล จริง	น้ำบาดาล สังเคราะห์	น้ำบาดาล จริง	น้ำบาดาล สังเคราะห์	น้ำบาดาล จริง	น้ำบาดาล สังเคราะห์	น้ำบาดาล จริง	น้ำบาดาล สังเคราะห์	น้ำบาดาล จริง
จลิตก	มก./ล.	26.9±0.7	26.0	20.7±0.1	20.2±0.1	10.1±0.0	10.1±0.3	7.8±0.1	20.3±0.1	7.8±0.1	7.8±0.1	7.8±0.1	7.8±0.1	7.8±0.1	7.8±0.2
ประสิทธิภาพ การกำจัดซิลิ กา	เปอร์ เซ็นต์	-	-	22.9±0.1	22.4±0.3	62.4±0.2	61.3±1.0	22.3±0.4	22.0±0.3	70.8±0.1	70.8±0.1	69.8±0.7	69.8±0.7	69.8±0.7	69.8±0.7

หมายเหตุ : คุณภาพน้ำของกระบวนการบำบัดน้ำในฟิเตอร์ชั้นที่ความดันผ่านเมมเบรน 7 บาร์



สำหรับกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันไม่ว่าคุณภาพน้ำเข้ากระบวนการจะมีค่าแตกต่างกัน จากตารางที่ 4.36 พบว่าน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันของน้ำเข้ากระบวนการแต่ละประเภท ได้แก่ 1) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี 2) น้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี 3) น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และ 4) น้ำบาดาลจริงที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง  $83.0 \pm 0.4$ ,  $82.3 \pm 0.5$ ,  $81.3 \pm 0.2$  และ  $82.7 \pm 0.5$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา มีค่าใกล้เคียงกันเช่นกัน โดยมีค่า  $22.9 \pm 0.1$ ,  $22.4 \pm 0.3$ ,  $22.3 \pm 0.4$  และ  $22.0 \pm 0.3$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำบาดาลจริง มีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำบาดาลสังเคราะห์ จึงกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดอออนของกระบวนการเมมเบรนค่อนข้างมีค่าคงที่แม้ว่าคุณภาพน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นข้อดีของการเลือกใช้กระบวนการเมมเบรน อย่างไรก็ตามคุณภาพน้ำเข้ากระบวนการที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อพฤติกรรมการอุดตันของเมมเบรนที่ต่างกัน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ SEM ของน้ำเข้ากระบวนการเมมเบรนเป็นน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี ที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ผิวเมมเบรนมีฟาวแลนต์ (Foulant) ปกคลุมทั่วเมมเบรน และมีชั้นที่หนา ดังรูปที่ 4.18 พิจารณาค่า EDX ดังตารางที่ 4.35 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค) เปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุบนเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานกับเมมเบรนสะอาด (New membrane) พบว่า เมมเบรนที่ผ่านการใช้งานและเมมเบรนสะอาดมี %คาร์บอน เท่ากับ  $76.8 \pm 2.3$  และ  $20.9 \pm 2.5$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมี %ซิลไฟด์ เท่ากับ  $3.9 \pm 0.5$  และ  $0.3 \pm 0.0$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ %คาร์บอน และ %ซิลไฟด์ ของเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานมีค่าน้อยกว่าเมมเบรนสะอาด น่าจะเกิดจากเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานถูกปกคลุมไปด้วยฟาวแลนต์ ดังนั้นธาตุที่วิเคราะห์ EDX ได้น่าจะเป็นธาตุของฟาวแลนต์ทั้งหมด ไม่ใช่ธาตุที่มีอยู่เดิมแล้วของโครงสร้างผิวเมมเบรน ไม่ได้เกิดความผิดพลาดแต่อย่างใด สำหรับธาตุที่พบหลัก ๆ บนเมมเบรนที่ผ่านการใช้งาน คือ แคลเซียม ออกซิเจน และคาร์บอน โดยมีเปอร์เซ็นต์ที่พบ  $15.6 \pm 0.7$ ,  $62.8 \pm 2.0$  และ  $20.9 \pm 2.5$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของแคลเซียมที่มีค่าสูงที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบ แมกนีเซียม ซิลิคอน คลอไรด์ อลูมิเนียม และเหล็ก ในปริมาณไม่มาก โดยมีค่า  $0.4 \pm 0.0$ ,  $0.1 \pm 0.1$ ,  $0.1 \pm 0.1$ ,  $0.1 \pm 0.0$  และ  $0.1 \pm 0.0$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าในน้ำบาดาลจริงน่าจะมีอลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งแตกต่าง

จากน้ำบาดาลสังเคราะห์ เนื่องจากองค์ประกอบในน้ำบาดาลจริงและน้ำบาดาลสังเคราะห์ไม่เหมือนกันจึงส่งผลให้ลักษณะของฟาวแลนท์แตกต่างกันด้วย ดังนั้นผู้วิจัยจะเปรียบเทียบลักษณะและองค์ประกอบของฟาวแลนท์ของน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมีและผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl เท่านั้น



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ของเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมีที่กำลังขยาย (ก) 500 และ (ข) 5,000

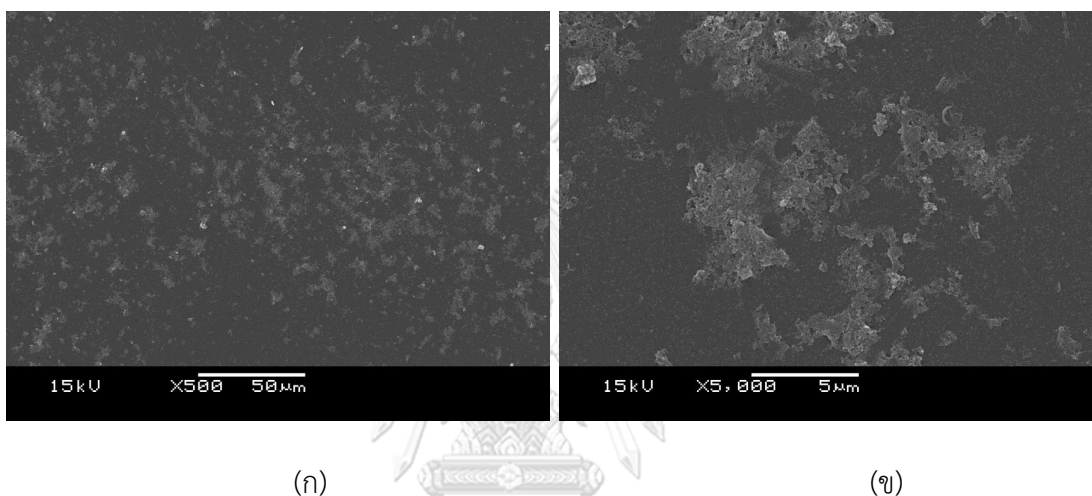
ตารางที่ 4.35 องค์ประกอบธาตุบนนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี และน้ำบาดาลจริงที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl

ธาตุ	องค์ประกอบธาตุ (% อะตอม)		
	เมมเบรน สะอาด	น้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่าน การเติมสารเคมี	น้ำบาดาลจริงที่ผ่านการเติม ปูนขาวร่วมกับ PACl
คาร์บอน (C)	76.8±2.3	20.9±2.5	60.3±4.2
ออกซิเจน (O)	19.3±2.0	62.8±2.0	34.2±3.7
ซัลไฟด์ (S)	3.9±0.5	0.3	3.7±0.1
แคลเซียม (Ca)	-	15.6±0.7	0.1±0.0
แมกนีเซียม (Mg)	-	0.4±0.0	0.1±0.1
ซิลิคอน (Si)	-	0.1±0.0	0.3±0.1

ธาตุ	องค์ประกอบธาตุ (% อะตอม)		
	เมมเบรน สะอาด	น้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่าน การเติมสารเคมี	น้ำบาดาลจริงที่ผ่านการเติม ปูนขาวร่วมกับ PACl
คลอไรด์ (Cl)	-	0.1±0.1	0.2±0.1
อลูมิเนียม (Al)	-	0.1	1.2±0.3
เหล็ก (Fe)		0.1±0.0	0.1±0.0

สำหรับน้ำเข้ากระบวนการเมมเบรนเป็นน้ำบาดาลจริงที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl ที่อัตราการนำน้ำกลับคืน 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ผิวเมมเบรนมีฟาวแลนท์ (Foulant) เป็นคราบบางพื้นที่ ไม่เห็นผลึกที่ชัดเจน ดังรูปที่ 4.19 พิจารณาค่า EDX เปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุบนเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานกับเมมเบรนสะอาด พบว่าเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานและเมมเบรนสะอาดมี %คาร์บอน เท่ากับ  $76.8 \pm 2.3$  และ  $60.3 \pm 4.2$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มี %ออกซิเจน เท่ากับ  $19.3 \pm 2.0$  และ  $34.2 \pm 3.7$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมี %ซิลไฟด์ เท่ากับ  $3.9 \pm 0.5$  และ  $3.7 \pm 0.1$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ %คาร์บอน %ซิลไฟด์ และ %ออกซิเจน ของเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานมีค่าใกล้เคียงกับเมมเบรนสะอาด ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวน่าจะเกิดจากเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานมีฟาวแลนท์เป็นคราบบางพื้นที่ ดังนั้นธาตุที่วิเคราะห์ EDX ได้น่าจะเป็นธาตุของฟาวแลนท์เล็กน้อย แต่เป็นธาตุของโครงสร้างผิวเมมเบรนเป็นหลัก สำหรับธาตุอื่น ๆ ที่พบแต่มีปริมาณไม่มาก ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม ซิลิคอน คลอไรด์ อลูมิเนียม และเหล็ก โดยมีค่า  $0.1 \pm 0.0$ ,  $0.1 \pm 0.1$ ,  $0.3 \pm 0.1$ ,  $0.2 \pm 0.1$ ,  $1.2 \pm 0.3$  และ  $0.1 \pm 0.0$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเหล็กบนผิวเมมเบรนของน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมีกับน้ำบาดาลจริงที่เติมปูนขาวร่วมกับ PACl มีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl อาจจะไม่สามารถกำจัดเหล็กในน้ำได้ นอกจากนี้พบว่าปริมาณเหล็กบนผิวเมมเบรนของน้ำบาดาลจริงที่เติมปูนขาวร่วมกับ PACl มีค่ามากกว่าน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมีเล็กน้อย เนื่องจาก สารละลาย PACl มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมบนผิวเมมเบรนของน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมีกับน้ำบาดาลจริงที่เติมปูนขาวร่วมกับ PACl พบว่ามี %แคลเซียม ลดลงกว่า  $99.4$  เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้สาเหตุที่ปริมาณซิลิคอนบนผิวเมมเบรนของน้ำบาดาลจริงที่เติมปูนขาวร่วมกับ

PACL ลดลงเมื่อเทียบกับน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี อาจเพราะฟาวแลนท์หลักที่ผิวเมมเบรนของน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมีอาจจะเป็น  $\text{CaCO}_3$  ดังนั้นฟาวแลนท์ที่เป็นสารประกอบซิลิเกตอาจถูกปกคลุม เนื่องจากซิลิกาในน้ำบาดาลจริงมีค่าประมาณ 26 มก./ล. ขณะที่น้ำบาดาลจริงที่เติมปูนขาวร่วมกับ PACL ปริมาณแคลเซียมในน้ำจะลดลงมากส่งผลให้ฟาวแลนท์ที่เป็น  $\text{CaCO}_3$  จะมีปริมาณน้อยลง ทำให้ฟาวแลนท์ที่เป็นสารประกอบซิลิเกตไม่ถูกปกคลุม นั่นอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้การวิเคราะห์ EDX พบเปอร์เซ็นต์ของซิลิคอนมากขึ้น

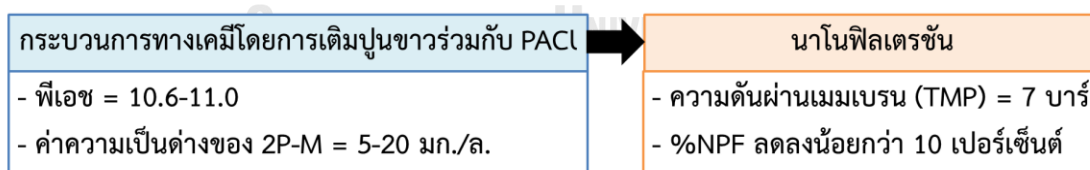


รูปที่ 4.19 ภาพ SEM ของเมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลจริงที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACL ที่กำลังขยาย (ก) 500 และ (ข) 5,000

จากผลการทดลอง SEM-EDX ของเมมเบรนที่ผ่านการกรองด้วยน้ำบาดาลจริงสอดคล้องกับผลการทดลองของน้ำบาดาลสังเคราะห์ กล่าวคือ น้ำบาดาลจริงที่เติมปูนขาวร่วมกับ PACL เมื่อนำมาเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันจะช่วยลดการเปรอะเปื้อนของฟาวแลนท์และการอุดตันของเมมเบรน ผิวของเมมเบรนค่อนข้างสะอาด เป็นคราบฟาวแลนท์ ไม่เห็นผลึกชัดเจน เช่นเดียวกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่เติมปูนขาวร่วมกับ PACL

กล่าวสรุปได้ว่ากระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACL มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาดีที่สุดใน โดยปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมสำหรับคุณ จะเพิ่มขึ้นจะเพิ่มขึ้นภาพน้ำที่แตกต่างกันนั้น ปริมาณปูนขาวที่เติมลงไปขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่างและปริมาณแมกนีเซียม (โดย

