

การประยุกต์ใช้วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนเหล็ก ออกไซด์สำหรับกำจัดไนเตรตและฟอสเฟตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน

Applications of Hybrid Anion Exchanger containing Hydrated Fe(III) Oxide Nanoparticles for Simultaneous Nitrate and Phosphate Removal in a Recirculating Aquaculture System

ศิริกัลยา พิลานูตร (Sirikanlaya Pilabut)^{1*} ดร.สุรพล ผดุงทน (Dr.Surapol Padungthon)**

(Received: May 14, 2021; Revised: July 20, 2021; Accepted: July 20, 2021)

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีไบโอฟล็อกเป็นระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากปล่อยน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อย แต่ยังมี การเปลี่ยนถ่ายน้ำออกทุกสัปดาห์อย่างน้อย 20 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำทั้งหมด เพื่อควบคุมตะกอนฟล็อกและของเสียที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนเหล็ก (HA520E-Fe) นำมาใช้ในการกำจัดไนเตรตและฟอสเฟตในระบบไบโอฟล็อก ส่งผลให้มีการปล่อยของเสียเป็นศูนย์จากระบบไบโอฟล็อก วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนเฟอร์ริกออกไซด์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มี 2 หมู่ฟังก์ชัน คือ ควอเตอร์นารีแอมโมเนียม สามารถกำจัดไนเตรตและอนุภาคนาโนเฟอร์ริกออกไซด์สามารถกำจัดฟอสเฟต จากการทดสอบด้วยวิธีคอลัมน์ (column run) ของเรซิน HA520E-Fe พบว่า สามารถกำจัดไนเตรตได้ 47.27 มิลลิกรัมต่อกรัม เรซิน คิดเป็นความสามารถ 98.67 เปอร์เซ็นต์ และสามารถกำจัดฟอสเฟตได้ 45 มิลลิกรัมต่อกรัม เรซิน คิดเป็นความสามารถ 79.96 เปอร์เซ็นต์ และยังสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้อีกด้วย วัสดุทั้งหมดสภาพแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายรอบโดยใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 10 เท่าของปริมาณวัสดุดูดซับ (Bed Volumes: BVs) เป็นสารฟื้นฟูประสิทธิภาพของไนเตรตและฟอสเฟตมีประสิทธิภาพสูงที่ 93.72 เปอร์เซ็นต์และ 99.61 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สารฟื้นฟูประสิทธิภาพที่ได้ ประกอบด้วย Mg^{2+} , NO_3^- , K^+ และ PO_4^{3-} ซึ่งเป็นธาตุอาหารสำคัญสำหรับพืช สามารถนำไปพัฒนาเป็นปุ๋ยละลายช้า (Struvite) เช่น ปุ๋ยสูตร K-Struvite คือ แมกนีเซียมโพแทสเซียมฟอสเฟต (magnesium potassium phosphate : MPP) และปุ๋ยสูตร NH_4 -Struvite คือ แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (magnesium ammonium phosphate : MAP)

ABSTRACT

Biofloc technology (BFT) is environmentally friendly aquaculture technology due to the reduction of wastewater discharge. However, to control the Biofloc concentration, there is still considering amount of wastewater being discharged typically 20% per week. In this study, the hybrid polymeric anion exchanger impregnated with hydrated Fe(III) oxide (HFO) nanoparticles, HA520E-Fe, was used for removal of nitrate and phosphate in a Biofloc system, resulting zero waste discharge (ZLD) for the BFT processes. HA520E-Fe contains two functional groups; quaternary ammonium (R_4N^+) selective for nitrate removal and HFO specifically adsorbed trace phosphate. The fixed-bed column run shows that the HA520E-Fe has

¹Corresponding author: Sirikanlaya_Pilabut@kkumail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

a high nitrate and phosphate removal capacity approximately $47.27 \text{ mgNO}_3^-/\text{g}$ and $45 \text{ mgPO}_4^{3-}/\text{g}$, respectively. Moreover, the HA520E-Fe can also partially remove organic matter. The exhausted material can be reused for many cycles by using mixed regenerant solution containing 10% w/v MgCl_2 and 5% w/v KOH solution. The high nitrate and phosphate recovery were achieved at 93.72 and 99.61 %, respectively. The regenerant solution composes of Mg^{2+} , NO_3^- , K^+ and PO_4^{3-} , which are essential nutrients for plants and can be further converted into slow-release fertilizers such as K-struvite (magnesium potassium phosphate: MPP) and NH_4 -struvite magnesium ammonium phosphate: MAP).

คำสำคัญ: การแลกเปลี่ยนไอออน ไฮดรอกไซด์ออกไซด์ ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ แอควาเรียมไบโอฟล็อก ไนเตรต ฟอสเฟต

Keywords: Ions Exchange, Hydrate Fe(III) Oxide, Aquaculture system, Advanced biofloc, Nitrate Phosphate

บทนำ

การปนเปื้อนไนโตรเจน (nitrogen : N) และฟอสฟอรัส (phosphorus : P) ในแหล่งน้ำธรรมชาติเป็นปัญหาสำคัญ เนื่องจากเป็นต้นเหตุของการเกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน (eutrophication) [1] ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำ เมื่อสารธาตุอาหารทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเข้าสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ มักถูกย่อยสลายและเปลี่ยนรูปจนสุดท้ายอยู่ในรูปของไนเตรต (nitrate: NO_3^-) และฟอสเฟต (phosphate: PO_4^{3-}) ตามลำดับ ซึ่งสาหร่ายหรือแพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ก่อให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen: DO) เพิ่มขึ้นสูงมากในเวลา กลางวัน เนื่องจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย และออกซิเจนในน้ำลดลงต่ำมากในเวลากลางคืน เนื่องจากกระบวนการหายใจเป็นผลทำให้สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำเกิดการล้มตายเพราะขาดออกซิเจน เมื่อสิ่งมีชีวิตรวมถึงสาหร่ายตายลงจะเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพเกิดการใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายส่งผลให้แหล่งน้ำเกิดการเน่าเสียและคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำเสื่อมโทรมลง โดยการปนเปื้อนของไนเตรต ทั้งในแหล่งน้ำทั้งผิวดินและน้ำใต้ดินเป็นที่น่ากังวลต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งการปนเปื้อนนี้นั้นมีสาเหตุมาจากหลายแหล่งด้วยกัน เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การชะล้างหน้าดินจากการทำเกษตร การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ หรือจากจุดทิ้งขยะ เป็นต้น [1] และเมื่อไนเตรตเข้าไปสู่ร่างกายของมนุษย์มักเปลี่ยนรูปเป็นไนไตรท์ (nitrite : NO_2^-) ไปทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออน (ferrous : Fe^{2+}) ที่อยู่ในเม็ดเลือดทำให้กระบวนการลำเลียงออกซิเจนในกระแสเลือดติดขัดนำไปสู่การเกิดโรคทารกเขียว (blue baby syndrome) หรือทางการแพทย์เรียกว่า ภาวะเมธฮีโมโกลบินนีเมีย (methemoglobinemia) พบได้ในเด็กทารกที่มีอายุต่ำกว่า 6 เดือน ซึ่งอาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ นอกจากนี้ไนเตรตเป็นส่วนหนึ่งของสาเหตุการเกิดมะเร็งในลำไส้ และส่วนต่างๆอีกด้วย [2] สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (the united states environmental protection agency : USEPA) ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มให้มีค่าไนเตรตไม่เกิน 10 มิลลิกรัมกรัมไนเตรต-ไนโตรเจนต่อลิตรและในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกำหนดให้มีค่าไนเตรตไม่เกิน 50 มิลลิกรัมกรัมไนเตรต-ไนโตรเจนต่อลิตร นอกจากนี้ธาตุอาหารที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง คือ ฟอสเฟต (phosphate : PO_4^{3-}) ที่ส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของสาหร่ายและจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงอื่น ๆ เช่น ไชยาโนแบคทีเรียที่เป็นพิษ (สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว) ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบนิเวศของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในแหล่งน้ำ [3] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดฟอสเฟตออกจากน้ำเสียก่อน เพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดขึ้นตามมา ปัจจุบันสำนักงานปกป้อง

