

ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเรซินประจุบวกแบบกรดแก่ โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นต่ำ จากน้ำสังเคราะห์น้ำทิ้งของระบบรีเวิร์สออสโมซิส

Regeneration Efficiency of Strong Acid Cation Exchange Resin using Low Concentration of NaCl from Synthetic RO Reject Water

สุทธิเกียรติ มีศรีสม (Sutthikiat Meesrisom)¹*ดร.สุรพล ผดุงทน (Dr.Surapol Padungthon)**

(Received: November 14, 2022; Revised: February 2, 2023; Accepted: February 3, 2023)

บทคัดย่อ

น้ำได้คินจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีศักยภาพเพิ่มมากขึ้นในชุมชนที่เข้าถึงแหล่งน้ำผิวดินอย่างจำกัด อย่างไรก็ตาม ร้อยละ 90 ของน้ำได้คินไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้อุปโภคและบริโภคโดยตรง เนื่องจากมีความกระด้างของน้ำ และมีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดสูง ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการจัดการหรือนำบำบัดก่อนที่จะสามารถนำมาใช้อุปโภคและบริโภคได้ ทางเลือกหนึ่งที่สำคัญสำหรับการแก้ปัญหา คือ การใช้เทคโนโลยีระบบรีเวิร์สออสโมซิส และการบำบัดขั้นต้นด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งต้องจัดการในด้านการใช้ปริมาณสารเคมีในการล้างทำความสะอาด การอุดตันของเมมเบรน ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนประจุของเรซินที่ลดลงจากการที่น้ำดิบมีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดสูง และการจัดการน้ำทิ้งที่มีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดสูง เพื่อที่จะนำเสนอแบบจำลองที่สามารถคาดการณ์ถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อระบบ และคุณภาพน้ำได้แบบทันที การวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาแบบจำลองการเดินระบบโดยศึกษาผลกระทบของค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำของเรซิน และการศึกษาการสังเคราะห์น้ำทิ้งจากกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสที่มีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำมาใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซิน จากการศึกษาพบว่า ค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของเรซิน ด้วยการเพิ่มค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดจาก 0-7,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของเรซินจะลดลงจากร้อยละ 100 ถึงร้อยละ 48.31 เป็นต้น และจากการศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเรซิน โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์จาก 5,000 เป็น 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเรซิน (% Ca^{2+} Recovery) จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเรซินถึงร้อยละ 100 และประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเรซินจะลดลงเมื่อมีการใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ลดลง ซึ่งจากการศึกษาถึงผลกระทบของค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำของเรซิน และต่อประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเรซิน จะทราบได้ถึงแบบจำลองการเดินระบบที่จะช่วยคาดการณ์ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของเรซิน และการฟื้นฟูสภาพเรซินจากน้ำทิ้งของกระบวนการแยกเกลือในระบบรีเวิร์สออสโมซิสได้ทันที

¹Corresponding author: Sutthikiat_m@kkumail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Student, Master of Engineering Program in Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

ABSTRACT

Groundwater resources are becoming an increasingly viable option for communities having limited access to fresh surface water supplies. About 90% of the groundwater is undesirable for consumption because of a water hardness and total dissolved solids (TDS), which need to be managed before being considered for drinking or other household applications. One of the foremost alternatives for resolving groundwater in the condition of hardness and total dissolved solids is the Reverse osmosis (RO) and ion exchange pretreatment which deal with the challenges in terms of large chemical usage for clean, membrane fouling, decreasing ion exchange efficiency with high TDS of raw water and wastewater management of high TDS. Which suggests having a certain operation model to predict their real-time utility. This work aims to prepare an operational model by investigating the effect of TDS on hardness removal and regeneration efficiency using low TDS wastewater from RO reject through a self-regeneration approach. The study found that the concentration of TDS directly affects the efficiency of hardness removal. With increasing the TDS from 0-7,500 mg/L, the ion exchange efficiency decreases from 100 to 48.31%, and so on. While studying the regeneration efficiency, it has been found that by increasing the concentration of brine solution from 5000 to 20000 mg/L, the Ca^{2+} recovery increases to achieve 100% recovery with a decrease in required bed volume of brine solution. Finally, considering the effect of TDS on the removal and regeneration efficiency of ion exchange, an operational model has been proposed which will help to predict the ion exchange efficiency and the real-time applicability of the RO-ion exchange process towards groundwater desalination.

คำสำคัญ: น้ำใต้ดิน การแลกเปลี่ยนไอออน รีเวิร์สออสโมซิส

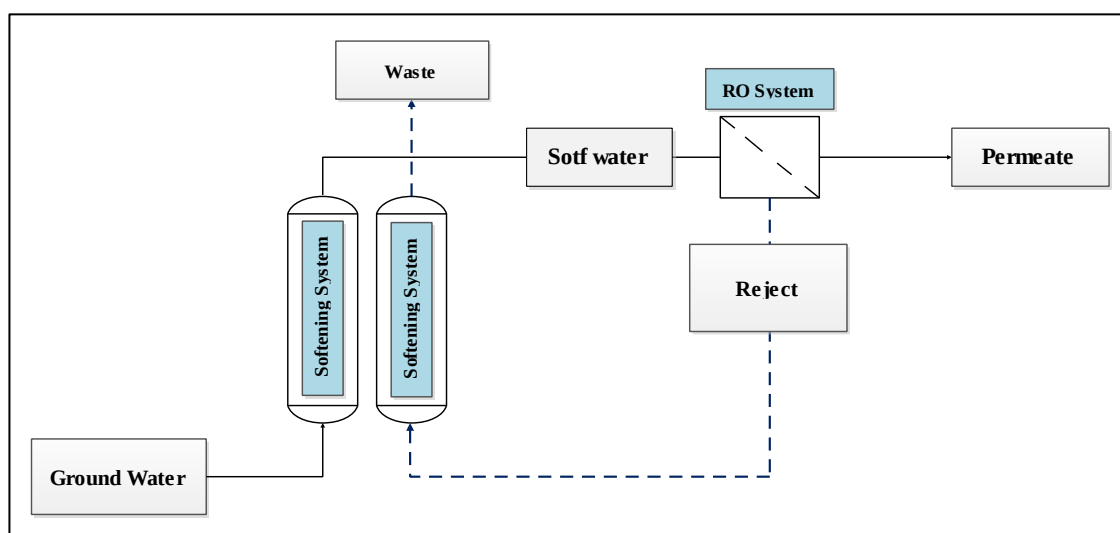
Keywords: Groundwater, Ion exchange, Reverse Osmosis

