



การพัฒนากระบวนการร่วมทางกายภาพ-เคมีสำหรับการกำจัด ความกระด้างและซิลิกาในน้ำบาดาล

Development of Combined Physico-Chemical Processes to Remove Hardness and Silica from Groundwater

Supattra Srisan* Nattawin Chawaloesphonsiya*** and Pisut Painmanakul***

สุพัตรา ศรีสันต์* ณฐวิญญ์ ชวเลศพรคิยา*** และ พิสุทธิ์ เพียรมนกุล***

*ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

**โปรแกรมวิจัย Control of hazardous contaminants in raw water resources for water scarcity resilience

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการและของเสียอันตราย (ศสอ.) กรุงเทพฯ 10330

E-mail : pisut.p@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง (Hardness) และซิลิกา (Silica) ในน้ำบาดาล (Groundwater) ด้วยกระบวนการผสมผสานระหว่างกระบวนการทางเคมีและนาโนฟิลเตรชัน (Chemical Treatment Process - Nanofiltration) ของระบบผลิตน้ำทดแทน (Makeup water) สำหรับระบบหล่อเย็น (Cooling System) เนื่องจากความกระด้างและซิลิกาในน้ำก่อให้เกิดปัญหาตะกอนในระบบดังกล่าว ทั้งนี้จะใช้กระบวนการทางเคมี โคแอกกูเลชัน/ฟลอคคูเลชัน (Coagulation/Flocculation) เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment process) เพื่อลดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน (Nanofiltration, NF) เนื่องจากการอุดตันของเมมเบรนส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการทำมาสะอาดเมมเบรน และส่งผลให้อายุการใช้งานของเมมเบรนสั้นลง คุณภาพน้ำที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจะถูกนำมาพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา และจำนวนรอบการใช้น้ำ (Concentration cycle, CC) ซึ่งจำนวนรอบการใช้น้ำจะส่งผลต่อปริมาณน้ำทดแทนทั้งหมดที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิตน้ำทดแทน ผลการศึกษาพบว่า ในกระบวนการทางเคมี ที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และโพลีลูมินัมคลอไรด์ (PACl) 1.2×10^{-4} โมลลูมินัม/ล. และนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่มีความดันในการผ่านเมมเบรน (TMP) 7 บาร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างทั้งหมดและปริมาณซิลิกา 96.5 และ 67.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่งผลให้รอบการใช้น้ำของน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นจาก 0 รอบเป็น 4 รอบ กล่าวคือกระบวนการดังกล่าวสามารถบำบัดน้ำบาดาลที่ไม่สามารถใช้เป็นน้ำทดแทน เนื่องจากมีคุณภาพน้ำต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับระบบหล่อเย็น ของ Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRA GL02-1994) โดยน้ำหลังผ่านการบำบัดมีคุณภาพน้ำดีขึ้นสามารถใช้เป็นน้ำทดแทนและสามารถเวียนน้ำอยู่ในระบบหล่อเย็นจนกระทั่งน้ำหล่อเย็น มีความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น 4 เท่า ซึ่งช่วยลดปริมาณน้ำทดแทนที่จะเข้าระบบหล่อเย็นได้กว่า 56 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้กระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาวและ PACl ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นยังช่วยลดการเกิดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนได้

คำสำคัญ : น้ำบาดาล; ความกระด้าง; ซิลิกา; กระบวนการทางเคมี; นาโนฟิลเตรชัน

Abstract

The purpose of this research is to study the efficiency in removing hardness and silica in ground water using chemical treatment process - Nanofiltration of the makeup water system in cooling system. Because hardness and silica are primarily responsible for most scaling in pipe and cooling system. The primary process for this treatment is chemical treatment process called “coagulation/flocculation” to reduce membrane fouling of the Nanofiltration membrane. This is because membrane fouling led to membrane cleaning cost and lessens membrane lifespan. On this note, Quality of treated water will be considered efficient to reduce hardness and silica and the concentration cycle (CC). The concentration cycle will affect overall makeup water requirement in the water makeup process. The study the hybrid process revealed that the chemical process with calcium hydroxide 360 mg/L and PACl 1.2×10^{-4} mol AL/L and Nanofiltration process is operated at trans-membrane pressure 7 bar has the ability to remove overall hardness and most effective in removing Silica, having the ability to remove overall hardness and silica 96.5% and 67.0% respectively. This increase the number of reusability cycle of underground water from 0 to 4 cycle, meaning that the said treatment process can be used to treat water that was previously not usable to become usable alternative by the standard of the Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRA GL02-1994). The processed water was greatly improved and become usable as an alternative and can be cycled within the cooling system until the concentration amount of soluble cooling water reaches 4 times the amount. This helps reduce the requirement of makeup water for more than 56%. Furthermore, the chemical treatment process with calcium hydroxide and PACl helps reduce membrane fouling

