

การประยุกต์ใช้ตะกอนประปาตัดแปลงสภาพเพื่อเป็นวัสดุดูดซับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียในระบบ
บำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศที่เกิดยูโทรฟิเคชันจากสาหร่ายไซยาโนแบคทีเรีย
Application of modified tap water treatment sludge as a phosphorus
adsorbent in aerobic wastewater treatment systems affected by
eutrophication from cyanobacteria

อนุสรรา สารักษ์¹ ไพเราะ แสนหวัง^{2*}
Anootsara Sarak¹ Phairo Saenwang^{2*}

(Received: June 4, 2023; Revised: August 15, 2023; Accepted: August 30, 2024)

*Corresponding author: phairo.s@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลตะกอนประปาตัดแปลงสภาพเพื่อเป็นวัสดุดูดซับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียกระทบของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส และสร้างตัวดูดซับจากตะกอนประปาตัดแปลงซึ่งสามารถกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียในระบบบำบัดน้ำเสียที่เกิดยูโทรฟิเคชันจากไซยาโนแบคทีเรีย ตัวดูดซับเตรียมขึ้นจากตะกอนประปาที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาเผาที่ 600 °C นาน 10 ชั่วโมง ตามด้วยการบดและร่อนเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาค 270 µm ทดสอบความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวดูดซับนี้ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัส 50-500 mgP/L และพีเอช 3-11 เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปออร์โธฟอสเฟตโดยวิธีแอสคอบิก การทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองพบว่า ตัวดูดซับจากตะกอนประปาตัดแปลงสภาพมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 19.59 m²/g และปริมาตรรูพรุนรวม 0.079 m³/g และมีองค์ประกอบของโลหะหนักสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ อะลูมิเนียม เหล็ก และแคลเซียม เมื่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเริ่มต้นอยู่ที่ 500 mgP/L และค่าพีเอชเป็นกลางที่ 7-9 พบว่า ค่าการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดเท่ากับ 13.71 และ 12.85 mgP/L ตามลำดับ ซึ่งผู้วิจัยพบว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับฟอสฟอรัสในน้ำเสียนี้ ดังนั้น ตะกอนประปาที่ผ่านการตัดแปลงสภาพแล้วสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียได้

คำสำคัญ: ตะกอนประปาตัดแปลงสภาพ วัสดุดูดซับ ฟอสฟอรัส ไซยาโนแบคทีเรีย

¹นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

¹Technical Laboratory Scientist, College of Medicine and Public Health, Ubon Ratchathani University

²นักวิทยาศาสตร์ปฏิบัติการ วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

²Laboratory Scientist, College of Medicine and Public Health, Ubon Ratchathani University

Abstract

This research aims to study the impact of initial pH levels on the phosphorus adsorption capacity and to create an adsorbent from modified tap water treatment sludge capable of removing phosphorus from wastewater in treatment systems affected by cyanobacteria-induced eutrophication. The adsorbent was prepared from used water treatment sludge, which was calcined at 600°C for 10 hours, followed by grinding and sieving to obtain a particle size of 270 μm . The phosphorus adsorption capacity of this adsorbent was tested with phosphorus concentrations ranging from 50 to 500 mgP/L and pH levels from 3 to 11 over 72 hours. The phosphorus content in the form of orthophosphate was analyzed using the ascorbic acid method, with three replicates per experiment. The results showed that the modified tap water treatment sludge adsorbent had a specific surface area of 19.59 m^2/g and a total pore volume of 0.079 m^3/g . The key heavy metal components affecting adsorption included aluminum, iron, and calcium. When the initial phosphorus concentration was 500 mgP/L and the pH was neutral at 7-9, the maximum phosphorus adsorption values were 13.71 and 12.85 mgP/L, respectively. The researchers found these conditions to be the most optimal for phosphorus adsorption in this wastewater. Therefore, modified tap water treatment sludge can be effectively used as an adsorbent for phosphorus removal from wastewater.

Keywords: Modified tap water treatment sludge, Adsorbent, Phosphorus, Cyanobacteria



1. บทนำ

ในระบบบำบัดน้ำเสีย มักพบปัญหาการปนเปื้อนของ ฟอสฟอรัส ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากกิจกรรมการซักล้างใน ชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงการชะล้างของปุ๋ยที่ ใช้ในภาคการเกษตรโดยน้ำฝน ฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนใน แหล่งน้ำนี้ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ โดยเฉพาะ การกระตุ้นการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของพืชน้ำและ สาหร่าย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "ยูโทรฟิเคชัน" (Eutrophication) ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง ของระบบนิเวศในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพ น้ำและสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้น ๆ

ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่มุ่งเน้นการกำจัด สารอินทรีย์คาร์บอน ทำให้การบำบัดฟอสฟอรัสกลายเป็น ประเด็นที่ถูกละเลย อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันการกำจัด ฟอสฟอรัสได้รับความสนใจมากขึ้น⁽¹⁾ เนื่องจากหากมี ปริมาณเกิน 0.1 mg/L ในน้ำเสีย อาจส่งผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อม จึงมีการพัฒนาวิธีการบำบัดน้ำหลากหลาย รูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น การตกตะกอนทางเคมีด้วยเกลือ โลหะ จำพวก อะลูมิเนียมซัลเฟตหรือเพอร์ริกคลอไรด์ เป็น วิธีที่มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 95⁽²⁾ แต่มีข้อเสียคือต้นทุน สูงและก่อให้เกิดตะกอนที่ต้องกำจัดเพิ่มเติม ส่วนการกำจัด ฟอสฟอรัสทางชีวภาพโดยใช้แบคทีเรียบางชนิดนั้นเป็นมิตร ต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีประสิทธิภาพที่ไม่แน่นอน (ร้อยละ 70- 90) และอ่อนไหวต่อสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ และค่า pH⁽³⁾