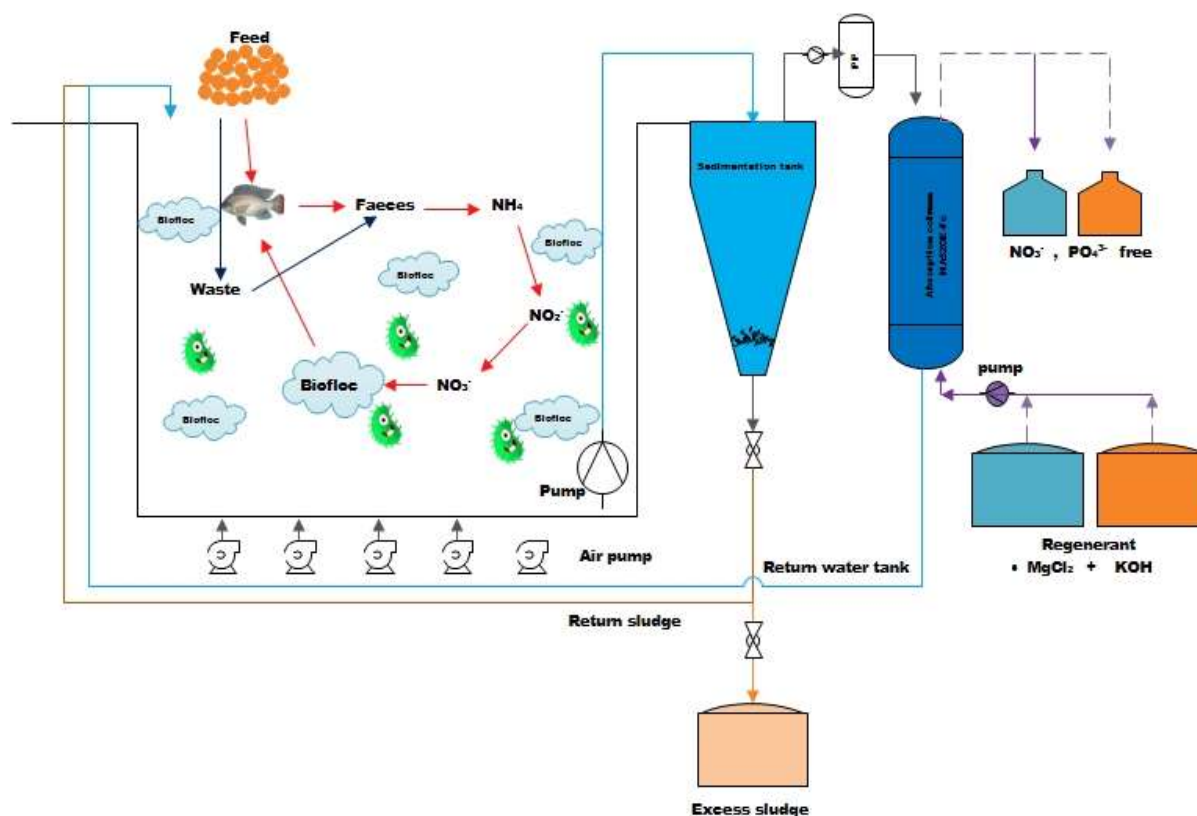
สิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา ได้มีการกำหนดค่าของฟอสเฟตที่ไม่ก่อให้เกิดการเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำคือไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสต่อลิตรและในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรเกิน 0.5 มิลลิกรัมฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสต่อลิตร [4]

อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในประเทศไทย เป็นอีกอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญ ในช่วงปี 2560 พบว่าการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในประเทศไทย มีปริมาณ 413.3 พันตัน [5] เนื่องจากความต้องการของผู้บริโภคที่มากขึ้น จึงเป็นที่มาของการเติบโตทางการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยเฉพาะการเพาะเลี้ยงปลานิลที่มีการเลี้ยงแบบฟาร์มขนาดใหญ่ และได้รับความนิยมกว่าสัตว์น้ำอื่นๆ จนมีการพัฒนาไปสู่การเลี้ยงเชิงการค้ามากขึ้นเพื่อส่งออกสู่ตลาดโลก เดิมการเพาะเลี้ยงแบบธรรมชาติ เป็นการเพาะเลี้ยงแบบบ่อดิน ซึ่งมีข้อเสีย คือใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงเป็นจำนวนมาก ต่อมาได้มีการพัฒนาไปเป็นการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียน (recirculating aquaculture system : RAS) ซึ่งสามารถผลิตสัตว์น้ำได้ปริมาณมากประหยัดพื้นที่ โดยระบบหมุนเวียนน้ำสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นกระบวนการทางชีวภาพที่ใช้ออกซิเจนโดยการไนตริฟายอิงแบคทีเรีย จะเปลี่ยนของเสียจำพวกไนโตรเจนที่เกิดจากการขับถ่ายของเสียของสัตว์น้ำ จากกระบวนการไนตริฟายอิง (Nitrifying bacteria) จะได้ไนเตรตเป็นผลผลิตสุดท้าย จึงทำให้ปริมาณไนเตรตสูงในระบบจนถึงระดับหนึ่ง (<50 มิลลิกรัมกรัมไนเตรต-ไนโตรเจนต่อลิตร) จะส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำ เช่น ก่อให้เกิดความเครียด ลดความสามารถของระบบภูมิคุ้มกัน จึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ และของเสียที่เกิดขึ้นอีกชนิดหนึ่งที่ไม่ค่อยได้รับความสนใจคือฟอสฟอรัส ที่เกิดขึ้นในระบบจากการเติมอาหารลงไปให้สัตว์น้ำกิน แต่สัตว์น้ำกินไม่หมด การสะสมฟอสฟอรัสที่มากจากการป้อนอาหารและทางขับของเสีย [4] ปัจจุบันเริ่มมีการพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมาเป็นระบบไบโอฟล็อก (biofloc) ซึ่งเป็นที่นิยมมาก โดยเป็นการบำบัดแอมโมเนียในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในระบบ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรต โดยไบโอฟล็อกที่เกิดจากการกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในน้ำ และเติมสารอินทรีย์คาร์บอน ให้อากาศอย่างเพียงพอ จะทำให้แบคทีเรียจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว สามารถตรึงแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์เพื่อนำไปสร้างโปรตีนต่อไป เมื่อแบคทีเรียในน้ำเพิ่มปริมาณมากขึ้น จะรวมกันเป็นกลุ่มตะกอนชีวภาพขนาดใหญ่เรียกว่า ตะกอนไบโอฟล็อก โดยปกติตะกอนไบโอฟล็อกไม่ควรเกิน 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นสัตว์น้ำสามารถบริโภคเป็นอาหารได้ จึงสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านอาหาร ในระบบไบโอฟล็อกควรมีค่าออกซิเจนที่และอยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากมีการนำไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรีย แต่ถึงยังต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำทุกอาทิตย์ เพื่อป้องกันการปนเปื้อน ไนเตรต และฟอสเฟตที่สะสมในระบบ ดังนั้นควรมีเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำก่อนทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อม

เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การบำบัดทางชีวภาพ เช่น การใช้ตัวจุลินทรีย์ร่วมกับกระบวนการเกิดไนตริฟิเคชัน (nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) เป็นวิธีการที่อาศัยจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย ข้อเสียของระบบนี้คือ ใช้ระยะเวลาในการบำบัดนาน หรืออาจมีประสิทธิภาพต่ำ [6] และการบำบัดน้ำเสียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอีกทางหนึ่งคือการปลูกพืชร่วมด้วยหรือไฮโดรโปนิคส์ ซึ่งพืชจะดูดซึมสารอาหารในน้ำเสีย ข้อเสียของระบบนี้จะก่อให้เกิดการสะสมสารพิษในห่วงโซ่อาหารมาสู่คนได้ ส่วนฟอสฟอรัสจะใช้การบำบัดด้วยการตกตะกอน [7] โดยใช้เกลือเหล็กและเกลืออลูมิเนียม ซึ่งก่อให้เกิดตะกอนในระบบจำนวนมากทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอน และเทคโนโลยีหนึ่งที่มีความคุ้มค่าเหมาะสำหรับการกำจัดสารละลายในน้ำ โดยเฉพาะสารที่มีความเข้มข้นต่ำโดยวัสดุดูดซับ (sorbent) ร่วมกับระบบคอลัมน์ (fixed-bed column) ซึ่งมีความง่ายต่อการเดินระบบ ทำให้สามารถนำไปใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียทั้งระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กและ

ขนาดใหญ่ และมีความสามารถกำจัดสารเกือบหมดไป (Near-zero effluent) ดังนั้นวัสดุดูดซับที่เลือกใช้จึงควรมีประสิทธิภาพสูง สามารถใช้ซ้ำได้ และสารที่กำจัดได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการกำจัดของเสีย

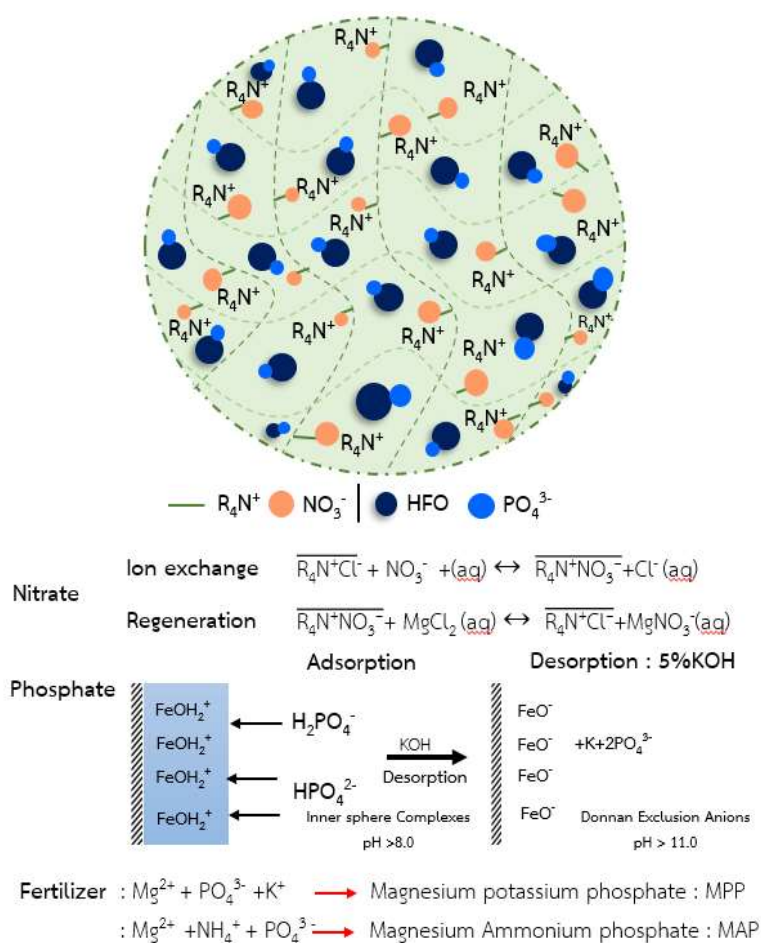
จากแนวคิดเรื่องการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระบบไบโอฟล็อกและการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบคอลัมน์ (fixed-bed column) จึงได้นำแนวคิดนี้มาใช้ในการศึกษาพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบใหม่ มีชื่อว่า ระบบแอดวานซ์ไบโอฟล็อก (advanced biofloc) เป็นการเพาะเลี้ยงที่ใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์จำพวกไนโตรเจนในระบบ โดยเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่มากกว่าเดิม (10-40 มิลลิกรัมต่อลิตร) เป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้แหล่งคาร์บอนเป็นน้ำตาล เมื่อมีการสะสมไนเตรตในระบบถึงประมาณ 100 มิลลิกรัมกรัมไนเตรต-ไนโตรเจนต่อลิตร ระบบจะทำการดึงน้ำจากระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมาไว้ในถังพักตกตะกอนจุลินทรีย์ แล้วเวียนตะกอนกลับไปยังระบบเพาะเลี้ยงน้ำ น้ำใสที่เหลือนำไปกำจัดไนเตรตและฟอสเฟตอยู่ในระบบคอลัมน์ (Fixed-bed column) โดยใช้วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ ที่สามารถกำจัดไนเตรตและฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ[8] น้ำที่ได้รับการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตแล้วจะทำการหมุนเวียนมายังระบบการเพาะเลี้ยงอีกครั้ง รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดสำหรับระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระบบไบโอฟล็อกแบบขั้นสูง (Advanced Biofloc)

โดยวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบมีความจำเพาะต่อไนเตรต (anion exchange resin: A520E) นำมาเพิ่มความสามารถด้วยการใส่อนุภาคของนาโนของเฟอร์ริกออกไซด์ (hydrated ferric oxide: HFO) เข้าไปเพื่อเพิ่มความสามารถกำจัด

ฟอสเฟตได้ในวัสดุชนิดเดียวกัน ทำให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่เป็นวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบอนุภาคนาโนเฟอร์ริกออกไซด์ (hybrid anion exchange resin containing hydrous ferric oxide: HA520E-Fe) วัสดุที่ได้นี้จะมี 2 หมู่ฟังก์ชัน (dual functional groups) นั่นคือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium) สามารถกำจัดไนเตรตด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน (anion exchange) และอนุภาคนาโนเฟอร์ริกออกไซด์ (hydrate ferric oxide: HFO) ที่สามารถกำจัดฟอสเฟตด้วยการดูดซับ (adsorption) (ภาพที่ 2) ซึ่งวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนเฟอร์ริกออกไซด์ ที่นำมากำจัดไนเตรตและฟอสเฟตจะสามารถนำมาใช้ใหม่ได้โดยทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพ โดยมีสารที่ฟื้นฟูประสิทธิภาพวัสดุคือ แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)



ภาพที่ 2 วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนเฟอร์ริกออกไซด์ (hybrid anion exchanger containing triethylamine functional groups and hydrated Fe(III) oxide nanoparticles :HA520E-Fe)

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนเฟอร์ริกออกไซด์ (Hybrid anion exchanger containing triethylamine functional groups and hydrated Fe(III) oxide nanoparticles :HA520E-Fe)

