

การพัฒนาเรซินในรูปโพลีวาเลนซ์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อใช้ใน กระบวนการผลิตน้ำอ่อน

Development of Maximum Capacity Cation Exchange Resin in Polyvalent Form for Water Softening Process

กฤษฎา ธานี (Kidsada Thanee)^{1*} สุรพล ผดุงทน (Surapol Padungthong)**

(Received: March 20, 2019; Revised: July 1, 2019; Accepted: July 2, 2019)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเรซินในรูปโพลีวาเลนซ์ให้มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจากการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของเรซินโดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้สารฟื้นฟูสภาพที่นิยมในปัจจุบันคือ เกลือ (NaCl) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารที่พัฒนาขึ้นในรูปโพลีวาเลนซ์คือสารละลายเหล็ก ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) พบว่าในการฟื้นฟูสภาพเรซิน (%Recovery) ที่ 100% นั้นจะต้องใช้เกลือ 3.8X (X : เท่าของความจุเรซิน) และในการใช้กรดไฮโดรคลอริกนั้นจะต้องใช้สูงถึง 9.5X ซึ่งโดยปกติค่าแนะนำจากบริษัทนั้นจะใช้เกลือเท่ากับ 250 g (2.14X) และประสิทธิภาพอยู่ที่ 1.6 eq/L แต่ในการฟื้นฟูสภาพของเรซินด้วยสารละลายเหล็ก ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เพียง 1.5X ก็สามารถทำให้เรซินกลับมามีประสิทธิภาพได้ 100% และจากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำกระด้างด้วยเรซินในรูปโพลีวาเลนซ์ 3 ชนิดคือ เหล็ก, อลูมิเนียม และเซอร์โคเนียม ผลการทดลองพบว่าเรซินในรูปโพลีวาเลนซ์ทั้ง 3 ชนิด มีความสามารถในการกำจัดน้ำกระด้างได้ 1.8, 1.68, 2.04 eq/L ตามลำดับ และจากผลการทดลองร่วมกับราคาของสารล้างฟื้นฟูพบว่าเรซินในรูปเหล็กมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ระบบการผลิตน้ำอ่อนมากที่สุด

ABSTRACT

The objective of this research aimed to develop environmental friendly with maximum capacity of cation exchange resin, operated in polyvalent form for water softening process. The comparison efficiency of regenerants by using NaCl, HCl, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ were investigated. The result found that at 100% of calcium recovery, 9.5X of H^+ , 3.8X of Na^+ , and 1.5X of Fe^{3+} were used to regenerate exhausted resins. According to the resin selectivity, the polyvalent Fe^{3+} can be effectively used as regenerants compared to monovalent Na^+ or H^+ . The comparison efficiency of hardness removal by using resin polyvalent form (Al-form, Fe-form, Zr-form) found that resin polyvalent form can remove hardness at approximately 420-510 bed volumes corresponding to the maximum exchange capacity. The traditional Na^+ -form requires 2.14X resin to achieve 1.6 eq/L ion exchange capacity, while Fe^{3+} -form, Al^{3+} -form and Zr^{4+} -form require only 1.5X to achieve 1.8, 1.68, 2.04 eq/L ion exchange capacity, respectively. The results suggested that the resin in a polyvalent form is suitable for water softening system.

คำสำคัญ: จำนวนเท่าของปริมาตรเรซิน เรซิน โพลีวาเลนซ์ต่อลิตร น้ำกระด้าง การแลกเปลี่ยนไอออน

Keywords: Bed Volumes(BV), Resin, Equivalent/Liter(eq/L), Hard water, Ion Exchange

¹ Correspondent author: kidsada.tha@gmail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

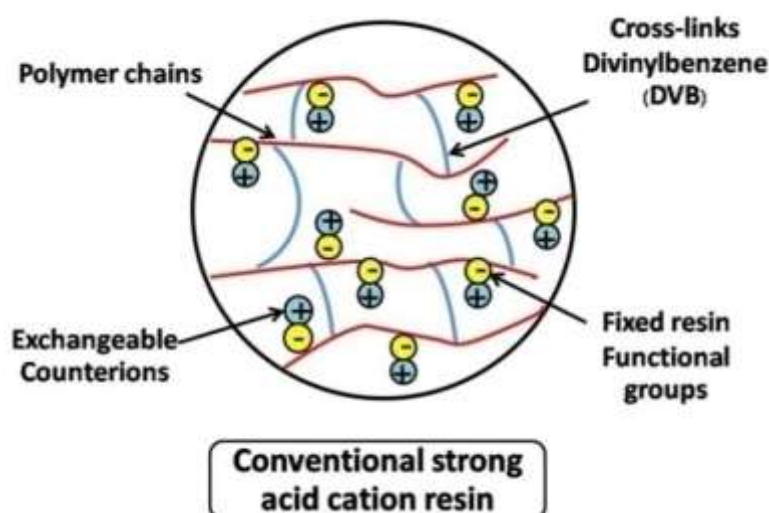
**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

น้ำกระด้างเกิดจากน้ำที่ไหลผ่านชั้นดินชั้นหินและทำการละลายของแร่ธาตุต่างๆลงสู่ น้ำ โดยส่วนใหญ่เกิดจากแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) น้ำกระด้างนั้นสามารถพบได้ทั้งในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน แต่ส่วนใหญ่แล้วน้ำใต้ดินจะมีค่าความกระด้างที่สูงกว่าน้ำผิวดิน ซึ่งน้ำกระด้างนั้นทำให้สารซักฟอกและสบู่เกิดฟองได้ยาก คุณสมบัติของน้ำกระด้างมีสถานะเป็นด่าง ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ดีเท่าที่ควร หากในน้ำมีค่าความกระด้างสูงมากจะทำให้เกิดตะกรันในเส้นท่อ และในหม้อน้ำ ทำให้เครื่องทำความร้อน ท่อน้ำร้อน ใช้งานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และน้ำดื่มที่มีความกระด้างจะมีรสแปลก แม้แต่การนำไปใช้ในการเกษตร น้ำกระด้างนั้นไม่เหมาะสำหรับพืชหลายชนิด รวมไปถึงการเลี้ยงสัตว์ ดังนั้นเพื่อที่จะนำน้ำมาใช้งานจะต้องกำจัดความกระด้างออกไปก่อน หรือเรียกว่า กระบวนการผลิตน้ำอ่อน (Water Softening) น้ำอ่อนคือน้ำที่ปราศจากไอออน หรือมีไอออนอยู่น้อย ซึ่งสามารถนำไปใช้กับกิจกรรมที่ต้องการน้ำที่มีความสะอาดสูง และใช้ในปริมาณมาก เช่น หม้อต้มไอน้ำ หรือระบบหล่อเย็น ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้อุตสาหกรรม [1-3]