สำหรับวิธีการกรองชั้นสูงด้วยเมมเบรนและเทคนิค การดูดซับกำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากมี ประสิทธิภาพสูงและสามารถกำจัดสารประกอบฟอสฟอรัส ได้อย่างเฉพาะเจาะจง สารดูดซับยอดินิม เช่น อะลูมินาที่ ผ่านการกระตุ้นหรือดินเหนียวที่ผ่านการดัดแปลง มีความ ยืดหยุ่นสูงแต่อาจต้องมีการเปลี่ยนหรือสร้างใหม่ ซึ่งส่งผล ต่อความคุ้มค่าในระยะยาว⁽⁴⁾ การพัฒนาวัสดุดูดซับราคา ประหยัดและหาได้ง่ายในท้องถิ่นจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ โดยพบว่าดินตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปาเป็นตัวเลือก ที่ดี การศึกษาพบว่าส่วนผสมที่มีเปลือกหอยแครงร้อยละ 50 ดินตะกอนประปาร้อยละ 40 และสารยัดประสานร้อยละ 10 มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดถึง

4.85 mgP/g ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมของ แลงเมียร์⁽⁵⁾

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีกำลังเผชิญกับปัญหาโทร ฟิเคชันในระบบบำบัดน้ำเสียรวม ซึ่งใช้ระบบเติมอากาศ ร่วมกับบึงประดิษฐ์ สาเหตุหลักมาจากปริมาณไนโตรเจนและ ฟอสเฟตที่สูงในน้ำเสีย ส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตอย่าง รวดเร็วของสาหร่าย โดยเฉพาะชนิดไมโครซิสติส ซึ่งอาจ เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมหากแพร่กระจายสู่ แหล่งน้ำชุมชน⁽⁶⁾ เพื่อแก้ไขปัญหา ผู้วิจัยจึงสนใจนำ ตะกอนประปาจากการประปาภูมิภาคเขต 8 สาขา อุบลราชธานี มาใช้ประโยชน์ โดยมุ่งเน้นการดัดแปลง ตะกอนให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอาหารพืช โดยเฉพาะฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุม การเจริญเติบโตของสาหร่าย

ถึงแม้จะมีการออกแบบระบบบำบัดเพื่อรองรับกับ สารอินทรีย์ที่เข้ามาในระบบแต่ก็ยังประสบปัญหาโทรฟิเค ชัน เนื่องจากน้ำเสียที่เข้ามาในระบบมีค่าปริมาณไนโตรเจน และฟอสเฟตสูง ซึ่งส่งผลการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว^(7- 8) การวิเคราะห์ปัจจัยจำกัด (Limiting Factors) ของธาตุ อาหารพืชในแหล่งน้ำเป็นกุญแจสำคัญในการเข้าใจและ จัดการปัญหาโทรฟิเคชัน โดยสามารถแบ่งได้เป็นสามกลุ่ม หลัก คือ ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน และทั้งฟอสฟอรัสร่วมกับ ไนโตรเจนเป็นปัจจัยจำกัด การพิจารณาอาศัยอัตราส่วน ระหว่างปริมาณไนโตรเจนรวมต่อฟอสฟอรัสรวม และ ปริมาณฟอสฟอรัสรวมในแหล่งน้ำ⁽⁹⁾ หากอัตราส่วนน้อยกว่า 10 บ่งชี้ว่าไนโตรเจนเป็นปัจจัยจำกัด ระหว่าง 10 ถึง 17 แสดงว่าทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอาจเป็นปัจจัย จำกัด และมากกว่า 17 บ่งชี้ว่าฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยจำกัด หลัก นอกจากนี้ การพิจารณาปริมาณฟอสฟอรัสรวมเพียง อย่างเดียวก็ให้ข้อมูลที่จำกัด โดยหากมีปริมาณเกิน 100 ug/L มีแนวโน้มที่ไนโตรเจนจะเป็นปัจจัยจำกัด แต่หากต่ำ กว่า 50 ug/L ฟอสฟอรัสมักเป็นปัจจัยจำกัด ความเข้าใจนี้ มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากน้ำเสียที่มีปริมาณ สารอาหารสูงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเสริมการเจริญเติบโต ของไซยาโนแบคทีเรีย ซึ่งสามารถปลดปล่อยสารพิษที่เป็น อันตรายต่อระบบนิเวศทางน้ำและสุขภาพของมนุษย์⁽¹⁰⁾ ดังนั้น การควบคุมปริมาณสารอาหารในน้ำ โดยเฉพาะ

ฟอสฟอรัสและไนโตรเจน จึงเป็นกลยุทธ์สำคัญในการป้องกันและแก้ไขปัญหายูโทรฟิเคชัน รวมถึงการลดความเสี่ยงจากการแพร่กระจายของสารพิษจากไซยาโนแบคทีเรียในแหล่งน้ำ

ตะกอนประปาเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการดูดซับฟอสฟอรัส และนิยมนำมาใช้ในการจัดการแหล่งน้ำที่มีภาวะยูโทรฟิเคชัน⁽¹¹⁾ โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับอยู่ที่ 4.5 มิลลิกรัม/กรัม⁽¹²⁾ และเมื่อนำมาดัดแปลงด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้ถึง 7.1 mgP/g นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณไนโตรเจนได้สูงถึง 45.7 mg/Kg เมื่อเปรียบเทียบกับตะกอนประปาที่ไม่ได้ดัดแปลงสภาพซึ่งลดได้มากกว่าร้อยละ 18-32⁽¹³⁾ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือการศึกษาความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตด้วยตัวดูดซับจากตะกอนประปาที่ผ่านการดัดแปลง เพื่อนำไปสู่การพัฒนาแนวทางการจัดการปัญหายูโทรฟิเคชันในระบบบำบัดน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในอนาคต

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยในรูปแบบเชิงทดลอง (Experimental research) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของตะกอนประปา แล้วนำมาทดสอบในการดูดซับฟอสฟอรัส