Keywords : Ground water; Hardness; Silica; Chemical Process; Nanofiltration

บทนำ

น้ำบาดาลถูกใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคบริโภค การเกษตร และอุตสาหกรรม การนำน้ำบาดาลมาใช้ในการเกษตร อุตสาหกรรม ปัญหาหนึ่งที่มีพบในการนำน้ำบาดาลมาใช้เป็นน้ำทดแทนสำหรับหอหล่อเย็น คือ ความกระด้างของน้ำซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดตะกอนในระบบท่อและในระบบหอหล่อเย็น ตะกอนที่เกิดขึ้นจะเป็นฉนวนขัดขวางการถ่ายเทความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลดลงและสิ้นเปลืองพลังงาน ทั้งนี้ ตะกอนที่พบในระบบมักเป็นสารประกอบของแคลเซียมและแมกนีเซียมจากความกระด้างของน้ำ ระบบกำจัดความกระด้างในปัจจุบันที่นิยมใช้ ได้แก่ กระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว (Lime softening) วิธีการนี้มีราคาถูกและง่ายต่อการดำเนินการ แต่มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถกำจัดความกระด้างออกได้หมด เนื่องจากตะกอนของ CaCO_3 และ Mg(OH)_2 มีความสามารถในการละลายน้ำได้ตาม

ธรรมชาติ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) สามารถกำจัดความกระด้างได้เช่นกัน โดยมีความกระด้างตกค้างในน้ำน้อยกว่ากระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว แต่ก่อให้เกิดของเสียจากการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) การล้างย้อน (Backwash) และการชะล้างสารเคมี (Rinse) ซึ่งมีปริมาณมากและไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ อีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการกำจัดความกระด้าง คือ กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO) โดยการใช้แรงดันให้น้ำผ่านเยื่อเมมเบรนที่มีความสามารถในการกรองไอออนและโมเลกุลของสารละลายที่อยู่ในน้ำได้ แต่มีข้อเสีย คือ เกิดการอุดตันของเมมเบรน (Fouling) บ่อยครั้ง มีอัตราการนำน้ำกลับคืน (%Recovery) ต่ำ และสิ้นเปลืองพลังงานเพราะต้องใช้แรงดันในการเดินระบบที่สูงมากเมื่อเทียบกับเมมเบรนชนิดอื่น

อย่างไรก็ตาม กระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง (Ca^{2+} และ Mg^{2+})

ออกจากน้ำได้เกือบเท่ากระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส โดยใช้ความดันในการเดินระบบที่ต่ำกว่า (ความดันเดินระบบของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันและรีเวอร์สออสโมซิส เท่ากับ 5-20 และ 50-100 บาร์ ตามลำดับ) โดยประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างขึ้นอยู่กับชนิดของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน ลักษณะสมบัติของน้ำ และสภาวะการเดินระบบ [1, 2] อย่างไรก็ตามเพื่อลดภาระการกรองของนาโนฟิลเตรชันผู้วิจัยจะเลือกใช้กระบวนการทางเคมีโคแอกกูเลชัน/ฟลอคคูเลชัน เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถกำจัดได้ทั้งความกระด้างและซิลิกาในน้ำ โดยการเติมปูนขาว (Lime softening) [3] การเติมโพลีออลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) [4] และการเติมอลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) [5] ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาปัญหาของการใช้กระบวนการทางเคมีในการกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำ ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยกระบวนการทางเคมี คอลลอยด์ที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการบำบัดทางเคมี ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ไม่เหมาะสมกับลักษณะสมบัติของน้ำ ซึ่งชนิดและปริมาณของสารเคมีที่เติมส่งผลโดยตรงกับค่าพีเอชของน้ำ เนื่องจากกลไกการตกผลึกของ $CaCO_3$, $Mg(OH)_2$ และ $Al(OH)_3$ เกี่ยวข้องกับค่าพีเอชของน้ำทั้งสิ้น ดังนั้นการศึกษาระบบการทางเคมีที่สามารถกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำบาดาลในสภาวะที่เหมาะสมกับลักษณะสมบัติของน้ำจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเสนอกระบวนการบำบัดแบบผสมผสาน (Combined/Hybrid process) ระหว่างกระบวนการบำบัดทางเคมีและกระบวนการนาโนฟิลเตรชันในการกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำซึ่งเป็นสาเหตุของการอุดตันของเมมเบรน (Fouling) และตะกรันในระบบหอหล่อเย็น เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของกระบวนการผลิตน้ำอุตสาหกรรมจากน้ำบาดาลสำหรับเป็นน้ำทดแทนในหอหล่อเย็น

นอกจากนี้จำนวนรอบการใช้น้ำจะถูกนำมาพิจารณาด้วยในการพิจารณากระบวนการบำบัดที่เหมาะสมและปริมาณน้ำทดแทนที่ต้องใช้ โดยจำนวนรอบการใช้น้ำคือจำนวนเท่าของความเข้มข้นของสารละลายใน