ในปัจจุบันมีวิธีการ และเทคโนโลยีในการผลิตน้ำอ่อน (Water Softening) หรือกำจัดน้ำกระด้างมากมาย เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี การกรองโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน และการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น วิธีการกำจัดน้ำกระด้างโดยการตกตะกอนด้วยสารเคมี เป็นวิธีที่ต้องใช้พื้นที่และใช้งบประมาณในการก่อสร้างพอสมควร และมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างน้อย ไม่สามารถลดความกระด้างให้หมดไปได้ วิธีการกรองโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นวิธีที่ทำให้น้ำที่ได้ออกมามีคุณภาพดี ใช้พื้นที่น้อย แต่ข้อเสียของระบบนี้คือหากมีความเข้มข้นของน้ำกระด้างมากจะทำให้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane) อุดตันเร็ว สิ้นเปลืองพลังงานในการเพิ่มแรงดันน้ำให้มากขึ้น และมีของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตในปริมาณมาก ซึ่งของเสียพวกนี้ประกอบด้วยเกลือ หรือของแข็งละลายน้ำ (TDS) ค่อนข้างสูง จึงทำให้น้ำเสียที่ต้องนำไปบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม [4] และวิธีแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซิน เป็นวิธีที่ประหยัดทั้งพื้นที่และงบประมาณในการก่อสร้าง และเรซินสามารถฟื้นฟูสภาพให้น้ำกลับมาใช้ได้ อีกวิธีนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างได้ดี ใช้งานง่าย ไม่ยุ่งยาก สามารถใช้ได้กับพื้นที่จำกัด

เรซิน (Resin) เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนที่สังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการทางเคมี มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5 มิลลิเมตร มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนโครงร่างและ หมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า ส่วนที่เป็นโครงร่างจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เรียงต่อกันเป็นเส้นยาว (Styrene) และไฮโดรคาร์บอนที่เชื่อมประสาน (Divinylbenzene) ทำให้โครงร่างเป็นสามมิติ มีความโปร่งและรูพรุน คงรูปร่างอยู่ได้ ไม่แตกหักง่ายและไม่ละลายน้ำ ส่วนที่เป็นโครงร่างนี้จะไม่มีการประจุไฟฟ้า แต่ส่วนที่เป็นหมู่ไอออน หรือหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) จะมีประจุไฟฟ้า เช่น หมู่ซัลโฟนิค หมู่คาร์บอกซิลิก เป็นต้น ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดจับกับไอออนอิสระที่สามารถหลุดออกหรือแลกเปลี่ยนออกไปได้ โดยหมู่ฟังก์ชันนั้นจะเป็นตัวกำหนดการใช้งานของเรซินว่าจะใช้แลกเปลี่ยนประจุบวกหรือประจุลบ ซึ่งเรซินสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange resin) และเรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion exchange resin) โดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) เช่น ซัลโฟนิค (SO_3^-) คาร์บอกซิลิก (COO^-) เป็นต้น โดยองค์ประกอบของเรซินสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1 สำหรับเรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion exchange resin) หมายถึง เรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) เช่น หมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) ทั้งไพรมารี (Primary, 1) เซเค็ลลารี (Secondary, 2) และเทอร์เชียรี (Tertiary, 3) และหมู่ควอเตอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium group) เป็นต้น



ภาพที่ 1 แสดงองค์ประกอบของเรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่เดินระบบแบบวาล์วเลนซ์ 1 [5]

การใช้งานเรซินทั้ง 4 ชนิดนี้มีการใช้งานที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงการเลือกชนิดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนตามการใช้งาน [6-10]

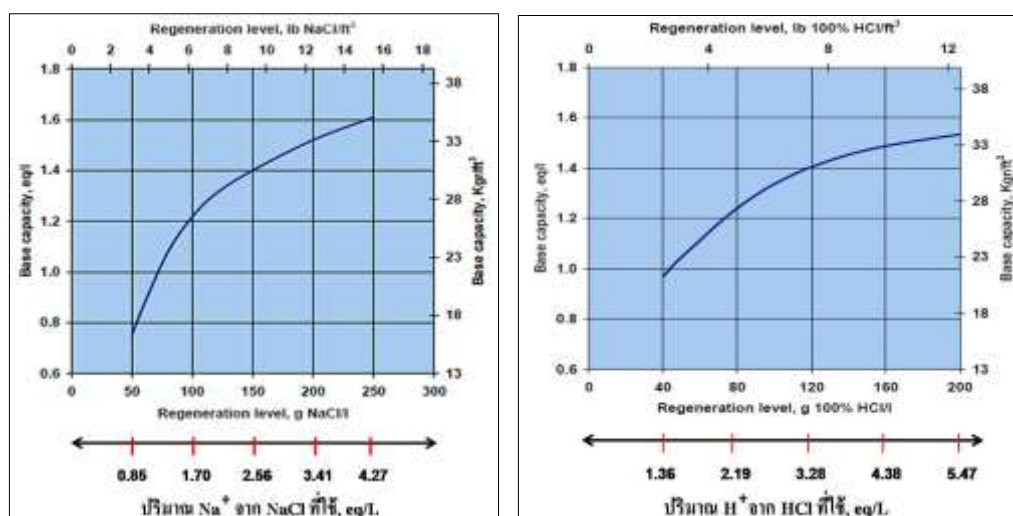
วัตถุประสงค์การใช้งาน	ชนิดของเรซิน	สารฟื้นฟูสภาพ
กำจัดความกระด้าง	เรซินแบบกรดแก่	โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
กำจัดความเป็นด่าง (Alkalinity)	เรซินแบบกรดอ่อน	ไฮโดรคลอริก (HCl), ซัลฟิวริก (H ₂ SO ₄)
น้ำปราศจากไอออน (De-ionized Water)	เรซินแบบกรดแก่หรือกรดอ่อน และเรซินแบบด่างแก่หรือด่างอ่อน (ใช้สองถังร่วมกัน หรือแยกกันก็ได้)	ไฮโดรคลอริก (HCl), ซัลฟิวริก (H ₂ SO ₄) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ แอมโมเนียม (NH ₄)

การกำจัดความกระด้างโดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะการเดินระบบของเรซิน ซึ่งนิยมใช้ในปัจจุบัน 2 แบบ คือ การเดินระบบเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกในรูปโซเดียม (Na⁺) และการเดินระบบด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกในรูปไฮโดรเจน (H⁺) สำหรับเรซินที่อยู่ในรูปของโซเดียม (Na-form) จะมีโซเดียมไอออน (Na⁺) หรือไฮโดรเจน (H⁺) เกาะอยู่กับหมู่ฟังก์ชันของเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนกับไอออนประจุบวกต่างๆที่เป็นสาเหตุของความกระด้างในน้ำเช่น แคลเซียม (Ca²⁺) แมกนีเซียม (Mg²⁺) เป็นต้น เมื่อมีการใช้งานจนเรซินหมดประสิทธิภาพ จะต้องทำการฟื้นฟูสภาพของเรซินเพื่อให้เรซินกลับมามีประสิทธิภาพตามเดิม โดยปกติการล้างฟื้นฟูสภาพของเรซินจะต้องฟื้นฟูโดยการล้างด้วยเกลือ (NaCl) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ตามไอออนอิสระที่ใช้งาน ซึ่งต้องใช้ในความเข้มข้นที่สูง เนื่องจากค่าความชอบของเรซินของแต่ละธาตุนั้นแตกต่างกัน โดยเรซินนั้นจะชอบไอออนที่มีประจุสูงกว่าประจุต่ำ ซึ่งค่าความชอบของเรซินนั้นสามารถแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงลำดับความชอบในการเลือกแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน [11]