2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรดและฟอสเฟตในน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิดและประสิทธิภาพการฟื้นฟูประสิทธิภาพของวัสดุ HA520E-Fe เพื่อบำบัดน้ำเสียจากระบบแคววนซ์ไบโอฟล็อก

วิธีการวิจัย

1. นำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

น้ำเสียที่นำมาทำการทดลอง ได้จากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบระบบไบโอฟล็อกแบบขั้นสูง (advanced biofloc) โดยในระบบการเพาะเลี้ยงมีปริมาตรน้ำบรรจุ 400 ลิตร ทำการติดตั้งหัวทราย และระบบจะทำการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ไบโอรีด็อกซ์ (Bio-redox) ทุกสัปดาห์ และเติมแหล่งคาร์บอน (น้ำตาล) ทุกวัน พร้อมทั้งให้ออกซิเจนตลอดเวลาอย่างเพียงพอ จากนั้นนำปลานิลที่พักน้ำไว้แล้วปล่อยลงในบ่อทั้งหมด 28 ตัว (ที่ความหนาแน่น 70 ตัวต่อลูกบาศก์เมตร) ให้อาหารสำเร็จรูป (เปอร์เซ็นต์โปรตีน 30 เปอร์เซ็นต์) ตามน้ำหนักของปลานิล ปริมาณอาหารทุกวัน 15 วัน ก่อนเริ่มทำการทดลองจะสุ่มนับและชั่งน้ำหนักปลาเริ่มต้น โดยมีการตรวจสอบวัดอัตราการเจริญเติบโตทุกๆ 15 วัน และทำการตรวจสอบคุณภาพน้ำในบ่อเบื้องต้น ได้แก่ อุณหภูมิ, DO, pH, VS_{30} , NH_4 , NO_3^- , PO_4^{3-} เป็นต้น ควบคุมปริมาณฟล็อกในระบบให้มีความเข้มข้นของตะกอนฟล็อกที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยน้ำเสียที่เกิดขึ้นที่นำมาทำการทดลองจะดูที่ความเข้มข้นของปริมาณไนเตรดและฟอสเฟตที่สะสมในระบบ เมื่อมีปริมาณของไนเตรดสูงถึงประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำการดึงน้ำเสียออกจากระบบ 50 เปอร์เซ็นต์ เพื่อนำไปทดสอบการกำจัดไนเตรดและฟอสเฟตด้วยวิธีคอลัมน์ ในขั้นตอนต่อไป

2 การสังเคราะห์วัสดุ

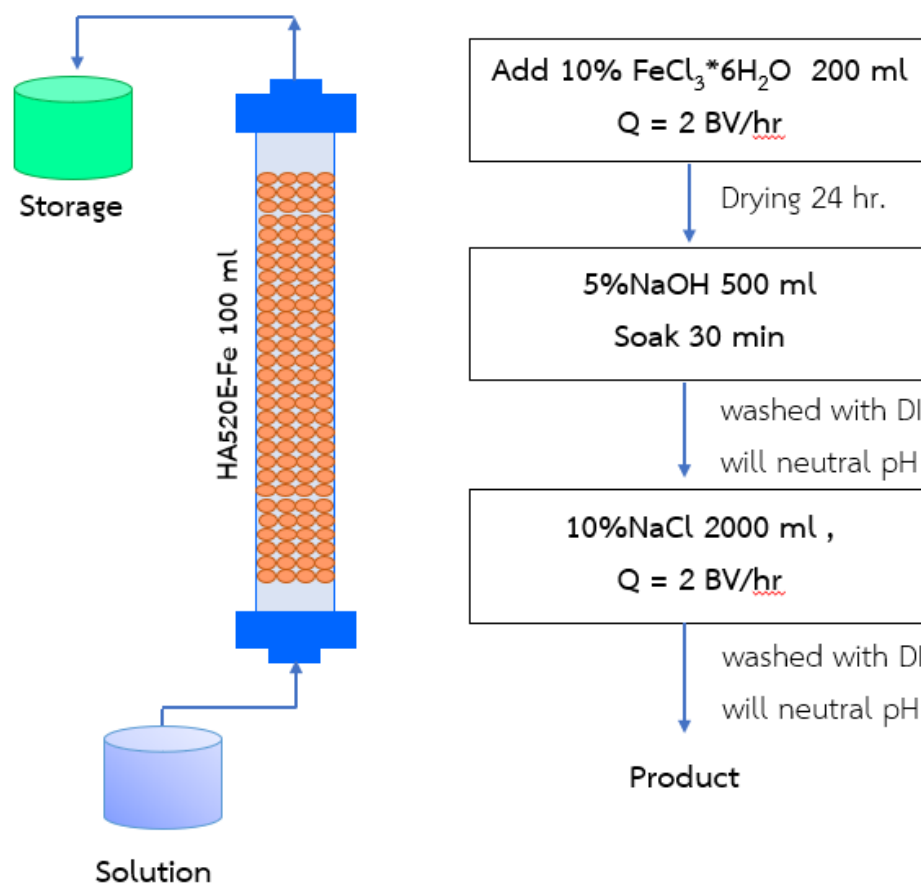
การสังเคราะห์วัสดุดูดซับพันธุ์ผสมระหว่างวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนของเฟอร์ริกออกไซด์ (Hybrid anion exchange resin containing hydrous ferric oxide: HA520E-Fe) โดยเป็นการสังเคราะห์ขึ้นจากวัสดุตัวกลาง A520E ที่ใช้สารละลายเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ดังภาพที่ 3 และสามารถอธิบายขั้นตอนการสังเคราะห์ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : การเพิ่มเหล็กลงในวัสดุ เตรียมสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ละลายในเอทานอล ปริมาตร 200 มิลลิตร (อัตราส่วนเรซิน : สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ เท่ากับ 1:2) จากนั้นนำมาสัมผัสกับวัสดุตัวกลาง(A520E) ปริมาตร 100 มิลลิตร ด้วยวิธีคอลัมน์ โดยที่เวลาสัมผัสในคอลัมน์ (Empty bed contact time: EBCT) เท่ากับ 3 นาที และอัตราการไหลของน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (Superficial Liquid Velocity: SLV) เท่ากับ 0.314 เมตรต่อชั่วโมง จากนั้นนำไปตากให้แห้ง เป็นเวลา 1 วัน

ขั้นตอนที่ 2 : การตกตะกอนเหล็ก เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ในน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized Water) ปริมาตร 500 มิลลิตร (อัตราส่วนเรซิน : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:5) และนำวัสดุตัวกลางมาแช่ตั้งทิ้งไว้ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำวัสดุตัวกลางมาล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน จนน้ำที่ออกมาจากการล้าง มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of Hydrogen ion : pH) ที่เป็นกลาง

ขั้นตอนที่ 3 : การคืนสภาพวัสดุ เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 2,000 มิลลิตร (อัตราส่วนเรซิน : สารละลายโซเดียมคลอไรด์ เท่ากับ 1:20) จากนั้นนำมาสัมผัสวัสดุตัวกลางด้วยวิธีคอลัมน์ โดยที่เวลา

สัมผัสในคอลัมน์ (Empty bed contact time: EBCT) เท่ากับ 3 นาที และอัตราการไหลของน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (Superficial Liquid Velocity: SLV) เท่ากับ 0.314 เมตรต่อชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized Water) ปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร แล้วนำไปตากให้แห้ง ทำการสังเคราะห์วัสดุตามขั้นตอนที่กล่าวมา 2 ชั่วโมง จะได้วัสดุที่พร้อมใช้งาน



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ (Hybrid anion exchange resin impregnated with hydrated Fe(III) oxide nanoparticles : HA520E-Fe)