2.1 จุดเก็บตัวอย่างในการวิจัย

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ และบ่อบึงประดิษฐ์ (พิกัด 15°07'12"N, 104°54'49"E) ซึ่งอยู่ในพื้นที่มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยทำการเก็บตัวอย่างในช่วงที่มีการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน ทั้งนี้ตัวอย่างน้ำจะทำการเก็บแบบแยก หรือจ้วง (Grab sampling) โดยใช้กระบอกรับตัวอย่าง (Water sampler) โดยจะเก็บจำนวน 4 จุด (ดังรูปที่ 1) ซึ่งเก็บจุดละ 6 ลิตร ใส่ในภาชนะพลาสติกทึบแสง เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้วทำการนำตัวอย่างไปทำการทดลองภายใน 24 ชั่วโมง ตรวจวัดลักษณะของน้ำ ได้แก่ พีเอช (pH) ของแข็งแขวนลอย (SS) ของแข็งละลายน้ำ (TDS) ซีโอดี (COD) บีโอดี (BOD) ซัลไฟด์ (Sulfide) ไนโตรเจน (TKN) น้ำมันและไขมัน (FOG) ฟอสฟอรัส (P) ทั้งนี้มีข้อกำหนด

เบื้องต้นของน้ำตัวอย่างต้องมีปริมาณของคลอโรฟิลล์ เอ ที่ไม่น้อยกว่า 100 ug/L และพบไซยาโนแบคทีเรียชนิด *Microcystis aeruginosa* เป็นชนิดเด่น



รูปที่ 1 แสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาทำการทดลอง

สำหรับจุดเก็บตัวอย่างตะกอนประปา คือ ตะกอนในบ่อพักตะกอนของการประปาส่วนภูมิภาคเขต 8 สาขาอุบลราชธานี เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ใกล้เคียงกัน และมีปริมาณเพียงพอในการนำมาใช้ทดลอง โดยทางหน่วยงานมีความยินดีในการให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างตะกอนประปามาเพื่อใช้ในการวิจัย

2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง

วัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับในการทดลอง คือ ตะกอนประปาเผาในสภาวะจำกัดออกซิเจน (Oxygen limited) ที่ 600 °C โดยก่อนนำมาทดลองตะกอนประปาจะถูกบดและคัดขนาดให้มีขนาด 270 μm โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนประปาจากพื้นที่ประมาณ 20 กิโลกรัม (เก็บสิ่งเจือปนออก)
- 2) คลุกเคล้าตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำตัวอย่างประมาณ 10 กิโลกรัมเทลงในถังน้ำ 2 ถัง ถังละ 5 กิโลกรัม
- 3) ทำการล้างด้วยน้ำกลั่น โดยเทน้ำลงถังละประมาณ 5-6 ลิตร กวนให้เข้ากันปล่อยให้ตกตะกอนแล้วเทน้ำที่มีสิ่งเจือปนด้านบนออกประมาณ 4 ลิตรให้เหลือเฉพาะเนื้อตะกอนตัวอย่าง ใช้เวลาประมาณครั้งละ 10 นาที โดยทำการล้างจำนวน 3 ครั้ง
- 4) นำตัวอย่างใส่ภาชนะแห้งสะอาดแห้งในตู้อบ

ที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นใน โถดูดความชื้นประมาณ 30 นาที (ในขั้นตอนนี้จะแบ่ง ตัวอย่างมา 20 กรัม เพื่อหาค่าความชื้นควบคู่ไปด้วยกัน)

5) เมื่อครบเวลานำตัวอย่างมาบดและร่อนด้วย ตะแกรงให้ได้อนุภาคขนาด $270 \mu\text{m}$ ตามลำดับ แล้วนำไป เผาที่อุณหภูมิสูง 600 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยเตาเผา อุณหภูมิสูง (Furnace) หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นใน โถดูดความชื้นประมาณ 30 นาที แล้วนำมาชั่งน้ำหนักและ เก็บไว้ในภาชนะแห้งปิดสนิทเพื่อรอใช้ในการทดลองต่อไป

6) นำตัวอย่างตะกอนประปาส่งตรวจวิเคราะห์ ลักษณะของตัวดูดซับตะกอนประปา ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Pore size) ปริมาตรรูพรุนรวม (Pore volume) คำนวณด้วยวิธีของ BJH method และ วิธีของ HK method องค์กรประกอบคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ไนโตรเจน (Nitrogen) ด้วยวิธี Combustion method และ CHNS analyzer และตรวจ โลหะหนัก (Heavy metal) ในตัวดูดซับตะกอนประปาด้วย Atomic Absorption Spectroscopy

2.3 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส

การหาความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสด้วยการทดสอบปริมาณฟอสฟอรัสของตัวอย่างน้ำระหว่างช่วง ก่อนและหลังการบำบัดด้วยการดูดซับ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมน้ำสังเคราะห์ที่มีปริมาณฟอสฟอรัส แตกต่างกันด้วยน้ำตัวอย่างที่เก็บจากระบบบำบัดน้ำเสีย มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี แล้วทำการปรับความเข้มข้น ของฟอสฟอรัส เท่ากับ 50 mgP/L , 100 mgP/L , 250 mgP/L และ 500 mgP/L สำหรับการทดลองดูดซับที่ 72 ชั่วโมง ในสภาวะเป็นกลางที่พีเอช 7 เพื่อให้ใกล้เคียงกับ สภาพน้ำตัวอย่างในระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัย อุบลราชธานี

2) นำตัวดูดซับตะกอนประปาตัดแปลงสภาพชนิดผง ขนาด $270 \mu\text{m}$ ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นใส่น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มล. ลงในขวดที่ ใส่ตัวดูดซับไว้แล้ว ปิดฝาขวดด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ นำไป เขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็วรอบ 175 รอบ/ นาที ที่อุณหภูมิห้อง 25 °C จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา เข้าสู่สมดุลเมื่อครบระยะเวลาบำบัด 72 ชั่วโมง

3) วิเคราะห์ค่าออร์โธฟอสเฟตโดยวิธีแอสคอบิก ด้วยวิธีมาตรฐานตามคู่มือ Standard methods for the examination of the water and wastewater⁽¹⁴⁾ และ ทำการทดลองอย่างละ 3 ซ้ำ ในทุกความเข้มข้น

2.4 วิเคราะห์หัตถิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อ ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส

การหาหัตถิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายต่อ การดูดซับ เพื่อทราบสภาพพีเอชที่เหมาะสมในการนำตัว ดูดซับไปใช้ในการบำบัดฟอสฟอรัสให้มีประสิทธิภาพมี ขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำที่เก็บตัวอย่างจาก ระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ความเข้มข้น ของฟอสฟอรัส 500 mgP/L เนื่องจากเป็นค่าความเข้มข้น ของฟอสฟอรัสในน้ำของการทดลองที่ให้ค่าความสามารถ ในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงที่สุด จากนั้นปรับค่าพีเอชโดย แบ่งออกให้แตกต่างกัน ได้แก่ 3, 5, 7, 9 และ 11

2) นำตัวดูดซับตะกอนประปาตัดแปลงสภาพชนิดผง ขนาด $270 \mu\text{m}$ ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นใส่น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มล. ลงในขวดที่ ใส่ตัวดูดซับไว้แล้ว ปิดฝาขวดด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ นำไป เขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็วรอบ 175 รอบ/ นาที ที่อุณหภูมิห้อง 25 °C จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา เข้าสู่สมดุลเมื่อครบระยะเวลาบำบัด 72 ชั่วโมง

3) วิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต โดยวิธีแอสคอบิก ด้วยวิธีมาตรฐานตามคู่มือ Standard methods for the examination of the water and wastewater⁽¹⁴⁾ และทำการทดลองอย่างละ 3 ซ้ำในทุก ความเข้มข้น

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์หาความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสใน น้ำด้วยตัวดูดซับจากตะกอนประปา⁽¹²⁾ ดังสมการ (1)

$$q = \frac{(C_0 - C) \times V}{m} \quad (1)$$

โดย q ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส (mg/g) คือ C_0 คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฟอสฟอรัส เริ่มต้น (mgP/L) C คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของของ

ฟอสฟอรัส m คือปริมาณของตัวดูดซับ (g) และ V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะทางกายภาพเคมีของตัวดูดซับ

ลักษณะภายนอกของตัวดูดซับที่บันทึกด้วยภาพถ่าย จากกล้อง SEM ของตัวดูดซับจากตะกอนประปาตัดแปลง สภาพขนาด 270 μm พบว่า ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ที่กำลังขยาย 50x พบลักษณะของตัวดูดซับเป็นเม็ดขนาดเล็กและมีรูปร่างไม่สมมาตร (รูปที่ 1) และพื้นผิวของตัวดูดซับจากตะกอนประปามีความละเอียด มีอนุภาคปกคลุมพื้นผิวภายนอกกระจายอยู่ทั่วตัวดูดซับ และพบรูพรุนเล็กน้อยเมื่อบันทึกภาพที่กำลังขยาย 3,000x (รูปที่ 2) เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวของการดูดซับ 19.59 m^2/g อนุภาคตัวดูดซับมีปริมาณรวมของรูพรุนทั้งหมด 0.079 cc/g ปริมาตรรูพรุนการดูดซับสะสม 0.074 cc/g และ รัศมีรูพรุน ในการดูดซับ \AA 18.00 โดยมีค่ารัศมีรูพรุนเฉลี่ย 59.64 \AA (ตารางที่ 1) สัดส่วนอินทรีย์วัตถุในตัวดูดซับตะกอนประปา ที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว ด้วยวิธี Combustion method และ CHNS analyzer พบสัดส่วนอินทรีย์วัตถุไนโตรเจน คาร์บอน และไฮโดรเจน เท่ากับ 0.04%, 0.04% และ 0.55% ตามลำดับ (ตารางที่ 2) ปริมาณโลหะหนักปนเปื้อน ในตัวดูดซับตะกอนประปาด้วยวิธี Atomic Emission Method พบว่า ดูดซับตะกอนประปาตรวจไม่พบการปนเปื้อนของโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู ตะกั่ว โคบอลต์ แคดเมียม และปรอท สำหรับโลหะหนักที่ยังมีการปนเปื้อนสูงสุด ได้แก่ อะลูมิเนียม (44,928.08 mg/kg) เหล็ก (15,082.98 mg/kg) และแคลเซียม (1,147.28 mg/kg) ตามลำดับ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดูดซับ

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
พื้นที่ผิว single point (m^2/g)	25.88
พื้นที่ผิว multi point (m^2/g)	26.42
พื้นที่ผิวของ langmuir (m^2/g)	102.70
พื้นที่ผิวของการดูดซับ ^a (m^2/g)	19.59
ปริมาณรวมของรูพรุนทั้งหมด (cc/g)	0.079

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
ปริมาณรูพรุนการดูดซับสะสม ^a (cc/g)	0.074
ปริมาณของรูพรุนขนาดเล็ก ^b (cc/g)	0.016
รัศมีรูพรุนเฉลี่ย (\AA)	59.64
รัศมีรูพรุนในการดูดซับ ^a (\AA)	18.00
รัศมีรูพรุนขนาดเล็ก ^b (\AA)	1.84

หมายเหตุ ^aคำนวณด้วยวิธีของ BJH method

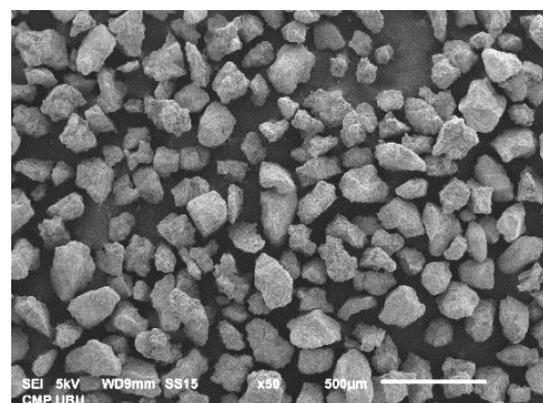
^bคำนวณด้วยวิธีของ HK method

ตารางที่ 2 สัดส่วนคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนในตัวดูดซับ

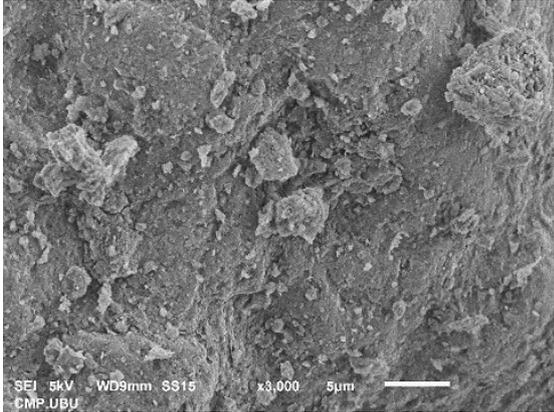
ชนิดอินทรีย์วัตถุ	ผลทดสอบ (%)
คาร์บอน (Carbon, C)	0.04 \pm 0.004
ไฮโดรเจน (Hydrogen, H)	0.55 \pm 0.330
ไนโตรเจน (Nitrogen, N)	0.04 \pm 0.002

ตารางที่ 3 ปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนในตัวดูดซับ

ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณ (mg/kg)
สารหนู (Arsenic, As)	ND
ตะกั่ว (Lead, Pb)	ND
โคบอลต์ (Cobalt, Co)	3.70
แคดเมียม (Cadmium, Cd)	ND
ปรอท (Mercury, Hg)	ND
แบเรียม (Barium Ba)	68.05
เหล็ก (Iron, Fe)	15,082.98
แมงกานีส (Manganese, Mn)	287.36
แคลเซียม (Calcium, Ca)	1,147.28
อะลูมิเนียม (Aluminium, Al)	44,928.08



รูปที่ 1 ลักษณะตัวดูดซับที่กำลังขยาย 50x



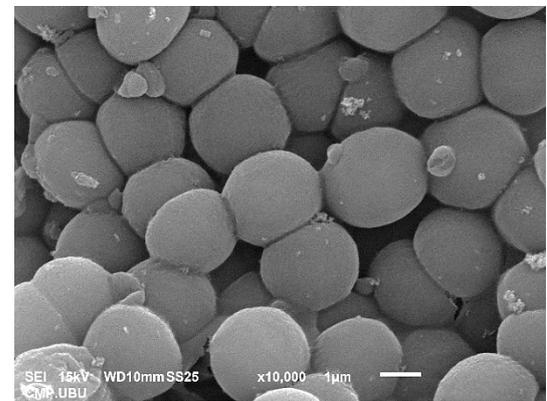
รูปที่ 2 ลักษณะตัวดูดซับที่กำลังขยาย 3,000x



รูปที่ 3 ลักษณะเซลล์ของสาหร่ายที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 10X

3.2 ลักษณะของตัวอย่างน้ำ

ลักษณะของตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการทดลองที่เก็บตัวอย่างจากระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี วันที่ 16 มกราคม 2567 พบว่า ตัวอย่างน้ำมีเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวชนิด *Microcystis aeruginosa* เป็นชนิดหลัก ลักษณะของเซลล์ค่อนข้างร้อยรูรวมกันเป็นกลุ่มโคลน (รูปที่ 3-4) วัดค่าความเข้มข้นปริมาณคลอโรฟิลล์ได้เท่ากับ 547 ± 49 ug/L ในสภาพที่เป็นกลาง พีเอช เท่ากับ 7.50 ± 0.35 ไนโตรเจน 21.35 ± 0.19 mg/L และฟอสฟอรัส 0.20 ± 0.001 mg/L ตามลำดับ (ตารางที่ 4) ซึ่งน้ำตัวอย่างนี้เป็นน้ำที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับฟอสฟอรัสต่อไป



รูปที่ 4 ลักษณะเซลล์ของสาหร่ายที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 10000X

ตารางที่ 4 ลักษณะของตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ปริมาณ	หน่วย
พีเอช (pH)	7.50 ± 0.35	-
ของแข็งแขวนลอย (SS)	42.00 ± 4.00	mg/L
ของแข็งละลายน้ำ (TDS)	99.00 ± 8.19	mg/L
ซีโอดี (COD)	74.67 ± 18.48	mg/L
บีโอดี (BOD)	53.00 ± 7.55	mg/L
ซัลไฟด์ (Sulfide)	0.27 ± 0.02	mg/L
ไนโตรเจน (TKN)	21.35 ± 0.19	mg/L
น้ำมันและไขมัน (FOG)	42.77 ± 2.45	mg/L
ฟอสฟอรัส (P)	0.20 ± 0.001	mg/L

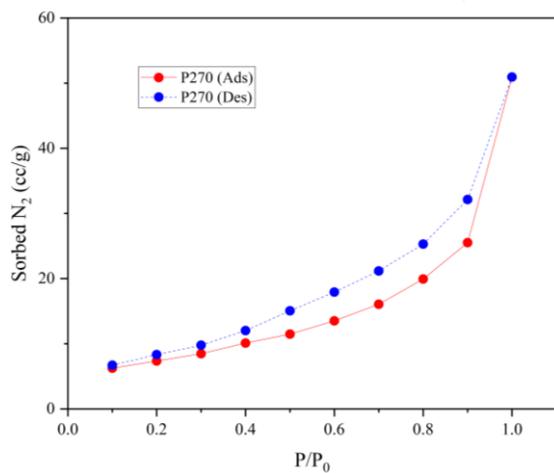
3.3 ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส

ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสด้วยการทดสอบปริมาณฟอสฟอรัสของตัวอย่างน้ำระหว่างช่วงก่อนและหลังการบำบัดด้วยการดูดซับฟอสฟอรัสในน้ำที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50-500 mgP/L นาน 72 ชั่วโมง พบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำลดลงในทุกความเข้มข้นของการทดลองโดยที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเริ่มต้น 50 mgP/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสมากที่สุด ร้อยละ 64.57 และความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเริ่มต้น 500 mgP/L มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุด 13.51 mg/kg (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ผลการทดลองบำบัดฟอสฟอรัสด้วยตัวดูดซับจากตะกอนประปา

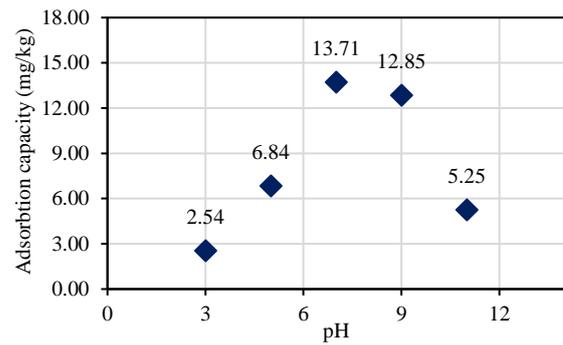
ฟอสฟอรัส (mgP/L)		การดูดซับฟอสฟอรัส	
ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ประสิทธิภาพ (%)	ความสามารถ (mg/kg)
50	17.72	64.57	3.23
100	55.66	44.34	4.43
250	168.22	32.71	8.18
500	362.87	27.43	13.71