ไอออนบวก	ลำดับความชอบ
Fe^{3+}	↑ มาก ↑ ↓ น้อย
Al^{3+}	
Fe^{2+}	
Mn^{2+}	
Ca^{2+}	
Mg^{2+}	
K^{+}	
Na^{+}	
H^{+}	

จากตารางที่ 2 เห็นได้เรซินนั้นมีความชอบไอออนสูงมากกว่าไอออนต่ำ ดังนั้นเมื่อกำจัดน้ำกระด้างเรซินจึงสามารถแลกเปลี่ยนไอออนของโซเดียม (Na^{+}) หรือไฮโดรเจน (H^{+}) ออกไปจากเรซินและแลกเปลี่ยนเอาไอออนของธาตุแคลเซียม (Ca^{2+}) หรือแมกนีเซียม (Mg^{2+}) มาจับกับเรซินแทน และเมื่อทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพของเรซินโดยใช้เกลือ (NaCl) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งมีค่าความชอบของเรซินที่ต่ำกว่าแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ดังนั้นจึงต้องใช้เกลือ (NaCl) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในความเข้มข้นที่สูงเพื่อจะผลักไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ออกมาจากเรซิน จึงทำให้สิ้นเปลืองสารเคมี และทำให้เกิดของเสียจากการล้างฟื้นฟูสภาพของเรซิน ซึ่งการล้างฟื้นฟูสภาพของเรซินในแต่ละครั้ง ประสิทธิภาพของเรซินจะลดลง เมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่งเรซินจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างได้น้อยลง โดยระดับของปริมาณการใช้เกลือ (NaCl) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เพื่อใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซินให้กลับมาใช้ได้อีกครั้งต่อประสิทธิภาพของเรซินหรือความจุของเรซิน (Capacity of resin) แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงปริมาณสารล้างฟื้นฟูสภาพเรซินที่ใช้ต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (Capacity of resin) ที่เดินระบบในรูปโซเดียม (Na^{+}) และไฮโดรเจน (H^{+}) [12]

จากภาพที่ 3 แสดงปริมาณการใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในการฟื้นฟูสภาพเรซินโดยค่าที่แนะนำจากบริษัทผู้ผลิต เพื่อให้ได้ความจุของเรซินที่ต้องการ (Base capacity : eq/L) แกน Y แสดงค่าความจุของเรซิน (Capacity of resin) หรือความสามารถในการกำจัดน้ำกระด้างของเรซิน ส่วนแกน X แสดงค่าปริมาณของสารที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ของเรซิน จากกราฟฝั่งซ้ายเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้เกลือ (NaCl) ที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซิน เพื่อให้ได้ความจุของเรซินอยู่ที่ 1.6 eq/L จะต้องใช้เกลือประมาณ 250 g ต่อเรซิน 1 L หรือ 4.72 eq/L และการใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เพื่อจะฟื้นฟูสภาพเรซินให้ได้ความจุประมาณ 1.55 eq/L จะต้องการใช้ปริมาณกรดไฮโดรคลอริก 200 g ต่อเรซิน 1 L หรือ 5.47 eq/L จากการใช้สารล้างฟื้นฟูสภาพเรซินทั้งสองสารนั้นถือว่ามีประสิทธิภาพน้อย แต่วิธีนี้ก็ยังคงเป็นวิธีที่ดีที่สุดในปัจจุบัน และสามารถกำจัดความกระด้างที่เหลือน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนตได้ เพียงแต่ข้อเสียของวิธีนี้คือการฟื้นฟูสภาพเรซินนั้นใช้สารเคมีสิ้นเปลืองดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยปกติแล้วในการฟื้นฟูสภาพของเรซินนั้นจะใช้เกลือ (NaCl) ในความเข้มข้นที่สูงประมาณ 10% หรือใช้กรด (HCl) ประมาณ 5-10% เพื่อให้ไอออนของน้ำกระด้าง (Ca^{2+} , Mg^{2+}) ถูกแลกเปลี่ยนออกมาจากเรซินมากที่สุด และเพื่อให้เรซินกลับไปยังรูปเดิม คือโซเดียม (Na^+) และไฮโดรเจน (H^+) ดังนั้นก่อให้เกิดของเสียที่ต้องปล่อยทิ้งซึ่งเมื่อลงสู่แหล่งน้ำหากมีความเข้มข้นสูงจะมีผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการซื้อสารเคมีเพื่อล้างฟื้นฟูสภาพเรซิน [12]

ดังนั้นจึงเห็นถึงความสำคัญของปัญหาของกระบวนการกำจัดน้ำกระด้างที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ทั้งในแง่ของประสิทธิภาพและการใช้สารเคมีในการล้างฟื้นฟูสภาพที่สิ้นเปลือง และการเกิดของเสียจากการล้างฟื้นฟูสภาพเรซิน ซึ่งในช่วงระยะเวลาไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาและพัฒนากระบวนการกำจัดน้ำกระด้างหลายวิธี ดังต่อไปนี้ ในปี 2007 ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการลดการใช้เกลือในกระบวนการฟื้นฟูสภาพของเรซิน โดยพัฒนาโครงสร้างของเรซินให้มีระยะการแพร่ผ่านของไอออนน้อยกว่าเรซินปกติ แต่วิธีนี้ยังคงต้องใช้เกลือในการฟื้นฟูสภาพเรซินอยู่ [7] ต่อมาในปี 2009 ได้มีการพัฒนาเรซินมาทำการกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียมโดยใช้เรซินที่อยู่ในรูปของโพแทสเซียม (K^+) ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถกำจัดแคลเซียมได้ 47.21 mg/g resin และกำจัดแมกนีเซียมได้ 27.70 mg/g resin ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างได้น้อยและค่าพีเอชของน้ำที่ออกมามีค่าที่เป็นค่าคือ ประมาณ 9.5-9.8 [13] และในปี 2016 ได้ทำการศึกษาการกำจัดน้ำกระด้างโดยใช้เรซินที่อยู่ในรูปของอลูมิเนียม (Al-form) ซึ่งผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดน้ำกระด้างได้ในระดับหนึ่ง แต่ไม่สามารถกำจัดน้ำกระด้างให้เหลือ 0 mg/L ได้ ดังนั้นจึงนำมาใช้เป็นกำจัดน้ำกระด้างเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปกำจัดโดยใช้เรซินในรูปโซเดียม (Na^+) เป็นขั้นตอนที่ 2 เพื่อช่วยลดภาระของเรซินในรูปโซเดียม (Na^+) และเพื่อช่วยลดความถี่ในการฟื้นฟูสภาพโดยใช้เกลือ (NaCl) ซึ่งวิธีนี้ก็ยังต้องใช้เกลือในกระบวนการอยู่ จึงทำให้มีของเสียที่ต้องนำไปบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม [14] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการพัฒนาวิธีการกำจัดน้ำกระด้างโดยใช้เรซินในรูปโพลีวาเลนซ์ (Me^{n+} -form)

แนวคิดของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาเรซินให้อยู่ในรูปของโพลีวาเลนซ์ (Polyvalent, Me^{n+}) เพื่อให้เรซินมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างและประหยัดสารเคมีในการล้างฟื้นฟูสภาพเรซิน ซึ่งคาดว่าเรซินที่อยู่ในรูปโพลีวาเลนซ์นั้นจะสามารถกำจัดน้ำกระด้างได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถประหยัดสารเคมีในการล้างฟื้นฟูสภาพเรซินและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากธาตุที่เป็นโพลีวาเลนซ์นั้นมีค่าความชอบของเรซินที่มากกว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบของน้ำกระด้าง ดังนั้นจึงสามารถแลกเปลี่ยนไอออนของน้ำกระด้างออกมาได้ง่ายกว่าการใช้ธาตุที่เป็นโมโนวาเลนซ์ จึงเหมาะสมในการนำมาใช้ฟื้นฟูสภาพของเรซินเพื่อลดการใช้สารเคมีสิ้นเปลืองและเมื่อนำเรซินที่เป็นโพลีวาเลนซ์มากำจัดน้ำกระด้างเนื่องจากน้ำกระด้างคือน้ำที่มีค่าความกระด้างอยู่ที่ $> 120 \text{ mg/L as CaCO}_3$ [15] ซึ่งถือว่ามีความเข้มข้นในระดับหนึ่ง จึงสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับธาตุที่เป็นโพลีวาเลนซ์ จากแนวคิดและทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นจึงคาดว่าเรซินในรูปโพลีวา

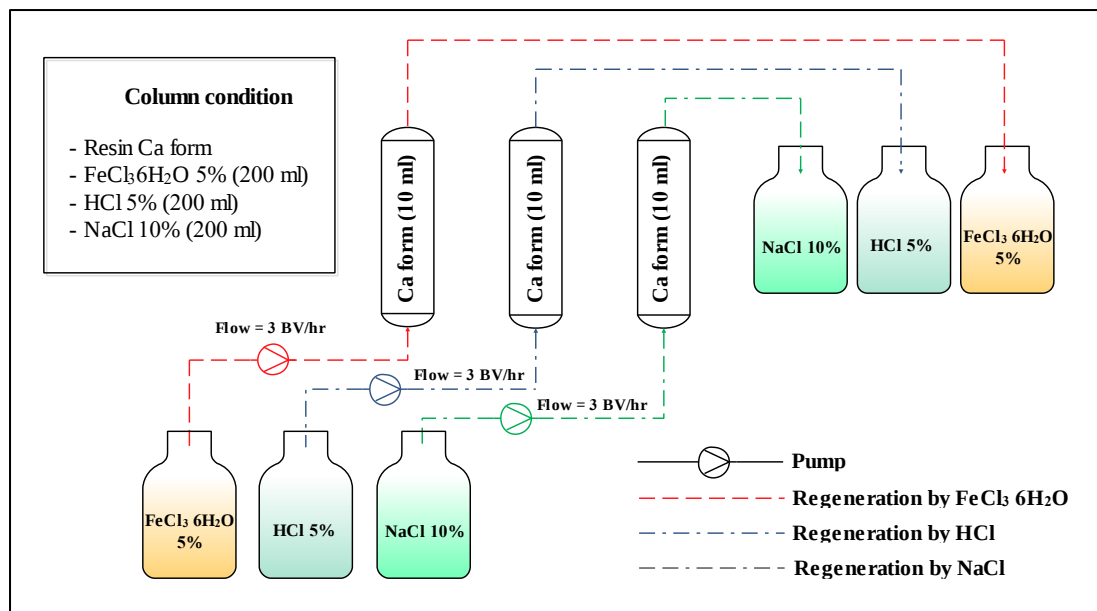
เลนซ์จะสามารถกำจัดน้ำกระด้างได้ และสามารถประหยัดสารเคมีในการฟื้นฟูสภาพมากกว่าการใช้เรซินในโซเดียม (Na-form) หรือไฮโดรเจน (H^+) ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยสารล้างฟื้นฟูสภาพเรซิน 3 ชนิด คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ไฮโดรคลอริก (HCl) และเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำกระด้างของเรซินในรูปเหล็ก (Fe-form) อลูมิเนียม (Al-form) และเซอร์โคเนียม (Zr-form)

1. รูปแบบการศึกษาวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) โดยนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange resin) ทดสอบใช้รูปแบบในการเดินระบบกำจัดน้ำกระด้าง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเรซินในรูปโพสิวาเลนซ์ และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพต่อปริมาณการใช้สารเคมีในการฟื้นฟูสภาพ ระหว่างเรซินในรูปโมโนวาเลนซ์ และเรซินในรูปโพสิวาเลนซ์ เพื่อนำไปสู่การประหยัดสารเคมีที่ใช้และลดการเกิดของเสียที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการล้างฟื้นฟูสภาพและการเพิ่มประสิทธิภาพของเรซิน

2. ศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเรซิน

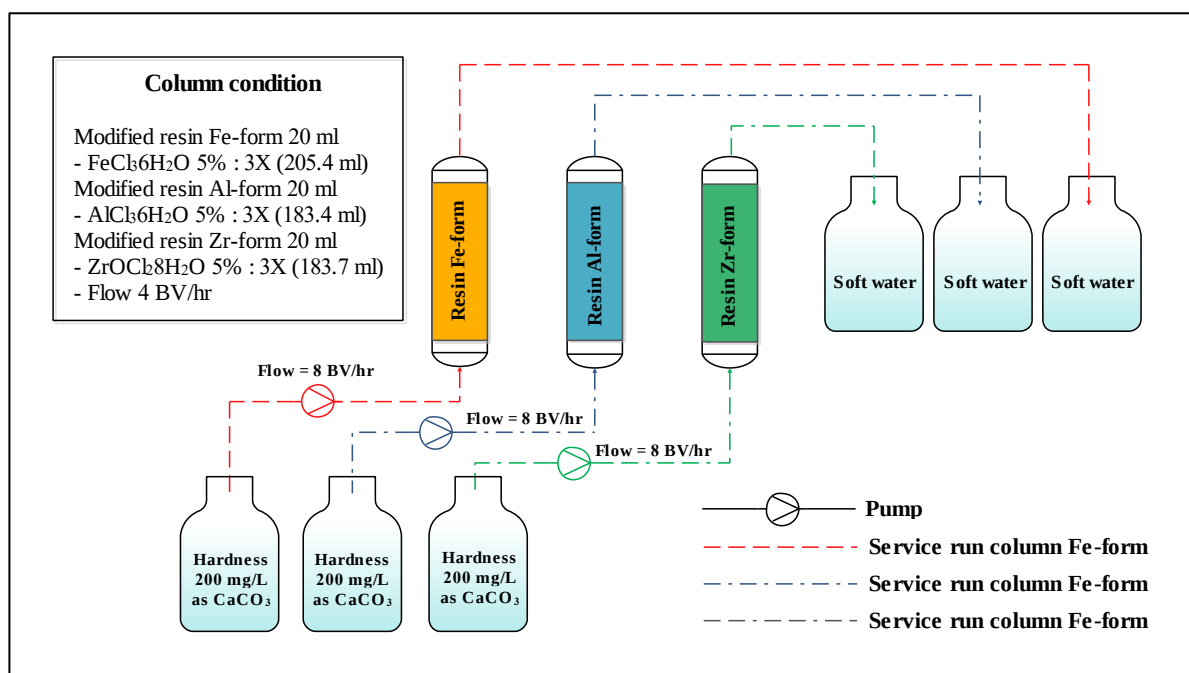
การศึกษาศักยภาพในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration efficiency) ของเรซิน ด้วยสารฟื้นฟูสภาพที่เป็นโมโนวาเลนซ์และโพสิวาเลนซ์ ทำการทดลองโดยใช้เรซินหลังผ่านการกำจัดน้ำกระด้างแล้ว นำมาบรรจุลงในคอลัมน์ 3 คอลัมน์ คอลัมน์ละ 10 ml หลังจากนั้นจะทำการฟื้นฟูสภาพเรซินโดยใช้สารล้างฟื้นฟูสภาพ 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ไฮโดรคลอริก (HCl) และเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) เพื่อดูประสิทธิภาพของสารแต่ละชนิดในการฟื้นฟูสภาพของเรซิน ซึ่งการใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) นั้นถือเป็นการฟื้นฟูสภาพของเรซินแบบปกติที่ใช้กันในปัจจุบัน หรือสามารถบอกได้ว่าเป็นการฟื้นฟูสภาพโดยใช้ธาตุโมโนวาเลนซ์ ส่วนการฟื้นฟูสภาพโดยใช้สารละลายเหล็กหรือเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) นั้นเป็นตัวแทนการฟื้นฟูสภาพที่เป็นธาตุโพสิวาเลนซ์ โดยขั้นตอนการทดลองแสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการทดลองการศึกษาศักยภาพการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration efficiency) ของเรซิน

3. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำกระด้างด้วยเรซินแบบต่าง

ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำกระด้างของเรซินในโพลีวาเลนซ์ 3 ชนิด คือ เรซินในรูปเหล็ก (Fe-form) อลูมิเนียม (Al-form) และเซอร์โคเนียม (Zr-form) และเพื่อเป็นการยืนยันว่า เรซินในรูปโพลีวาเลนซ์ (Polyvalent : Me^{n+}) มีประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการนำมาใช้กำจัดน้ำกระด้าง โดยการทดลองจะใช้เรซินในรูปโพลีวาเลนซ์ 3 ชนิด คือ เหล็ก (Fe^{3+}) อลูมิเนียม (Al^{3+}) และเซอร์โคเนียม (Zr^{4+}) มากำจัดน้ำกระด้าง วิธีการทดลองจะใช้เรซิน SSTC65 ที่อยู่ในรูปโซเดียม (Na-form) บรรจุลงในคอลัมน์ 3 คอลัมน์ ปริมาตรเรซิน คอลัมน์ละ 20 ml หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนรูปเรซินโดยใช้ $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 5%, $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ 5% และ $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ 5% บ่มผ่านคอลัมน์ในแต่ละคอลัมน์ ด้วยอัตราการไหล 4 BV/hr (1.33 ml/min) และนำคอลัมน์ทั้ง 3 คอลัมน์ที่เปลี่ยนรูปแล้วไปกำจัดน้ำกระด้างมีค่าความกระด้าง 200 mg/L โดยใช้อัตราการไหลที่ 8 BV/hr (2.67 ml/min) ซึ่งขั้นตอนการทดลองแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการทดลองการกำจัดน้ำกระด้างโดยใช้เรซินที่อยู่ในรูปเหล็ก (Fe-form) เรซินในรูปอลูมิเนียม (Al-form) และเรซินในรูปเซอร์โคเนียม (Zr-form)

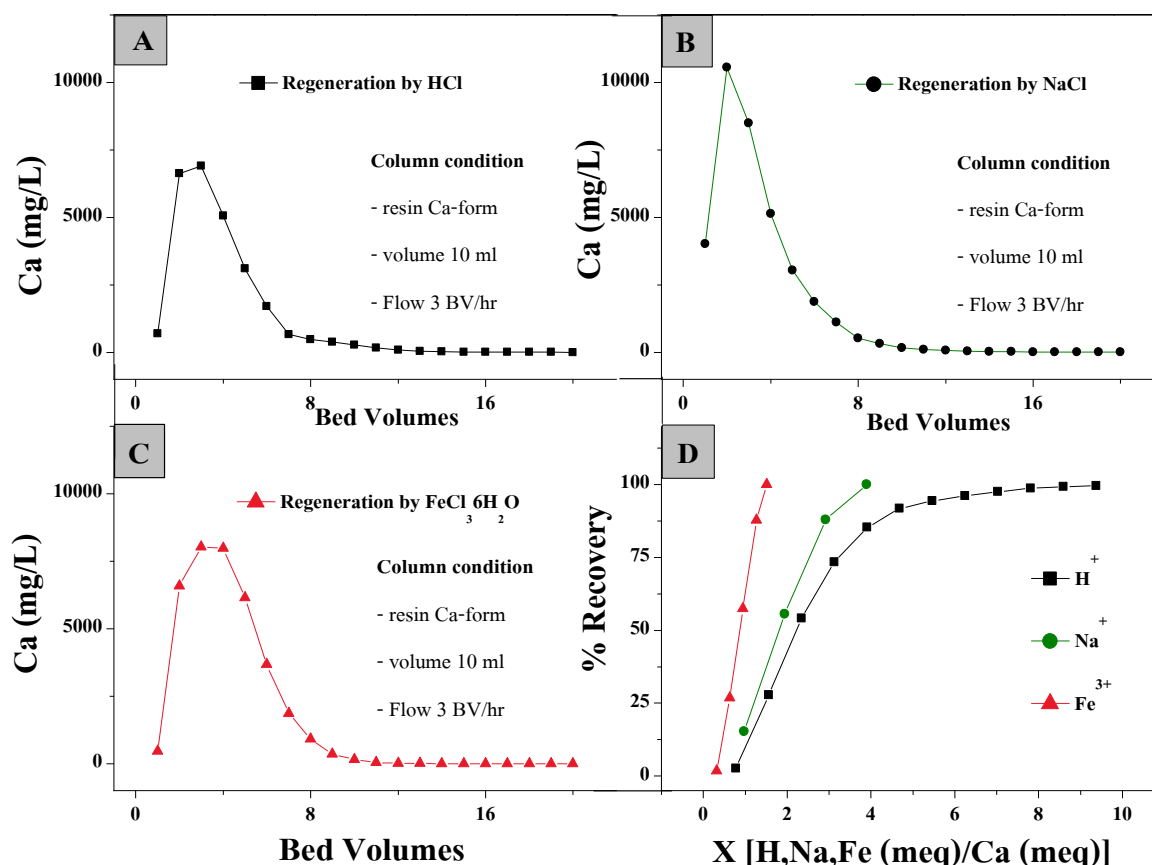
4. การศึกษาลักษณะของเรซินในรูปโพลีวาเลนซ์

1) นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์ (Scanning Electron Microscopy and X-ray Techniques, SEM and EDX)

2) นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy : XPS)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง

ศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยสารล้างฟื้นฟูสภาพเรซิน 3 ชนิด ทำการทดลองโดยใช้เรซินหลังผ่านการกำจัดน้ำกระด้างแล้ว มาฟื้นฟูสภาพเรซินโดยใช้สารล้างฟื้นฟูสภาพ 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ไฮโดรคลอริก (HCl) และเฟอร์ริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เพื่อดูประสิทธิภาพของสารแต่ละชนิดในการฟื้นฟูสภาพของเรซิน



ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยสารล้างฟื้นฟูสภาพเรซิน 3 ชนิด A ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) B ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยไฮโดรคลอริก (HCl) C ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และ D สัดส่วนของปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อประสิทธิภาพฟื้นฟูสภาพเรซิน

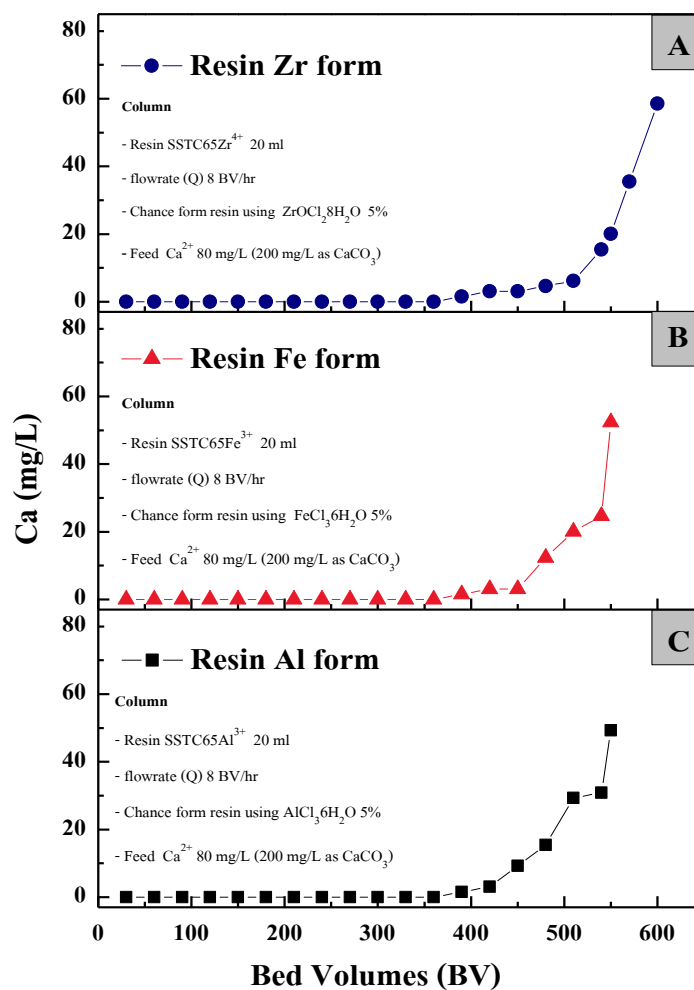
จากการทดลองการหาปริมาณแคลเซียมที่ออกมาจากการใช้สารเคมี 3 ชนิด คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ไฮโดรคลอริก (HCl) และเฟอร์ริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งผลการทดลองนั้นแสดงดังกราฟในภาพที่ 6 (A-C) แสดงปริมาณแคลเซียมที่ออกมาจากเรซินต่อปริมาณสารฟื้นฟูสภาพเรซิน (Bed Volumes : BV) จากผลการทดลองแสดงในภาพที่ 6 (A) แสดงปริมาณแคลเซียมที่ออกมาจากเรซินโดยใช้ไฮโดรคลอริก (HCl) ภาพที่ 6 (B) แสดงปริมาณแคลเซียมที่ออกมาจากเรซินโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ภาพที่ 6 (C) แสดงปริมาณแคลเซียมที่ออกมาจากเรซินโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) โดยผลการทดลองนี้จะนำค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้สารฟื้นฟูสภาพและประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพ ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$\% \text{Ca}^{2+} \text{ recovery} = \frac{\text{แคลเซียมที่ออกมาพร้อมกับสารฟื้นฟูสภาพ}}{\text{แคลเซียมที่เรซินกักได้}} \times 100$$

ซึ่งจากผลการทดลองการหาปริมาณแคลเซียมที่ออกมาจากเรซินนั้นจะนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของเรซิน หรือเรียกว่าการหา % Recovery ดังภาพที่ 6 (D) ที่แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารฟื้นฟูสภาพคือ X ซึ่งหมายถึงจำนวนเท่าของความจุเรซิน (maximum capacity of resin) ค่า X ได้จากการหาสัดส่วนระหว่างปริมาณแคลเซียมที่ออกมาจากเรซินต่อปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซิน และประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเรซิน (% Recovery) จากกราฟพบว่าในการฟื้นฟูสภาพเรซินให้ได้ประสิทธิภาพ 100% จะต้องใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ประมาณ 9.5X ส่วนการใช้เกลือ (NaCl) จะต้องใช้ประมาณ 3.8X ซึ่งกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และเกลือ (NaCl) นั้นมีประจุเป็นโมโนวาเลนซ์ และจากผลการทดลองของการใช้สารล้างฟื้นฟูสภาพเรซินที่เป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) นั้นสามารถฟื้นฟูสภาพเรซินที่ 100% โดยใช้สารเคมีเพียงประมาณ 1.5X ซึ่งเห็นได้ว่า การใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นธาตุประจุโพลีวาเลนซ์ ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานว่าธาตุที่มีประจุ 1 บวก ($1+$) นั้นมีค่าความชอบของเรซิน (Selectivity of resin) น้อยกว่าธาตุที่มีประจุสูงหรือที่เป็นโพลีวาเลนซ์ ดังนั้นจึงใช้สารเคมีน้อยกว่าธาตุที่เป็นประจุโมโนวาเลนซ์ ดังแสดงในส่วนบทนำ (ตารางที่ 2) ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าการใช้สารเคมีที่อยู่ในรูปของโพลีวาเลนซ์นั้นใช้น้อยกว่าสารเคมีที่เป็นโมโนวาเลนซ์ อย่างเช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และเกลือ (NaCl)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกักน้ำกระด้างของเรซินในรูปเหล็ก (Fe-form) เรซินในรูปอลูมิเนียม (Al-form) และเรซินในรูปเซอร์โคเนียม (Zr-form)

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยสารล้างฟื้นฟูสภาพเรซินที่เป็นธาตุโมโนวาเลนซ์ที่ใช้ในงานในปัจจุบันและธาตุโพลีวาเลนซ์นั้น พบว่าธาตุโพลีวาเลนซ์นั้นมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเรซินได้ดีในปริมาณสารเคมีที่น้อยกว่าธาตุโมโนวาเลนซ์ ซึ่งจากการทดลองได้ใช้สารละลายเหล็ก หรือเฟอร์ริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ในการฟื้นฟูสภาพ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อดูประสิทธิภาพในการนำเรซินในรูปโพลีวาเลนซ์มา กักน้ำกระด้าง โดยทดลองกับเรซินในรูปโพลีวาเลนซ์ตัวอื่น นั่นคือ อลูมิเนียม (Al^{3+}) และเซอร์โคเนียม (Zr^{4+}) ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 7