น้ำหล่อเย็นเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายในน้ำทดแทน น้ำทดแทนที่มีจำนวนรอบการใช้น้ำสูง หมายถึงมีความเข้มข้นของสารละลายในน้ำต่ำ น้ำจึงเวียนใช้ในระบบได้นานขึ้น ลดการระบายน้ำทิ้งออกส่งผลให้ลดปริมาณน้ำทดแทนที่จะเติมเข้าในระบบหล่อเย็นได้

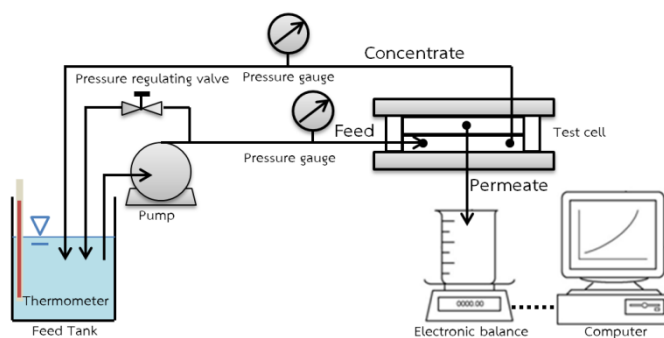
อุปกรณ์และวิธีการ

พารามิเตอร์ในน้ำที่สนใจ ได้แก่ ความกระด้างทั้งหมด ปริมาณซิลิกา พีเอช ค่าความเป็นด่าง ปริมาณไบคาร์บอเนต และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด โดยใช้วิธีมาตรฐานจากคู่มือ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

การทดลองที่ 1 ศึกษากระบวนการทางเคมีในการกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยจาร์เทส (Jar test) : สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ 1) ปูนขาว 2) สารส้ม 3) PACl 4) ปูนขาวและสารส้ม และ 5) ปูนขาวและ PACl ซึ่งขั้นตอนการทดลองประกอบไปด้วย การกวนเร็ว-กวนช้า-ตกตะกอน-การกรองด้วยกระดาษที่มีขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน

การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซิลิกาของน้ำบาดาลด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันของน้ำที่ผ่าน/ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี : โดยพิจารณาคุณภาพน้ำหลังการกรองจากผลกระทบบของความดันผ่านเมมเบรน (Transmembrane Membrane, TMP) ต่อฟลักซ์ของน้ำสะอาด (Permeate Flux) และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา (%Reject) สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ได้แก่ Crossflow cell รุ่น CF042D ของบริษัท Sterlitech Corporation โดยใช้เมมเบรนแบบแผ่นรุ่น DK ของบริษัท GE water and process technologies จำกัด แสดงดังรูปที่ 1

การทดลองที่ 3 เปรียบเทียบการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนในระบบกำจัดความกระด้างและซิลิกาของน้ำบาดาล ระหว่างน้ำที่ผ่าน/ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี



รูปที่ 1 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

ผลการทดลองและวิจารณ์

การทดลองที่ 1 : ศึกษากระบวนการทางเคมีในการกำจัดความกระด้างและซิลิกาด้วยจาร์เทส (Jar test)

ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลของโรงงานผลิตเอทานอลและจำนวนรอบการใช้น้ำ แสดงดังตารางที่ 1 โดยพบว่าน้ำบาดาลจากโรงงานไม่สามารถใช้น้ำดังกล่าวเป็นน้ำทดแทนได้ โดยมีความกระด้างทั้งหมดเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมจำนวนรอบการใช้น้ำเนื่องจากมีจำนวนรอบการใช้น้ำต่ำกว่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ดังนั้น หากสามารถกำจัดความกระด้างทั้งหมดจะสามารถเพิ่มจำนวนรอบการใช้น้ำได้ อย่างไรก็ตาม แคลเซียมและซิลิกาจะกลายเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมจำนวนรอบการใช้น้ำ

แทนความกระด้างทั้งหมด จึงต้องกำจัดทั้งความกระด้างทั้งหมด แคลเซียม และซิลิกา ในน้ำบาดาลดังกล่าวจึงจะสามารถเพิ่มจำนวนรอบการใช้น้ำได้ และจากการทดลองการเติมสารเคมีแต่ละชนิดที่ปริมาณต่างๆ สามารถกำจัดความกระด้างและซิลิกาในน้ำได้ ส่งผลให้รอบการใช้น้ำของน้ำหลังผ่านกระบวนการทางเคมีมีการเปลี่ยนแปลงสำหรับค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีต่อการบำบัดน้ำ 1 ม³ ที่ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาที่ดีที่สุดของการเติมปูนขาว สารส้ม PACl ปูนขาว-สารส้ม และปูนขาว-PACl มีค่าเท่ากับ 4.21, 2.57, 0.07, 4.47 และ 4.29 บาท/ม³ ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในแต่ละกระบวนการ