ไอโซเทอมการดูดซับและการคายของก๊าซไนโตรเจนบนตัวดูดซับจากตะกอนประปาขนาด 270 μm ที่อุณหภูมิ 77 K พบว่าเส้นกราฟไอโซเทอมมีลักษณะเป็นแบบ Type I โดยจำแนกตามระบบของ IUPAC⁽¹⁵⁾ ปริมาณการดูดซับและปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ตามค่าของสัดส่วน P/P₀ ที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยตัวดูดซับมีแนวโน้มดูดซับและปลดปล่อยสารละลายได้ง่ายกว่าที่ความดันต่ำ (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 ไอโซเทอมการดูดซับและคายของก๊าซไนโตรเจนบนตัวดูดซับจากตะกอนประปา

อิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำที่แตกต่างกันต่อการดูดซับฟอสฟอรัสในน้ำ 500 mgP/L นาน 72 ชั่วโมง พบว่า ตัวดูดซับตะกอนประปามีความสามารถในการดูดซับได้สูงที่สุด คือ 13.71 mg/kg ในสภาพน้ำที่เป็นกลาง (พีเอช 7) รองลงมา คือ ในสภาพที่น้ำมีความเป็นเบสอ่อน (พีเอช 9) และกรดอ่อน (พีเอช 5) ตามลำดับ (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 3, 5, 7, 9 และ 11

4. อภิปรายผล

การกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียนั้นเป็นประเด็นที่สำคัญเนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักที่สามารถก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันและปัญหามลพิษในแหล่งน้ำซึ่งในระบบบำบัดน้ำเสียนี้เกิดการบลูมของไซยาโนแบคทีเรียชนิด *Microcystis aeruginosa* ซึ่งเป็นสาหร่ายที่มีพิษที่ส่งผลต่อสุขภาพคนและสัตว์น้ำได้⁽¹⁶⁾ จากผลการศึกษาอัตราส่วนของปัจจัยจำกัดในระบบบำบัดโดยพบค่า Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) ที่ 21.35 mg/L และ ฟอสฟอรัส (P) ที่ 0.20 mg/L ที่บ่งชี้ถึงความเสี่ยงสูงต่อการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันในระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งอัตราส่วน N:P ที่สูงถึงประมาณ 107:1 นี้ สะท้อนถึงภาวะอิมตัวของไนโตรเจนในระบบ⁽¹⁷⁾ แม้ว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับไนโตรเจน แต่ยังคงเป็นค่าที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ซึ่งความไม่สมดุลของธาตุอาหารดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันได้

ทั้งนี้การนำวัสดุดูดซับชนิดตะกอนประปาตัดแปลงสภาพขนาด 270 μm ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการกำจัดฟอสฟอรัส โดยงานวิจัยนี้ นำเสนอการศึกษาสมบัติพื้นผิวและปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสของวัสดุดูดซับโดยใช้เทคนิค nitrogen adsorption isotherm โดยผ่านกระบวนการเผาแบบจำกัดออกซิเจนที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}\text{C}$ ⁽¹⁷⁾ จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว ซึ่งพบว่าวัสดุดูดซับดังกล่าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงอยู่ในช่วง 25-26 ตารางเมตร

ต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวตามแบบจำลองแลงเมียร์ถึง 102 m^2/g นอกจากนี้วัสดุยังมีปริมาตรรวมของรูพรุนสูงถึง $0.079 \text{ cm}^3/\text{g}$ โดยมีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กประมาณ $0.016 \text{ cm}^3/\text{g}$ ซึ่งมีรัศมีรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 1.8 nm โดยคุณสมบัติเหล่านี้บ่งชี้ว่าเป็นวัสดุรูพรุนที่มีพื้นที่ผิวสูง มีส่วนประกอบของรูพรุนทั้งในช่วงมิลลิพอร์และไมโครพอร์ และมีรูพรุนในระดับนาโนด้วย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัส ได้แก่ พื้นที่ผิวสูง ปริมาตรรูพรุนรวมสูง และการมีรูพรุนขนาดเล็กในระดับนาโน⁽¹⁸⁾ ทั้งนี้การที่วัสดุดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลบวกต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสในน้ำเสีย โดยการมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักที่สูงขึ้นนั้นจะเพิ่มบริเวณสำหรับการดูดซับไอออนหรืออนุภาคของฟอสฟอรัสได้มากขึ้น⁽¹⁹⁾ เนื่องจากที่ผิววัสดุ มักจะมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นบริเวณจูดรอนรับการดูดซับด้วยพันธะต่างๆ โดยการมีพื้นที่ผิวที่มากขึ้นจึงหมายถึงมีจูดรอนรับนี้มากขึ้นตามไปด้วย โดยจะส่งผลให้อัตราการดูดซับฟอสเฟตบนผิววัสดุสูงขึ้น นอกจากนี้พื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงยังเป็น การเพิ่มพื้นที่ผิวของรูพรุนในวัสดุให้มากขึ้น อนุภาคฟอสเฟตจึงสามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนได้ดีมากยิ่งขึ้น เพิ่มปริมาณการดูดซับในภาพรวม ด้วยเหตุนี้การมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงจึงนับเป็นคุณสมบัติสำคัญสำหรับวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย⁽²⁰⁻²¹⁾