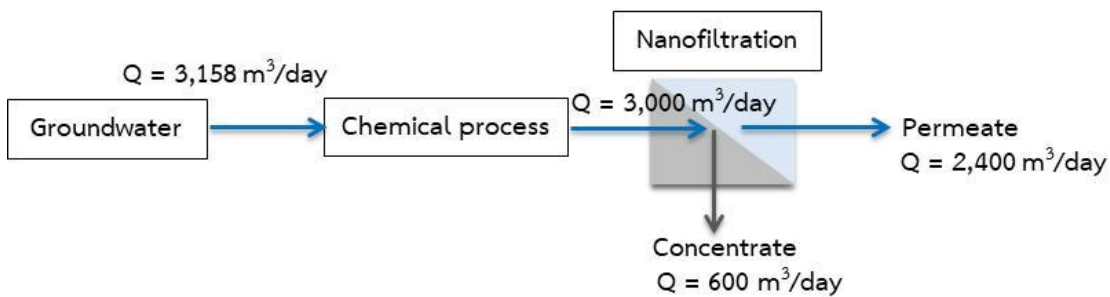
กำหนดให้ความเข้มข้นของ  $\text{CO}_2$  ที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิ  $25\text{ }^\circ\text{C} = 0.42\text{ มก./ล.}$ ) จะได้ปริมาณปูนขาวตามทฤษฎี ทั้งนี้การเติมปูนขาวให้มากเกินพอที่ปริมาณ 1.13-1.16 เท่าของปริมาณปูนขาวตามทฤษฎีจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเติม PACl พิเศษหลังปฏิกิริยาควรมีค่าประมาณ 10.6-11.0 และค่าความเป็นด่างของ 2P-M เท่ากับ 5-20 มก./ล. ในทอมนของหินปูน เพื่อให้ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างด้วยการเกิดผลึก  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ยังคงมีประสิทธิภาพ โดยการเติม PACl จะช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาสูงขึ้น เนื่องจากเกิดผลึก  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ซึ่งซิลิกาเกาะติดผลึกดังกล่าวได้ดี เมื่อนำน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีมาทดลองในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน พบว่าความดันผ่านเมมเบรนในการเดินระบบของนาโนฟิลเตรชัน ควรมีค่าไม่เกิน 7 บาร์ ตามคำแนะนำการใช้งานเมมเบรนของผู้ประกอบการ รวมถึงการเดินระบบด้วยความดันผ่านเมมเบรนที่สูงจะส่งผลให้เมมเบรนเสียหายเร็ว เนื่องจากเกิดการกัดของเมมเบรน นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าความดันผ่านเมมเบรนที่มากกว่า 7 บาร์ ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกามีค่าเท่ากับความดันผ่านเมมเบรนที่ 7 บาร์ จึงไม่มีความจำเป็นที่จะเดินระบบด้วยความดันผ่านเมมเบรนที่สูงกว่า 7 บาร์ สำหรับอัตราการนำน้ำกลับคืนของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันพบว่ามีค่าสูงมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันผ่านการกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยกระบวนการทางเคมีออกส่วนหนึ่งแล้ว ซึ่งสามารถลดภาระการกรองให้กับนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนได้ ส่งผลให้สามารถเดินระบบที่อัตราการนำน้ำกลับคืนของเมมเบรนสูงได้ก่อนเกิดการอุดตันของเมมเบรน ดังรูปที่ 4.20



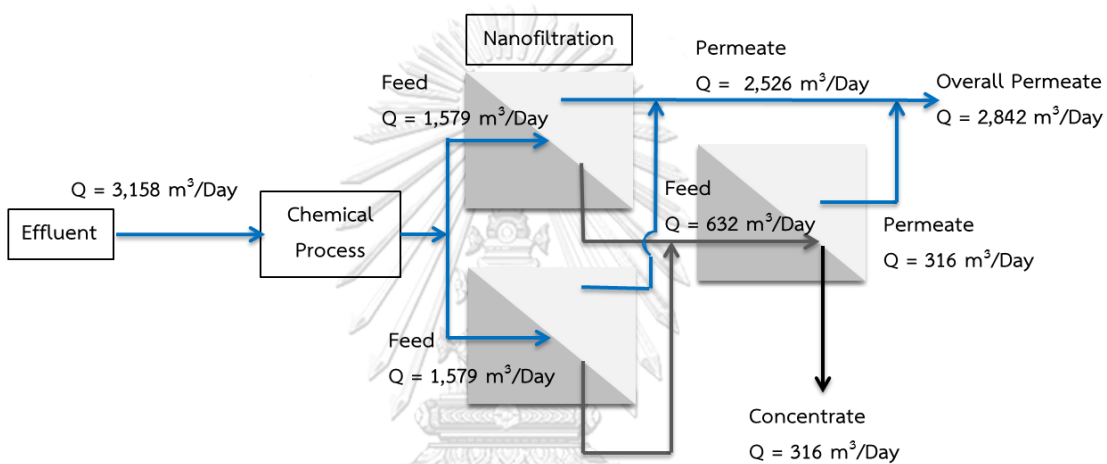
**รูปที่ 4.20** สถานะที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีโดยเติมปูนขาวร่วมกับ PACl-นาโนฟิลเตรชัน

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอเสนอการต่อระบบเมมเบรนที่สามารถเพิ่มอัตราการนำน้ำกลับคืนของระบบโดยรวมได้ด้วยการต่อระบบนาโนฟิลเตรชันแบบ “Two stage NF with 2:1 arrays” สำหรับกระบวนการทางเคมีและกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ที่มีอัตราการนำน้ำกลับ 95 และ 80 เปอร์เซ็นต์

ตามลำดับ คิดเป็นอัตราการนำน้ำกลับคืนของระบบโดยรวมประมาณ 76 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้อัตราการนำน้ำกลับคืนดังกล่าวคำนวณจากการต่อระบบนาโนฟิลเตรชันแบบ “Single stage NF” โดย Single stage หมายถึง น้ำไหลผ่าน NF เพียงครั้งเดียว ดังรูปที่ 4.21 โดยโรงงานต้องการน้ำทดแทนของระบบหล่อเย็น 2,400 ลบ.ม./วัน ดังนั้นปริมาณน้ำบาดาลที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำทดแทนจะมีปริมาณ 3,158 ลบ.ม./วัน ผ่านกระบวนการทางเคมีและได้นำเพื่อเข้านาโนฟิลเตรชัน 3000 ลบ.ม./วัน อย่างไรก็ตามการต่อระบบนาโนฟิลเตรชันแบบ “Two stage NF with 2:1 arrays” จะช่วยเพิ่มอัตราการนำน้ำกลับคืนได้ โดย Two stage หมายถึง น้ำไหลผ่าน NF 2 ครั้ง กล่าวคือ น้ำเข้มข้น (Concentrate) จากนาโนฟิลเตรชัน Stage แรก จะผ่านนาโนฟิลเตรชันอีก Stage ที่สอง เพื่อดึงน้ำกลับมาเพิ่ม ซึ่งทำให้อัตราการนำน้ำกลับคืนโดยรวมของระบบเพิ่มขึ้น แสดงสมดุลน้ำของระบบ ดังรูปที่ 4.22 เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำทดแทน 2,400 ลบ.ม./วัน สำหรับ 2:1 arrays หมายถึง Stage แรกมีท่อความดันสำหรับใส่เมมเบรน (Pressure vessel) 2 ชุด และใน Stage ที่สองมี Pressure vessel 1 ชุด เมื่อพิจารณากระบวนการนาโนฟิลเตรชันแบบ Two stage NF with 2:1 arrays จะมีอัตราการนำน้ำกลับคืนโดยรวม =  $(2,400/2,500) \times 100 = 96$  เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าอัตราการนำน้ำกลับคืนของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันสามารถเพิ่มจาก 80 เปอร์เซ็นต์ เป็น 96 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของไอออนในน้ำสะอาดของระบบแบบ Two stage NF with 2:1 arrays จะมีค่าสูงชันกว่าการต่อระบบนาโนฟิลเตรชันแบบ Single stage NF ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานเพื่อออกแบบระบบให้เหมาะสมกับความต้องการ อย่างไรก็ตามกระบวนการนาโนฟิลเตรชันแบบ Two stage NF with 2:1 arrays ก็มีความน่าสนใจหากผู้ใช้งานต้องการเพิ่มอัตราการนำน้ำกลับคืนของระบบ แสดงข้อมูลความเข้มข้นของน้ำเข้า (Feed) น้ำสะอาด (Permeate) และน้ำเข้มข้น (Concentrate) และปริมาณน้ำดังตารางที่ 4.36 ทั้งนี้การคำนวณดังกล่าวมาจากสมดุลมวลและกำหนดให้นาโนฟิลเตรชันใน Stage ที่ 2 มีอัตราการนำน้ำกลับคืน 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.21 สมดุลน้ำของระบบนาโนฟิลเตรชันเป็นแบบ Single stage NF



รูปที่ 4.22 สมดุลน้ำของระบบนาโนฟิลเตรชันเป็นแบบ Two stage NF with 2:1 arrays

ตารางที่ 4.36 ความเข้มข้นของน้ำเข้า (Feed) น้ำสะอาด (Permeate) และน้ำเข้มข้น (Concentrate) และปริมาณน้ำของการต่อระบบนาโนฟิลเตรชันแบบ Two stage NF with 2:1 arrays

Stage	ชนิดของน้ำ	ปริมาณ (ลบ.ม./Stage)	ความเข้มข้นของความกระด้าง (มก./ล. ในเทอมของหินปูน)	ความเข้มข้นของซิลิกา (มก./ล)	ความเข้มข้นของ TDS (มก./ล)
Stage 1	น้ำเข้า (Feed)	1,500	42.9	10.1	500.7
	น้ำสะอาด (Permeate)	1,200	8.0	7.8	200.9
	น้ำเข้มข้น (Concentrate)	300	182.4	19.1	1699.9
Stage 2	น้ำเข้า (Feed)	600	182.4	19.1	1699.9
	น้ำสะอาด (Permeate)	300	34.1	14.8	1017.6
	น้ำเข้มข้น (Concentrate)	300	330.7	23.4	2382.2
รวม	น้ำสะอาด (Permeate)	1,500	13.2	9.2	364.2
	น้ำเข้มข้น (Concentrate)	600	256.6	21.2	2041.1

หมายเหตุ: ปริมาณที่น้ำเข้านาโนฟิลเตรชัน 3000 ลบ.ม./วัน



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำบาดาลด้วยกระบวนการทางเคมีและนาโนฟิลเตรชันเพื่อใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนกระบวนการรีเวอร์ออสโมซิสในการผลิตน้ำทดแทนของระบบหล่อเย็นและน้ำในหม้อไอน้ำจากน้ำบาดาล ของโรงงานผลิตเอทานอลแห่งหนึ่งในจังหวัดขอนแก่น สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1) กระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างขึ้นอยู่กับปริมาณปูนขาวและ PACl โดยประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างจะมีค่าสูงสุดเมื่อพีเอชของน้ำหลังปฏิกิริยา (Final pH) มีค่าอยู่ในช่วง 10.6-11.0 และค่าความเป็นด่างของ 2P-M มีค่าอยู่ในช่วง 5-20 มก./ล. ในเทอมของหินปูน โดยค่าความเป็นด่างของ 2P-M คำนวณได้จากการไตเตรทหาค่าความเป็นด่าง P และค่าความเป็นด่าง M โดยหาค่าความเป็นด่างของ 2P-M มากกว่า 0 มก./ล. ในเทอมของหินปูน กล่าวได้ว่าปริมาณไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) ในน้ำถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ทั้งหมดแล้ว

2) กระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอน  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Mg(OH)}_2$  และ  $\text{Al(OH)}_3$  เนื่องจากซิลิกาสามารถเกาะติดตะกอนเหล่านี้ได้ดี และตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ง่าย หากมีตะกอนดังกล่าวมาก ซิลิกาก็จะสามารถไปเกาะติดตะกอนเหล่านี้ได้มากเช่นกัน กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาของกระบวนการทางเคมีจะมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ทั้งนี้ในการทดลองกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ พบว่าที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. ร่วมกับ PACl  $1.2 \times 10^{-4}$  โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม ที่สภาวะการกวนเร็วที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 วินาที และการกวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที และตั้งน้ำทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา  $80.2 \pm 0.4$  และ  $62.4 \pm 0.2$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3) นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนรุ่น DK ของบริษัท GE water and process technologies จำกัด มีค่าความต้านทานเนื่องจากเมมเบรน (Membrane Resistance,  $R_m$ ) มีค่าประมาณ  $2.3 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$

4) การเดินระบบนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนต่อเนื่องในการทดลองนี้ทำที่ความดันผ่านเมมเบรน 4-15 บาร์ ที่น้ำเข้ากระบวนการแต่ละประเภท พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดอออนของเมมเบรนมีค่าค่อนข้างคงที่แม้ว่าคุณภาพน้ำเข้าระบบและความดันในการเดินระบบจะเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม คุณภาพน้ำเข้าระบบและความดันผ่านเมมเบรนที่เดินระบบที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อพฤติกรรมการอุดตันของเมมเบรนที่แตกต่างกัน

5) กระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl สามารถช่วยลดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนได้ โดยน้ำเข้าที่เข้าระบบเมมเบรนหากมีการบำบัดด้วยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl พบว่าที่อัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) 80 เปอร์เซ็นต์ ค่า Normalized Flux ( $J/J_0$ ) และอัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ถูกเทียบค่า (Normalized Permeate Flow, NPF) ลดลงเท่ากับ 6.0 และ 0.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีน้ำเข้าระบบที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี ค่า  $J/J_0$  และ %NPF ที่อัตราการนำน้ำกลับคืน (% Recovery) ลดลงเท่ากับ 89.4 และ 89.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

6) ที่กระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และนาโนฟิลเตรชัน ที่ความดันผ่านเมมเบรน 7 บาร์ สามารถเดินระบบที่อัตราการนำน้ำกลับคืนได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้ได้ปริมาณน้ำสะอาดมากขึ้น

7) คุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และนาโนฟิลเตรชัน มีคุณภาพดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเข้ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสของโรงงานที่สนับสนุนข้อมูลในงานวิจัย ซึ่งการใช้กระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และนาโนฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น (Pre-Treatment) ก่อนกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส จะสามารถช่วยลดภาระการกรองของความกระด้างและซิลิกาให้กับเมมเบรนรีเวอร์สออสโมซิสได้ เนื่องจากความกระด้างและซิลิกาในน้ำเป็นสาเหตุหลักของการอุดตันของเมมเบรน

8) ปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl และนาโนฟิลเตรชัน ได้แก่ (1) ตะกอนเคมีของสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียม และตะกอนของโพลิเมอร์ (2) น้ำจากตะกอนเคมี และ (3) น้ำเข้มข้นจากกระบวนการเมมเบรน อย่างไรก็ตามการจัดการน้ำเข้มข้นดังกล่าวขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำ ทั้งนี้มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการ และมาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน กำหนดให้ค่าของแข็งละลาย (TDS) มีค่าไม่เกิน 3,000 และ 1,300 มก./ล. ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรมีการศึกษากับน้ำบาดาลจริงในหลายภูมิภาค เพื่อให้เห็นความแตกต่างและยืนยันผลการทดลองได้ชัดเจนมากขึ้น
- 2) ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน เช่น ผลของสภาวะอุทกศาสตร์ของโมดูล (Hydrodynamic of the membrane module) โดยใช้แผ่นกั้น (Spacers) และแผ่นปรับพื้นที่หน้าตัดของช่องน้ำไหลผ่านเมมเบรน (Shim) ที่แตกต่างกัน เนื่องจากส่งผลต่อค่าความเร็วตามขวาง (Crossflow velocity) และความเค้นเฉือน (Shear stress) เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบในระดับ Full-scale ได้ดียิ่งขึ้น
- 3) ควรมีการศึกษาในด้านราคาก่อสร้าง และจุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ศึกษาเพียงค่าใช้จ่ายจากสารเคมีซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของค่าดำเนินการ (Operation cost) ของระบบ