บทนำ

การประสบปัญหาภัยแล้ง การเข้าถึงแหล่งน้ำผิวดิน หรือการเข้าถึงยากของน้ำประปาในแต่ละท้องถิ่น ส่งผลให้ปัจจุบันน้ำบาดาลเป็นทางเลือกหนึ่ง ที่นิยมในการนำมาใช้ในการอุปโภคและบริโภค ซึ่งแต่ละพื้นที่จะพบปัญหาของน้ำบาดาลที่แตกต่างกันออกไป ตามแต่สภาพองค์ประกอบทางเคมีของชั้นหินใต้ดิน [1] หรือสภาพภูมิประเทศ โดยปัญหาหลักที่สำคัญและพบได้มากของน้ำบาดาลนั้นคือ มีค่าความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness: TH) และในบางพื้นที่จะมีปริมาณของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solid : TDS) สูงหรือเรียกว่า น้ำกร่อยเค็ม (Brackish) จากการศึกษาข้อมูลกรมทรัพยากรน้ำบาดาลของประเทศไทยพบว่า ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีปัญหาน้ำบาดาลที่มีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง ซึ่งเกินเกณฑ์คุณภาพน้ำอุปโภคบริโภค หรือมากกว่า 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตรหลายพื้นที่ [2] การนำน้ำบาดาลกร่อยเค็มไปใช้ประโยชน์นั้น จะส่งผลกระทบต่างๆ เป็นอย่างมาก จากปัญหาที่ทำให้เกิดตะกอนเกาะตามวัสดุหรืออุปกรณ์ ส่งผลต่ออุตสาหกรรมที่มีการใช้ระบบหม้อต้มไอน้ำ หรือระบบหล่อเย็น เนื่องจากตะกอนที่เกิดจากน้ำกระด้าง จะทำให้เกิดการสะสมอุดตันในท่อ น้ำ หรือการบดตะกอนในหม้อต้มไอน้ำ ที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านความร้อนได้ยาก ซึ่งหากเกิดตะกอนในเส้นท่อจะส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ เพิ่มมากขึ้น [3] และส่งผลทำให้เกิดคราบเกลือ และยังทำให้วัสดุอุปกรณ์ที่เป็นโลหะเกิดสนิมก่อให้เกิดความเสียหายได้

เทคโนโลยีโดยทั่วไปที่สามารถกำจัดเกลือออกจากน้ำ มีหลายวิธี เช่น การกลั่นด้วยแฟลชหลายขั้นตอน (multi-stage flash distillation : MSF) การกลั่นแบบหลายเอฟเฟกซ์ (multiple-effect distillation : MED) [4] แต่เทคโนโลยีที่เหมาะสม และนิยมใช้ในการนำมาแก้ไขปัญหาน้ำบาดาลกร่อยเค็มในปัจจุบัน คือการใช้เทคโนโลยีระบบรีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse Osmosis : RO) [4, 5] เนื่องจากระบบรีเวิร์สออสโมซิสมีประสิทธิภาพในการกำจัดความเค็มสูง และต้นทุนการผลิตต่ำ [6] ซึ่งหลักการทำงานของระบบรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis : RO) จะใช้เมมเบรน (Membrane) หรือเยื่อเลือกผ่านในการกรองสารละลายในน้ำออกไป ซึ่งหลังจากการกรองจะทำให้เกิดน้ำ 2 ส่วน คือ น้ำสะอาดที่ปราศจากสารละลายในน้ำ และส่วนของน้ำทิ้งที่มีสารละลายในน้ำที่มีความเข้มข้นสูงออกมา [7] ซึ่งปัญหาที่พบของระบบ คือ เยื่อเลือกผ่านในระบบรีเวิร์สออสโมซิส จะเกิดการอุดตันได้ง่ายจากตะกอนที่เกิดจากค่าความกระด้างของน้ำสูง [8] จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการป้องกันการเกิดการอุดตัน เช่น กรดอะมิโนไทรเมทิลีนฟอสโฟนิค (Aminotrimethylene Phosphonic : ATMP) [9] อย่างไรก็ตาม หากน้ำมีค่าความกระด้างในน้ำสูง ก็จะส่งผลทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนมากขึ้นไป อาจทำให้ต้องทำการเปลี่ยนเมมเบรนบ่อยเกินความจำเป็น ทำให้ต้นทุนการผลิตยิ่งสูงมากขึ้นตามไปด้วย โดยปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการแก้ปัญหาน้ำบาดาลกร่อยเค็ม โดยใช้เทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน (Ion Exchange) ในการกำจัดความกระด้างของน้ำเพื่อลดปัญหาการเกิดการอุดตันของเมมเบรน ร่วมกับเทคโนโลยีรีเวิร์สออสโมซิส แต่การใช้เทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน และเทคโนโลยีรีเวิร์สออสโมซิสร่วมกัน ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำกร่อยเค็ม ยังพบปัญหาจากการเกิดน้ำเสียที่มีค่าของแข็งละลายในน้ำสูงของน้ำทิ้งจากทั้งสองระบบ ซึ่งระบบแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินจะมีการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ปริมาณมากเพื่อฟื้นฟูสภาพเรซินที่ทำให้เกิดน้ำทิ้งที่มีค่าของแข็งละลายในน้ำสูงจำเป็นต้องบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยหลักการทำงานของกำจัดความกระด้างด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซินจะมีหลักการทำงานทั่วไปคือ เรซินเป็นวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่มีโครงสร้างประกอบด้วยหมู่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) โดยมีหมู่ฟังก์ชันเกาะอยู่ที่โครงสร้างของเรซิน หมู่ฟังก์ชันของเรซินที่ใช้ในการกำจัดน้ำกระด้างทั่วไปจะเป็นหมู่ซัลโฟนิค ($-SO_3^-$) หรือเรียกเรซินชนิดนี้ว่า “เรซินชนิดกรดแก่” และเรซินชนิดนี้จะมีไอออนอิสระมาเกาะกับหมู่ซัลโฟนิค โดยส่วนใหญ่ไอออนอิสระนั้นคือ ไอออนของโซเดียม (Na^+) ซึ่งมีหน้าที่แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกในน้ำ ดังนั้นหลักการทำงานของเรซินคือ เมื่อน้ำกระด้างผ่านเรซินแล้วเรซินจะแลกเปลี่ยนไอออนของโซเดียม กับไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) หรือไอออนของแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งทำให้ไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมนั้นไปเกาะอยู่กับหมู่ซัลโฟนิคในเรซิน และไอออนของโซเดียมจะหลุดออกไปกับน้ำ [10] เมื่อเรซินกำจัดไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมออกจากน้ำจนหมดประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนแล้ว หรือเรซินแลกเปลี่ยนไอออนของโซเดียมออกไปจนหมดแล้ว เรซินจะถูกฟื้นฟูสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ในปริมาณมาก และความเข้มข้นสูงเพื่อให้โซเดียมไปแทนที่แคลเซียมและแมกนีเซียมในเรซินคืนดังเดิม ส่งผลให้น้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์สูงตามไปด้วย ซึ่งเมื่อน้ำที่ถูกกำจัดแคลเซียมหรือความกระด้างทั้งหมดออกแล้ว ยังมีความเค็มหรือเกลืออยู่ในน้ำ เนื่องจากการแลกเปลี่ยนไอออนนั้นจะสามารถกำจัดได้เพียงไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียม แต่ไม่สามารถกำจัดเกลือหรือโซเดียมได้ น้ำที่ถูกกำจัดแคลเซียม