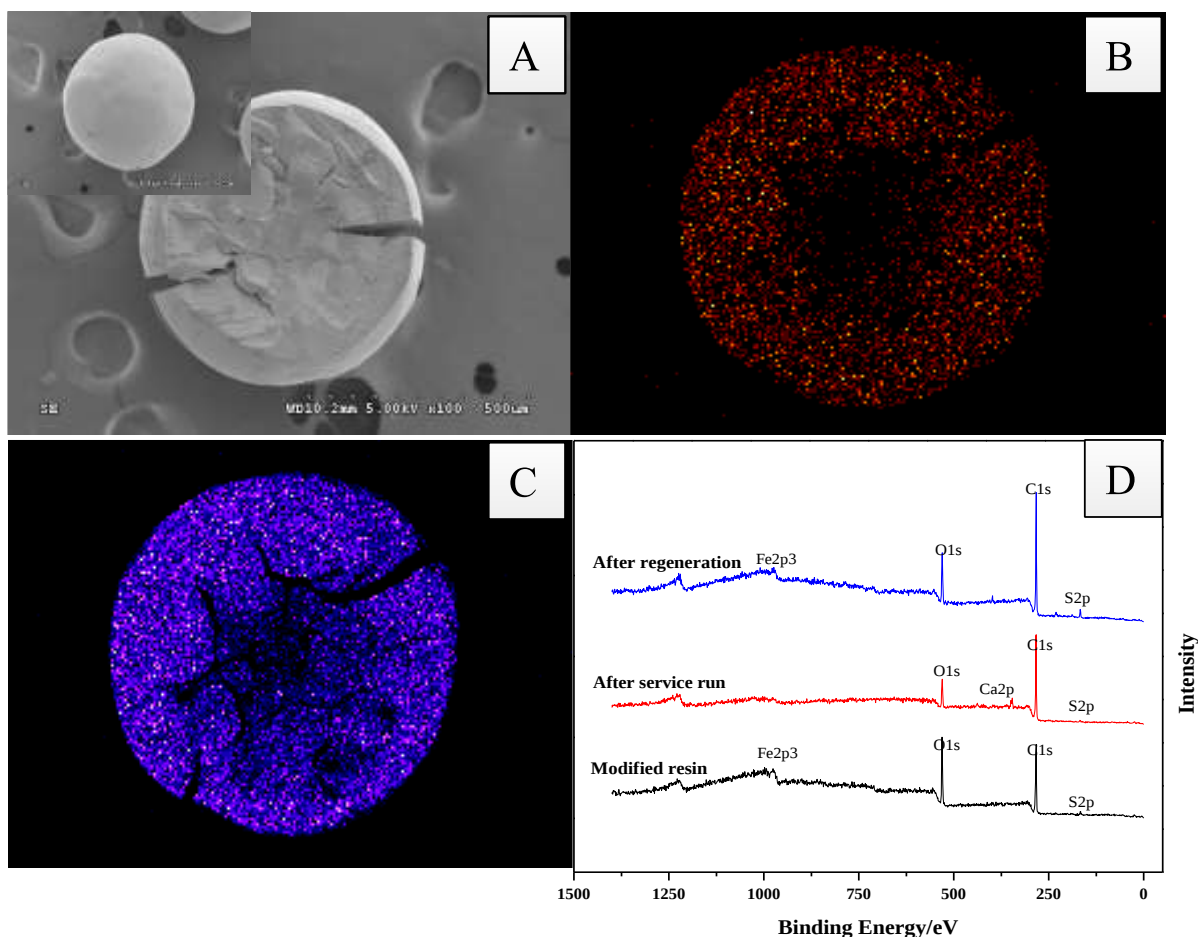


ภาพที่ 7 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดน้ำกระด้างโดยใช้เรซินในรูปโพลีวาเลนซ์ 3 ชนิด A คือเรซินในรูปเซอร์โครเนียม (Zr^{4+}) B คือเรซินในรูปเหล็ก (Fe^{3+}) และ C คือเรซินในรูปอลูมิเนียม (Al^{3+})

ผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำกระด้างของเรซินที่อยู่ในรูปเหล็ก (Fe^{3+}), อลูมิเนียม (Al^{3+}) และเซอร์โครเนียม (Zr^{4+}) ดังแสดงในภาพที่ 7 เรซินที่อยู่ในรูปของโพลีวาเลนซ์ทุกตัวนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างได้ดี เรซินที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างดีที่สุด คือ เรซินที่อยู่ในรูปของเซอร์โครเนียม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างประมาณ 510 BV (BV : เท่าของปริมาตรเรซิน) แสดงดังภาพที่ 7 (A) รองลงมาคือเรซินในรูปเหล็ก สามารถกำจัดน้ำกระด้างได้ประมาณ 450 BV แสดงดังภาพที่ 7 (B) และเรซินที่อยู่ในรูปของอลูมิเนียมมีประสิทธิภาพต่ำสุด คือมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างประมาณ 420 BV แสดงดังภาพที่ 7 (C) โดยเมื่อคิดเป็นค่าความสามารถในการกำจัดน้ำกระด้าง หรือความจุของเรซินแล้ว เรซินในรูปของเซอร์โครเนียม (Zr-form) มีความจุสูงสุดอยู่ที่ 2.04 eq/L ส่วนเรซินในรูปของเหล็ก (Fe-form) มีความจุสูงสุดอยู่ที่ 1.8 eq/L และเรซินในรูปอลูมิเนียม (Al-form) 1.68 eq/L จึงเป็นการยืนยันว่าเรซินในรูปของโพลีวาเลนซ์นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างที่ดี และสามารถนำมาใช้ในการกำจัดน้ำกระด้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าทั้ง 3 ชนิดนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างค่อนข้างใกล้เคียงกันและเรซินทั้ง 3 ชนิด ซึ่งในการนำมาใช้งานจริงนั้นถึงแม้เรซินที่อยู่ในรูปเซอร์โครเนียมนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างดีที่สุด แต่เนื่องจากมีราคาแพงและหาซื้อตามท้องตลาดได้ยาก จึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ ส่วนเรซินที่อยู่ในรูปของอลูมิเนียมและเหล็กนั้นมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน แต่เหล็กมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าและปลอดภัยกว่าเรซินที่อยู่ใน

รูปอลูมิเนียม ดังนั้นการใช้เรซินในรูปเหล็ก (Fe-form) นั้นจะมีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในงานกำจัดน้ำกระด้างได้ดี หาซื้อได้ง่ายราคาถูกและมีความเป็นอันตรายน้อยที่สุด และสารฟื้นฟูสภาพยังสามารถกำจัดได้ง่ายโดยการปรับพีเอช (pH) เพื่อตกตะกอนเหล็ก

การศึกษาคุณลักษณะของเรซินในรูปโพลีวาเลนซ์



ภาพที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์จากเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์ (Scanning Electron Microscopy and X-ray Techniques, SEM and EDX) และเทคนิคสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy : XPS)

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์ (Scanning Electron Microscopy and X-ray Techniques, SEM and EDX) จากวัสดุที่นำไปกำจัดน้ำกระด้าง พบว่าภาพที่ 8 (A) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งแบบส่องกราด เห็นได้ว่าพื้นผิวของเรซินนั้นมีลักษณะที่เรียบ และไม่มีรูพรุน (ภาพเล็ก) และลักษณะของวัสดุแบบผ่าครีง (ภาพใหญ่) จากรูปเห็นว่าวัสดุมีลักษณะแตกเนื่องจากการนำตัวอย่างไปอบก่อนจะนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ ภาพที่ 8 (B-C) แสดงภาพเรซินที่วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในเรซิน จากผลการวิเคราะห์พบว่าเรซินที่ผ่านการกำจัดน้ำกระด้างนั้นมีเหล็กแสดงดังภาพที่ 8 (B) และแคลเซียมแสดงดังภาพที่ 8 (C) ซึ่งเห็น