3 การทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุที่เตรียมได้ด้วยวิธีทดสอบสู่จุดสมดุล (Equilibrium batch test)

ทำการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบสู่จุดสมดุล (Equilibrium batch test) โดยการทดลองจะเตรียมน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟตเริ่มต้น $6.29 \text{ mg PO}_4^{3-}/\text{L}$ ปริมาตร 1 ลิตร ปรับค่าพีเอช (pH) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ให้ได้ค่าพีเอชเท่ากับ 6.5 จากนั้นเติมวัสดุดูดซับปริมาณ 1 กรัม แล้วทำการกวนที่ความเร็วรอบ 750 รอบต่อนาทีด้วยเครื่องกวน (Agitator) เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ระหว่างการกวนทำการควบคุมพีเอช (Control pH) ให้ใกล้เคียงกับพีเอชเริ่มต้นตลอดเวลา เมื่อเขย่าเสร็จทำการเก็บตัวอย่างน้ำสุดท้ายเพื่อนำไปวัดความเข้มข้นของฟอสเฟต

4. การทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุด้วยวิธีคอลัมน์ (Performance testing by fixed-bed column)

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและฟอสเฟต ในระบบหมุนเวียนน้ำจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งมีวิธีการทดลองโดยใช้เรซินวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนของเฟอริกออกไซด์ (Hybrid anion exchange resin containing hydrous ferric oxide: HA520E-Fe) ที่สามารถกำจัดได้ทั้งไนเตรตและฟอสเฟตร่วมกัน บรรจุลงในคอลัมน์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นปั้มน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำประมาณ 100 ลิตร นำมาปรับพีเอช (pH) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ให้ได้ค่าพีเอชเท่ากับ 6.5 จากนั้นนำมาผ่านคอลัมน์ ด้วยอัตราการไหล 8 BV/hr (0.67 มิลลิลิตรต่อนาที) โดยจะกำหนดเป็นจำนวนเท่าของน้ำที่วัดได้ต่อปริมาณวัสดุ (Bed Volumes: BVs) ซึ่งจะเก็บตัวอย่างน้ำของไนเตรต, ฟอสเฟตและคุณสมบัติของสารอินทรีย์ (UVA₂₅₄) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ต่อ 1 ตัวอย่าง โดยการเก็บตัวอย่างจะใช้เครื่องเก็บตัวอย่างอัตโนมัติ (Fraction collector) เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนเตรตด้วยวิธีบรูซีนซัลเฟต (Brucine Sulfate Method) ,ฟอสเฟต (Phosphate) ด้วยวิธีสแตนนัสคลอไรด์ (Stannous Chloride Method) และคุณสมบัติของสารอินทรีย์ ด้วยวิธีการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร(UVA₂₅₄) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DR6000 Spectrophotometry (Hach, USA) แล้วนำค่าที่ได้ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของไนเตรต(Nitrate),ฟอสเฟต (Phosphate) และคุณสมบัติของสารอินทรีย์ (UVA₂₅₄) ซึ่งการเดินระบบด้วยวิธีคอลัมน์ (Fixed-bed column) จะสิ้นสุดลงใน 1 รอบ เมื่อค่าความเข้มข้นของน้ำเข้าระบบกับค่าความเข้มข้นของน้ำออกมีค่าเท่ากัน เรียกจุดนี้ว่า จุดยุติของการดูดซับ (break through curve) โดยคำนวณจากสมการ 1

$$BV_s = \frac{V_w}{V_m} \quad (1)$$

โดย V_w = ปริมาตรน้ำที่ผ่านวัสดุ (มิลลิลิตร, ลิตร)

V_m = ปริมาตรวัสดุ (มิลลิลิตร, ลิตร)

5. การศึกษาการฟื้นฟูประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)

เมื่อวัสดุที่ใช้หมดประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตและฟอสเฟต จะทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพ (Regeneration) โดยใช้ปั๊มแบบปริคต้อ (Peristaltic Pump) สูบจ่ายสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl) ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ผ่านคอลัมน์ แล้วทำการเก็บตัวอย่างโดยใช้เครื่องเก็บตัวอย่างอัตโนมัติ (Fraction collector) จากนั้นจะนำไปวิเคราะห์ค่าไนเตรตและฟอสเฟตเพื่อวัดความสามารถในการฟื้นฟูประสิทธิภาพของวัสดุ สามารถคำนวณได้จากสมการการหาเปอร์เซ็นต์การกู้คืน (%recovery) (2) ดังนี้

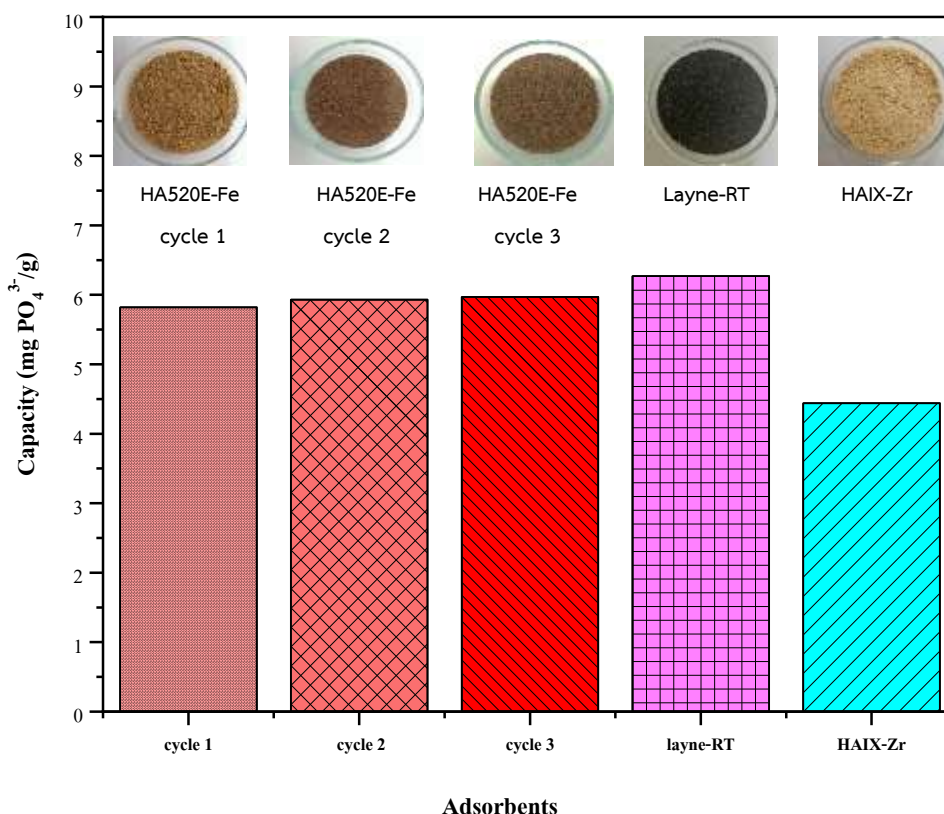
$$\% \text{ recovery} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ Regeneration}}{\text{“ความสามารถในการกำจัด”}} \times 100 \quad (2)$$

ผลการวิจัย

1. ผลการสังเคราะห์วัสดุการสังเคราะห์วัสดุดูดซับพันธุ์ผสมระหว่างวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนของเฟอร์ริกออกไซด์ (HA520E-Fe)

ผลการสังเคราะห์วัสดุ HA520E-Fe ที่มีความสามารถในการกำจัดไนเตรตและฟอสเฟตพร้อมกัน ซึ่งการสังเคราะห์วัสดุเป็นการใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีคอลลอยด์ แล้วทำการสังเคราะห์ซ้ำ 3 รอบ (3 Cycle) จะได้วัสดุที่พร้อมนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป โดยวัสดุ HA520E-Fe ที่ผ่านการสังเคราะห์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพที่ 4

การศึกษาเปรียบเทียบวัสดุดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟต ได้แก่ วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ (HA520E-Fe) (1-3 cycle), เรซิน Layne-RT และเรซิน HAIX-Zr [9] ซึ่งนำวัสดุมาทำการทดสอบด้วยวิธีทดสอบสมดุล (Equilibrium batch test)



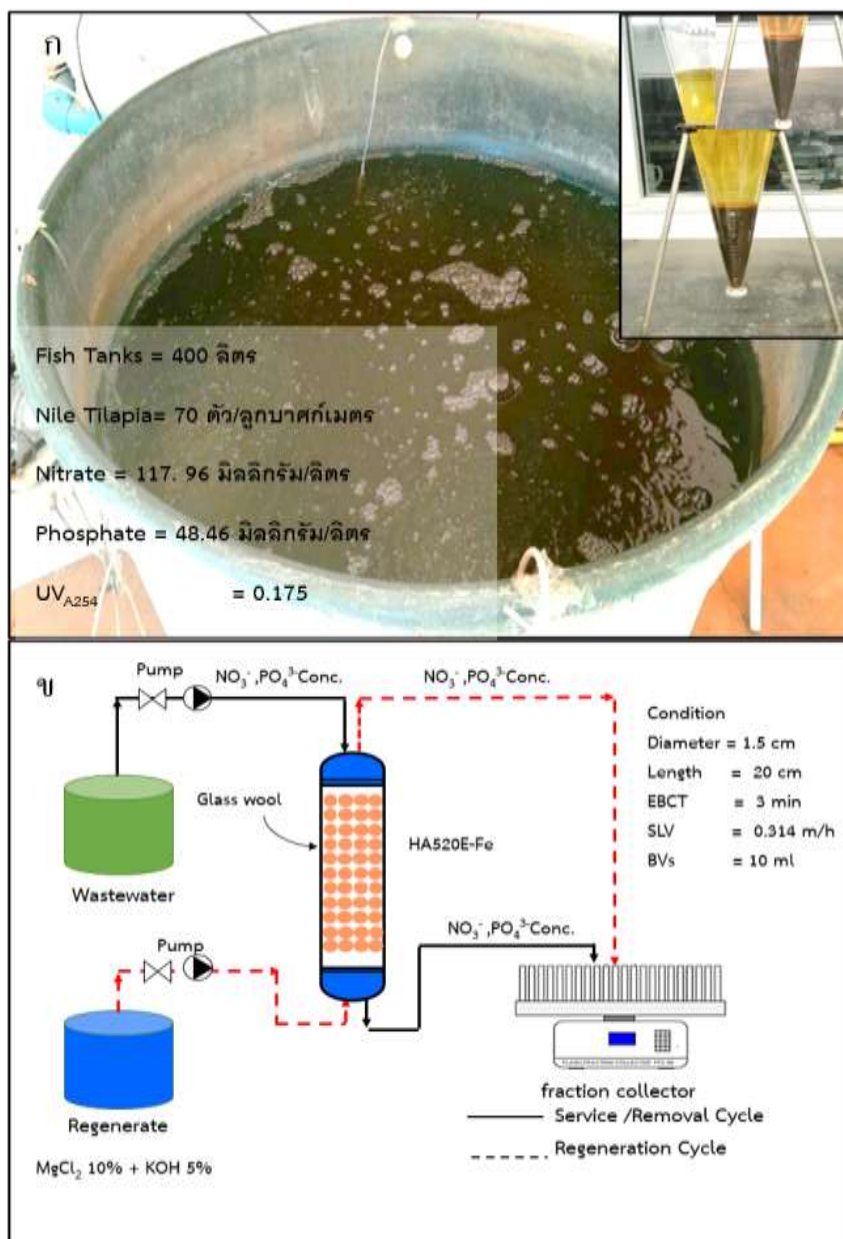
ภาพที่ 4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างชนิดตัวกลางและตัวกำจัดฟอสเฟต (ความเข้มข้นของฟอสเฟตเริ่มต้น 6.29 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH 6.5, เวลา 3 ชั่วโมง, ปริมาณเรซิน 1 กรัมต่อลิตร)

จากการศึกษาพบว่า เรซินชนิด Layne-RT มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้สูงสุด (6.27 มิลลิกรัมฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสต่อลิตร) รองลงมาคือ HA520E-Fe ทั้ง 3 cycle ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ใกล้เคียงกัน (ความสามารถ



ในการกำจัดฟอสเฟตอยู่ระหว่าง 5.97, 5.93, 5.82 มิลลิกรัมกรัมฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสต่อลิตร) และ เรซิน HAIX-Zr มีความสามารถในการกำจัดน้อยที่สุด คือ 4.44 มิลลิกรัมกรัมฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสต่อลิตรซึ่งจะเห็นว่าเรซิน Layne-RT เป็นวัสดุประกอบด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบชนิดเจล [10] ที่แข็งแรงพร้อมกับกลุ่มฟังก์ชันควอเตอร์นารีแอมโมเนียม ประมาณ 26 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นผิวภายนอกและภายในของวัสดุถูกปกคลุมด้วยเหล็กในรูปเฟอร์ริกออกไซด์ โดยเรซินมีความจุ 1 มิลลิกรัมวาเลนซ์/ลิตร ในรูปคลอไรด์ (Cl) ที่ใช้สำหรับกำจัดสารพิษจำพวกประจุลบ [11] ที่ขายเชิงพาณิชย์ซึ่งมีราคาก่อนข้างแพง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการใช้วัสดุดูดซับ สามารถเลือกใช้วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของนาโนเฟอร์ริกออกไซด์ (HA520E-Fe) ซึ่งเดิมเป็นวัสดุที่เป็นโพลิเมอร์แลกเปลี่ยนไอออนลบมีกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของวัสดุสามารถกำจัดไนเตรต และมีผลการกำจัดฟอสเฟตที่ตรงลงมาจากเรซิน Layne-RT ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นได้เอง มีวิธีการสังเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อนและสามารถล้างฟื้นฟูประสิทธิภาพได้เป็นอย่างดี [8]

2. ผลการศึกษาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบระบบไบโอฟิล็อก (Biofloc)



ภาพที่ 5 (ก) กระบวนการเตรียมน้ำเพื่อทดสอบ (ข) ระบบคอลัมน์ในการบำบัดน้ำเสีย

จากการศึกษาระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบระบบไบโอฟิล็อก (Biofloc) ดังแสดงในภาพที่ 5(ก) ที่มีน้ำปริมาตร 400 ลิตร เป็นการเพาะเลี้ยงแบบการใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายของเสียในระบบ ซึ่งส่วนมากเป็นแอมโมเนียที่อยู่ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและผลผลิตสุดท้ายจะได้เป็นไนเตรต และของเสียอีกอย่างหนึ่ง คือฟอสเฟต โดยมีการเติมแหล่งคาร์บอนทุกวันลงในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นน้ำตาล และมีการควบคุมตะกอนฟล็อกที่เกิดขึ้นอยู่ที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และให้ออกซิเจนอย่างเพียงพอ ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (ปลานิล) 28 ตัว (ความหนาแน่น 70 ตัวต่อลูกบาศก์เมตร) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้ม