หรือความกระด้างทั้งหมดออกแล้วนั้นจะถูกส่งเข้าสู่ระบบรีเวิร์สออสโมซิส เพื่อกำจัดเกลือออกไป หลักการทำงานของระบบรีเวิร์สออสโมซิส คือ การให้น้ำไหลผ่านเมมเบรนโดยใช้แรงดัน เมมเบรนที่ใช้จะเป็นเมมเบรนชนิดรีเวิร์สออสโมซิส (RO Membrane) ซึ่งเมมเบรนชนิดนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กมากที่ไอออนของธาตุประจุ 1 หรือมากกว่าจะไม่สามารถผ่านเมมเบรนชนิดนี้ไปได้ [11] ซึ่งเกลือที่มีส่วนประกอบของธาตุโซเดียม (Na^+) และคลอไรด์ (Cl^-) มีประจุเป็น 1 จะไม่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้ น้ำที่ผ่านเมมเบรนออกมาจึงปราศจากไอออน และจะเหลือน้ำบางส่วนออกเป็นน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของเกลือสูงมากขึ้น เนื่องจากน้ำส่วนใหญ่หายไปแต่ไอออนของธาตุยังเท่าเดิม จึงทำให้น้ำมีความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้น้ำทิ้งจากระบบรีเวิร์สออสโมซิส มีค่าของแข็งละลายในน้ำที่สูงมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวที่พบของการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลร่อยเค็ม โดยใช้เทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน และเทคโนโลยีรีเวิร์สออสโมซิส ร่วมกัน จึงได้มีแนวคิดในการศึกษาผลกระทบของน้ำดิบที่มีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินในการกำจัดความกระด้าง และศึกษาการนำน้ำทิ้งจากระบบรีเวิร์สออสโมซิส ที่มีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดกลับมาใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซินที่หมดประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง เพื่อลดการเกิดน้ำทิ้งที่มีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และช่วยลดต้นทุนการผลิตน้ำจากต้นทุนการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นสูงในการใช้ฟื้นฟูสภาพเรซิน โดยแนวคิดการศึกษานี้สามารถแสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้ถังกรองเรซินจำนวน 2 ถัง ซึ่งหลักการทำงานเมื่อถังกรองในแรกทำการกำจัดความกระด้าง ถังกรองอีกหนึ่งถังจะทำการล้างฟื้นฟูสภาพเรซินโดยใช้น้ำทิ้งจากระบบรีเวิร์สออสโมซิสที่สามารถแยกสารละลายเกลือออกจากน้ำสะอาดได้



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดของการนำน้ำทิ้งจากระบบรีเวิร์สออสโมซิสกลับมาใช้ฟื้นฟูสภาพเรซิน

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำของเรซิน
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้น้ำทิ้งจากระบบบรีเวียร์สออสโมซิสที่มีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดต่ำกลับมาใช้ล้างพื้นฟูสภาพเรซิน

วิธีการวิจัย

1. การสังเคราะห์น้ำบาดาลกร่อยเค็ม

เตรียมสังเคราะห์น้ำบาดาลกร่อยเค็มที่มีความมีความกระด้าง 200 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และมีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดแตกต่างกัน โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0, 2500, 7500 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 1 : เตรียมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) 3.36 กรัม ละลายในน้ำ DI ลงในน้ำ 10 ลิตร และพักทิ้งไว้ 1 วัน

ขั้นตอนที่ 2 : เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 2.94 กรัม ละลายลงในน้ำที่มีสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ในขั้นตอนที่ 1 แล้วพักทิ้งไว้ 1 วัน

ขั้นตอนที่ 3 : เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 0, 25, 75 และ 100 กรัม ละลายลงในน้ำที่มีสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) และ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ในขั้นตอนที่ 2 และ 3 แล้วพักทิ้งไว้ 1 วัน

ขั้นตอนที่ 4 : ทำการตรวจวัดค่าความกระด้างของน้ำ และค่าสารละลายในน้ำ แล้วจดบันทึกข้อมูล

2. การเตรียมตัวอย่างน้ำทิ้งที่มีค่าสารละลายในน้ำแตกต่างกัน

ขั้นตอนที่ 1 : เตรียมสารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 5, 7, 15 และ 20 กรัม

ขั้นตอนที่ 2 : นำสารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่เตรียมไว้ ละลายกับน้ำบริสุทธิ์ ในบีกเกอร์ และปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร ขนาด 1 ลิตร (เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่แต่ละความเข้มข้นตัวอย่างละ 1 ลิตร)

ขั้นตอนที่ 3 : ทำการตรวจวัดค่าค่าสารละลายในน้ำ แล้วจดบันทึกข้อมูล

3. การทดสอบการศึกษาผลกระทบของค่าสารละลายในน้ำที่สูงขึ้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำ

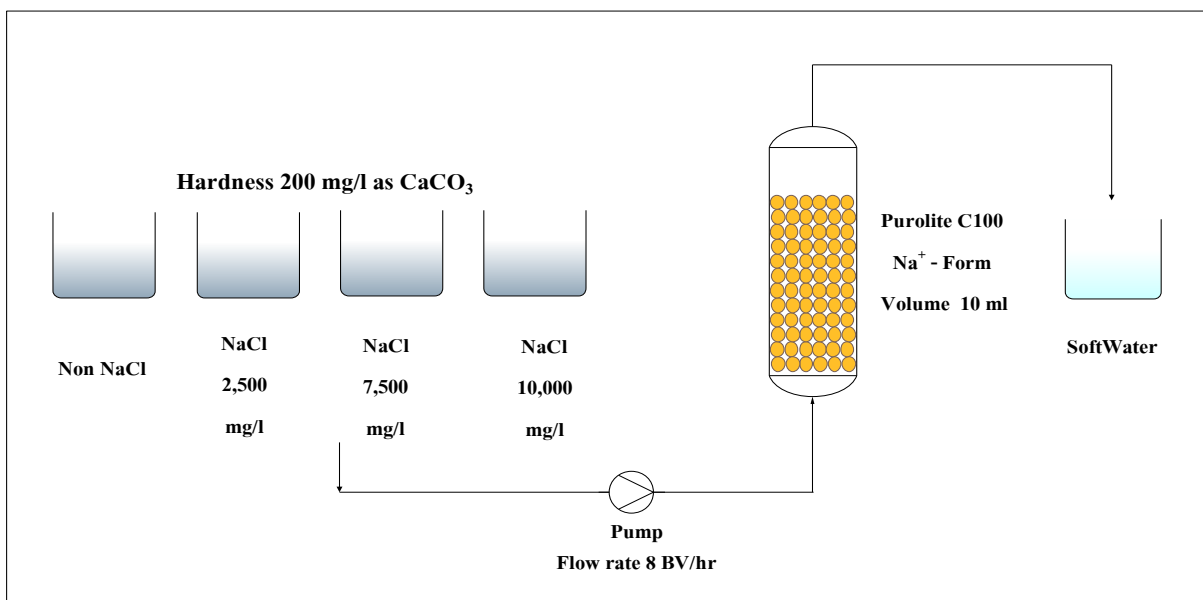
ทำการทดลองด้วยวิธีคอลัมน์ (Fixed-Bed Column) โดยเตรียมเรซินประจุบวก Purolite C100 ในรูปของโซเดียม ปริมาณ 10 มิลลิลิตร บรรจุลงในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และทำการนำตัวอย่างน้ำบาดาลกร่อยเค็มที่ได้เตรียมไว้ ไหลผ่านเรซินด้วยปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump- LEAD FLUID YZ15, China) ที่อัตราการไหล 8 BV/hr. (1.33 มิลลิลิตรต่อวินาที) และทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ทุก 40 BV ซึ่งสามารถหาค่า BV ได้ดังสมการที่ (1) [12] และแสดงวิธีการทดลองดังภาพที่ 2

$$\text{Bed Volume (BV)} = \frac{\text{อัตราการไหลของปั๊ม (มิลลิเมตรต่อนาทีก)} \times \text{เวลา (นาทีก)}}{\text{ปริมาตรของเรซิน (มิลลิเมตร)}} \quad (1)$$

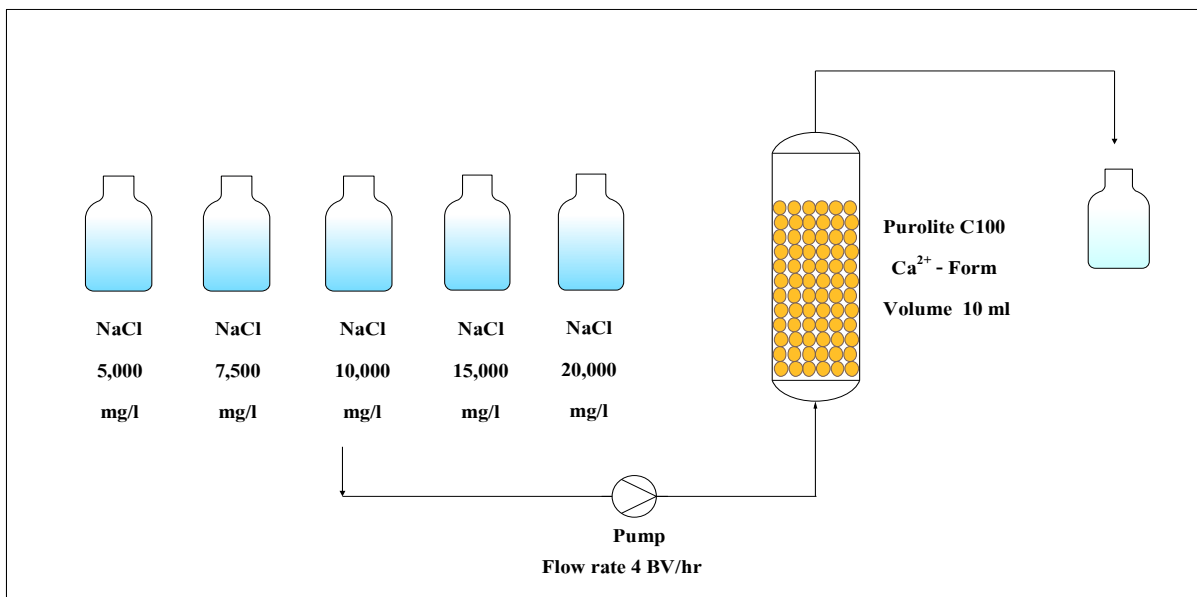
Bed Volume (BV) คือ ปริมาตรของสารละลายที่เทียบเท่าปริมาณเรซินในคอลัมน์สำหรับเวลาและอัตราการไหลที่กำหนด

4. การทดสอบการศึกษาประสิทธิภาพการใช้น้ำทิ้งจากระบบรีเวิร์สออสโมซิสที่มีค่าสารละลายในน้ำแตกต่างกัน กลับมาใช้ล้างฟื้นฟูสภาพเรซิน