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา				
	ปูนขาว	สารส้ม	PACl	ปูนขาว-สารส้ม	ปูนขาว-PACl
- ความกระด้างทั้งหมด	79.9±1.7	-0.4±1.8	-0.4±0.8	80.6±0.6	80.2±0.4
- แคลเซียม	81.5±1.0	-0.3±0.4	-0.4±1.1	80.5±0.6	81.5±0.3
- ซิลิกา	35.2±0.3	16.7±0.5	24.7±0.6	35.8±0.2	66.9±0.3
ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (กรัม/น้ำบาดาล 1 ม ³)	ที่ปริมาณปูนขาว 350-360 มก./ล.	สารส้ม 10 ³ โมล/ล.	PACl 10 ⁻⁴ โมล/ล.	ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และสารส้ม 10 ⁻⁴ โมล/ล.	ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และ PACl 1 × 10 ⁻⁴ - 1.2 × 10 ⁻⁴ โมล/ล.
ราคาสารเคมี (บาท/น้ำบาดาล 1 ม ³)	4.21	2.57	0.07	4.47	4.29

หมายเหตุ : (1) เก็บตัวอย่างน้ำเมื่อ วันที่ 18-22 ธันวาคม 2558

กระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาว (Lime-softening) : จากการทดลองพบว่า ที่ปริมาณปูนขาว 350-360 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาเท่ากับ 79.9 ± 1.7 และ 35.2 ± 0.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีความกระด้างเหลือในน้ำประมาณ 50-60 มก./ล. ในเทอมของหินปูน ตามความสามารถในการละลายน้ำของ CaCO_3 และ Mg(OH)_2 สภาวะที่มีการเติมปูนขาวปริมาณดังกล่าวส่งผลให้ค่าพีเอชหลังปฏิกิริยามีค่าประมาณ 10.6-11.0 ซึ่ง Mg(OH)_2 ละลายได้น้อยในช่วงพีเอชดังกล่าว ทั้งนี้ ซิลิกาสามารถเกาะติด (Adsorption) บนตะกอน CaCO_3 และ Mg(OH)_2 ได้ นอกจากนี้ ที่พีเอชน้ำมากกว่า 6.5 โมเลกุลซิลิกาจะแตกตัวเป็นอไอออน (Ionization) เกิดเป็นซิลิกาอไอออน (H_2SiO_4^-) โดยอไอออนนี้จะมีมากที่พีเอชประมาณ 8.0-9.5 หรือมากกว่าซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและแมกนีเซียมเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและแมกนีเซียมซิลิเกต จึงสามารถตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ ทำให้กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกา [6] อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวมากกว่า 360 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาจะเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างจะลดลง เนื่องจากปริมาณไบคาร์บอเนตที่มีอยู่ในน้ำไม่เพียงพอต่อการเกิดตะกอน CaCO_3 การเติมปูนขาวเกินปริมาณไบคาร์บอเนตที่มีอยู่จึงเป็นการเพิ่มปริมาณแคลเซียมลงไปในน้ำ ส่งผลให้ความกระด้างทั้งหมดในน้ำสูงขึ้น

กระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) : ชนิดของโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ทดลอง ได้แก่ สารส้ม (Alum , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) และโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ทำการทดลองที่ปริมาณโคแอกกูแลนต์ 10^{-7} - 10^{-3} โมลต่อลิตรของอลูมินัม ทั้งนี้ ค่าความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ที่เลือกมาครอบคลุมโดะแกรมของเขตการเกิดกลไกในกระบวนการโคแอกกูเลชัน [7, 8] จากการทดลองพบว่า สารส้มและ PACl ไม่มีผลต่อการกำจัดความกระด้างในน้ำ แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกา โดยที่ปริมาณสารส้ม 10^{-3} โมลต่อลิตรของอลูมินัม ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาเท่ากับ 16.7 ± 0.5 เปอร์เซ็นต์ และที่ปริมาณ PACl 10^{-4} โมลต่อลิตรของอลูมินัม ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาเท่ากับ 24.7 ± 0.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสภาวะที่มีการเติมสารส้มและ PACl ปริมาณดังกล่าวส่งผลให้ค่าพีเอชหลังปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วง 6.6-7.7 และ 7.0-7.7 ตามลำดับ โดยช่วงพีเอชหลังปฏิกิริยา (Final pH) มีค่าใกล้เคียง 5.5-7.5 ซึ่งช่วงพีเอชดังกล่าว จะเป็นช่วงที่ Al(OH)_3 ละลาย