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2558). รายงานสถานการณ์น้ำบาดาลประเทศไทย พ.ศ.2558. วันที่สืบค้น 2 พฤษภาคม 2560, จาก [www.agriinfo.doae.go.th/year58/diaster/dgr\\_report.pdf](http://www.agriinfo.doae.go.th/year58/diaster/dgr_report.pdf)
- การประปานครหลวง. (2555). การกำจัดความกระด้าง (Hardness removal). วันที่สืบค้น 15 ตุลาคม 2560, จาก [https://www.mwa.co.th/download/prd01/water\\_technology/other/awtp2.pdf](https://www.mwa.co.th/download/prd01/water_technology/other/awtp2.pdf)
- การประปานครหลวง. (2556). Advanced Water Treatment. วันที่สืบค้น 2 มกราคม 2561, จาก [https://www.mwa.co.th/download/prd01/water\\_technology/other/awtp2.pdf](https://www.mwa.co.th/download/prd01/water_technology/other/awtp2.pdf)
- การประปาส่วนภูมิภาค. (2558). คู่มือกระบวนการหลักด้านกระบวนการผลิตน้ำประปา. วันที่สืบค้น 20 ตุลาคม 2559
- ประสิทธิ์ เกี้ยวสุนทร. (2555). การศึกษาและออกแบบโอโคไนไมเซอร์โดยใช้ความร้อนปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- ผกาวัต แก้วกันเนตร. (2554). เทคโนโลยีเมมเบรนและการประยุกต์ใช้ (พิมพ์ครั้งที่ 1). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปรภาภรณ์ ผาติสุนทร. (2546). ระบบนาโนฟิลเตรชันขนาดทดสอบสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำประปา. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, and นิธิยา รัตนานนท์. (2557). จุดไอโซอิเล็กทริก. วันที่สืบค้น 20 กันยายน 2559, จาก <http://share.psu.ac.th/blog/scientist/34275/>
- พิสุทธ์ เพ็ชรมนกุล. (2557). หน่วยกระบวนการสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พงษ์สวาท สุวคนธ์ สิงหราชวรพันธ์. (2548). น้ำบาดาล การเกิดและการพัฒนาที่ยั่งยืน. วันที่สืบค้น 17 กันยายน 2559, จาก [http://gtsc.geol.science.cmu.ac.th/gw\\_book\\_FS.pdf](http://gtsc.geol.science.cmu.ac.th/gw_book_FS.pdf)

มันสิน ตัณฑุลเวศม์, ไพพรรณ พรประภาม, and มันรัชต์ ตัณฑุลเวศม์. (2554). การปรุงแต่งคุณภาพน้ำ เล่ม 1 สำหรับระบบหม้อไอน้ำ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบประปา กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์บริษัทสันติศิริจำกัด.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์, and มันรัชต์ ตัณฑุลเวศม์. (2551). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์บริษัทสันติศิริจำกัด.

สำนักอนุรักษ์และฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2558). รายงานสถานการณ์น้ำบาดาลประเทศไทย พ.ศ. 2558. วันที่สี่คัน 4 กันยายน 2559, จาก [http://www.agriinfo.doae.go.th/year58/diaster/dgr\\_report.pdf](http://www.agriinfo.doae.go.th/year58/diaster/dgr_report.pdf)

สุมาลี เดโชพลชัย. (2529). การกำจัดซิลิกาในน้ำด้วยวิธีตกผลึกทางเคมี. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

เอกลักษณ์ เข้มเพชร. (2556). การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดการใช้สารเคมีควบคุมจุลินทรีย์ในหอหล่อเย็นของโรงงานผลิตโอเลฟินส์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

## ภาษาอังกฤษ

A. M. Al-Rehaili. (2003). Comparative chemical clarification for silica removal from RO groundwater feed. *Desalination*, 159, 21-31.

M. C. Amiri, M. Ostovar, and M. T. Amiri. (2012). A Cost Effective Technique for Chemical Wastes Reduction in Lime Water Softening Process. 2012 4th International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering, 43.

A. Amirtharajah, and K. M. Mills. (1982). Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. *American Water Works Association*, 74(4), 210-216.

- W. R. Bowen, and H. Mukhtar. (1996). Characterisation and prediction of separation performance of nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, 112(2), 263-274.
- H. Cheng, S. Chen, and S. Yang. (2009). In-line coagulation/ultrafiltration for silica removal from brackish water as RO membrane pretreatment. *Separation and Purification Technology*, 70(1), 112-117. doi: 10.1016/j.seppur.2009.09.001
- M. H. Davood Abadi Farahani, S. M. Borghei, and V. Vatanpour. (2016). Recovery of cooling tower blowdown water for reuse: The investigation of different types of pretreatment prior nanofiltration and reverse osmosis. *Journal of Water Process Engineering*, 10, 188-199.
- F. Elazhar, R. EL Habbani, M. Elazhar, M. Hafsi, and A. Elmidaoui. (2013). Comparison of the performances of two commercial membranes in hardness removal from underground water using Nanofiltration membranes. *International Journal of Advanced Chemistry*, 1(2), 21-30.
- S. D. Faust, and O. M. Aly. (1998). *Chemistry of Water Treatment (2nd)*. United States of America: Lewis Publishers.
- R. Field. (2010). *Membranes for Water Treatment (Vol. 4)*: Wiley-VCH.
- Julia M. Frick, Liliana A. Féris, and Isabel C. Tessaro. (2014). Evaluation of pretreatments for a blowdown stream to feed a filtration system with discarded reverse osmosis membranes. *Desalination*, 341, 126-134.
- C.J. Gabelich, K.P. Ishida, F.W. Geringer, R. Evangelista, M. Kalyan, and I.H. Suffet. (2006). Control of residual aluminum from conventional treatment to improve reverse osmosis performance. *Desalination*, 190, 147-160.
- S. Ghizellaoui, S. Taha, G. Dorange, A. Chibani, and J. Gabon. (2004). Softening of Hamma drinking water by nanofiltration and by lime in the presence of heavy metals. *Desalination*, 171, 133-138.

- S. Kawamura. (2000). *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities* (Second Ed.). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- M. Manttari, B. Van der Bruggen, and N. Marianne. (2013). Nanofiltration. In S. Ramaswamy, H. Huang & B. V. Ramarao (Eds.), *Separation and Purification Technologies in Biorefineries* (1st ed., pp. 233-258). United Kingdom: John Wiley & Sons.
- A. W. Mohammad, Y. H. Teow, W. L. Ang, Y. T. Chung, D. L. Oatley-Radcliffe, and N. Hilal. (2015). Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination*, 356, 226-254.
- J. Nicolini, C. Borges, and H. Ferraz. (2016). Selective rejection of ions and correlation with surface properties of nanofiltration membranes. *Separation and Purification Technology*, 171, 238-247. doi: 10.1016/j.seppur.2016.07.042
- K. Ohno, Y. Matsui, M. Itoh, Y. Oguchi, T. Kondo, Y. Konno, . . . Y. Magara. (2010). NF membrane fouling by aluminum and iron coagulant residuals after coagulation–MF pretreatment. *Desalination*, 254(1-3), 17-22. doi: 10.1016/j.desal.2009.12.020
- S. S. Sablani, M. F. A. Goosen, R. Al-Belushi, and M. Wilf. (2001). Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review. *Desalination*, 141, 269-289.
- H. Saitua, R. Gil, and A. P. Padilla. (2011). Experimental investigation on arsenic removal with a nanofiltration pilot plant from naturally contaminated groundwater. *Desalination*, 274(1-3), 1-6.
- S. Salvador Cob, C. Beaupin, B. Hofs, M. M. Nederlof, D. J. H. Harmsen, E. R. Cornelissen, . . . G. J. Witkamp. (2012). Silica and silicate precipitation as limiting factors in high-recovery reverse osmosis operations. *Journal of Membrane Science*, 423-424, 1-10.

- S. Salvador Cob, B. Hof, C. Maffezzoni, J. Adamus, W. G. Siegers, E. R. Cornelissen, . . .  
G. J. Witkamp. (2014). Silica removal to prevent silica scaling in reverse osmosis membranes. *Desalination*, 344, 137-143.
- M. Seneviratne. (2006). *A Practical Approach to Water Conservation for Commercial and Industrial Facilities*. United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- R. Sheikholeslami, I. S. Al-Mutaz, T. Koo, and A. Young. (2001). Pretreatment and the effect of cations and anions on prevention of silica fouling. *Desalination*, 139, 83-95.
- W. Stumm, and J. J. Morgan. (2012). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters* (3rd Vol. 126). Hoboken: John Wiley & Sons.
- C. Y. Tang, T. H. Chong, and A. G. Fane. (2011). Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes: a review. *Adv Colloid Interface Sci*, 164(1-2), 126-143.
- H. Tang, F. Xiao, and D. Wang. (2015). Speciation, stability, and coagulation mechanisms of hydroxyl aluminum clusters formed by PACl and alum: A critical review. *Adv Colloid Interface Sci*, 226, 78-85.
- N. Wei, Z. Zhang, D. Liu, Y. Wu, J. Wang, and Q. Wang. (2015). Coagulation behavior of polyaluminum chloride: Effects of pH and coagulant dosage. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(6), 1041-1046.
- X. Wu, X. Ge, D. Wang, and H. Taha. (2007). Distinct coagulation mechanism and model between alum and high Al<sub>13</sub>-PACl. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 305, 89-96.
- R. Yagnaseni. (2017). Effect of Temperature on Ion Transport in Nanofiltration Membrane: Diffusion, Convection and Electromigration. *Desalination*, 420, 241-257.



- I. Zarchi, E. Friedler, and M. Rebhun. (2013). Polyaluminium chloride as an alternative to alum for the direct filtration of drinking water. *Environmental Technology*, 34(9), 1199-1209.
- A. Zouboulis, G. Traskas, and P. Samaras. (2008). Comparison of efficiency between poly-aluminium chloride and aluminium sulphate coagulants during full-scale experiments in a drinking water treatment plant. *Separation Science and Technology*, 43(6), 1507-1519.





ภาคผนวก ก :

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ กราฟมาตรฐานของซิลิกา  
และกราฟมาตรฐานของอลูมิเนียม

ก-1 : เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1) SDI Test

- Tarson In-line Membrane Filter Holder



- Cellulose acetate membrane (CA membrane) ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน เส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มม.



## 2) pH Conductivity และ TDS

- pH/Conductivity meter ของบริษัท EZ DO รุ่น 7200



## 3) ความขุ่น

- Nephelometer ของบริษัท HANNA instruments รุ่น HI 98703



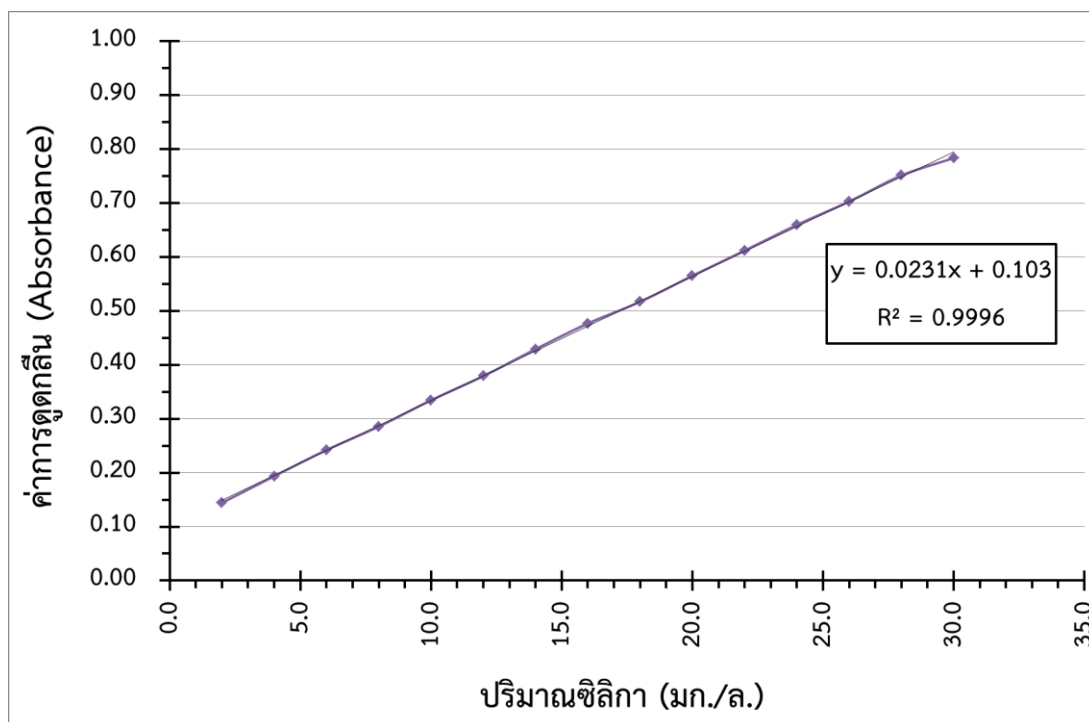
#### 4) ซิลิกาและอลูมิเนียม

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

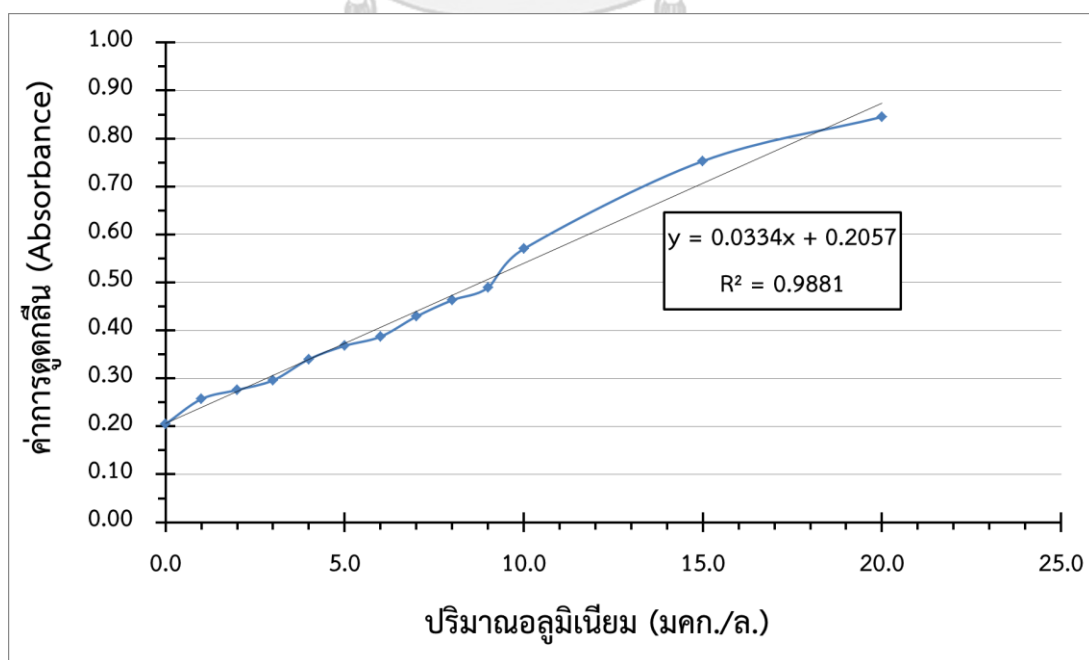


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก-2 : กราฟมาตรฐานของซิลิกา (Si Calibration Curve)