ทำการทดลองด้วยวิธีคอลัมน์โดยเตรียมเรซินประจุบวก Purolite C100 ในรูปของแคลเซียม (Ca^{2+} - Form) ปริมาณ 10 มิลลิเมตร บรรจุลงในคอลัมน์ และทำการนำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ไหลผ่านเรซิน ด้วยปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump- LEAD FLUID YZ15, China) ที่อัตราการไหล 4 BV/hr. (0.67 มิลลิเมตรต่อนาทีก) และทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ทุก 2 BV และทำการตรวจวัดค่าความกระด้างของน้ำตัวอย่าง ทำซ้ำโดยวิธีเดียวกันจนกว่าจะตรวจไม่พบค่าความกระด้างของน้ำ ตัวอย่างที่เก็บได้ โดยแสดงวิธีการทดลองดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 แสดงวิธีการทดลองผลกระทบของค่าสารละลายในน้ำที่สูงขึ้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำ



ภาพที่ 3 แสดงวิธีการทดลองประสิทธิภาพการใช้สารฟื้นฟูสภาพโซเดียมคลอไรด์ที่มีค่าสารละลายในน้ำแตกต่างกันในการฟื้นฟูสภาพเรซิน

ผลการวิจัย

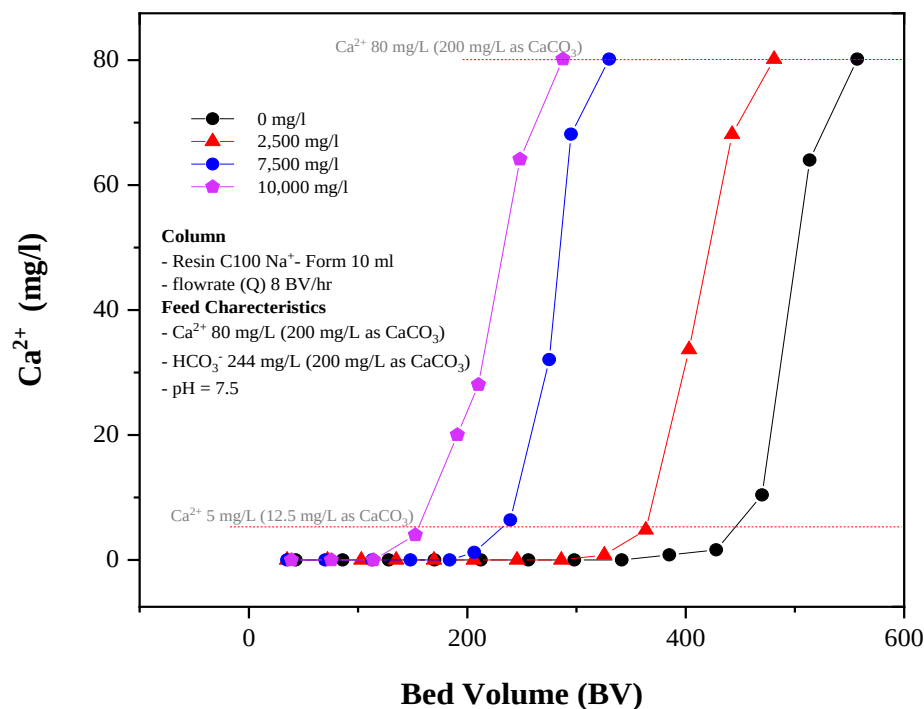
1. ผลการศึกษาผลกระทบของค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำของเรซิน

จากการทดลอง พบว่าตัวอย่างน้ำสังเคราะห์น้ำบาดาลกร่อยเค็ม ที่มีค่าความกระด้าง 200 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่แตกต่างกันโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0, 2500, 7500 และ 20000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เรซินประจุบวก Purolite C100 มีประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างอยู่ที่ 428, 363.5, 206 และ 152 BV ตามลำดับ แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองการศึกษผลกระทบของค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำ

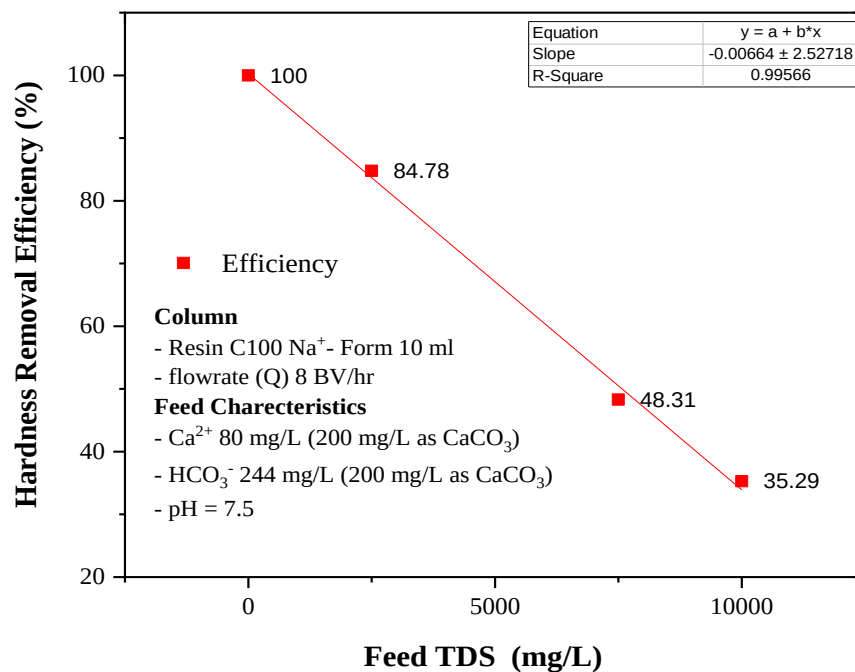
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (mg/L)	ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ (BV)	ความสามารถของเรซิน (meq/mL)	ประสิทธิภาพ (%)
0	428	1.71	100
2,500	363.5	1.45	84.78
7,500	206	0.83	48.31
10,000	152	0.60	35.29