ได้ว่าเรซินที่นำไปกำจัดน้ำกระด้างนั้นพบทั้งธาตุเหล็กและแคลเซียม ตามทฤษฎีของการแลกเปลี่ยนไอออนนั้นควรจะพบเพียงธาตุเดียวนั้นคือแคลเซียม ซึ่งเป็นตัวแทนของน้ำกระด้าง เนื่องจากไอออนของแคลเซียมนั้นจะไปแทนที่ไอออนของเหล็กในเรซิน แต่ที่ยังพบเหล็กนั้นเนื่องจากเหล็กที่ถูกแลกเปลี่ยนไอออนออกมาเกิดการตกตะกอนโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และเพื่อเป็นการยืนยันการเกาะจับกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันและไอออนอิสระจึงได้นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy : XPS) [14] ที่แสดงดังภาพที่ 8 (D) ผลการวิเคราะห์พบว่าเรซินหลังจากกำจัดน้ำกระด้างนั้น (After service run) ไม่พบเหล็ก พบเพียงแต่แคลเซียม ซึ่งยืนยันได้ว่าไอออนอิสระที่จับกับหมู่ฟังก์ชันนั้นเป็นไอออนของแคลเซียมไม่ใช่ไอออนของเหล็ก และเมื่อฟื้นฟูสภาพของเรซินแล้ว (After regeneration) ไม่พบไอออนของแคลเซียม จึงยืนยันประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเรซินได้ว่าสารฟื้นฟูสภาพเรซินสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับแคลเซียมและทำให้แคลเซียมนั้นหลุดออกมาจากเรซิน และไอออนของเหล็กนั้นสามารถเข้าไปจับกับหมู่ฟังก์ชันได้ดังเดิม (Modified resin)

สรุปผลการวิจัย

จากปัญหาเรื่องน้ำกระด้างที่มีผลต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆซึ่งทำให้ต้องมีระบบกำจัดน้ำกระด้างเพื่อแก้ปัญหา และปัญหาของการใช้เกลือปริมาณมากในการฟื้นฟูสภาพของสารแลกเปลี่ยนไอออนในระบบกำจัดน้ำกระด้าง และทำให้เกิดน้ำทิ้งที่มีค่าของแข็งละลายน้ำสูง (TDS) งานวิจัยนี้จึงต้องพัฒนาระบบกำจัดน้ำกระด้างขึ้นมาให้มีประสิทธิภาพและลดการเกิดการของเสียจากระบบการกำจัดน้ำกระด้าง โดยใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่อยู่ในรูปของโพลีวาเลนซ์ (Polyvalent : Me^{n+}) จากการผลการวิจัยพบว่าวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่อยู่ในรูปของโพลีวาเลนซ์ (Me^{n+}) มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างได้ ซึ่งเรซินที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดคือเรซินในรูปเซอร์โคเนียม (Zr-form) มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้าง 2.04 eq/L รองลงมาคือเหล็ก (Fe-form) มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้าง 1.8 eq/L และเรซินในรูปอลูมิเนียม (Al-form) มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้าง 1.68 eq/L โดยเรซินที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานมากที่สุดคือเหล็ก เนื่องจากมีราคาถูกหาซื้อได้ง่าย และการใช้สารฟื้นฟูสภาพเรซิน (regenerants) เพียง 1.5X เมื่อผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุนั้นพบว่าในขั้นตอนการกำจัดน้ำกระด้างนั้นเกิดการตกตะกอนของเหล็กอยู่ในเรซินโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อการจัดน้ำกระด้าง เนื่องจากเหล็กไม่ได้ตกตะกอนอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน แต่ตกตะกอนขณะที่หลุดออกจากหมู่ฟังก์ชันแล้ว ซึ่งทำให้น้ำที่ออกมานั้นจะมีปริมาณเหล็กที่ละลายอยู่น้อยมาก ทำให้สามารถนำไปใช้ในกิจกรรมต่างๆได้ เช่น ใช้เป็นน้ำหล่อเย็น หรือใช้ในหม้อต้มไอน้ำ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเรซินในรูปเหล็กนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมากำจัดน้ำกระด้าง เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำกระด้างได้สูง และประหยัดสารเคมีในการฟื้นฟูสภาพเรซิน

เอกสารอ้างอิง

1. Ahn M, Chilakala R, Han C, Thenepalli T. Removal of Hardness from Water Samples by a Carbonation Process with a Closed Pressure Reactor. *Water*. 2018;10(1):54. PubMed PMID: doi:10.3390/w10010054.
2. Forghani F, Park JH, Oh DH. Effect of water hardness on the production and microbicidal efficacy of slightly acidic electrolyzed water. *Food microbiology*. 2015 Jun;48:28-34. PubMed PMID: 25790988.
3. Johan Schaep BVdB, Steven Uytterhoeven, Raf Croux, Carlo Vandecasteele, Dirk Wilms, Emmanuel Van Houtte, Frans Vanlerberghe. Removal of hardness from groundwater by nanofiltration. *Desalination*. 1998.



4. Ali W, Zehra DA, Ali Z, Naqvi B. Plant Science Journal Effect of salinization and alkalization on seed germination and early seedling growth of leguminous species *Vigna mungo* L2017. 1-11 p.
5. Limaporn N. Development of water softening process using cation exchange resin operated in ferric (Fe^{3+}) form [MSc thesis]: Khon Kaen University; 2016. Thai.
6. Edzwald JK. water quality treatment a hand book on drinking water. Edition S, editor2011.
7. A New Family of resin [Internet] 2008 [updated MAR 27, 2008; cited 2019 Feb 20] Available from: <https://www.wqpmag.com/new-family-resins>.
8. Mackenzie L, Davis PD, BCEE PE. water and wastewater engineering design principles and practice2010.
9. Smith RC, SenGupta AK. Integrating tunable anion exchange with reverse osmosis for enhanced recovery during inland brackish water desalination. Environmental science & technology. 2015 May 5;49(9):5637-44. PubMed PMID: 25839209.
10. Smith RC, SenGupta AK. Mixed Anion Exchange Resins for Tunable Control of Sulfate–Chloride Selectivity for Sustainable Membrane Pretreatment. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2016 2016/01/27;55(3):647-655.
11. Prasannam P. Removal of heavy metal from solution by using hydroxyethyl cellulose ion exchange [MSc thesis]: Silpakorn University; 2004. Thai.
12. Purolite water softening resin guide. [Internet] 2007. Available from: http://www.purolite.com/releid/606346/isvars/default/customized/uploads/pdfs/appnotes_watersofteningbasics_9_20_07_js_blend.pdf.
13. Yu Z, Qi T, Qu J, Wang L, Chu J. Removal of Ca(II) and Mg(II) from potassium chromate solution on Amberlite IRC 748 synthetic resin by ion exchange. Journal of hazardous materials. 2009 2009/08/15;167(1):406-412.
14. Li J, Koner S, German M, SenGupta AK. Aluminum–Cycle Ion Exchange Process for Hardness Removal: A New Approach for Sustainable Softening. Environmental science & technology. 2016 Nov 01;50(21):11943-11950. PubMed PMID: 27696832.
15. Organization WH. Hardness in Drinking-water Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. 2011.