ก-3 : กราฟมาตรฐานของอลูมิเนียม (Al Calibration Curve)

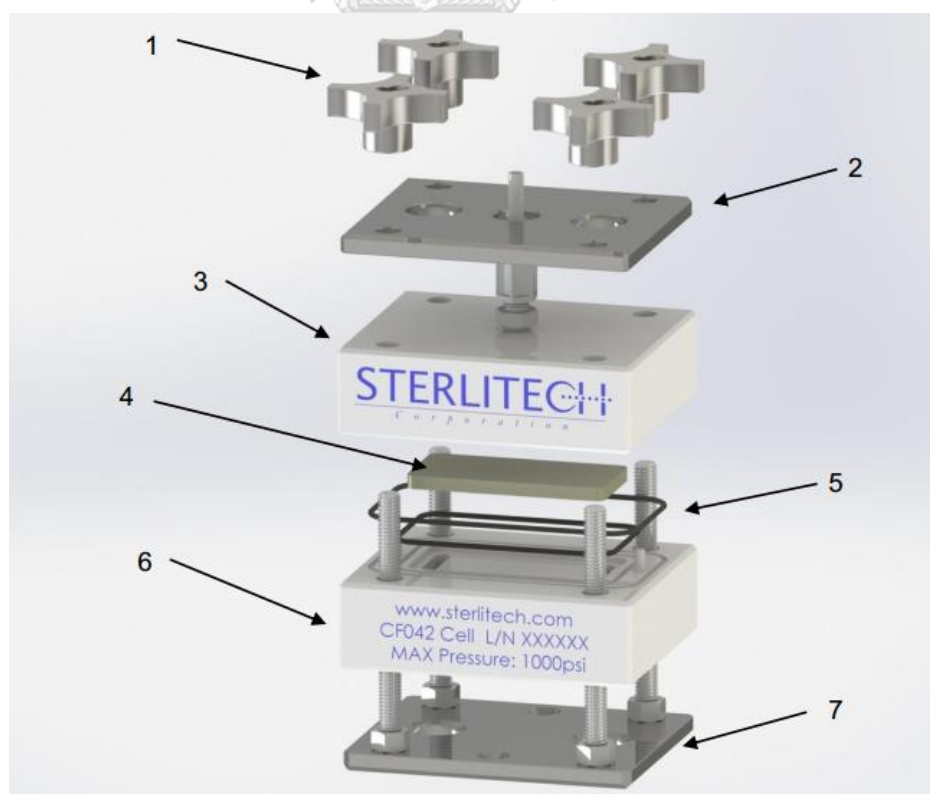


ภาคผนวก ข :

### 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 ค :

## 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 ชีรวัฒน์ แซ่ก๊วย

Address: \_\_\_\_\_

Tel: 043 - 418807- 13 Fax: 043 - 418806

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

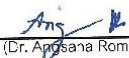
Parameters	Units	Method / Reference	Water samples			
			น้ำดิบ	Feed RO	RO	
<b>Physical properties</b>						
Appearance	-	Visual Comparison/ 2120 B*	ใส ตะกวนแดง	ใส	ใส	
Turbidity	NTU	Nephelometric Method/ 2130 B*	6.6	0.4	0.0	
pH / (°C)	-	Electrometric Method/ 4500-1*	7.0	7.7	6.7	
Conductivity	µs/cm	Laboratory Method/ 2510 B*	667	698	23	
TDS	ppm	Laboratory Method/ 2610 B*	400	412	14	
<b>Chemical properties</b>						
Total hardness	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	EDTA Titrimetric Method/ 2340 C*	226	216	Nil	
Calcium (Ca) as hardness	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	EDTA Titrimetric Method/ 2340 C*	144	132	Nil	
Alkalinity (P)	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	Titration Method/ 2320 B*	Nil	Nil	Nil	
Alkalinity (M)	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	Titration Method/ 2320 B*	256	276	24	
Carbonate	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	Titration Method/ 2320 B*	Nil	Nil	Nil	
Bicarbonate	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	Titration Method/ 2320 B*	256	276	24	
Chloride	mg/l as Cl <sup>-</sup>	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 <sub>2</sub>	Molybdosilicate Method/ 4500-Si*	25.9	26.5	0.2	
Sulfite	mg/l as SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Iodometric Method/ 4500-SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> *				
Nitrite	mg/l as NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Colorimetric Method/ 4500-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> *				
Phosphate	mg/l as P	Ascorbic Method/ 4500-P*				
Free Chlorine	mg/l as Cl <sub>2</sub>	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. Eaton American Public Health Association, Washington D.C. 2005

ได้รับมาตรฐานห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เอกชน จากกรมโรงงานอุตสาหกรรม เลขที่ใบอนุญาต ๖-186

ข้อความนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างน้ำที่นำมาทดสอบเท่านั้น

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

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

Ecotech Water Systems Co., LTD

B3 Sangkom-Songkor Rd., Ladprao, Ladprao, Bangkok 10230 Tel : 0 2538 9635 ( 4 line ) Fax : 0 2539 8829  
www.ecotechthailand.com



ภาคผนวก ง

คุณภาพน้ำบาดาลสี่งเคราะห์ที่

การทดสอบ	ความกระด้าง (มก./ล. ในเทอม ของหินปูน)	แคลเซียม (มก./ล. ในเทอม ของหินปูน)	แมกนีเซียม (มก./ล. ในเทอม ของหินปูน)	ซิลิกา (มก./ล.)	พีเอช	ความเป็นต่าง M (มก./ล. ในเทอม ของหินปูน)	TDS (มก./ล.)	ค่านำไฟฟ้า (ไมโคร ซีเมนส์/ซม.)	ความขุ่น (NTU)
1	220.0	135.0	85.0	28.3	7.76	283.0	651.0	975.0	0.89
2	212.0	132.0	80.0	26.5	7.77	278.0	665.0	1002.0	0.65
3	220.0	134.0	86.0	26.5	7.73	280.0	668.0	989.0	0.43
4	220.0	132.5	87.5	25.8	7.70	278.0	652.0	976.0	0.62
5	220.0	132.0	88.0	25.9	7.79	282.0	665.0	1003.0	0.51
6	215.0	132.0	83.0	25.1	7.85	286.0	654.0	982.0	0.44
7	220.0	134.0	86.0	26.2	7.85	282.0	654.0	982.0	0.43
8	215.0	134.0	81.0	26.4	7.90	281.0	680.0	1015.0	0.52
9	215.0	132.0	83.0	26.4	7.78	282.0	668.0	990.0	0.32
10	217.0	132.0	85.0	26.5	7.77	278.0	665.0	1002.0	0.67
11	215.0	135.0	80.0	27.2	7.85	292.0	654.0	982.0	0.91

การทดสอบ	ความกระด้าง (มก./ล. ในเทอม ของหินปูน)	แคลเซียม (มก./ล. ในเทอม ของหินปูน)	แมกนีเซียม (มก./ล. ในเทอม ของหินปูน)	ซิลิกา (มก./ล.)	พีเอช	ความเป็นด่าง M (มก./ล. ในเทอม ของหินปูน)	TDS (มก./ล.)	ค่านำไฟฟ้า (ไมโคร ซีเมนส์/ซม.)	ความขุ่น (NTU)
12	220.0	132.0	88.0	27.4	7.79	281.0	670.0	988.0	0.78
13	215.0	132.0	83.0	27.4	7.78	276.0	653.0	978.0	0.93
14	215.0	127.0	88.0	27.7	7.75	288.0	654.0	983.0	0.37
15	215.0	132.0	83.0	27.5	7.70	280.0	660.0	988.0	0.89
16	217.5	132.0	85.5	27.6	7.70	279.0	677.0	1012.0	0.91
17	215.0	132.0	83.0	27.5	7.56	282.0	655.0	984.0	0.43
18	216.0	130.0	86.0	27.4	7.79	280.0	680.0	1014.0	0.52
19	220.0	132.0	88.0	26.8	7.66	281.0	672.0	992.0	0.65
20	215.0	128.8	86.3	26.8	7.47	278.0	656.0	984.0	0.56
21	215.0	128.0	87.0	26.9	7.50	276.0	674.0	1012.0	0.41
22	220.0	132.0	88.0	26.6	7.69	278.0	653.0	980.0	0.47
23	217.5	132.0	85.5	27.0	7.67	282.0	658.0	984.0	0.56
24	220.0	135.0	85.0	27.1	7.70	282.0	655.0	984.0	0.89

การทดลอง	ความกระด้าง (มก./ล. ในเทอม ของหินปูน)	แคลเซียม (มก./ล. ในเทอม ของหินปูน)	แมกนีเซียม (มก./ล. ในเทอม ของหินปูน)	ซิลิกา (มก./ล.)	ฟอสฟอรัส (มก./ล.)	ความเป็นด่าง M (มก./ล. ในเทอม ของหินปูน)	TDS (มก./ล.)	ค่านำไฟฟ้า (ไมโคร ซีเมนส์/ซม.)	ความขุ่น (NTU)
25	216.0	134.0	82.0	27.6	7.78	278.0	670.0	989.0	0.76
ค่าเฉลี่ย	217.0	132.1	84.9	26.9	7.7	280.9	662.5	990.8	0.6
ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	2.5	2.0	2.5	0.7	0.1	3.6	9.4	12.4	0.2



ภาคผนวก จ :

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระต้าง แคลเซียม แมกนีเซียม และซิลิกา  
และคุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาว

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระต้าง (เปอร์เซ็นต์)

การทดลอง	ปริมาณปูนขาว (มก./ล.)																
	0	100	250	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	450	500	
1	0.0	38.6	52.3	65.9	66.4	68.2	72.7	73.9	78.2	78.0	75.0	70.2	64.5	62.3	62.3	61.4	
2	-2.0	38.6	51.2	64.3	65.9	67.0	69.3	72.7	79.5	81.2	76.1	69.7	67.8	60.2	60.1	61.8	
3	1.0	40.9	50.2	63.6	65.7	65.9	69.3	73.4	80.2	80.6	76.6	71.3	65.7	61.1	61.3	60.9	
ค่าเฉลี่ย	-0.3	39.4	51.2	64.6	66.0	67.1	70.4	73.3	79.3	79.9	75.9	70.4	66.0	61.2	61.2	61.4	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.5	1.3	1.1	1.2	0.4	1.1	2.0	0.6	1.0	1.7	0.8	0.8	1.7	1.1	1.1	0.5	

**ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย (เปอร์เซ็นต์)**

การทดลอง	ปริมาณปุ๋ยขาว (กก./ล.)															
	0	100	250	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	450	500
1	0.8	65.7	68.0	70.3	72.1	71.3	72.5	73.4	76.5	80.9	67.7	59.6	48.9	39.1	38.1	-87.0
2	-2.1	66.2	67.5	71.2	71.8	72.4	80.8	75.0	75.0	82.7	69.2	57.2	47.6	38.0	38.0	-92.7
3	1.6	64.8	68.2	72.4	71.2	71.8	78.8	74.4	78.9	80.8	69.1	58.1	47.8	36.0	36.2	-77.2
ค่าเฉลี่ย	0.1	65.6	67.9	71.3	71.7	71.8	77.4	74.3	76.8	81.5	68.7	58.3	48.1	37.7	37.4	-85.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.0	0.7	0.4	1.1	0.5	0.6	4.3	0.8	2.0	1.1	0.8	1.2	0.7	1.6	1.1	7.8

**ประสิทธิภาพการกำจัดแมกนีเซียม (เปอร์เซ็นต์)**

การทดลอง	ปริมาณปุ๋ยขาว (กก./ล.)															
	0	100	250	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	450	500
1	1.1	0.0	21.1	24.5	25.5	30.5	48.9	75.2	80.4	85.6	91.2	91.6	92.0	92.3	92.6	93.1
2	-0.4	0.8	22.4	25.6	24.3	31.4	47.3	70.3	80.2	86.7	91.1	91.9	92.1	92.2	92.0	93.3
3	0.8	-1.2	21.8	24.6	25.1	30.8	46.8	71.2	79.7	85.4	90.6	90.9	91.8	92.5	92.8	93.3
ค่าเฉลี่ย	0.5	-0.1	21.8	24.9	25.0	30.9	47.7	72.2	80.1	85.9	91.0	91.5	92.0	92.3	92.5	93.2
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.8	1.0	0.7	0.6	0.6	0.5	1.1	2.6	0.4	0.7	0.3	0.5	0.2	0.2	0.4	0.1