ของไนเตรตอยู่ที่ 117.96 มิลลิกรัมต่อลิตร, ฟอสเฟตมีความเข้มข้น 48.46 มิลลิกรัมต่อลิตรและคุณลักษณะของสารอินทรีย์ (UVA₂₅₄) เท่ากับ 0.175 cm⁻¹ จะถ่ายน้ำในระบบประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทำการกำจัดสารอาหารที่เกิดขึ้น ได้แก่ ไนเตรด, ฟอสเฟตและคุณลักษณะของสารอินทรีย์ โดยใช้ระบบคอลัมน์ในการบำบัดน้ำเสียต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 5 (ข)

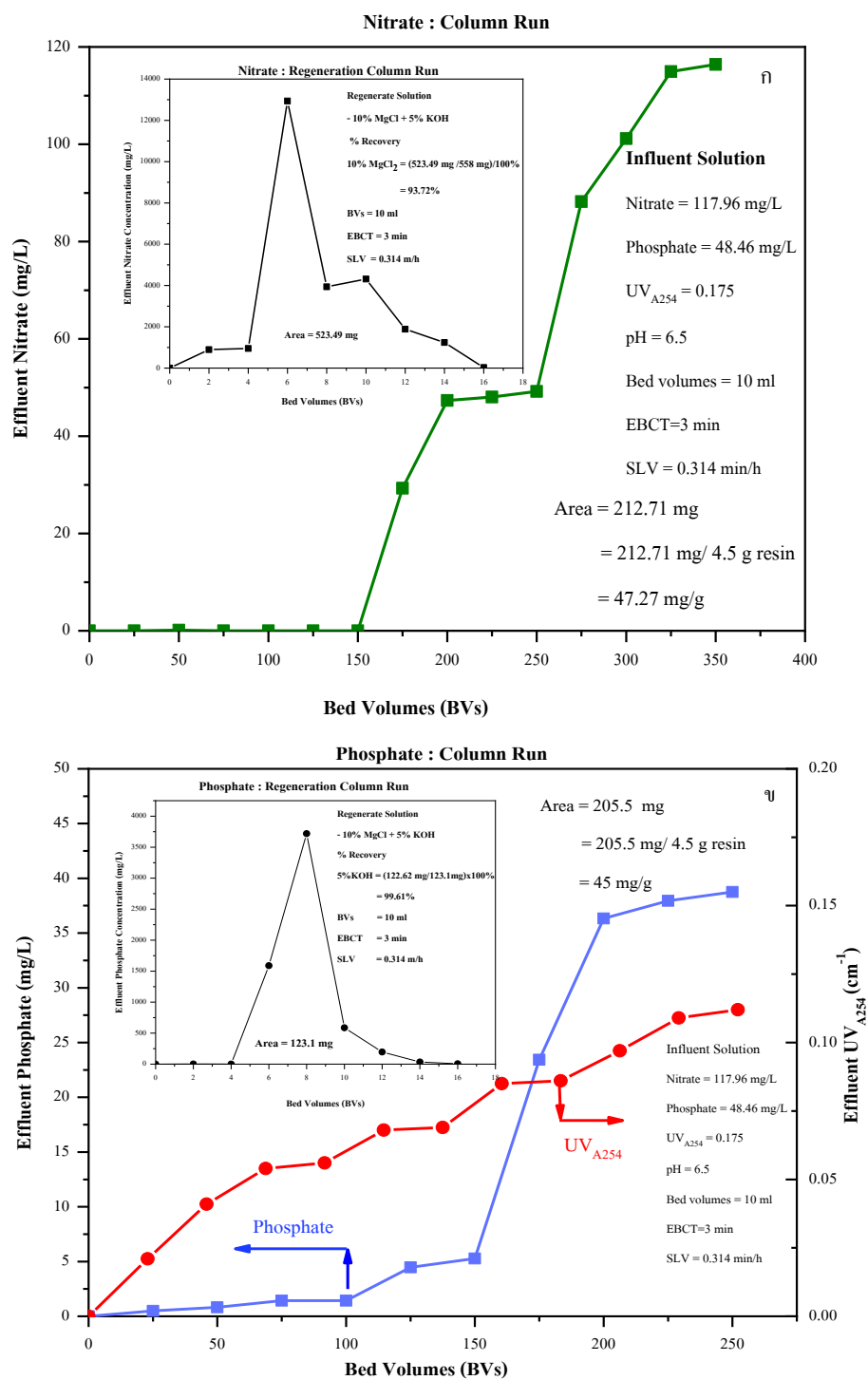
3. การกำจัดไนเตรดและฟอสเฟตที่เกิดขึ้นจากระบบไบโอฟลอคชันสูง และการทดสอบประสิทธิภาพการฟื้นฟูวัสดุ

การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานสำหรับน้ำเสียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของการกำจัดไนเตรด, ฟอสเฟต และคุณลักษณะของสารอินทรีย์ ด้วยวิธีคอลัมน์ ผลการทดลองมีดังนี้ ผลการกำจัดไนเตรดแสดงดังภาพที่ 6 (ก) จากการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรด ช่วงที่ปั้มน้ำผ่านวัสดุไปในช่วงแรกไม่พบการปนเปื้อนไนเตรด แต่เมื่อน้ำผ่านวัสดุไปได้ประมาณ 150 เท่าของปริมาณวัสดุดูดซับ (Bed Volumes: BVs) ค่าความเข้มข้นไนเตรดจะค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรดเมื่อผ่านไปประมาณ 325 เท่าของปริมาณวัสดุดูดซับ สามารถกำจัดไนเตรดได้ 47.27 มิลลิกรัมต่อกรัมเรซิน คิดเป็นความสามารถ 98.67 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรด แสดงให้เห็นว่าวัสดุมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรดเป็นอย่างดี เนื่องจากวัสดุตั้งต้นเป็นเรซินที่มีความสามารถในการกำจัดไนเตรด โดยมีไอออนของคลอไรด์ที่ทำหน้าที่กำจัดไนเตรดด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน จากการกำจัดไนเตรดของวัสดุ HA520E-Fe ที่สามารถกำจัดไนเตรดได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้วนั้น ยังสามารถทำการฟื้นฟูวัสดุให้กลับมาใช้งานได้อีกครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 6 (ก) จากการฟื้นฟูประสิทธิภาพของวัสดุมีค่าเปอร์เซ็นต์การคืนกลับ (% Recovery) ของไนเตรดอยู่ในช่วง 93.72 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีค่าการฟื้นฟูประสิทธิภาพสูง และสารฟื้นฟูประสิทธิภาพที่ได้จะมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมคลอไรด์ และไนเตรด ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่มีประโยชน์ต่อพืช สามารถนำไปประยุกต์เป็นปุ๋ยต่อไป