น้ำได้น้อยที่สุดจึงเกิดการตกผลึก Al(OH)_3 ซึ่งซิลิกาสามารถเกาะติดบนพื้นผิวได้ [5] ทั้งนี้ ที่ปริมาณโคแอกกูแลนต์เท่ากัน PACl มีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกาสูงกว่าสารส้ม เนื่องจาก PACl มีสารประกอบอลูมินัมของ PACl ที่เป็นทั้งโมโนเมอร์ (Monomer) และโพลิเมอร์ (Polymer) หรือ Al_{13} ซึ่งโพลิเมอร์ดังกล่าวก่อให้เกิดกลไกแบบสะพานเชื่อม (Bridge aggregation) เกิดการรวมกลุ่มกันของโพลิเมอร์ (Al_{13} -aggregate) โดยจะเป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ทำให้รวมตัวกันได้ดีขึ้น ซิลิกาจึงสามารถเกาะติดได้ทั้งบนผลึก Al(OH)_3 ที่เกิดจากโมโนเมอร์ และกลุ่มของโพลิเมอร์ [9] นอกจากนี้ K. McCurdy และคณะ (2016) [10] พบว่า ขนาดฟล็อก (Floc) ที่เกิดจาก PACl มีขนาดใหญ่กว่าฟล็อกของสารส้ม ที่ปริมาณโมลของอลูมิเนียมเท่ากัน PACl จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกาสูงกว่าสารส้ม

กระบวนการทางเคมีด้วยวิธีการเติมปูนขาว (Lime softening) และโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) : จากการทดลองพบว่า ที่ปริมาณปูนขาว 350-360 มก./ล. และปริมาณสารส้ม 10^{-6} - 10^{-4} โมลต่อลิตรของอลูมินัม ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกามีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกำจัดโดยการเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียว เนื่องมาจากพีเอชหลังปฏิกิริยามีค่าประมาณ 10.6-11 ซึ่งคาดว่าจะยังคงเกิดตะกอน CaCO_3 และ Mg(OH)_2 ได้ ทั้งนี้ ที่ปริมาณสารส้ม 10^{-3} โมลต่อลิตรของอลูมินัม พีเอชมีค่าลดลงเหลือประมาณ 8.5 ซึ่งคาดว่าตะกอน CaCO_3 และ Mg(OH)_2 เกิดขึ้นได้ไม่ดีส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างลดลง เนื่องจากปัจจัยของพีเอชที่เหมาะสมของการเกิดตะกอน CaCO_3 และ Mg(OH)_2 อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกากลับมีค่าสูงประมาณ 80.6 ± 0.4 เปอร์เซ็นต์ (กรณีเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาประมาณ 35.2 ± 0.3 เปอร์เซ็นต์) เนื่องจากซิลิกาอไอออนน่าจะเกิดปฏิกิริยากับทั้งแคลเซียม แมกนีเซียม และอลูมินัมได้ดี เกิดเป็นสารประกอบซิลิเกต

ขณะที่ปริมาณปูนขาว 350-360 มก./ล. และปริมาณ PACl 10^{-4} โมลต่อลิตรของอลูมินัม ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกำจัดโดยการเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียว เนื่องจากพีเอชหลังปฏิกิริยามีค่าประมาณ 10.6-11.0 และมีประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาได้ประมาณ 60.4 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากซิลิกาอไอออนน่าจะเกิดปฏิกิริยากับทั้งแคลเซียม แมกนีเซียม และอลูมินัมได้ดี อย่างไรก็ตาม ที่ปริมาณ PACl 10^{-3} โมลต่อลิตรของอลูมินัม ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาเท่ากับประมาณ

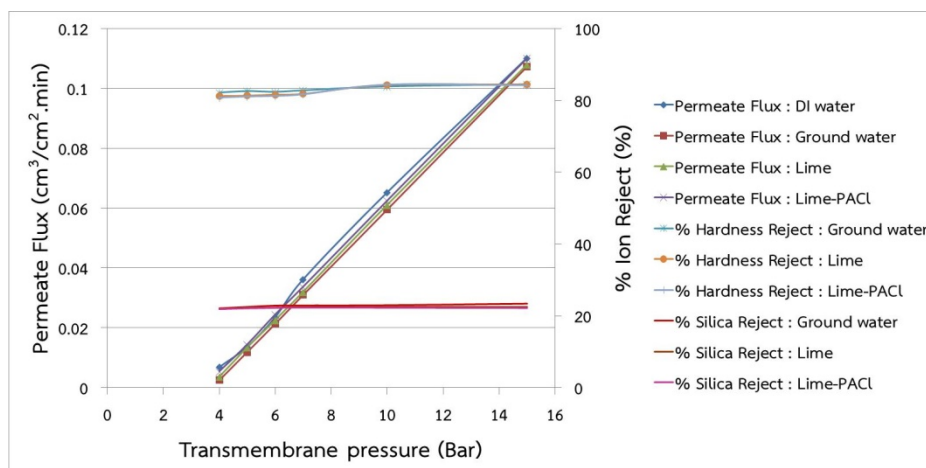
82.0±0.1 เปอร์เซ็นต์ แต่มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างลดลง เนื่องจากพีเอชลดลงมีค่าประมาณ 9.0 จึงทำการศึกษาต่อเพื่อหาปริมาณ PACl ที่เหมาะสมที่สุดพบว่า ที่ปริมาณ PACl 1.2×10^{-4} โมลต่อลิตรของอลูมินัม ยังคงมีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างได้ดีและมีประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาดีขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 80.2±0.4 และ 66.9±0.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นการเติมปูนขาวและ PACl ในขั้นตอนการกวนเร็วพร้อมกันจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกา และลดขั้นตอนการตกตะกอนในการแยกตะกอน CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ และตะกอนคอลลอยด์ที่เกิดจากการเติมโคแอกกูแลนต์