**ประสิทธิภาพการกำจัดซีลีเนียม (เปอร์เซ็นต์)**

ปริมาณปุ๋ยขาว (กก./ล.)																
การทดลอง	0	100	250	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	450	500
1	0.0	-1.1	9.6	23.3	23.4	32.1	33.8	34.2	35.3	35.3	36.2	36.2	36.8	37.2	41.6	42.9
2	-0.2	0.8	9.8	21.2	22.1	32.5	33.5	34.0	35.9	35.4	35.9	36.7	37.2	37.8	40.1	43.5
3	-1.8	0.2	10.4	21.3	24.8	33.8	33.1	34.2	34.2	34.9	36.1	36.1	36.5	36.5	39.8	44.2
ค่าเฉลี่ย	-0.7	0.0	9.9	21.9	23.4	32.8	33.5	34.1	35.1	35.2	36.1	36.3	36.8	37.2	40.5	43.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.0	0.9	0.4	1.2	1.4	0.5	0.4	0.1	0.9	0.3	0.2	0.3	0.4	0.7	0.9	0.7

**ฟีดแบ็ก**

ปริมาณปุ๋ยขาว (กก./ล.)																
การทดลอง	0	100	250	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	450	500
1	7.8	8.9	9.7	10.2	10.2	10.4	10.5	10.5	10.7	11.0	11.3	11.4	11.6	11.7	12.1	12.7
2	7.7	8.8	9.9	10.1	10.3	10.4	10.4	10.5	10.6	11.0	11.3	11.4	11.6	11.8	12.3	12.6
3	7.8	8.9	9.8	10.2	10.2	10.3	10.4	10.6	10.6	11.1	11.3	11.4	11.6	11.8	12.2	12.7
ค่าเฉลี่ย	7.8	8.9	9.8	10.2	10.2	10.4	10.4	10.5	10.6	11.0	11.3	11.4	11.6	11.8	12.2	12.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0

**ความชื้น (WTU)**

		ปริมาณขุนขาว (กก./ล.)															
การทดลอง	0	100	250	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	450	500	
1	0.7	7.1	7.9	11.0	5.7	5.7	5.0	4.4	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	
2	0.7	7.3	7.5	10.5	5.9	5.9	5.2	3.5	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	
3	0.5	7.2	8.0	10.7	5.8	5.9	5.1	4.2	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.2	
ค่าเฉลี่ย	0.6	7.2	7.8	10.7	5.8	5.8	5.1	4.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.1	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	

**ค่าองศาแห้งที่ 25°C (mg/l)**

		ปริมาณขุนขาว (กก./ล.)															
การทดลอง	0	100	250	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	450	500	
1	665.0	678.0	657.0	620.0	595.0	546.0	541.0	542.0	548.0	551.0	581.0	647.0	699.0	745.0	874.0	887.0	
2	660.0	654.0	662.0	615.0	587.0	551.0	545.0	535.0	551.0	559.0	571.0	622.0	678.0	723.0	845.0	923.0	
3	669.0	691.0	667.0	611.0	599.0	553.0	538.0	549.0	542.0	559.0	565.0	618.0	688.0	713.0	890.0	913.0	
ค่าเฉลี่ย	664.7	674.3	662.0	615.3	593.7	550.0	541.3	542.0	547.0	556.3	572.3	629.0	688.3	727.0	869.7	907.7	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.5	18.8	5.0	4.5	6.1	3.6	3.5	7.0	4.6	4.6	8.1	15.7	10.5	16.4	22.8	18.6	

**ค่าความเบี่ยงต่าง ของ 2P-M (mg/l)**

ปริมาณปูนขาว (มก./ล.)																
การทดลอง	0	100	250	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	450	500
1	-280.2	0.3	3.3	7.6	7.8	8.4	9.3	9.4	12.4	19.4	39.3	79.5	99.4	125.9	315.9	792.9
2	-279.5	0.3	3.6	7.8	7.8	8.8	8.5	9.8	12.8	20.2	39.3	79.0	99.4	125.3	315.5	792.1
3	-280.3	0.6	2.8	8.3	8.1	9.4	8.9	9.4	12.6	20.1	40.5	79.0	100.5	125.5	315.1	792.3
ค่าเฉลี่ย	-280.0	0.4	3.2	7.9	7.9	8.9	8.9	9.5	12.6	19.9	39.7	79.2	99.8	125.6	315.5	792.4
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.2	0.2	0.4	0.4	0.2	0.5	0.4	0.2	0.2	0.4	0.7	0.3	0.6	0.3	0.4	0.4





## ภาคผนวก ฉ :

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง แคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟต และคุณภาพ  
น้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมโคแอกกูแลนต์

ภาคผนวก ฉ-1 : ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง แคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟต และ  
คุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมสารส้ม

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง (เปอร์เซ็นต์)

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	0.0	-1.2	0.0	1.2	1.2	0.0
2	-2.0	0.3	0.1	-2.0	-1.2	-2.4
3	1.0	-2.3	-2.3	0.9	0.8	1.2
ค่าเฉลี่ย	-0.3	-1.0	-0.7	0.0	0.2	-0.4
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.5	1.3	1.4	1.8	1.3	1.8

ประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียม (เปอร์เซ็นต์)

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	0.8	0.0	2.4	-2.1	0.0	0.0
2	-2.1	1.2	0.0	1.1	-2.3	-0.8
3	1.6	-2.2	-1.8	0.3	1.9	-0.1
ค่าเฉลี่ย	0.1	-0.3	0.2	-0.2	-0.2	-0.3
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.0	1.7	2.1	1.7	2.1	0.4

**ประสิทธิภาพการกำจัดแมกนีเซียม (เปอร์เซ็นต์)**

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	1.1	-2.6	1.8	-1.3	2.6	-1.2
2	-0.4	0.0	0.0	1.1	0.0	1.9
3	0.8	1.8	-2.1	0.2	-1.9	-0.9
ค่าเฉลี่ย	0.5	-0.3	-0.1	0.0	0.2	-0.1
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.8	2.2	1.9	1.2	2.2	1.7

**ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา (เปอร์เซ็นต์)**

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	0.0	1.5	1.6	6.1	9.5	16.1
2	-0.2	1.3	1.7	6.3	9.8	16.8
3	-1.8	1.7	1.2	6.8	9.2	17.2
ค่าเฉลี่ย	-0.7	1.5	1.5	6.4	9.5	16.7
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.0	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5

พีเอช

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	7.8	7.8	7.4	7.1	6.9	6.6
2	7.7	7.7	7.4	7.2	7.0	6.6
3	7.8	7.7	7.4	7.2	6.9	6.7
ค่าเฉลี่ย	7.8	7.7	7.4	7.2	6.9	6.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0

ความขุ่น (NTU)

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	0.7	0.6	0.7	0.9	1.0	0.9
2	0.7	0.7	0.6	0.9	0.9	1.0
3	0.5	0.6	0.6	1.0	0.9	1.0
ค่าเฉลี่ย	0.6	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0

ค่าของแข็งละลาย ที่ 25°C (mg/L)

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	665.0	664.0	667.0	675.0	741.0	869.0
2	660.0	669.0	669.0	679.0	752.0	883.0
3	669.0	658.0	674.0	681.0	748.0	879.0
ค่าเฉลี่ย	664.7	663.7	670.0	678.3	747.0	877.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.5	5.5	3.6	3.1	5.6	4.2

ค่าความเป็นต่าง ของ 2P-M (มก./ล. ในเทอมของหินปูน)

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	-280.2	-280.5	-280.3	-279.4	-278.1	-261.5
2	-279.5	-280.2	-279.1	-279.1	-278.4	-261.9
3	-280.3	-279.2	-280.6	-280.8	-278.1	-261.7
ค่าเฉลี่ย	-280.0	-280.0	-280.0	-279.8	-278.2	-261.7
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.2	0.7	0.8	1.0	0.2	0.2

ภาคผนวก ฉ-2 : ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง แคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟต และ  
คุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติม PACl

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง (เปอร์เซ็นต์)

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	0.0	0.0	0.0	-2.5	0.0	0.0
2	-2.0	0.1	-1.2	0.0	-1.3	1.2
3	1.0	1.0	0.6	1.4	0.1	0.8
ค่าเฉลี่ย	-0.3	0.4	-0.2	-0.4	-0.4	0.7
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.5	0.5	0.5	2.0	0.8	0.6

ประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียม (เปอร์เซ็นต์)

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	0.8	0.0	0.0	1.2	-1.2	0.6
2	-2.1	-1.1	0.6	0.0	0.8	0.2
3	1.6	-0.8	0.6	-2.4	-0.8	-0.8
ค่าเฉลี่ย	0.1	-0.6	0.4	-0.4	-0.4	0.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.0	0.6	0.3	1.8	1.1	0.7

**ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียม (เปอร์เซ็นต์)**

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	1.1	0.0	0.0	-2.4	-1.2	-0.6
2	-0.4	-1.2	1.2	1.2	0.6	0.6
3	0.8	0.6	0.6	0.6	0.0	0.8
ค่าเฉลี่ย	0.5	-0.2	0.6	-0.2	-0.2	0.3
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.8	0.9	0.6	1.9	0.9	0.8

**ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา (เปอร์เซ็นต์)**

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	0.0	4.2	5.7	13.5	24.2	38.4
2	-0.2	3.4	5.9	13.7	25.4	38.8
3	-1.8	4.3	5.7	13.0	24.5	39.0
ค่าเฉลี่ย	-0.7	4.0	5.8	13.4	24.7	38.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.0	0.5	0.1	0.3	0.6	0.3

พีเอช

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	7.8	7.8	7.4	7.3	7.0	7.0
2	7.7	7.7	7.4	7.3	7.1	6.9
3	7.8	7.7	7.3	7.3	7.1	6.9
ค่าเฉลี่ย	7.8	7.7	7.4	7.3	7.1	6.9
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0

ความขุ่น (NTU)

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	0.7	0.3	0.5	0.4	0.3	0.2
2	0.7	0.4	0.4	0.4	0.2	0.3
3	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
ค่าเฉลี่ย	0.6	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0

ค่าของแข็งละลาย ที่ 25°C (mg/L)

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	665.0	659.0	681.0	721.0	823.0	978.0
2	660.0	668.0	677.0	718.0	835.0	965.0
3	669.0	665.0	681.0	724.0	828.0	970.0
ค่าเฉลี่ย	664.7	664.0	679.7	721.0	828.7	971.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.5	4.6	2.3	3.0	6.0	6.6

ค่าความเป็นต่าง ของ 2P-M (มก./ล. ในเทอมของหินปูน)

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	-280.2	-280.4	-280.3	-279.8	-279.7	-279.1
2	-279.5	-280.2	-279.3	-279.9	-279.6	-279.3
3	-280.3	-279.3	-280.4	-280.3	-280.3	-280.2
ค่าเฉลี่ย	-280.0	-280.0	-280.0	-280.0	-279.9	-279.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.2	0.6	0.6	0.3	0.4	0.6



## ภาคผนวก ช :

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง แคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟต และคุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาวที่ปริมาณ 360 มก./ล. ร่วมกับ

## โคแอกกูแลนต์

ภาคผนวก ช-1 : ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง แคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟต และคุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาวที่ปริมาณ 360 มก./ล. ร่วมกับสารส้ม

## ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง (เปอร์เซ็นต์)

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	78.0	72.1	80	79.9	80	27.9
2	81.2	72.3	80.3	80.2	80.5	27.6
3	80.6	73.1	80.9	80.7	81.2	30.1
ค่าเฉลี่ย	79.9	72.5	80.4	80.3	80.6	28.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.7	0.5	0.5	0.4	0.6	1.4

## ประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียม (เปอร์เซ็นต์)

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	80.9	72.2	81.2	81.2	81	24.3
2	82.7	73.2	80.9	81.2	80.5	25.1
3	80.8	71.9	81.1	80	79.9	24.8
ค่าเฉลี่ย	81.5	72.4	81.1	80.8	80.5	24.7
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.1	0.7	0.2	0.7	0.6	0.4

**ประสิทธิภาพการกำจัดแมกนีเซียม (เปอร์เซ็นต์)**

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	85.6	74.5	85.9	85.4	85.4	33.3
2	86.7	74.1	85.1	84.9	86.1	34.5
3	85.4	73.8	85.6	85.6	85.9	33.8
ค่าเฉลี่ย	85.9	74.1	85.5	85.3	85.8	33.9
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6

**ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา (เปอร์เซ็นต์)**

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	35.3	30.3	30.6	31.18	35.8	80.5
2	35.4	31.2	30.2	31.2	35.6	80.3
3	34.9	30.8	30.8	31.42	35.9	81.1
ค่าเฉลี่ย	35.2	30.8	30.5	31.3	35.8	80.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.3	0.5	0.3	0.1	0.2	0.4

พีเอช

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	11.0	11.0	10.8	10.7	10.5	8.3
2	11.0	11.0	10.8	10.6	10.5	8.3
3	11.1	11.1	10.8	10.6	10.5	8.3
ค่าเฉลี่ย	11.0	11.0	10.8	10.6	10.5	8.3
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0

ความขุ่น (NTU)

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.3
2	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.2
3	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.3
ค่าเฉลี่ย	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.2
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0

ค่าของแข็งละลาย ที่ 25°C (mg/L)

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	551.0	588.0	598.0	608.0	615.0	605.0
2	559.0	582.0	596.0	610.0	617.0	601.0
3	559.0	582.0	600.0	608.0	611.0	599.0
ค่าเฉลี่ย	556.3	584.0	598.0	608.7	614.3	601.7
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.6	3.5	2.0	1.2	3.1	3.1

ค่าความเป็นต่าง ของ 2P-M (มก./ล. ในเทอมของหินปูน)

ปริมาณสารส้ม (โมล อลูมิเนียม/ล.)						
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
1	19.4	19.4	16.5	15.1	10.2	-38.1
2	20.2	19.2	16.7	14.5	10.6	-38.1
3	20.1	19.7	17.2	15.2	10.5	-37.6
ค่าเฉลี่ย	19.9	19.4	16.8	14.9	10.4	-37.9
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.4	0.3	0.4	0.4	0.2	0.3

ภาคผนวก ข-2 : ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง แคลเซียม แมกนีเซียม และซิลิกา และคุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาวที่ปริมาณ 360 มก./ล. ร่วมกับ PACl

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง (เปอร์เซ็นต์)

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)								
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$10^{-3}$
1	78.0	80.2	80.1	79.9	80.1	79.9	75.1	34.8
2	81.2	79.9	79.8	80.5	80.7	80.1	75.9	35.1
3	80.6	80.7	81.2	80.6	80.9	80.7	75.6	36.4
ค่าเฉลี่ย	79.9	80.3	80.4	80.3	80.6	80.2	75.5	35.4
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.7	0.4	0.7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9

ประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียม (เปอร์เซ็นต์)