นอกเหนือจากปัจจัยด้านพื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุนแล้ว ค่า pH ของสารละลายยังเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสของวัสดุดูดซับ โดยจากการศึกษานี้จะพบว่า จะเกิดการดูดซับได้ดีที่พีเอช 6-9 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ต่ำและสูงจนเกินไป โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับที่ 12.85 - 13.71 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้เนื่องจากค่า pH จะมีอิทธิพลต่อทั้งสถานะของไอออนฟอสเฟตและประจุบนผิววัสดุ ที่ค่า pH ต่ำ ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปโมเลกุลประจุลบของกรด เช่น H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} เป็นต้น ซึ่งในขณะที่ค่า pH สูง จะพบในรูปของ PO_4^{3-} เป็นหลัก⁽²²⁻²⁴⁾ ซึ่งรูปแบบการอยู่ของไอออนนี้จะมีผลต่อความสามารถในการเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับผิววัสดุ นอกจากนี้ประจุบนผิววัสดุเองก็ขึ้นอยู่กับค่า pH เช่นกัน โดยที่ pH ต่ำผิวอาจมีประจุบวก ขณะที่ pH สูงผิว

อาจมีประจุลบ⁽²⁵⁾ โดยสถานะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับจึงเกิดขึ้นเมื่อประจุของฟอสเฟตไอออนมีขั้วตรงกันข้ามกับประจุบนผิววัสดุ จึงเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ทั้งนี้การควบคุมค่า pH ให้เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับให้ดูดซับไอออนฟอสเฟตได้สูงสุด⁽²⁶⁾

นอกจากนี้ตะกอนประปายังประกอบด้วยโลหะหนักหลายชนิดที่สามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสฟอรัสได้ ได้แก่ เหล็ก (15,082.98 mg/kg) อะลูมิเนียม (44,928.08 mg/kg) และแคลเซียม (1,147.28 mg/kg) โดยเหล็กสามารถรวมตัวกับฟอสเฟตกลายเป็นสารประกอบเฟอร์ริกฟอสเฟต (FePO_4) หรือเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ฟอสเฟต ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)⁽²⁷⁾ ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ การตกตะกอนของสารเหล่านี้จึงเป็นกระบวนการดูดซับฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เหล็กในตะกอนประปาสารสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้อย่างดี ในขณะที่อะลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับฟอสเฟตกลายเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO_4) ซึ่งมีความละลายน้ำต่ำมาก⁽²⁸⁻²⁹⁾ การตกตะกอนของสารประกอบนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ทำให้ตะกอนที่มีอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดี ส่วนแคลเซียมสามารถเกิดปฏิกิริยาตกตะกอนในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$)⁽³⁰⁾ ซึ่งละลายน้ำได้ต่ำ การตกตะกอนนี้ช่วยให้แคลเซียมสามารถดูดซับฟอสเฟตออกจากน้ำได้ดี โดยทั่วไปประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับมีปริมาณลดลง เนื่องจากแรงขับเคลื่อนในการดูดซับลดลง ดังนั้นในการศึกษาที่ความเข้มข้น 0.2 mgP/L อาจพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสโดยตะกอนประปานั้นจะต่ำกว่าการทดลองที่ความเข้มข้นสูงกว่า นอกจากนี้ควรทำการทดลองเพิ่มเติมที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ (0.1-1 mg/L)⁽³¹⁾ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับสภาพจริงมากขึ้น และนำไปสู่การออกแบบระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพต่อไป

การนำตะกอนที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาใช้ประโยชน์เป็นแนวทางที่น่าสนใจและมี

ประสิทธิภาพในการจัดการของเสียอย่างยั่งยืน ตะกอนประปา ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นในปริมาณมากจากระบบการผลิตน้ำประปา สามารถนำมาพัฒนาและดัดแปลงเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการดูดซับไอออนฟอสเฟต ความน่าสนใจของตะกอนประปานี้มาจากองค์ประกอบหลักที่เป็นสารประกอบของแคลเซียมเหล็ก และอะลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการดูดซับฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเหล็กและอะลูมิเนียมที่สามารถรวมตัวกับฟอสเฟตเกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำและตกตะกอน ช่วยกำจัดฟอสเฟตออกจากน้ำได้ดี

นอกจากนี้ กระบวนการเตรียมวัสดุดูดซับจากตะกอนประปายังทำได้ไม่ยาก เพียงใช้กระบวนการเผาที่อุณหภูมิไม่สูงมาก ทำให้วัสดุที่ได้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีองค์ประกอบจากธรรมชาติและใช้กระบวนการผลิตที่ประหยัดพลังงาน คุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลให้ตะกอนประปามีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับไอออนฟอสเฟตที่มีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นทางเลือกในการกำจัดของเสียที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืนและการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาตัวดูดซับจากตะกอนประปาที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์แล้ว ทำให้มีคุณสมบัติของพื้นที่ผิวจำเพาะ และรูพรุนปริมาณสูง และมีองค์ประกอบของธาตุโลหะหนักที่สำคัญได้แก่ เหล็ก อะลูมิเนียม และแคลเซียม ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตได้ดี ทั้งนี้จากผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับฟอสเฟตในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการบลูมของไซยาโนแบคทีเรียได้ซึ่งเป็นการลดสัดส่วนปัจจัยด้านธาตุอาหารไม่ให้เอื้อต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยต้องมีการควบคุมปัจจัยค่าความเป็นกรด ด่างให้อยู่ในสภาพที่เป็นกลางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้ดียิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานส่งเสริมบริหารงานวิจัย บริการวิชาการและทำนุบำรุงศิลปวัฒนธรรม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนงบประมาณการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2566

7. เอกสารอ้างอิง

1. สุวนันท์ ทั้นสมัย. การกำจัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นจากน้ำเสียชุมชนด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์และตะกอนจากการผลิตน้ำประปา. [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม]. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2565.
2. Fang X, Zhang D, Chang Z, Li R, Meng S. Phosphorus removal from water by the metal-organic frameworks (MOFs)-based adsorbents: A review for structure, mechanism, and current progress. *Environmental Research* 2023; 243(12):117816-117816.
3. Das R. Phosphorous Sources, Consequences and Removal Techniques from Water - A Review. *Progress in Chemical Science Research* 2023; 9:147-57.
4. Fan X, Wu Y, He Y, Liu H, Guo J, Li B, Peng, H. Efficient removal of phosphorus by adsorption. *Phosphorus Sulfur and Silicon and The Related Elements* 2022; 198:375-384.
5. มธุรส วัจนะชัย, ณีฐัฐ ภูเกดสิน, ศิริพร ลาภเกียรติถาวร, พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์. การคัดเลือกวัสดุสำหรับการดูดซับฟอสเฟตเพื่อใช้เป็นตัวกลางในระบบบำบัดน้ำเสีย. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9 ตามรอยพระยุคลบาท เกษตรศาสตร์กำแพงแสน. 6-7 ธ.ค. 2555; นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. นครปฐม: สำนักงานวิทยาเขตกำแพงแสน กองบริหารวิชาการและนิสิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน; 2555. น. 394-401.