การทดลองที่ 2 : ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างและซิลิกาของน้ำบาดาลด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันของน้ำที่ผ่าน/ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี

ผลของความดันผ่านเมมเบรนที่ 4 ถึง 15 บาร์ต่อฟลักซ์ของน้ำสะอาด (Permeate Flux) และเปอร์เซ็นต์การกำจัดความกระด้างและซิลิกา (%Reject) แสดงดังรูปที่ 2 โดยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำสะอาดจะแปรผันตรงกับ TMP ของระบบ ตามสมการ (1)

$$F_w = K_w (\text{TMP} - \Delta\pi) \quad (1)$$

เมื่อเปรียบเทียบฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ TMP เท่ากัน ของน้ำทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ 1) น้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี 2) น้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาว และ 3) น้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาวและ PACl พบว่า น้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมีมีฟลักซ์ของน้ำสะอาดต่ำน้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาว และน้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาวและ PACl เนื่องจากมีปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total dissolved solid, TDS) ในน้ำสูงที่สุด ทำให้มีค่าผลต่างของความดันออสโมซิส ($\Delta\pi$) สูง ส่งผลให้ฟลักซ์ของน้ำสะอาดมีค่าลดลง ทั้งนี้ น้ำที่ผ่านการเติมสารเคมีมีค่า TDS ในน้ำน้อยเนื่องจากตะกอนที่เกิดจากสารประกอบแคลเซียม แมกนีเซียม และซิลิกาถูกกำจัดออกจากน้ำโดยการตกตะกอน ทำให้ปริมาณ TDS ในน้ำมีค่าลดลงแม้ว่าจะมีการเติมสารเคมีลงไป สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาของ 1) น้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี 2) น้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาว และ 3) น้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาวและ PACl แสดงดังตารางที่ 2 พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาของน้ำทั้ง 3 ประเภทใกล้เคียงกัน ที่ความดันผ่านเมมเบรน 4-15 บาร์ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกามากกว่า 80.0 และ 20.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของน้ำสะอาด ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกา

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาของน้ำเข้านาโนฟิลเตรชัน (Feed Water) แต่ละประเภท

ประเภทของน้ำเข้านาโนฟิลเตรชัน	ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้าง (%)	ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกา (%)
น้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี	82.2±0.4 ถึง 84.5±0.3	22.1±0.6 ถึง 23.4±0.3
น้ำที่ผ่านการเติมปูนขาว	81.2±0.3 ถึง 84.4±0.4	21.9±0.3 ถึง 22.5±0.5
น้ำที่ผ่านการเติมปูนขาวและ PACl	80.8±0.4 ถึง 84.2±0.1	21.9±0.5 ถึง 22.2±0.3

หมายเหตุ : (1) ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาที่ช่วงความดันผ่านเมมเบรน 4-15 บาร์

อย่างไรก็ตาม ตามเกณฑ์การเดินระบบของเมมเบรนตามการประปานครหลวง [11] ควรเดินระบบนาโนฟิลเตรชันในช่วงความดัน 4-7 บาร์ รวมถึงค่า Typical operating pressure ของ NF membrane รุ่น DK ของบริษัท GE Water แนะนำที่ความดันประมาณ 6.9 บาร์ (Typical flux 22 GFD/100 psi) ซึ่งโดยปกติแล้วความดันที่เหมาะสมในการเดินระบบ คือ ความดันที่น้อยที่สุดที่ทำให้มีอัตราการผลิตน้ำและเปอร์เซ็นต์การกำจัดมากที่สุด เนื่องจากการใช้ความดันที่สูงเกินไปจะเป็นการเพิ่มความหนาแน่นเนื้อเมมเบรน หรือ “เกิดการกดอัด (Compaction)” ส่งผลให้อัตราการแพร่ผ่านของน้ำลดลง นอกจากนี้ ประสิทธิภาพการกำจัดบางพารามิเตอร์จะมีค่าลดลงที่ความดันสูง เนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนของตัวถูกละลายหรือไอออน (Solute transfer) เพิ่มขึ้น ตามปรากฏการณ์ของคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน

(Concentration polarization, CP) หรือการสะสมตัวของไอออนที่ผิวเมมเบรน จึงไม่เป็นที่นิยมในการเดินระบบสูงเกินความจำเป็นทั้งในเรื่องของคุณภาพน้ำและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสำหรับเดินระบบ

จากประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาของกระบวนการทางเคมีและนาโนฟิลเตรชันพบว่า ในกระบวนการทางเคมีที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และ PACl 1×10^{-4} - 1.2×10^{-4} โมลต่อลิตรของอลูมิเนียม และนาโนฟิลเตรชันที่การเดินระบบความดันผ่านเมมเบรน 7 บาร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างทั้งหมดและซิลิกา 96.5 และ 67.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถเพิ่มรอบการใช้น้ำจะเพิ่มขึ้นเป็น 4 รอบ โดยมีปริมาณซิลิกา เป็นตัวกำหนดรอบการใช้น้ำ ซึ่งจำนวนรอบการใช้น้ำดังกล่าวส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 56 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 จำนวนรอบการใช้น้ำและเปอร์เซ็นต์การประหยัดน้ำของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน กระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาว - นาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการทางเคมีโดยการเติมปูนขาวและ PACl - นาโนฟิลเตรชัน

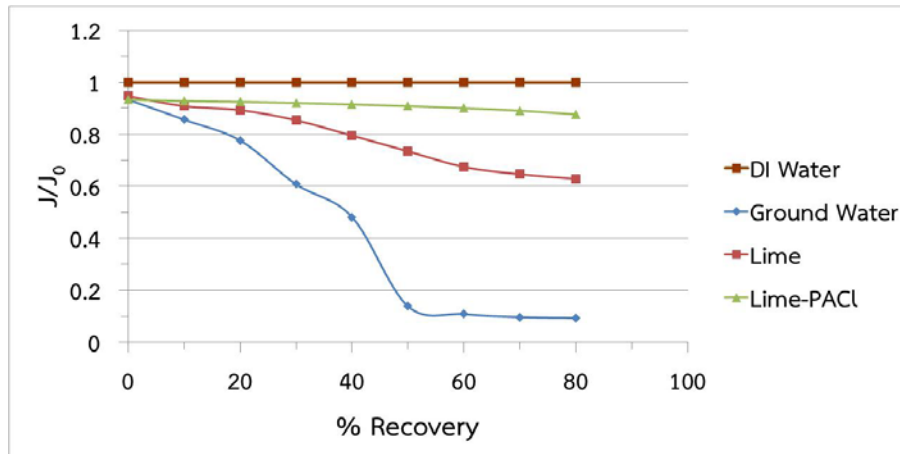
พารามิเตอร์	รอบการใช้น้ำ			
	น้ำบาดาล	น้ำหลังผ่านนาโนฟิลเตรชัน	น้ำหลังผ่านการเติมปูนขาว - นาโนฟิลเตรชัน	น้ำหลังผ่านการเติมปูนขาวและ PACl - นาโนฟิลเตรชัน
ความกระด้างทั้งหมด	0	1	26	26
แคลเซียม	1	2	47	47
ซิลิกา	1	2	3	4
พารามิเตอร์ที่กำหนดรอบการใช้น้ำ	ความกระด้างทั้งหมด	ความกระด้างทั้งหมด	ซิลิกา	ซิลิกา
จำนวนรอบการใช้น้ำ	0	1	3	4
การประหยัดน้ำ (%) ⁽¹⁾	-	0	50	56

หมายเหตุ : (1) ให้รอบการใช้น้ำเริ่มต้นเท่ากับ 1.5 รอบในการคำนวณเปอร์เซ็นต์การประหยัดน้ำ [12]

การทดลองที่ 3 : ศึกษาการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนในระบบกำจัดความกระด้างของน้ำบาดาลระหว่างน้ำที่ผ่าน/ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี

ศึกษาการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนของน้ำทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ 1) น้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี 2) น้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาว และ 3) น้ำที่ผ่านกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมปูนขาวและ PACl ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง J/J_0 กับ %Recovery ต่างๆ ทั้งนี้ ค่า J/J_0 คือฟลักซ์น้ำสะอาดของน้ำใดๆ ต่อฟลักซ์น้ำสะอาดของน้ำ DI เพื่อลดความผิดพลาดเนื่องจากการใช้เมมเบรนคนละแผ่นในการทดลอง จากผลการทดลองพบว่า ที่ 80 %Recovery ค่า J/J_0 ของน้ำ DI ของน้ำทั้ง 3 ประเภท มีค่าเท่ากับ 0.0940 ± 0.0007 , 0.5589 ± 0.1207 และ 0.8768 ± 0.0006 ตามลำดับ และค่าความต้านทานเนื่องจากการอุดตันของเมมเบรน (Fouling Resistane, R_f) มีค่าประมาณ