ผลการกำจัดฟอสเฟตดังภาพที่ 6 (ข) จากการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต ในช่วงแรกของการทดสอบไม่พบการปนเปื้อนจนกระทั่งน้ำที่ผ่านวัสดุไปได้ประมาณ 100 เท่าของปริมาณวัสดุดูดซับ (Bed Volumes: BVs) ค่าความเข้มข้นของฟอสเฟตค่อยๆมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จนหมดประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตเมื่อผ่านไปประมาณ 250 เท่าของปริมาณวัสดุดูดซับ (Bed Volumes: BVs) สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ 45 มิลลิกรัมต่อกรัมเรซินคิดเป็นความสามารถ 79.96 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อพิจารณาวัสดุดูดซับ HA520E-Fe ที่เพิ่มเฟอร์ริกออกไซด์เข้าไปในเรซิน มีการกระจายของอนุภาคนาโนที่มีเฟอร์ริกออกไซด์ และสามารถดูดซับเฉพาะเจาะจงต่อไอออนประจุลบได้ดี คล้ายคลึงกับ [3, 8] จากการกำจัดฟอสเฟตของวัสดุ HA520E-Fe ที่สามารถกำจัดฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถทำการฟื้นฟูวัสดุให้กลับมาใช้งานได้อีกครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 6 (ข) จากการฟื้นฟูประสิทธิภาพของวัสดุมีค่าเปอร์เซ็นต์การคืนกลับ (% Recovery) ของฟอสเฟตอยู่ในช่วง 99.61 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าการฟื้นฟูประสิทธิภาพที่ดี [12] ส่วนสารฟื้นฟูที่ได้ คือ ฟอสเฟต และโพแทสเซียม ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่มีประโยชน์ต่อพืช สามารถนำไปประยุกต์เป็นปุ๋ยได้ ส่วนผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ดังภาพที่ 6(ข) พบว่าน้ำเสียที่ผ่านวัสดุไปได้ประมาณเพียง 25 เท่าของปริมาณวัสดุดูดซับ (Bed Volumes: BVs) ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ค่อยๆเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งที่ 250 เท่าของปริมาณวัสดุดูดซับ ซึ่งให้เห็นว่าวัสดุ HA520E-Fe มีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ หรือจัดได้ว่ากำจัดสีของน้ำได้อีกด้วย

จากการศึกษาผลการกำจัดไนเตรดและฟอสเฟตของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของนาโนเฟอร์ริกออกไซด์ (Hybrid anion exchange resin containing hydrous ferric oxide : HA520E-Fe) มีความสามารถในการกำจัดไนเตรดและฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากการฟื้นฟูประสิทธิภาพของวัสดุนั้นยังมีความเข้มข้นสูง สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตกตะกอนปุ๋ยละลายช้า (Struvite) เช่น ปุ๋ยสูตร K-Struvite คือ แมกนีเซียมโพแทสเซียมฟอสเฟต (magnesium potassium

phosphate : MPP) และปุ๋ยสูตร NH_4 -Struvite คือ แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (magnesium ammonium phosphate : MAP) ที่คล้ายคลึงกับ [10, 13]



ภาพที่ 6 (ก) ผลการกำจัดไนเตรดและการฟื้นฟูประสิทธิภาพของวัสดุ HA520E-Fe (ข) ผลการกำจัดฟอสเฟตและการฟื้นฟูประสิทธิภาพของวัสดุ HA520E-Fe

สรุปผลการวิจัย

จากการสังเคราะห์วัสดุดูดซับพันธุ์สมระหว่างวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนลบที่มีองค์ประกอบของอนุภาคนาโนของเฟอร์ริกออกไซด์ (hybrid anion exchange resin containing hydrous ferric oxide: HA520E-Fe) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระบบแอควาเรียมชีวโอฟลอค พบว่า สามารถกำจัดไนเตรตได้อยู่ที่ 47.27 มิลลิกรัมต่อกรัมเรซิน คิดเป็นความสามารถ 98.67% และสามารถกำจัดฟอสเฟตได้อยู่ที่ 45 มิลลิกรัมต่อกรัมเรซิน คิดเป็นความสามารถ 79.96 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเห็นว่าวัสดุมีความสามารถในการกำจัดไนเตรตและฟอสเฟตได้ดีและยังกำจัดสารอินทรีย์ได้อีกด้วย และการฟื้นฟูประสิทธิภาพของวัสดุทั้งหมดสภาพแล้วให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายรอบ โดยใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร) ปริมาตร 10 เท่าของปริมาณวัสดุดูดซับ (Bed Volumes: BVs) พบว่า มีประสิทธิภาพฟื้นฟูไนเตรตและฟอสเฟตสูงที่ 93.72 เปอร์เซ็นต์ และ 99.61 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยสารฟื้นฟูประสิทธิภาพยังมีความประสิทธิภาพสูง ประกอบด้วย Mg^{2+} , NO_3^- , K^+ และ PO_4^{3-} ซึ่งเป็นธาตุอาหารสำคัญสำหรับพืช สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตกตะกอนเป็นปุ๋ยละลายช้า (Struvite) เช่น ปุ๋ยสูตร K-Struvite คือ แมกนีเซียมโพแทสเซียมฟอสเฟต (magnesium potassium phosphate : MPP) และปุ๋ยสูตร NH_4 -Struvite คือ แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (magnesium ammonium phosphate : MAP)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย และทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Hai Ou Song, Yang Zhou, Ai Min Li, Sandra Mueller. Selective removal of nitrate by using a novel macroporous acrylic anion exchange resin. Chinese Chemical Letters, 2012. 23(5): p. 603-606.
2. Saba Samatya, Nalan Kabay, Umrhan Yuksel, Muhsin Arda, Mithat Yuksel. Removal of nitrate from aqueous solution by nitrate selective ion exchange resins. Reactive & Functional Polymers, 2006. 66(11): p. 1206-1214.
3. Yang W, et al., Fabrication of a Novel Bifunctional Nanocomposite with Improved Selectivity for Simultaneous Nitrate and Phosphate Removal from Water. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019. 11(38): p. 35277-35285.
4. Burut-Archana S, et al., Phosphorus removal in a closed recirculating aquaculture system using the cyanobacterium Synechocystis sp. PCC 6803 strain lacking the SphU regulator of the Pho regulon. Biochemical Engineering Journal, 2013. 74: p. 69-75.
5. Division F D P A S. Fisheries Statistics of Thailand. -, 2017.
6. Gendel Y, Lahav O. A novel approach for ammonia removal from fresh-water recirculated aquaculture systems, comprising ion exchange and electrochemical regeneration. Aquacultural Engineering, 2013. 52: p. 27-38.



7. Bing Li, Irina Boiarkina, Wei Yu, Hai Ming Huang, Tajammal Munir a, Guang Qian Wang b, Brent R. Young, Phosphorous recovery through struvite crystallization: Challenges for future design. *Science of the Total Environment*, 2019. 648: p. 1244-1256.
8. Wiriyathamcharoen S, Sarkar S, Jiemvarangkul P, Trung Thanh Nguyen Wantana Klysuban⁵, Padungthonl S, et al., Synthesis optimization of hybrid anion exchanger containing triethylamine functional groups and hydrated Fe(III) oxide nanoparticles for simultaneous nitrate and phosphate removal. *Chemical Engineering Journal*, 2020. 381: p. 122671.
9. Mahamalage Kusumitha Perera, James , Englehardt. Polymeric anion exchanger supported hydrated Zr(IV) oxide nanoparticles: A reusable hybrid sorbent for selective trace arsenic removal. *Reactive & Functional Polymers*, 2015. 93: p. 84-94.
10. Williams AT, Zitomer DH. Mayer BK. Ion exchange-precipitation for nutrient recovery from dilute wastewater. *Environmental Science-Water Research & Technology*, 2015. 1(6): p. 832-838.
11. Martin BD, et al. Quantifying the performance of a hybrid anion exchanger/adsorbent for phosphorus removal using mass spectrometry coupled with batch kinetic trials. *Environmental Technology*, 2018. 39(18): p. 2304-2314.
12. Martin BD, Parsons SA, Jefferson B. Removal and recovery of phosphate from municipal wastewaters using a polymeric anion exchanger bound with hydrated ferric oxide nanoparticles. *Water Science and Technology*, 2009. 60(10): p. 2637-2645.
13. Huanwen Li, Zhiping Ye, Ying Lin, Fengying Wang. Phosphorus recovery as struvite from eutrophic waters by XDA-7 resin. *Water Science and Technology*, 2012. 65(12): p. 2091-2097.