6. Isaacs JD, Strangman WK, Barbera AE, Mallin MA. Microcystins and two new micropeptin cyanopeptides produced by unprecedented *Microcystis aeruginosa* blooms in North Carolina's Cape Fear River. *Harmful Algae* 2014; 31:82–86.
7. สำนักงานบริหารกายภาพและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. รายงานผลการบำบัดน้ำเสียประจำปี 2564. สำนักงานบริหารกายภาพและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี; 2564.
8. Mohsenpour SF, Hennige S, Willoughby N, Adeloye A, Gutierrez T. Integrating micro-algae into wastewater treatment: A review. *Science of the Total Environment* 2021; 752:142168.
9. Florida LAKEWATCH. A Beginner's Guide to Water Management [Internet]. [cited 2023 May 26]. Available from: https://lakewatch.ifas.ufl.edu/media/lakewatchifasufledu/extension/circulars/101_ABCs_2004copy.pdf
10. Romanis CS, Pearson LA, Neilan BA. Cyanobacterial blooms in wastewater treatment facilities: Significance and emerging monitoring strategies. *Health & Environmental Research Online (HERO)* 2021; 180(106123).
11. Welch EB, Schriever GD. Alum treatment effectiveness and longevity in shallow lakes. *Hydrobiologia* 1994; 275–276(1):423–31.
12. Kasprzyk M, Czerwionka K, Gajewska M. Waste materials assessment for phosphorus adsorption toward sustainable application in circular economy. *Resources, Conservation & Recycling* 2020; 168(105335):1–9.
13. Kuster AC, Huser BJ, Thongdamrongtham S, Padungthon S, Junggoth R, Kuster AT. Drinking water treatment residual as a ballast to sink *Microcystis cyanobacteria* and inactivate phosphorus in tropical lake water. *Water Res* 2021; 207(117792).
14. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. Washington DC: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation; 2005.
15. Seader JD, Henley EJ. Separation process principles. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1998.
16. Rastogi RP, Sinha RP, Incharoensakdi A. The cyanotoxin-microcystins: Current overview. *Environmental Science and Biotechnology* 2014; 13:215–49.
17. Kuster AC, Huser BJ, Padungthon S, Junggoth R, Kuster AT. Washing and heat treatment of aluminum-based drinking water treatment residuals to optimize phosphorus sorption and nitrogen leaching: Considerations for lake restoration. *Water (Switzerland)* 2021; 13(18):2465.
18. Assoualaye G, Djongyang N. Influence of pore size and isosteric heat of adsorption of some metal-organic frameworks on the volumetric and gravimetric adsorption capacities of hydrogen at room temperature. *Polymer Bulletin* 2021; 78(9):1–15.
19. Matsuzawa F, Amano Y, Machida M. Phosphate Ion Adsorption Characteristics of Nitrogen Doped Carbon-based Adsorbents Prepared from Sucrose, Melamine, and Urea. *Carbon Reports* 2023; 2(2):114–22.
20. Zhang Y, Song C, Ji L, Lui Y, Xiao J, Cao X, Zhou Y. Cause and effect of N/P ratio decline with eutrophication aggravation in shallow lakes.

- Science of The Total Environment 2018; 627:1294-1302.
21. Brontowiyono W, Patra I, Hussein SA, Alimuddin, Mahdi AB, Izzat SE, et al. Phosphate Ion Removal from Synthetic and Real Wastewater Using MnFe₂O₄ Nanoparticles: A Reusable Adsorbent. Acta Chim Slov 2022; 69(3):681–93.
22. Zhang Y, Yang K, Fang Y, Ding J, Zhang H. Removal of Phosphate from Wastewater with a Recyclable La-Based Particulate Adsorbent in a Small-Scale Reactor. Water (Switzerland) 2022; 14(15):2326.
23. Liu T, Ji B, Wu Y, Liu Z, Wang W. Effects of the pH Value on the Electrodeposition of Fe-P Alloy as a Magnetic Film Material. Journal of Physical Chemistry C 2022; 126(36):15472–15484.
24. Ye T, Pollack GH. Do aqueous solutions contain net charge?. PLoS One 2022; 17(10):e0275953.
25. Hantal G, Klíma M, McFegan L, Kolafa J, Jedlovsky P. Does the Sign of Charge Affect the Surface Affinity of Simple Ions? Journal of Physical Chemistry B 2023; 127(27):6205–6216.
26. Kang L, Mucci M, Lürling M. Influence of temperature and pH on phosphate removal efficiency of different sorbents used in lake restoration. Science of the Total Environment. 2021; 812:151489.
27. Zhang Y, Yang K, Fang Y, Ding J, Zhang H. Removal of Phosphate from Wastewater with a Recyclable La-Based Particulate Adsorbent in a Small-Scale Reactor. Water (Switzerland) 2022; 14(15):2326.
28. Yankwa Djobo JN, Nkwaju RY. Preparation of acid aluminum phosphate solutions for metakaolin phosphate geopolymer binder. RSC Adv 2021; 11(51):32258–32268.
29. Goj P, Handke B, Stoch P. Vibrational characteristics of aluminum–phosphate compounds by an experimental and theoretical approach. Dental science reports 2022; 12(1):17495.
30. Labjar H, Chair H. Synthesis and characterization of apatite silicated powders with wet precipitation method. E3S Web of Conferences 2021; 234:00106.
31. Li BG, Chen Y, Ren G, Zhao R, Zheneng Wu Z, Zhu F, Ma X. Efficient low-concentration phosphate removal from sub-healthy surface water by adsorbent prepared based on functional complementary strategy. Science of The Total Environment 2023; 902:166476.