จากตารางที่ 1 แสดงค่าประสิทธิภาพที่ลดลงในการกำจัดความกระด้างของเรซิน ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของเรซิน หรือความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลดลง ซึ่งตามคำแนะนำของผู้ผลิตเรซินได้ระบุค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ หรือค่าความจุของเรซินไว้ที่ 2.0 มิลลิกรัมวาลেন্টต่อมิลลิลิตร[13] ซึ่งใกล้เคียงตามผลการทดลองการกำจัดความกระด้างที่ค่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0 mg/l ได้ค่าความจุของเรซินเท่ากับ 1.71 มิลลิกรัมวาลেন্টต่อมิลลิลิตร และเมื่อค่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความจุของเรซินลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของเรซินเมื่อมีค่าสารละลายในน้ำที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 4 แสดงผลการทดลองโดยน้ำตัวอย่างที่ทำการทดลองจะถูกกำหนดค่าความกระด้างของแคลเซียมที่ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการทดสอบที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์แตกต่างกัน โดยปริมาณน้ำที่ผ่านเรซินในช่วงแรกจะถูกกำจัดความกระด้างออกไปโดยการแลกเปลี่ยนประจุ จนถึงจุดที่เรซินหมดประสิทธิภาพและไม่สามารถแลกเปลี่ยนประจุได้อีก ซึ่งจะสังเกตได้จากน้ำที่ผ่านเรซินออกมามีความกระด้างของแคลเซียมมากถึง 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่สูงขึ้น จะส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดความกระด้างลดน้อยลง หรือทำให้กำลังการผลิตของน้ำที่ปราศจากความกระด้างลดลงตามไปด้วย ซึ่งประสิทธิภาพของความสามารถการกำจัดความกระด้างของเรซินจะลดลงเมื่อ น้ำดิบมีค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มสูงขึ้นสามารถแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงประสิทธิภาพของความสามารถการกำจัดความกระด้างของเรซินเมื่อมีค่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 5 แสดงประสิทธิภาพของความสามารถการกำจัดความกระด้างของเรซินเมื่อมีค่าสารละลายในน้ำที่แตกต่างกันพบว่า เมื่อค่าสารละลายในน้ำที่ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสามารถในการกำจัดความกระด้างของเรซินร้อยละ 100 และเมื่อน้ำมีค่าสารละลายในน้ำที่ 7500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการกำจัดความกระด้างของเรซินจะลดลงเหลือร้อยละ 48.31 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของความสามารถการกำจัดความกระด้างของเรซิน จะลดลงเมื่อค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหรือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจากภาพที่ 5 จะสามารถคาดการณ์ประสิทธิภาพของความสามารถการกำจัดความกระด้างของเรซินได้จากค่าความชัน ดังสมการที่ (2)

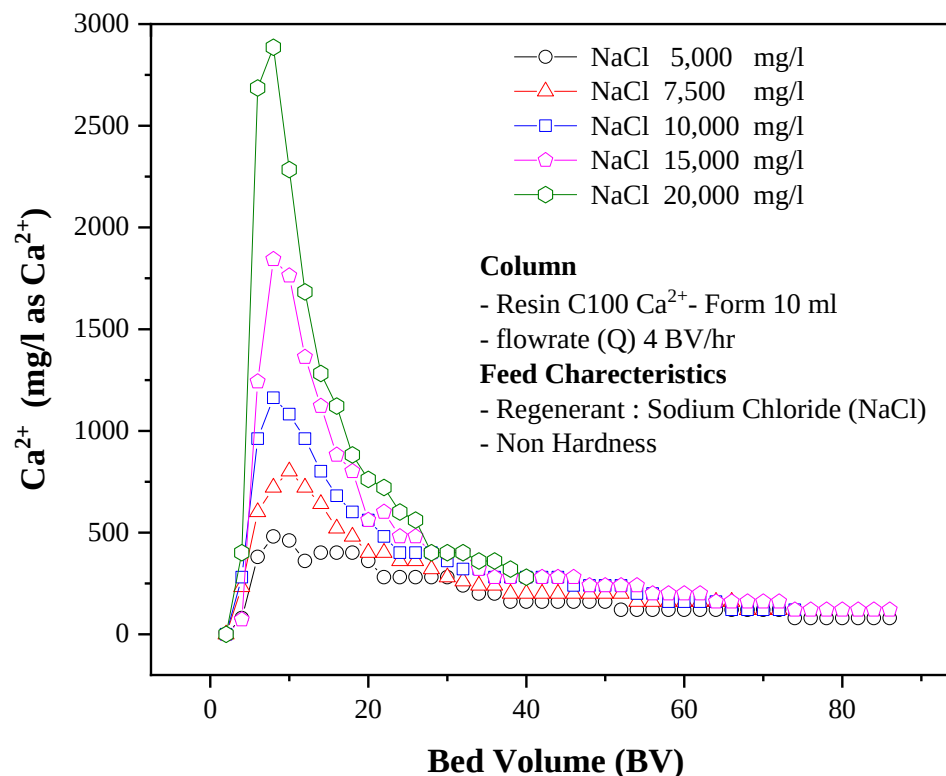
$$A = 100 - (0.00664 \times B) \quad (2)$$

A คือ ประสิทธิภาพของความสามารถการกำจัดความกระด้างของเรซิน (%)

B คือ ค่าความเข้มข้นของปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/L)

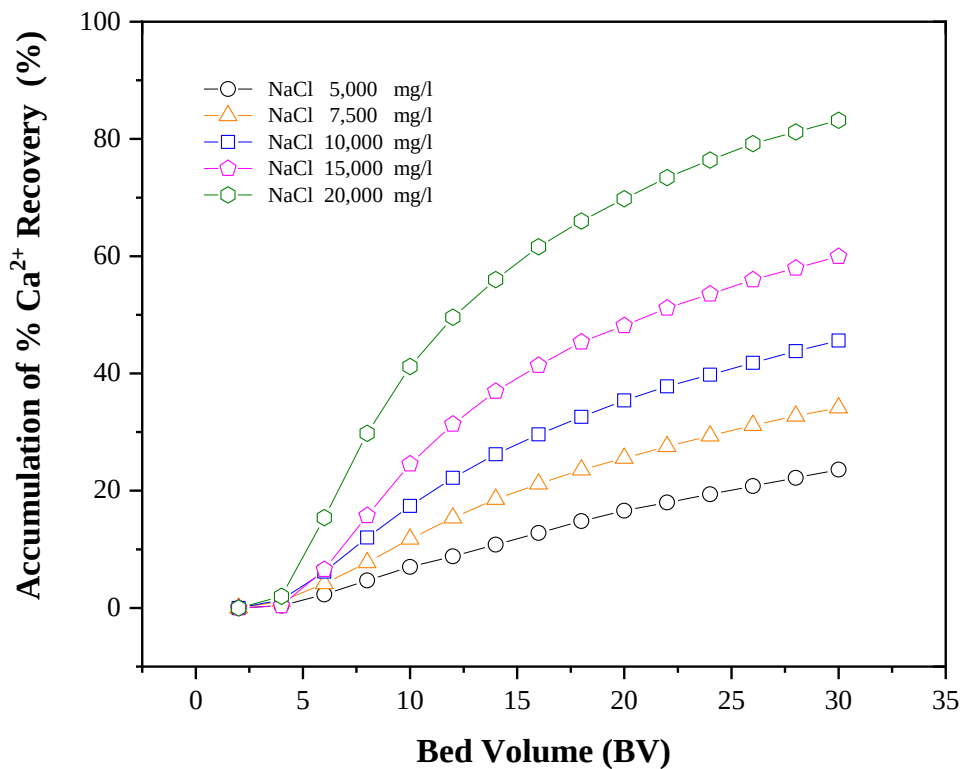
2. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการใช้น้ำทิ้งจากระบบรีเวิร์สออสโมซิสที่มีค่าสารละลายในน้ำแตกต่างกัน กลับมาใช้ล้างพื้นฟูสภาพเรซิน

จากการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพการใช้น้ำทิ้งจากระบบรีเวิร์สออสโมซิสที่มีค่าสารละลายในน้ำแตกต่างกัน กลับมาใช้ล้างพื้นฟูสภาพเรซินโดยการนำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 5000, 7500, 10000, 15000 และ 20000 มิลลิกรัมต่อลิตรกลับมาใช้พื้นฟูสภาพเรซิน ซึ่งแสดงผลข้อมูลการทดลองดังตารางที่ 2 และภาพที่ 6



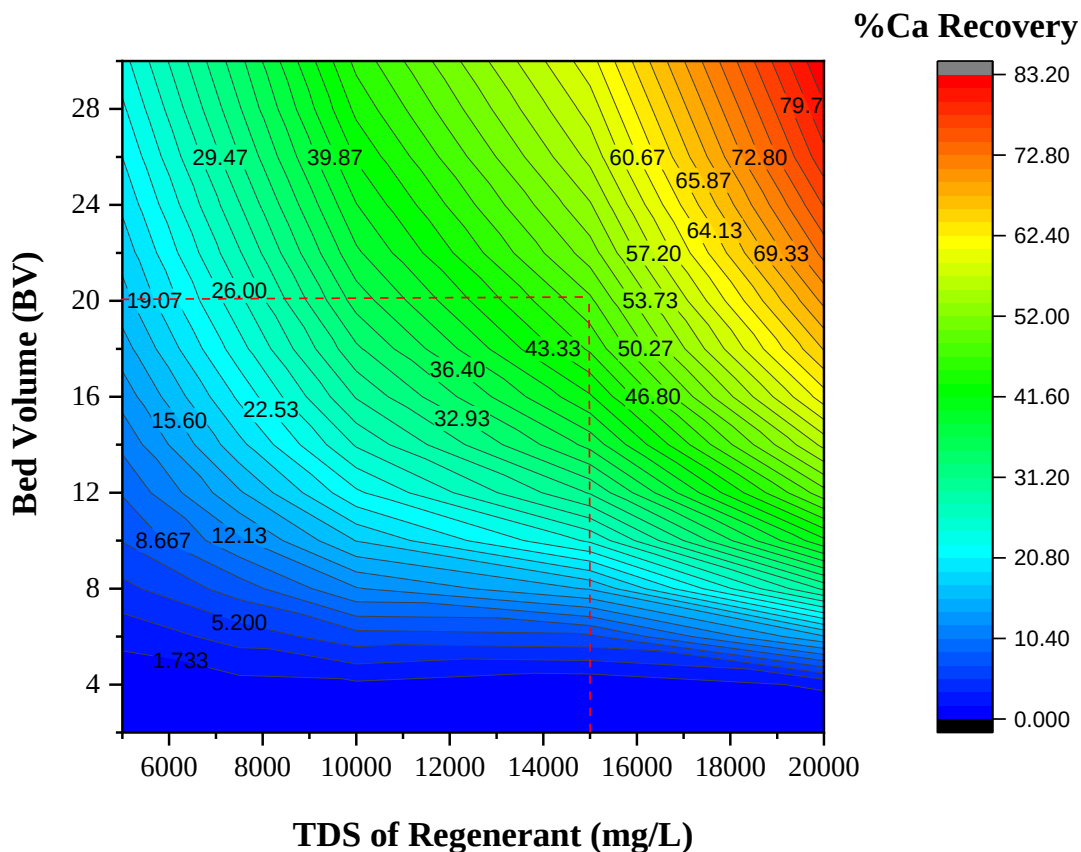
ภาพที่ 6 แสดงผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการใช้น้ำทิ้งจากระบบรีเวิร์สออสโมซิสที่มีค่าสารละลายในน้ำแตกต่างกัน กลับมาใช้ล้างพื้นฟูสภาพเรซิน

จากภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่าปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้เป็นสารพื้นฟูสภาพเรซินที่มีความเข้มข้นต่างกัน ในช่วง 10 BV จะมีประสิทธิภาพการพื้นฟูสภาพเรซิน หรือมีประสิทธิภาพการกู้คืนประจุแคลเซียมได้สูงในช่วงแรก และจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และเมื่อพิจารณาข้อมูลในช่วงปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ 30 BV ซึ่งเป็นช่วงที่ประสิทธิภาพการพื้นฟูสภาพเรซินต่ำ และคงที่จะสามารถแสดงค่าประสิทธิภาพการพื้นฟูสภาพเรซิน (% Ca²⁺ Recovery) ต่อค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และค่าปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์จากข้อมูลการทดลอง ได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของค่าร้อยละประสิทธิภาพของการล้างพื้นฟูสภาพเรซิน (% Ca^{2+} Recovery) ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และค่าปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

จากภาพที่ 7 แสดงค่าร้อยละประสิทธิภาพของการล้างพื้นฟูสภาพเรซิน ซึ่งหลังจากการพื้นฟูสภาพเรซิน เมื่อความเข้มข้นของสารพื้นฟูสภาพโซเดียมคลอไรด์ที่สูงขึ้น และปริมาณสารพื้นฟูสภาพเรซินที่สูงขึ้น จะยิ่งส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการพื้นฟูสภาพเรซิน สูงขึ้นตามไปด้วย และจากข้อมูลตารางที่ 2 จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ และประมาณการค่าประสิทธิภาพการพื้นฟูสภาพเรซิน ต่อ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ และปริมาณสารโซเดียมคลอไรด์ได้ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าร้อยละประสิทธิภาพของการล้างพื้นฟูสภาพเรซิน (% Ca^{2+} Recovery) ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และค่าปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