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)								
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$10^{-3}$
1	80.9	81.3	81.4	81.2	81.3	81.2	73.3	32.5
2	82.7	80.9	80.9	81.5	81.1	81.7	73.5	32.1
3	80.8	81.5	81.6	80.8	81.6	81.6	73.2	31.7
ค่าเฉลี่ย	81.5	81.2	81.3	81.2	81.3	81.5	73.3	32.1
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.1	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.4

**ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียม (เปอร์เซ็นต์)**

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)								
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$10^{-3}$
1	85.6	85.6	85.6	85.4	84.9	85.5	81.4	39.8
2	86.7	85.1	85.1	85.4	85.7	85.7	81.6	39.0
3	85.4	85.2	85.1	85.6	85.7	85.8	81.8	40.0
ค่าเฉลี่ย	85.9	85.3	85.3	85.5	85.4	85.7	81.6	39.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.7	0.3	0.3	0.1	0.5	0.2	0.2	0.5

**ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา (เปอร์เซ็นต์)**

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)								
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$10^{-3}$
1	35.3	30.4	34.6	34.7	60.4	62.3	66.8	82.1
2	35.4	30.5	33.8	34.7	60.9	62.4	66.7	82.3
3	34.9	30.1	33.9	34.6	60.1	62.6	67.2	81.7
ค่าเฉลี่ย	35.2	30.3	34.1	34.7	60.5	62.4	66.9	82.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.3	0.1	0.4	0.1	0.4	0.2	0.3	0.3



ค่าของแข็งละลาย ที่ 25°C (mg/L)

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)								
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$10^{-3}$
1	551.0	587.0	591.0	603.0	511.0	500.0	535.0	910.0
2	559.0	588.0	588.0	601.0	509.0	498.0	525.0	899.0
3	559.0	583.0	580.0	611.0	505.0	504.0	538.0	915.0
ค่าเฉลี่ย	556.3	586.0	586.3	605.0	508.3	500.7	532.7	908.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.6	2.7	5.7	5.3	3.1	3.1	6.8	8.2

ค่าความเป็นต่าง ของ 2P-M (มก./ล. ในเทอมของหินปูน)

ปริมาณ PACl (โมล อลูมิเนียม/ล.)								
การทดลอง	0	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$10^{-3}$
1	19.4	17.0	16.7	15.5	11.2	10.6	8.3	-35.6
2	20.2	17.1	16.7	15.7	11.1	10.7	8.1	-35.8
3	20.1	17.4	16.9	15.8	11.3	10.4	8.3	-35.9
ค่าเฉลี่ย	19.9	17.2	16.8	15.7	11.2	10.6	8.2	-35.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2



ภาคผนวก ซ :

## ราคาสารเคมี

สารเคมี	ราคา	หน่วย	อ้างอิง
ปูนขาว 65 (% w/w)	8	บาทต่อกิโลกรัม	ผู้ประกอบการ
สารส้ม 50 (% w/w)	3,860	บาทต่อดัน (น้ำและเนื้อ)	การประปานครหลวง
PACL 30 (% w/w)	4,480	บาทต่อดัน (น้ำและเนื้อ)	การประปานครหลวง
กรดกำมะถัน 98 (% w/w)	10	10 บาทต่อกิโลกรัม	ผู้ประกอบการ
กรดไฮโดรคลอริก 35 (% w/w)	9	บาทต่อกิโลกรัม	ผู้ประกอบการ
โซดาไฟ 50 (% w/w)	15	บาทต่อกิโลกรัม	ผู้ประกอบการ



*Future Chem Asia Co., Ltd.*

29/67-68 หมู่ 7 ต.ศรีนครินทร์ อ.เทพารักษ์ อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10270

29/67-68 Moo 7, Srinakarin Road, Tepruk, Muang, Samutprakarn 10270

โทรศัพท์ : 0-2383-5473 โทรสาร : 02-383-5474

## QUOTATION

<b>To:</b> คุณนุ่น	<b>NO.</b>	QF 0875
<b>Company:</b> ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เลขประจำตัวผู้เสียภาษี 0994000158319	<b>Date</b>	6/9/2560
<b>Tel:</b> 087-760-3993	<b>Sales Rep.</b>	ก. สุภา
<b>E-mail:</b> <a href="mailto:noon_0297@hotmail.com">noon_0297@hotmail.com</a>		085-197-1555

We would like to offer chemicals' price as listing below

Item	Product	Packing	Quantity	Price(Baht/Unit)	Amount
1	Lime ปูนขาว	บรรจุ 25 kg./ถุง	1 kg.	8.00	8.00
2	NaOH 50%	บรรจุ 30 kg./ถัง	1 kg.	15.00	15.00
3	กรดกำมะถัน 98%	บรรจุ 35 kg./ถัง	1 kg.	10.00	10.00
4	กรดเกลือ 35%	บรรจุ 25 kg./ถัง	1 kg.	9.00	9.00
5	PAC แบบบ่น้ำ	บรรจุ 25 kg./ถัง	1 kg.	12.00	12.00
6	Alum บ่น้ำ	บรรจุ 25 kg./ถัง	1 kg.	10.00	10.00
					64.00
				VAT 7 %	4.48
				<b>TOTAL</b>	<b>68.48</b>

Lead Time : 3 days

Price Validity : 30 days

Term of Payment : เงินสด / เงินโอน

Remark:

We look forward to receiving the confirmation of your order at the earliest thank you.

Yours faithfully,

Future Chem Asia

คุณสุภา กิจจานุกิจ

Sales Representative

## ภาคผนวก ฅ :

ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซึลิกา ที่ความดันผ่านเมมเบรนต่าง ๆ ของน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันทั้ง 3 ประเภท

น้ำ DI :

ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ 25 °C (ชลบ.ม./ชตร.ม.นาทึ)

การทดลอง	ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)					
	4	5	6	7	10	15
1	0.0069	0.0137	0.0236	0.0362	0.0655	0.1101
2	0.0067	0.0139	0.0236	0.0361	0.0656	0.1102
3	0.0068	0.0135	0.0237	0.0363	0.0648	0.1103
ค่าเฉลี่ย	0.0068	0.0137	0.0236	0.0362	0.0653	0.1102
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0001	0.0001	0.0000	0.0001	0.0002	0.0001

น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี :

ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ 25 °C (ชลบ.ม./ชตร.ม.นาทึ)

การทดลอง	ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)					
	4	5	6	7	10	15
1	0.0022	0.0118	0.0210	0.0310	0.0597	0.1073
2	0.0023	0.0117	0.0211	0.0311	0.0599	0.1065
3	0.0030	0.0122	0.0218	0.0312	0.0588	0.1081
ค่าเฉลี่ย	0.0025	0.0119	0.0213	0.0311	0.0595	0.1073
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0004	0.0003	0.0004	0.0001	0.0006	0.0008

น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี :

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง (เปอร์เซ็นต์)

การทดลอง	ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)					
	4	5	6	7	10	15
1	82.5	82.6	83.2	83.0	83.6	84.3
2	82.6	82.6	83.4	83.4	83.6	84.3
3	82.7	82.9	82.4	82.6	84.2	84.6
ค่าเฉลี่ย	82.6	82.7	83.0	83.0	83.8	84.4
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.1	0.2	0.5	0.4	0.3	0.2

น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี :

ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา (เปอร์เซ็นต์)

การทดลอง	ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)					
	4	5	6	7	10	15
1	22.3	22.6	22.8	22.9	23.3	23.0
2	22.3	22.6	22.8	22.8	23.4	23.1
3	21.6	22.3	23.1	23.0	22.6	22.9
ค่าเฉลี่ย	22.1	22.5	22.9	22.9	23.1	23.0
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.4	0.2	0.2	0.1	0.4	0.1

น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว :

ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ 25 °C (ชลบ.ม./ชตร.ม.นาที)

การทดลอง	ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)					
	4	5	6	7	10	15
1	0.0036	0.0137	0.0226	0.0322	0.0612	0.1081
2	0.0038	0.0138	0.0222	0.0323	0.0612	0.1078
3	0.0037	0.0130	0.0233	0.0318	0.0609	0.1079
ค่าเฉลี่ย	0.0037	0.0135	0.0227	0.0321	0.0611	0.1079
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.0001	0.0004	0.0006	0.0003	0.0002	0.0002

น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว :

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง (เปอร์เซ็นต์)

การทดลอง	ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)					
	4	5	6	7	10	15
1	80.7	80.9	81.2	81.1	82.6	84.3
2	80.7	81.4	81.3	81.2	83.0	84.8
3	81.1	80.7	80.9	81.6	83.1	84.1
ค่าเฉลี่ย	80.8	81.0	81.1	81.3	82.9	84.4
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.2	0.4	0.2	0.3	0.3	0.4

น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว :

ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา (เปอร์เซ็นต์)

การทดลอง	ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)					
	4	5	6	7	10	15
1	21.7	22.4	22.3	22.9	22.6	22.5
2	22.2	22.3	22.2	22.4	22.9	22.7
3	21.7	22.0	22.6	22.3	22.6	23.4
ค่าเฉลี่ย	21.9	22.2	22.4	22.5	22.7	22.9
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.5

น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl :

ค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ 25 °C (ลบ.ม./ชตร.ม.นาท)

การทดลอง	ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)					
	4	5	6	7	10	15
1	0.0055	0.0145	0.0244	0.0338	0.0625	0.1103
2	0.0052	0.0144	0.0246	0.0340	0.0621	0.1106
3	0.0058	0.0146	0.0247	0.0336	0.0629	0.1094
ค่าเฉลี่ย	0.0055	0.0145	0.0246	0.0338	0.0625	0.1101
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.0003	0.001	0.0002	0.0002	0.0004	0.0006

น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACL :

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง (เปอร์เซ็นต์)

การทดลอง	ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)					
	4	5	6	7	10	15
1	80.4	81.2	81.3	81.2	82.7	84.2
2	80.9	80.6	81.5	81.5	82.6	84.2
3	81.2	81.4	80.7	81.2	83.1	84.9
ค่าเฉลี่ย	80.8	81.1	81.2	81.3	82.8	84.4
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.4	0.4	0.4	0.2	0.3	0.4

น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACL :

ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา (เปอร์เซ็นต์)

การทดลอง	ความดันผ่านเมมเบรน (บาร์)					
	4	5	6	7	10	15
1	21.6	22.1	22.6	22.5	22.1	22.7
2	22.4	22.5	22.4	22.6	22.5	22.5
3	21.7	21.6	21.6	21.9	21.9	21.8
ค่าเฉลี่ย	21.9	22.1	22.2	22.3	22.2	22.3
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.4	0.5	0.5	0.4	0.3	0.5

ภาคผนวก ญ :

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา และประสิทธิภาพการกำจัด TDS ค่า  $J/J_0$  ค่า  $J/J_0$  (กรณี  $R_f=0$ ) ที่อัตราการนำน้ำกลับคืนต่าง ๆ ของน้ำเข้ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันทั้ง 3 ประเภท

น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ซิลิกา และ TDS

พารามิเตอร์	หน่วย	อัตราการนำน้ำกลับคืน (เปอร์เซ็นต์)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
ความกระด้าง	เปอร์เซ็นต์	82.8	83.2	81.4	80.0	75.8	69.9	59.0	53.2	49.4
ซิลิกา	เปอร์เซ็นต์	22.9	23.0	22.5	22.7	22.6	22.5	20.1	19.1	17.7
TDS	เปอร์เซ็นต์	71.6	71.9	71.7	70.0	65.3	60.0	52.2	48.2	46.6



น้ำบาดาลลักษณะที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี

ค่า  $J/J_0$  และ  $J/J_0$  (กรณี  $R_f=0$ )

พารามิเตอร์	หน่วย	อัตราการนำน้ำกลับคืน (เปอร์เซ็นต์)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
TDS <sub>Feed</sub>	มก./ล.	662	698	748	808	878	934	950	980	1015
TDS <sub>con</sub>	มก./ล.	681	714	756	831	876	941	970	1022	1135
P <sub>osm</sub>	บาร์	0.47	0.49	0.53	0.57	0.61	0.66	0.67	0.70	0.75
R <sub>m</sub>	ม. <sup>-1</sup>	2.35E+12	2.35E+12	2.35E+12	2.35E+12	2.35E+12	2.35E+12	2.35E+12	2.35E+12	2.35E+12
R <sub>m</sub> +R <sub>f</sub>	ม. <sup>-1</sup>	2.35E+12	2.55E+12	2.80E+12	3.55E+12	4.45E+12	1.54E+13	1.96E+13	2.18E+13	2.24E+13
J	LMH	1116.00	1024.78	928.77	727.38	576.74	166.18	130.16	116.20	112.40
J <sub>0</sub>	LMH	1196.33	1196.33	1196.33	1196.33	1196.33	1196.33	1196.33	1196.33	1196.33
J/J <sub>0</sub>	-	0.93	0.86	0.78	0.61	0.48	0.14	0.11	0.10	0.09
J/J <sub>0</sub> (R <sub>f</sub> =0)	-	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90	0.89

น้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปุ๋ยขาว

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง จีลีกา และ TDS

พารามิเตอร์	หน่วย	อัตราการนำกลับคืน (เปอร์เซ็นต์)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
ความกระด้าง	เปอร์เซ็นต์	81.8	78.8	80.0	78.4	76.9	76.2	74.5	73.1	71.2
จีลีกา	เปอร์เซ็นต์	22.5	22.4	22.2	22.0	22.1	22.0	21.9	21.6	19.4
TDS	เปอร์เซ็นต์	61.1	61.2	60.8	61.6	59.2	59.0	58.2	58.8	58.2





น้ำบาดาลสังเคราะห์ผ่านการเติมปุ๋ยร่วมกับ PACI

ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง ซิลิกา และ TDS

พารามิเตอร์	หน่วย	อัตราการนำน้ำกลับคืน (เปอร์เซ็นต์)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
ความกระด้าง	เปอร์เซ็นต์	81.7	81.8	80.0	80.6	79.5	80.5	79.1	76.6	74.5
ซิลิกา	เปอร์เซ็นต์	22.3	22.1	22.4	22.1	22.7	22.4	22.8	22.0	22.6
TDS	เปอร์เซ็นต์	59.8	60.2	59.6	59.8	59.7	58.6	58.8	58.4	57.9



หน้าบาทคลังกระดาษที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับPACl

ค่า  $J/J_0$  และ  $J/J_0$  (กรณี  $R_f=0$ )