2.0×10^{13} , 9.9×10^{11} และ $7.1 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ ตามลำดับ จากรูปที่ 3 ค่า J/J_0 ที่ลดลง มาจาก 2 สาเหตุ ได้แก่ (1) ความเข้มข้นของน้ำขาเข้า (Feed Water) ซึ่งทำให้ความดันออสโมซิสมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันสุทธิมีค่าลดลง (2) การอุดตันของเมมเบรน เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของน้ำขาเข้า และ R_f ที่ %Recovery ต่างๆ ของน้ำทั้ง 3 ประเภท พบว่า น้ำที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมี ค่า J/J_0 จะลดลงอย่างรวดเร็ว และสาเหตุหลักของการลดลงเกิดจากการอุดตันของเมมเบรน สำหรับน้ำที่ผ่านการเติมปูนขาวและ PACl สาเหตุหลักของการค่า J/J_0 ที่ลดลง คือความเข้มข้นของน้ำขาเข้าที่เพิ่มขึ้นตาม %Recovery ส่งผลให้ความดันออสโมซิสเพิ่มขึ้น (TMP เท่าเดิม) จึงกล่าวได้ว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยการเติมปูนขาวและ PACl ช่วยลดภาระการกรองความกระด้างและซิลิกา ทำให้ลดการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนได้ดี



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง J/J_0 ของน้ำสะอาดกับ %Recovery

สรุป

การศึกษากระบวนการผสมผสานระหว่างกระบวนการทางเคมีและนาโนฟิลเตรชัน เพื่อกำจัดความกระด้างทั้งหมดและซิลิกาในน้ำบาดาลเนื่องจากอ้อนดังกกล่าวเป็นปัจจัยของการเกิดตะกอนในระบบหล่อเย็น ในกระบวนการทางเคมีที่ชนิดและปริมาณสารเคมีต่างๆ พบว่า ที่ปริมาณปูนขาว 360 มก./ล. และ PACl 1×10^{-4} - 1.2×10^{-4} โมลต่อลิตรของอลูมินัม มีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาได้เท่ากับ 80.2 และ

66.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อนำน้ำหลังผ่านการเติมสารเคมีดังกล่าวไปผ่านกระบวนการนาโนฟิลเตรชันพบว่ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างและซิลิกาได้มากกว่า 80.0 และ 20.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นกระบวนการทางเคมีและนาโนฟิลเตรชันมีประสิทธิภาพรวมในการกำจัดความกระด้างทั้งหมดและซิลิกา 96.5 และ 67.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถเพิ่มรอบการใช้งานจะเพิ่มขึ้นเป็น 4 รอบ โดยมีปริมาณซิลิกา เป็นตัวกำหนดรอบการใช้งาน ซึ่งจำนวนรอบการใช้งานดังกล่าวส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การประหยัดน้ำเท่ากับ

56 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน พบว่า น้ำที่ผ่านการเติมปูนขาวและ PACl ค่า J/J_0 มีค่าลดลงน้อยที่สุด โดยที่ 80 %Recovery ค่า J/J_0 ลดลงเพียง 6.0 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่น้ำที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมีและน้ำที่ผ่านการเติมปูนขาว ที่ 80 %Recovery ค่า J/J_0 ลดลง 33.6 และ 89.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย และโปรแกรมวิจัย Control of hazardous contaminants in raw water resources for water scarcity resilience ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการและของเสียอันตราย (ศสอ.) สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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
- [2] 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. *Inter J Adv Chem*. 1(2): 21-30.
- [3] A. M. Al-Rehaili. 2003. Comparative chemical clarification for silica removal from RO groundwater feed. *Desalination*, 159. 21-31.
- [4] 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.
- [5] S. Salvador Cob, B. Hofs, 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.
- [6] C. Hsu-Hui, C. Shiao-Shing and Y. Shu-Ru. 2009. In-line coagulation/ultrafiltration for silica removal from brackish water as RO. *Sep. Purif. Technol*. 70, 112-117.
- [7] 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 J. Chem. Eng*. 23(6): 1041-1046.
- [8] X. Wu. 2007. Distinct coagulation mechanism and model between alum and high Al13-PACl. *Colloids Surfaces A*. 305: 89-96.
- [9] 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 Interfac*. 226: 78-85.
- [10] K. McCurdy, K. Carlson and D. Gregory. 2004. Floc morphology and cyclic shearing recovery: comparison of alum and polyaluminum chloride coagulants, *Water Res*. 38(2): 486-494.
- [11] M. Seneviratne. 2006. A Practical Approach to Water Conservation for Commercial and Industrial Facilities. United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- [12] Metropolitan Waterworks Authority (MWA). 2001. Membrane Technology. Retrieved from https://www.mwa.co.th/download/prd01/water_technology/other/awtp2.pdf [2016, September 4] (in Thai)