จากภาพที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของค่าร้อยละประสิทธิภาพของการล้างพื้นฟูสภาพเรซิน (% Ca^{2+} Recovery) ต่อค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และค่าปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จะเห็นได้ว่าขณะที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หรือค่าปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เปลี่ยนแปลง จะส่งผลต่อค่าร้อยละประสิทธิภาพของการล้างพื้นฟูสภาพเรซิน และจะสามารถคาดการณ์ประสิทธิภาพการพื้นฟูสภาพเรซิน เมื่อมีค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 2 ถึง 30 BV ดังเช่นหากใช้สารพื้นฟูสภาพโซเดียมคลอไรด์ที่มีค่าสารละลายในน้ำ 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาณ 20 BV จะมีค่าร้อยละประสิทธิภาพของการล้างพื้นฟูสภาพเรซินเท่ากับ 48.53 จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าน้ำทิ้งจากระบบรีเวิร์สออสโมซิสที่มีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำ หรือค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จะสามารถนำกลับมาใช้พื้นฟูสภาพเรซินได้

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในน้ำส่งผลเป็นอย่างมากต่อการกำจัดความกระด้างด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินในรูปโซเดียม ทั้งการผลิตน้ำอ่อนหรือน้ำที่ปราศจากความกระด้าง และการฟื้นฟูสภาพเรซิน ซึ่งจากการทดลองการกำจัดความกระด้างเมื่อค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดแตกต่างกัน โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน พบว่าเมื่อค่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำที่ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสามารถในการกำจัดความกระด้างของเรซินร้อยละ 100 และเมื่อน้ำมีค่าสารละลายในน้ำที่ 7,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการกำจัดความกระด้างของเรซินจะลดลงเหลือร้อยละ 48.31 จะเห็นได้ว่ายิ่งความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อการกำจัดความกระด้างของเรซิน ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของเรซินลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้การศึกษานำน้ำสังเคราะห์น้ำทิ้งจากระบบบรีเวียร์สออสโมซิสที่มีค่าความเข้มข้นของสารละลายในน้ำต่ำกลับมาใช้ฟื้นฟูสภาพเรซินพบว่า ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หรือค่าปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เปลี่ยนแปลง จะส่งผลต่อค่าร้อยละประสิทธิภาพของการล้างฟื้นฟูสภาพเรซิน และจะสามารถคาดการณ์ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเรซิน เมื่อมีค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 2 ถึง 30 BV ดังเช่น หากใช้สารฟื้นฟูสภาพโซเดียมคลอไรด์ที่มีค่าสารละลายในน้ำ 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาณ 20 BV พบว่าจะมีประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเรซินเท่ากับ 48.53 ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำทิ้งจากระบบบรีเวียร์สออสโมซิสที่มีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำต่ำ หรือค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ต่ำ สามารถนำกลับมาใช้ฟื้นฟูสภาพเรซินแทนการใช้สารฟื้นฟูสภาพโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นสูง ที่ความเข้มข้น 100,000 มิลลิกรัมต่อลิตรลงได้ และส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำทิ้งจากการฟื้นฟูสภาพเรซินลดลง จากการลดปริมาณการใช้สารฟื้นฟูสภาพโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นสูง และจากการศึกษาถึงผลกระทบของค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างในน้ำของเรซิน และต่อประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเรซิน จะทราบได้ถึงแบบจำลองการเดินระบบที่จะช่วยคาดการณ์ประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างของเรซิน และการฟื้นฟูสภาพเรซินจากน้ำทิ้งของกระบวนการแยกเกลือในระบบบรีเวียร์สออสโมซิสได้ทันที

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย และทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Ojo O, Otieno F, Ochieng G. Groundwater: Characteristics, qualities, pollutions and treatments: An overview. International Journal of Water Resources and Environmental Engineering. 2012;4.
2. Environment MoNRa. Strategic Plan of Water Resource Management. 2558.



3. Kaixiang C, Li C, Yao B, Yang F, Sun G. Synthesis and evaluation of an environment friendly terpolymer CaCO_3 scale inhibitor for oilfield produced water with better salt and temperature resistance. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019;137:48460.
4. Ahdab YD, Lienhard JH. Chapter 41 - Desalination of brackish groundwater to improve water quality and water supply. In: Mukherjee A, Scanlon BR, Aureli A, Langan S, Guo H, McKenzie AA, editors. *Global Groundwater*: Elsevier; 2021. p. 559-575.
5. Garg MC. Chapter 4 - Renewable Energy-Powered Membrane Technology: Cost Analysis and Energy Consumption. In: Basile A, Cassano A, Figoli A, editors. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*: Elsevier; 2019. p. 85-110.
6. Afonso MD, Jaber JO, Mohsen MS. Brackish groundwater treatment by reverse osmosis in Jordan. *Desalination*. 2004;164(2):157-171.
7. Puritec. Basics of Reverse Osmosis 2012 [Available from: <https://puretecwater.com/downloads/basics-of-reverse-osmosis.pdf>].
8. Ahmed A A-G. Recycling of Reverse Osmosis (RO) Reject Streams in Brackish Water Desalination Plants Using Fixed Bed Column Softener. *Energy Procedia*. 2017;107:205-211.
9. Mpelwa M, Tang S-F. State of the art of synthetic threshold scale inhibitors for mineral scaling in the petroleum industry: a review. *Petroleum Science*. 2019;16.
10. Prasannam P. Removal of heavy metal ions from solution using ion exchangers based on Hydroxyethyl Cellulose: Silpakorn University; 2004.
11. Yang ZZYFZRXXZTZZ. A Review on Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes for Water Purification. *Polymers* [Internet]. 2019; 11(8).
12. Pérez-González A, Ibáñez R, Gómez P, Urtiaga AM, Ortiz I, Irabien JA. Recovery of desalination brines: separation of calcium, magnesium and sulfate as a pre-treatment step. *Desalination and Water Treatment*. 2015;56(13):3617-3625.
13. Purolite. C100 sodium cycle operation. 2010 [Available from: [http://www.purolite.com/Customized/Uploads/C100Na cycle Eng Bulletin 0910.pdf](http://www.purolite.com/Customized/Uploads/C100Na%20cycle%20Eng%20Bulletin%200910.pdf)].