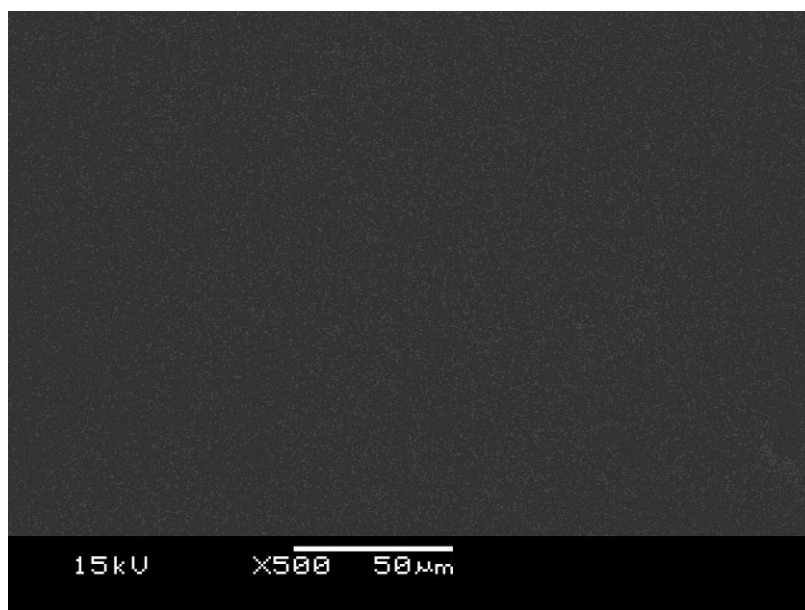
พารามิเตอร์	หน่วย	อัตราการนำน้ำกลับคืน (เปอร์เซ็นต์)										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80		
$TDS_{Feed}$	มก./ล.	500	508	515	532	571	607	650	704	803		
$TDS_{Con}$	มก./ล.	520	528	567	613	667	742	830	951	1086		
$P_{osm}$	บาร์	0.36	0.36	0.38	0.40	0.43	0.47	0.52	0.58	0.66		
$R_m$	ม. <sup>-1</sup>	2.16E+12	2.16E+12	2.16E+12	2.16E+12	2.16E+12	2.16E+12	2.16E+12	2.16E+12	2.16E+12		
$R_m+R_f$	ม. <sup>-1</sup>	2.20E+12	2.21E+12	2.21E+12	2.21E+12	2.21E+12	2.22E+12	2.22E+12	2.22E+12	2.23E+12		
$J$	LMH	1216.80	1210.26	1206.23	1200.58	1193.31	1184.91	1174.47	1161.80	1143.90		
$J_0$	LMH	1304.61	1304.61	1304.61	1304.61	1304.61	1304.61	1304.61	1304.61	1304.61		
$J/J_0$	-	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	0.90	0.89	0.88		
$J/J_0$ ( $R_f=0$ )	-	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92	0.91		

ภาคผนวก ก :

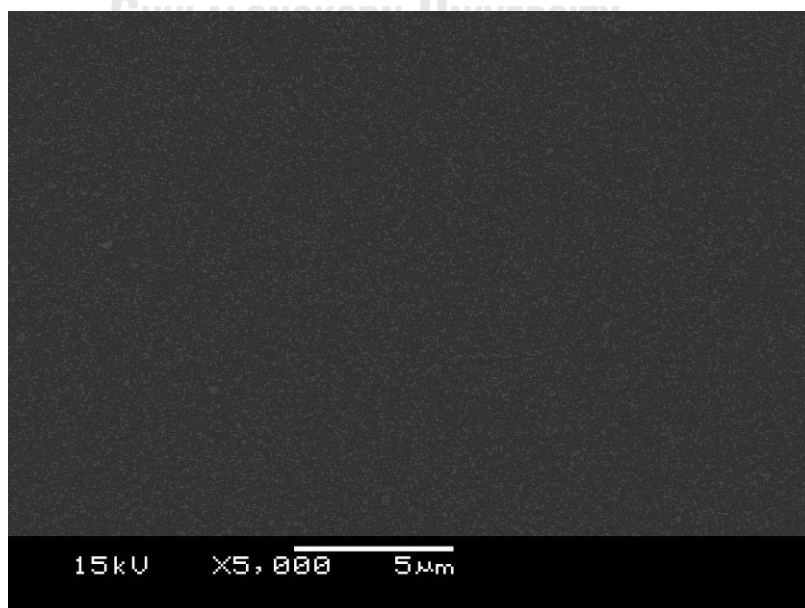
SEM-EDX ผิวหน้าของแผ่นนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่ไม่ผ่านการใช้งานและที่ผ่านการ  
ใช้งานกับน้ำบาดาลสังเคราะห์ทั้ง 3 ประเภท

SEM : เมมเบรนสะอาด

กำลังขยาย 500 เท่า



กำลังขยาย 5,000 เท่า



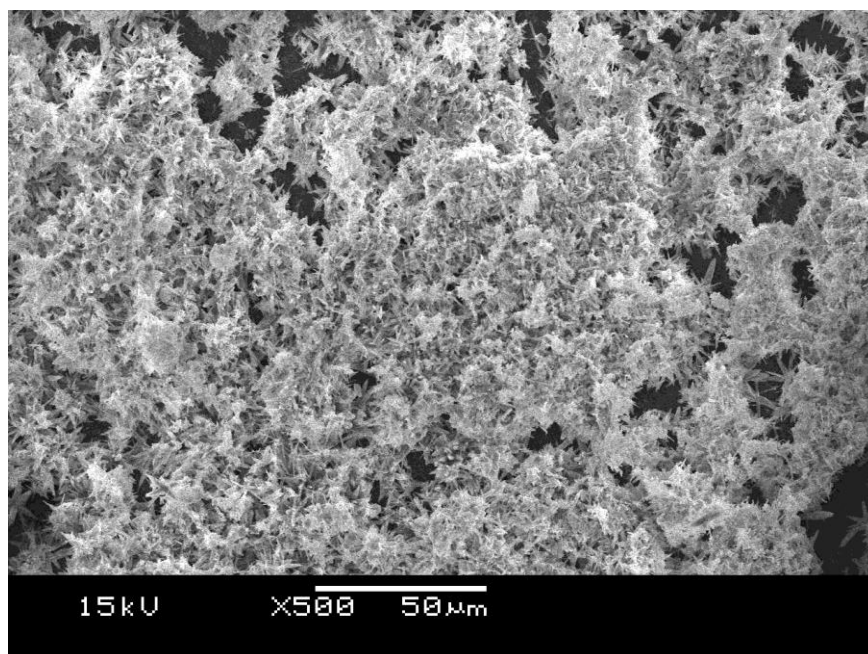
**EDX : เมมเบรนสะอาด**

การทดลอง	% อะตอม		
	% C	% O	% S
1	76.46	19.19	4.35
2	79.28	17.33	3.39
3	74.71	21.29	4.00
ค่าเฉลี่ย	76.8	19.3	3.9
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.3	2.0	0.5

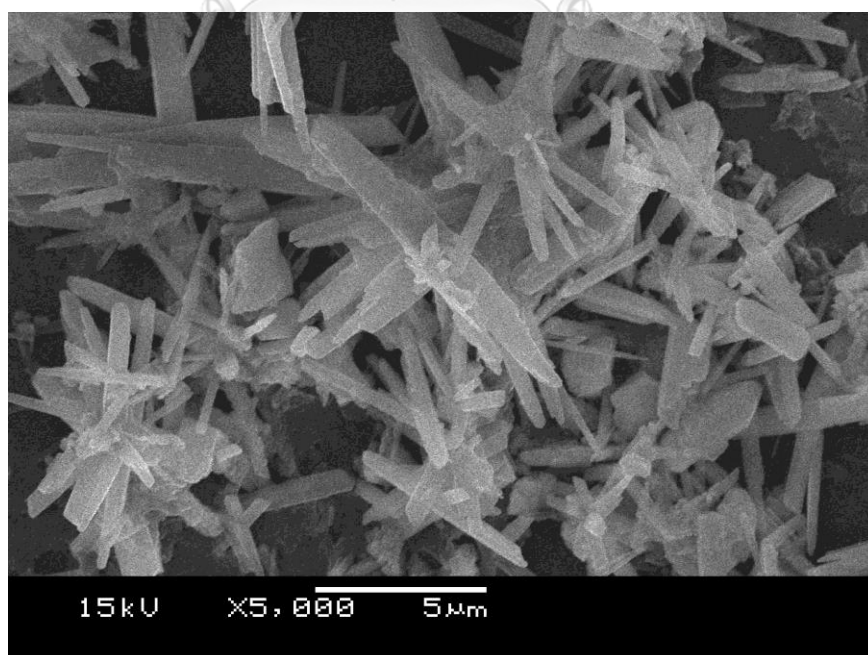


SEM : เมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี

กำลังขยาย 500 เท่า



กำลังขยาย 5,000 เท่า



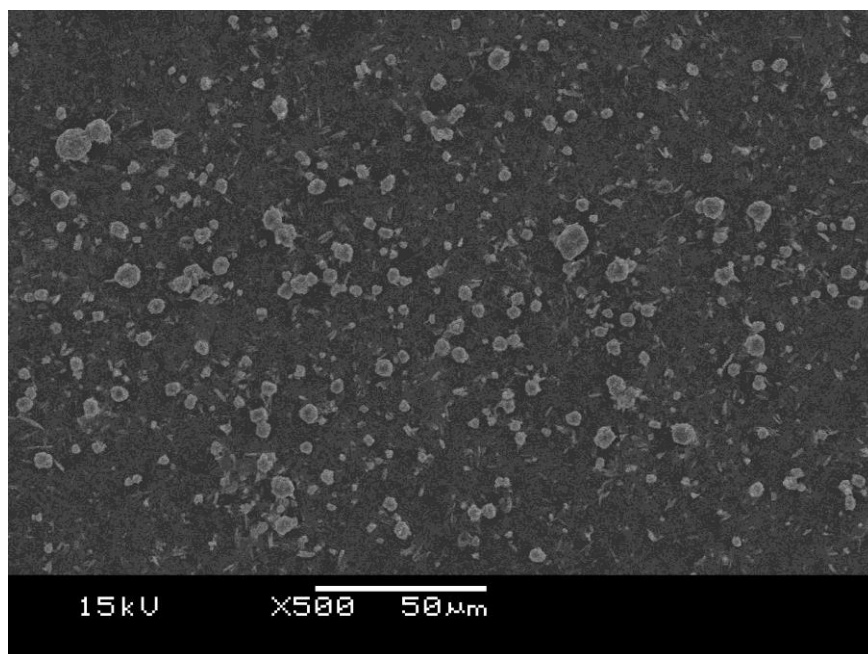


**EDX : เมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี**

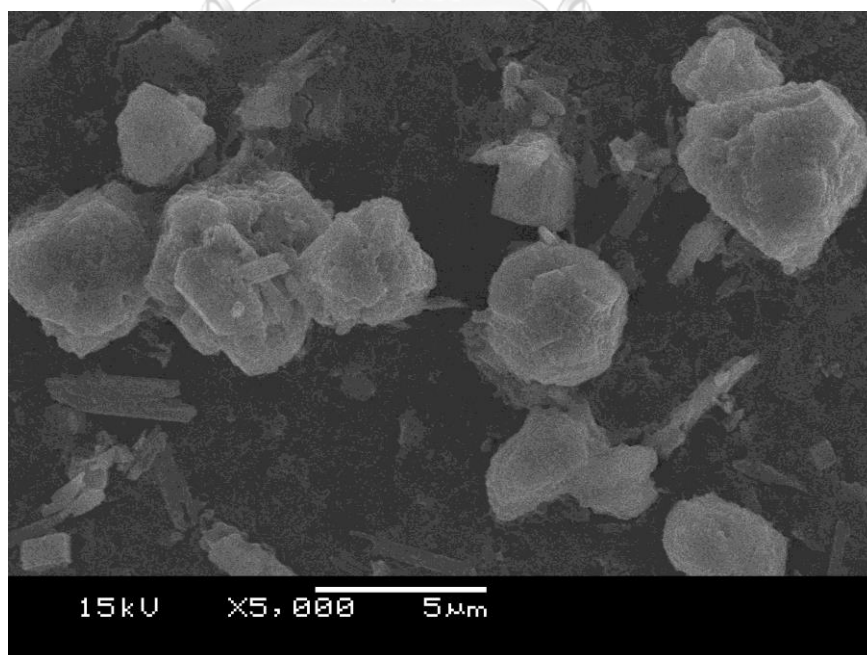
การทดลอง	% อะตอม						
	% C	% O	% S	% Ca	% Mg	% Si	% Cl
1	18.19	65.26	0.33	15.51	0.22	0.46	0.04
2	21.03	61.82	0.08	16.42	0.27	0.35	0.02
3	23.40	61.50	-	13.71	0.46	0.90	0.02
ค่าเฉลี่ย	20.9	62.9	0.2	15.2	0.3	0.6	<0.1
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	2.6	2.1	0.2	1.4	0.1	0.3	0.0

SEM : เมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว

กำลังขยาย 500 เท่า



กำลังขยาย 5,000 เท่า

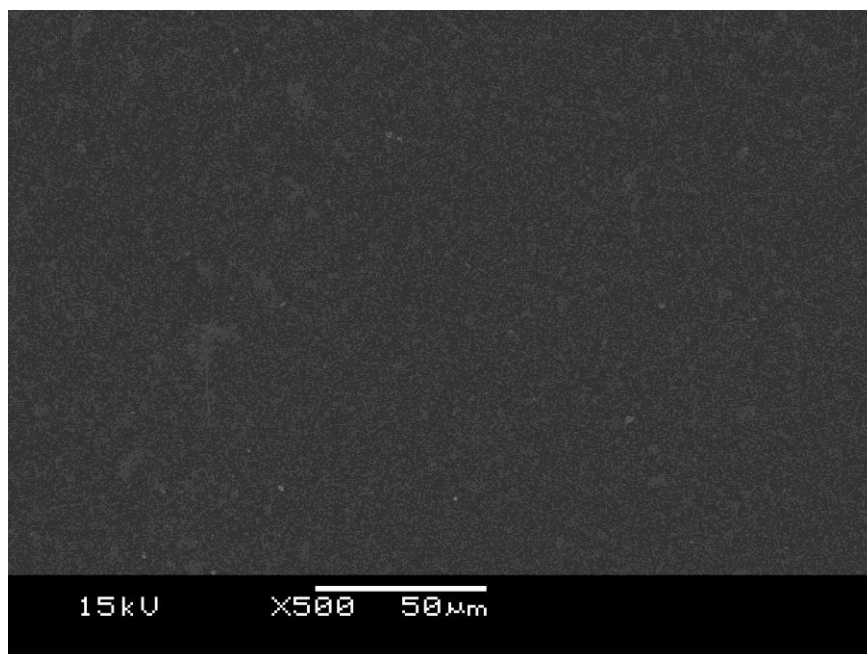


**EDX : เมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาว**

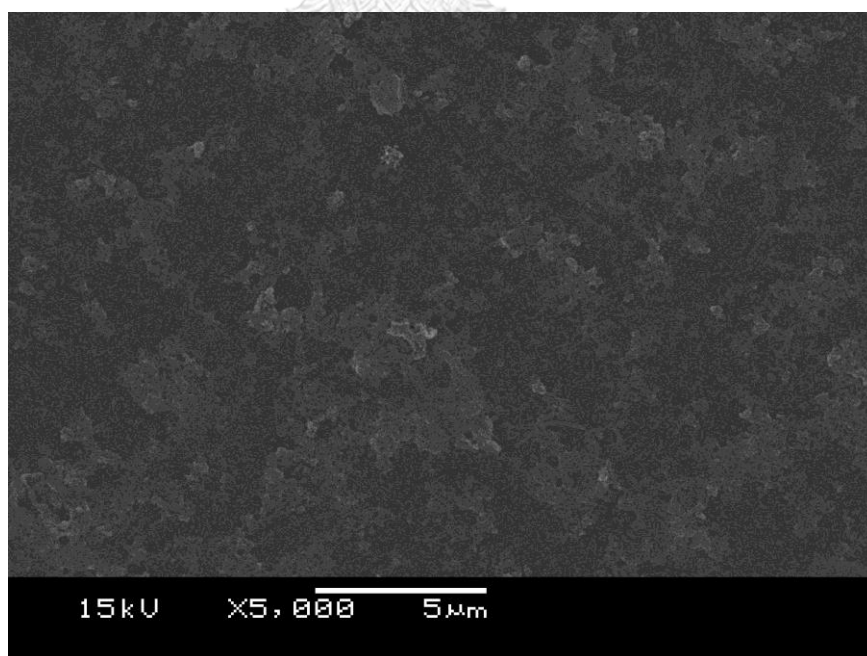
การทดลอง	% อะตอม						
	% C	% O	% S	% Ca	% Mg	% Si	% Cl
1	63.46	32.03	3.13	0.97	0.08	0.06	0.28
2	54.53	38.35	2.96	3.12	0.29	0.66	0.09
3	60.89	33.49	2.79	2.42	-	0.17	0.23
ค่าเฉลี่ย	59.6	34.6	3.0	2.2	0.2	0.3	0.2
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	4.6	3.3	0.2	1.1	0.1	0.3	0.1

SEM : เมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl

กำลังขยาย 500 เท่า



กำลังขยาย 5,000 เท่า



**EDX : เมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลสังเคราะห์ที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl**

การทดลอง	% อะตอม							
	% C	% O	% S	% Ca	% Mg	% Si	% Cl	% Al
1	72.29	23.85	3.32	0.11	-	0.04	0.11	-
2	77.81	17.73	3.38	0.10	0.18	0.34	0.27	0.18
3	77.96	18.10	3.44	0.06	0.10	-	0.22	0.12
ค่าเฉลี่ย	76.0	19.9	3.4	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	3.2	3.4	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0

ภาคผนวก ก :

มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขต  
ประกอบการ

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 ในน้ำทิ้งที่จะระบายได้ต้องมีค่าเกินกว่าค่า TDS ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำนั้นไม่เกิน 5,000 มก./ล.
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids)	มก./ล.	<50
บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand)	มก./ล.	<20
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	มก./ล.	<120
ซัลไฟต์	มก./ล.	<1
ไฮยาไนต์	มก./ล.	<0.2
น้ำมันและไขมัน	มก./ล.	<5
ฟอร์มาลดีไฮด์	มก./ล.	<1
สารประกอบฟีนอล	มก./ล.	<1
คลอรีนอิสระ	มก./ล.	<1

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
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
- ทองแดง	มก./ล.	<2.0
- พรอท	มก./ล.	<0.005
- แคดเมียม	มก./ล.	<0.03
- แบเรียม	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 ร :**  
**มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำ**  
**ชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน**

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	6.5-8.5
ความนำไฟฟ้า	ไมโครโมล/ซม.	2,000
ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS)	มก./ล.	1,300
บีโอดี (BOD <sub>5</sub> )	มก./ล.	20
สารแขวนลอย (SS)	มก./ล.	30
ซัลไฟด์ คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	มก./ล.	1.0
ไซยาไนด์คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (cyanide as HCN)	มก./ล.	0.2
น้ำมันและไขมัน (Fat ,Oil and Grease)	มก./ล.	5.0
ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde)	มก./ล.	1.0
ฟีนอล และ/หรือ ครีโซลส (Phenol& Cresols)	มก./ล.	1.0
คลอรีนอิสระ (Free chlorine)	มก./ล.	1.0
ยาฆ่าแมลงและสารกำจัดวัชพืช	มก./ล.	ไม่มีเลย
สี และกลิ่นที่ระบายลงสู่ทางน้ำชลประทาน (Colour and Odor)	-	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
น้ำมันทาร์ (Tar)	-	ไม่มีเลย



ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
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
- 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
- นิกเกิล	มก./ล.	0.2
- แมงกานีส	มก./ล.	5.0

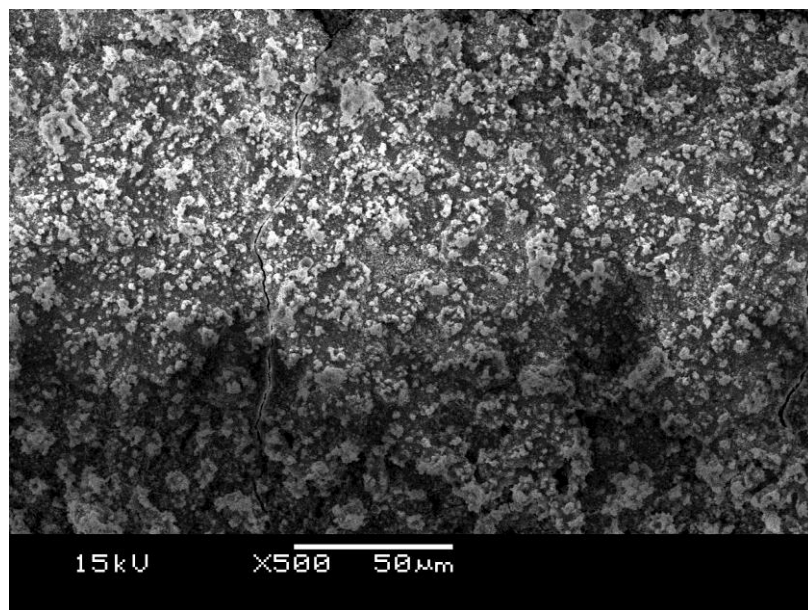
ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ

ภาคผนวก ฅ :

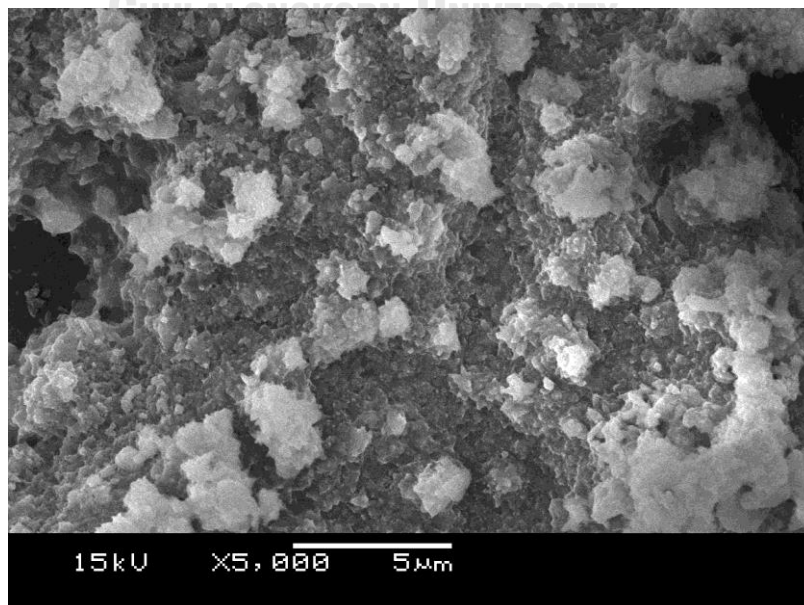
SEM-EDX ผิวหน้าของแผ่นนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานกับน้ำบาดาลจริง  
ที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี และผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl

SEM : เมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี

กำลังขยาย 500 เท่า



กำลังขยาย 5,000 เท่า

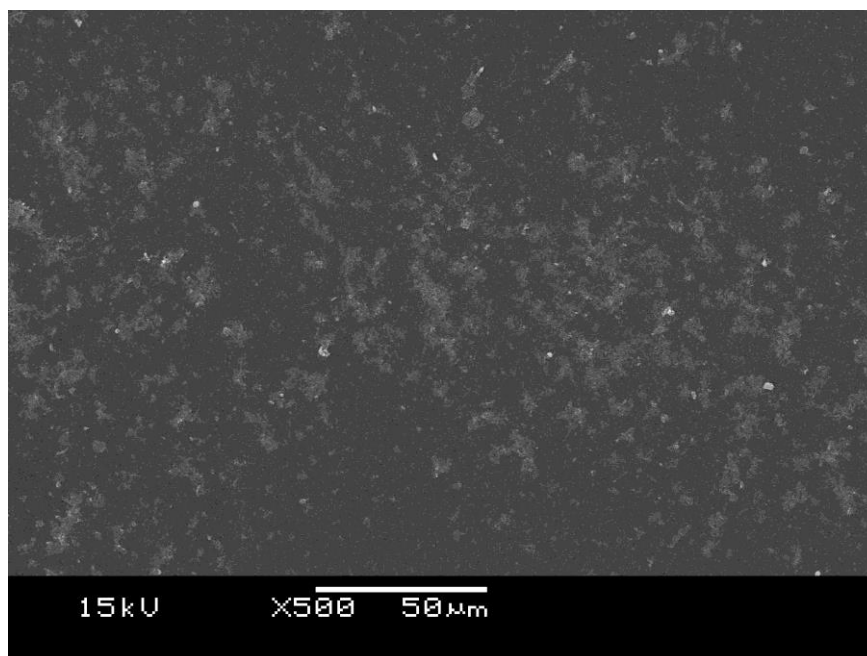


**EDX : เมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลจริงที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี**

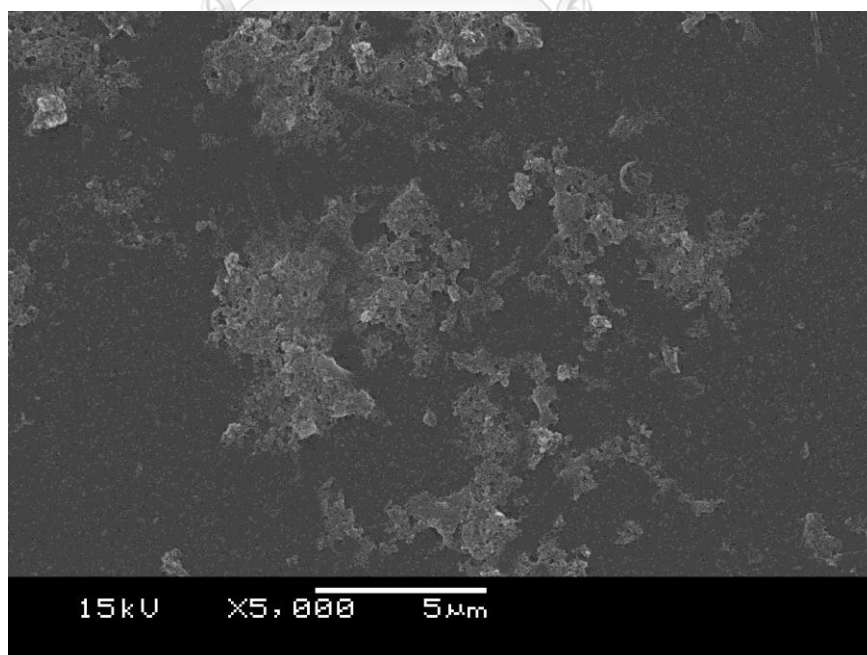
การทดลอง	% อะตอม								
	% C	% O	% S	% Ca	% Mg	% Si	% Cl	% Al	% Fe
1	23.69	60.58	0.32	14.86	0.32	0.05	0.13	-	0.05
2	20.31	63.37	-	15.7	0.4	0.07	0.04	0.11	-
3	18.81	64.33	-	16.21	0.37	0.06	0.13	-	0.07
ค่าเฉลี่ย	20.9	62.8	0.3	15.6	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	2.5	2.0	*	0.7	0.0	0.0	0.1	*	0.0

SEM : เมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลจริงที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl

กำลังขยาย 500 เท่า



กำลังขยาย 5,000 เท่า



**EDX : เมมเบรนที่ใช้กับน้ำบาดาลจริงที่ผ่านการเติมปูนขาวร่วมกับ PACl**

การทดลอง	% อะตอม								
	% C	% O	% S	% Ca	% Mg	% Si	% Cl	% Al	% Fe
1	65.02	30.04	3.62	0.07	0.02	0.14	0.13	0.9	0.06
2	58.73	35.45	3.84	0.09	0.08	0.23	0.22	1.28	0.08
3	57.05	37.06	3.59	-	0.21	0.41	0.13	1.46	0.11
ค่าเฉลี่ย	60.3	34.2	3.7	0.1	0.1	0.3	0.2	1.2	0.1
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	4.2	3.7	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.0

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุพัตรา ศรีสันต์ เกิดเมื่อวันที่ 12 พฤษภาคม 2535 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2557 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์นี้ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 9 จัดขึ้นที่ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เมื่อวันที่ 20 มีนาคม 2561 ในหัวข้อ การพัฒนากระบวนการผสม (กระบวนการเคมีและนาโนฟิลเตรชัน) สำหรับการกำจัดความกระด้างในน้ำบาดาล

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์นี้ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 17 จัดขึ้นที่ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เมื่อวันที่ 24-25 พฤษภาคม 2561 ในหัวข้อ การพัฒนากระบวนการร่วมทางกายภาพ-เคมี สำหรับการกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำบาดาล