



KKU SCIENCE JOURNAL

Journal Home Page : <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/KKUSciJ>

Published by the Faculty of Science, Khon Kaen University, Thailand



ประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ใบมะม่วงผสมตะกอนดิน จากกระบวนการผลิตน้ำประปา

Efficiency of Phosphate Adsorption in Synthetic Wastewater using Mango Leaves Combined with Tap Water Treatment Plant Sludge

สุภาวดี น้อยน้ำใส^{1*}, ฉัตรชัย ชาภา¹, สิทธิศักดิ์ ไหวพริบ¹ และ ปิยะดา วชิระวงศ์กร¹Supawadee Noinumsai^{1*}, Chatchai Chada¹, Sitthisak Waipib¹ and Piyada Wachrirawongsakorn¹¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก 65000¹Division of Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok, 65000, Thailand

บทคัดย่อ

ฟอสเฟตเป็นสารมลพิษหลักที่ก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำ การพัฒนาวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพและราคาประหยัดจึงมีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมจากตะกอนดินโรงผลิตประปา (S) ผสมกับใบมะม่วง (LM) อัตราส่วน 100:0 70:30 50:50 30:70 และ 0:100 (โดยน้ำหนัก) ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วน S-LM (100:0) และ S-LM (70:30) ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถนำมาขึ้นรูปอัดแท่งได้และไม่ละลายน้ำ จากนั้นปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับด้วยการเคลือบผิวด้วยสารไคโตซาน (S-LM+C) ผลการศึกษาระยะเวลาสมดุลการดูดซับ พบว่า ตัวดูดซับ S-LM (70:30) ปริมาณ 1 กรัม ณ อุณหภูมิห้อง ที่ pH เท่ากับ 7 ทั้งที่เคลือบไคโตซานจะเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าไม่เคลือบไคโตซาน ซึ่งมีระยะเวลาเข้าสู่สมดุลภายใน 16 ชั่วโมง ขณะที่ตัวดูดซับที่ไม่เคลือบต้องใช้เวลาสมดุลนานถึง 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับพบว่า ตัวดูดซับที่เคลือบไคโตซานมีร้อยละการกำจัดสูงกว่าตัวดูดซับที่ไม่เคลือบ ซึ่งมีการกำจัดฟอสเฟตเท่ากับ 60.00% และ 44.00% ตามลำดับ ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับฟอสเฟตบนพื้นผิวตัวดูดซับแต่ละชนิด พบว่า ค่า R^2 สูงสุดเท่ากับ 0.9910 ซึ่งใกล้เคียง 1 แสดงว่ารูปแบบที่สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของ Langmuir Isotherm แสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว และสำหรับ S-LM (70:30)+C มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 158.7302 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่ตัวดูดซับที่ไม่เคลือบ S-LM (100:0) มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 14.7059 มิลลิกรัมต่อกรัม ทั้งนี้การเคลือบไคโตซานโดยเฉพาะตัวดูดซับ S-LM (70:30) ที่เคลือบไคโตซานมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากช่วยเพิ่มประจุบวกบนพื้นผิวตัวดูดซับ ได้แก่ หมู่อะมิโน ($-NH_3^+$) ทำให้เกิดแรงดึงดูดกับไอออนฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ที่มีประจุลบผ่านกลไกการดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต ส่งผลให้ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพสูง จึงเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่เป็นป้อนฟอสเฟต

*Corresponding Author, E-mail: supawadeebum@psru.ac.th

Received date: 22 October 2025 | Revised date: 28 January 2026 | Accepted date: 26 March 2026

doi: 10.14456/kkuscij.2026.28

ABSTRACT

Phosphate is a major pollutant causing eutrophication in aquatic environments. Developing cost-effective and efficient adsorbent materials is crucial for wastewater treatment. This research aimed to investigate the efficiency of phosphate adsorption in synthetic wastewater using adsorbents prepared from tap water treatment plant sludge (S) mixed with mango leaves (LM) at ratios of 100:0, 70:30, 50:50, 30:70, and 0:100 by weight. The results showed that S-LM ratios of 100:0 and 70:30, calcined at 500°C for 2 hours, could be successfully formed into pellets and were water-insoluble. The adsorbent surface was then modified by chitosan coating. The equilibrium time study revealed that 1 g of S-LM (70:30) adsorbent at room temperature and pH 7 reached adsorption equilibrium faster with chitosan coating (16 hours) compared to the uncoated adsorbent (24 hours). The adsorption efficiency study demonstrated that chitosan-coated adsorbents achieved higher removal efficiency than uncoated ones, with phosphate removal rates of 60.00% and 44.00%, respectively. The adsorption isotherm study showed that the highest correlation coefficient (R^2) was 0.9910, close to 1, indicating excellent agreement with the Langmuir isotherm model and confirming monolayer adsorption behavior. The maximum adsorption capacity of S-LM (70:30)+C was 158.7302 mg/g for the chitosan-coated adsorbent and 14.7059 mg/g for S-LM (100:0). The chitosan-coated S-LM (70:30) adsorbent exhibited the highest efficiency due to the introduction of positively charged functional groups, particularly protonated amino groups ($-NH_3^+$), which attract negatively charged phosphate ions (PO_4^{3-}) through electrostatic attraction mechanisms. This enhanced performance makes the adsorbent highly suitable for application in treating phosphate-contaminated wastewater.

คำสำคัญ: การดูดซับ ฟอสเฟต ใบมะม่วง ตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา ไคโตซาน

Keywords: Adsorption, Phosphate, Mango Leaves, Tap Water Treatment Plant Sludge, Chitosan

บทนำ

ฟอสเฟต (Phosphate) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต แต่เมื่อมีปริมาณมากเกินไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ กลับกลายเป็นสารมลพิษที่ทำให้เกิดปัญหาโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งเป็นภาวะที่มีธาตุอาหารมากเกินไป ส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตของสาหร่ายและพืชน้ำอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และระบบนิเวศโดยรวม (Smith and Schindler, 2009) แหล่งที่มาของฟอสเฟตในแหล่งน้ำ ส่วนใหญ่มาจากน้ำทิ้งจากชุมชน น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ย ผงซักฟอก และการแปรรูปอาหาร รวมถึงน้ำท่าจากพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ (Correll, 1998; Sharpley *et al.*, 2013) ในประเทศไทยปัญหาฟอสเฟตในแหล่งน้ำมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการเกษตรกรรมและชุมชนหนาแน่นส่งผลให้แหล่งน้ำธรรมชาติหลายแห่งเกิดปัญหาคุณภาพน้ำเสื่อมโทรม การพัฒนาเทคโนโลยีการกำจัดฟอสเฟตจากน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูง และราคาประหยัดจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการแก้ไขปัญหาดังกล่าว (กรมควบคุมมลพิษ, 2565) นอกจากปัญหาฟอสเฟตแล้ว แหล่งน้ำยังประสบปัญหาจากโลหะหนักที่ปนเปื้อน เช่น ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม พรอท นิกเกิล สังกะสี ทองแดง เหล็ก และแมงกานีส ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท การสะสมของโลหะหนักในน้ำไม่เพียงส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศแต่ยังสร้างความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น การเกิดโรคเรื้อรังและปัญหาทางระบบประสาท (Natrayan *et al.*, 2022) ปัจจุบันจึงมีความจำเป็นในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยการพัฒนากลยุทธ์ในการจัดการ

มลพิษน้ำ รวมถึงการสนับสนุนการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ การตรวจสอบคุณภาพน้ำอย่างสม่ำเสมอ และการปรับปรุงเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมการพัฒนาที่ยั่งยืนในระยะยาว (รัฐพลและคณะ, 2562)

ไบโอมะม่วง จัดเป็นของเสียที่เหลือทิ้งทางการเกษตรในสวนมะม่วงของเกษตรกร หากไม่มีการจัดการที่ดี อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหามลพิษทางอากาศ ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำไบโอมะม่วงมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากไบโอมะม่วงมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญหลายชนิด ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) ลิกนิน (Lignin) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการจับไอออนฟอสเฟต เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) และหมู่ฟีนอลิก ทำให้ไบโอมะม่วงมีศักยภาพในการดูดซับฟอสเฟตผ่านกลไกการแลกเปลี่ยนไอออน และการดูดซับทางกายภาพ (Bhatnagar *et al.*, 2015; Dey *et al.*, 2022) ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้สามารถหาได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำทั่วไป (Dey and Haripavan, 2023) ซึ่งการนำไบโอมะม่วงมาใช้ในการกระบวนการบำบัดน้ำ ยังเป็นการส่งเสริมการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างยั่งยืน และสามารถนำไปใช้ในระดับชุมชนเพื่อการจัดการน้ำเสียในพื้นที่ชนบทที่ขาดแคลนเทคโนโลยีขั้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถช่วยลดภาระในการจัดการน้ำเสียของชุมชนที่มีทรัพยากรจำกัด อีกทั้งยังช่วยเสริมสร้างการมีส่วนร่วมของชุมชนในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปานั้น เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟต (Alum) หรือเฟอริกคลอไรด์ ทำให้ตะกอนดินนี้มีส่วนประกอบหลักเป็นโลหะออกไซด์ของอะลูมิเนียม (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษในการดูดซับฟอสเฟตได้ดีเยี่ยม เนื่องจากโครงสร้างผิวของโลหะออกไซด์เหล่านี้มีประจุบวก โดยเฉพาะในสภาวะ pH ที่เป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย ทำให้สามารถดึงดูดไอออนฟอสเฟตที่มีประจุลบ ($H_2PO_4^-$) ผ่านกลไกการดูดซับด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต และกลไกการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ โดยไอออนฟอสเฟตจะแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนพื้นผิวของโลหะออกไซด์ ทำให้เกิดการจับกันอย่างแน่นแฟ้น (Babatunde and Zhao, 2007; Yang *et al.*, 2006) การนำตะกอนจากกระบวนการผลิตประปามาใช้ประโยชน์นี้ จึงเป็นทั้งการแก้ปัญหาการจัดการของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำประปา และเป็นการพัฒนาวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟอสเฟต สอดคล้องกับหลักการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลายชนิดในการดูดซับฟอสเฟต เช่น เปลือกข้าว แกลบ ชี้เถ้าชานอ้อย และกะลามะพร้าว โดยวัสดุเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการดูดซับฟอสเฟตที่แตกต่างกันไปตามองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างพื้นผิว (Loganathan *et al.*, 2014) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้ตะกอนดินจากโรงผลิตน้ำประปาเพียงอย่างเดียวในการดูดซับฟอสเฟต ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีแต่ยังมีข้อจำกัดในด้านความจุการดูดซับสูงสุด (Huang *et al.*, 2017) การพัฒนาตัวดูดซับแบบผสมผสานโดยการนำวัสดุไบโอมะม่วงเหลือทิ้งชุมชนมาผสมกับตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้ เนื่องจากเกิดการบูรณาการคุณสมบัติการดูดซับจากทั้งสองวัสดุ ทำให้มีจุดดูดซับที่หลากหลายและเพิ่มความจุการดูดซับโดยรวม (De Gisi *et al.*, 2016) อีกทั้งการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไคโตซาน (Chitosan) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีหมู่อะมิโน ($-NH_2$) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวนมาก ได้รับความสนใจอย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถจับกับไอออนฟอสเฟตได้ดี โดยเฉพาะในสภาวะ pH ที่เหมาะสม ซึ่งหมู่อะมิโนจะถูกโปรตอนเนตให้มีประจุบวก ($-NH_3^+$) และดึงดูดไอออนฟอสเฟตที่มีประจุลบ (Guibal, 2004; Sowmya and Meenakshi, 2013)

อย่างไรก็ตามการศึกษการใช้ไบโอมะม่วงเหลือทิ้งในชุมชนผสมกับจากตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาและปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารไคโตซานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตยังมีอยู่จำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำสังเคราะห์ด้วยไบโอมะม่วงผสมตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา และทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยสารไคโตซาน ทั้งนี้เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้ง รวมถึงเป็นแนวทางในการลดปริมาณของเสียจากภาคเกษตรกรรมและโรงผลิตน้ำประปาชุมชน ตลอดจนเป็นแนวทางในการจัดการขยะจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่างยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวดูดซับจากใบมะม่วงผสมตะกอนผลิตน้ำประปา

ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองวิจัยนี้ คือ ใบมะม่วงที่ได้รับความอนุเคราะห์มาจากสวนมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง และน้ำดอกไม้เบอร์ 4 อำเภอวังทอง และตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปา ที่ได้รับความอนุเคราะห์มาจากวัดสุทธวาสดี อำเภอบ้านคลอง จังหวัดพิษณุโลก โดยนำมาตากแดดให้แห้งและนำมาบดให้ละเอียดแล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร (รูปที่ 1) ทำการขึ้นรูปตัวดูดซับโดยผสมใบมะม่วงกับตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาในอัตราส่วน 100:0 70:30 50:50 30:70 และ 0:100 โดยน้ำหนัก เติมน้ำกลั่น 10.00% เพื่อให้อนุภาคมีความเหนียวพอที่จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการสร้างพันธะไฮโดรเจนชั่วคราวระหว่างอนุภาค ในขณะที่องค์ประกอบของลิกนินในใบมะม่วงทำหน้าที่เป็นสารยึดเกาะธรรมชาติ นำมาบดเป็นผงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 – 1 เซนติเมตร (รูปที่ 1) จากนั้นนำไปเผาในเตาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ดัดแปลงมาจากเรศและกิตตินันท์, 2567) หลังจากนั้นอบให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำไปใส่ตู้ดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพต่อไป ทำการทดสอบการละลายของตัวดูดซับในอัตราส่วน ปริมาณ 1 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปเข้าเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 1 ตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปา (ก) ใบมะม่วงแห้งทั้งตากแห้งและนำบดละเอียด (ข) และตัวอย่างการขึ้นรูปตัวดูดซับ (ค)

2. การเตรียมสารละลายฟอสเฟตสังเคราะห์

เตรียมสารละลายสต็อกฟอสเฟต เตรียมโดยชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 0.4395 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) เจือจางสารละลายสต็อก เป็นความเข้มข้น 5 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยดูดสารละลายสต็อก 2.5 5 10 15 20 และ 25 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3. การเตรียมสารละลายโคโคซาน

นำผงโคโคซาน (Deacetylation $\geq 90.00\%$) จำนวน 1.5 กรัม ละลายในสารละลายกรดอะซิติก 1.00% (v/v) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ซึ่งเตรียมโดยเจือจางกรดอะซิติกเข้มข้น (99.00%) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นจนครบปริมาตร 100 มิลลิลิตร ได้สารละลายโคโคซาน 1.50% (w/v) (Souza *et al.*, 2017) แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สารละลายโคโคซานที่พร้อมใช้งานในการทดลองต่อไป

4. การเคลือบด้วยสารโคโตซาน

การเคลือบผิวด้วยโคโตซานเพื่อปรับปรุงพื้นผิวดูดซับ โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันอะมิโน ($-NH_2$) และไฮดรอกซิล ($-OH$) บนพื้น ผิวดูดซับ ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟต ผ่านกลไกการแลกเปลี่ยนไอออน และแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Sowmya and Meenakshi, 2013) โดยการนำตัวดูดซับ 1 กรัม (เตรียมได้จากข้อ 2.1) ไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.00% นาน 24 ชั่วโมง แล้วกรองและผึ่งแห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งไม่เคลือบโคโตซาน อีกส่วนแช่ในสารละลายโคโตซาน (กำหนดให้ตัวดูดซับที่เคลือบแทนด้วยสัญลักษณ์ด้วย C) โดยใช้อัตราส่วนตัวดูดซับต่อสารละลายโคโตซาน เท่ากับ 5:1 แล้วแช่ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง เมื่อเสร็จแล้วกรองออก ผึ่งให้แห้ง แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจน pH เป็นกลาง จากนั้นผึ่งแห้งอีกครั้ง และเก็บในโถสุญญากาศเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

5. ผลของระยะเวลาสมดุลต่อการดูดซับฟอสเฟต

เตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ฟอสเฟตใส่ขวดรูปชมพู่ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ปรับค่า pH เท่ากับ 7 แล้วชั่งตัวดูดซับปริมาณ 1 กรัมใส่ขวดรูปชมพู่ แล้วนำไปแช่ในเวลาที่สมดุลที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 2.5 (ตัวดูดซับที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยโคโตซาน ใช้เวลาแช่สมดุลเท่ากับ 16 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ) และปรับค่า pH เท่ากับ 7 ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30°C จากนั้นเก็บตัวอย่างส่วนไปทำการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยวิธีแอสคอบิกที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตรด้วยเครื่อง Spectrophotometer

6. ผลของความเข้มข้นต่อการดูดซับฟอสเฟต

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 5 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ แล้วนำตัวดูดซับ 1 กรัมใส่ขวดรูปชมพู่ นำไปแช่ในระยะเวลาที่สมดุลที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 2.5 (ตัวดูดซับที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยโคโตซาน ใช้เวลาแช่สมดุลเท่ากับ 16 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ) และปรับค่า pH เท่ากับ 7 ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30°C จากนั้นเก็บตัวอย่างส่วนไปทำการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยเครื่อง Spectrophotometer (APHA-AWWA-WEF, 2017)

7. ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต

สามารถคำนวณได้จากค่าการกำจัดฟอสเฟต (%) (ชนิภรณ์และคณะ, 2563) ดังสมการที่ 1

$$\text{ร้อยละการดูดซับ} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e คือ ความเข้มข้นของสมดุลฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)

8. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

ทำได้โดยชั่งตัวดูดซับปริมาณ 1 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ปริมาณ 250 มิลลิลิตร เติมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ฟอสเฟต ที่มีความเข้มข้น 5 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร พร้อมชุดควบคุม (สารละลายฟอสเฟตที่ไม่มีการเติมตัวดูดซับ) ที่อุณหภูมิห้อง และมี pH เท่ากับ 7 จากนั้นนำไปแช่ 100 รอบต่อนาที ในระยะเวลาสมดุลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 5 จากนั้นตัวอย่างน้ำส่วนที่ไปวิเคราะห์หาปริมาณสารละลายฟอสเฟตที่เหลือ ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) จากนั้นศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับเพื่อใช้อธิบายรูปแบบของการดูดซับ ซึ่งประกอบด้วยไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) โดยการพล็อตกราฟระหว่าง q_e กับ C_e จะได้เส้นตรง ซึ่งค่า q_m คำนวณได้จากความชัน (slope = $1/q_m$) และค่า K_L คำนวณได้จากจุดตัดแกน Y ดังสมการที่ 2 (Ho, 2006) และสมการไอโซเทอมของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) (เสาวภา, 2559) โดยการพล็อตกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้เส้นตรง ซึ่งค่า K_F คำนวณได้จากจุดตัดแกน Y (intercept = $\log K_F$) และค่า n คำนวณได้จากความชัน (slope = $1/n$) ดังสมการที่ 3

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อปริมาณสารตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่ถูกต้องสูงสุดบนพื้นผิวของสารดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ (มิลลิกรัม)

K_L คือ ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์

C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (3)$$

q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อปริมาณสารตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_f คือ ค่าคงที่ของฟรอนดลิชที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ

C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$1/n$ คือ ค่าความหนาแน่นของการดูดซับ (adsorption intensity)

9. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟต สามารถวิเคราะห์ได้การนำค่าเฉลี่ย และวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-Way ANOVA) เมื่อพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติวิเคราะห์ SPSS

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการศึกษาการขึ้นรูปตัวดูดซับ

ผลการศึกษาการขึ้นรูปตัวดูดซับระหว่างตะกอนดินจากโรงผลิตน้ำประปา (S) และใบมะม่วง (LM) ในอัตราส่วน 100:0 70:30 50:50 30:70 และ 0:100 โดยน้ำหนัก พบว่า S-LM (50:50) S-LM (30:70) และ S-LM (0:100) ไม่สามารถขึ้นรูปได้ แต่ในขณะที่ S-LM (100:0) และ S-LM (70:30) เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถขึ้นรูปได้ ดังตารางที่ 1 เนื่องจากตะกอนดินมีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน และการรักษาโครงสร้างของเม็ดตัวดูดซับหลังการเผา จะช่วยให้เกิดการเผาติดกันของอนุภาคดิน ทำให้เกิดความแข็งแรง คงสภาพโครงสร้างไว้ ไม่ละลายน้ำและความทนทานต่อการละลายน้ำ จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับ ดวงพรและอัจฉรา (2550) ผลการศึกษาพบว่าการขึ้นรูปตัวดูดซับที่ทำจากดินเหนียวและเถ้ากลบดำในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 1:0 1:1 2:1 3:1 และ 0:1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ผสมน้ำกลั่นปราศจากไอออนแล้วขึ้นรูปโดยนำไปเผาที่ 550°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อีกทั้งสอดคล้องกับธเรศและกิตตินันท์ (2567) ผลการศึกษาพบว่าการขึ้นรูปของตัวดูดซับที่ทำจากดินเหนียวผสมซีลี้อยู่ในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ในอัตราส่วน 10:90 20:80 30:70 40:60 50:50 60:40 70:30 80:20 และ 90:10 โดยน้ำหนัก พบว่า สามารถขึ้นรูปได้ โดยการเผาที่อุณหภูมิเหมาะสมเท่ากับ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมจะส่งผลทำให้ดินมีความสุกตัว แล้วเมื่อดินสุกตัวอนุภาคดินจะเกาะกันมากขึ้นและแข็งขึ้น เมื่อนำมาเขย่ากับน้ำกลั่น ทำให้ตัวดูดซับที่ขึ้นรูปได้ไม่แตกและละลาย

ตารางที่ 1 การขึ้นรูปตัวดูดซับด้วยตะกอนดินจากโรงผลิตน้ำประปาและไบโอมะม่วง

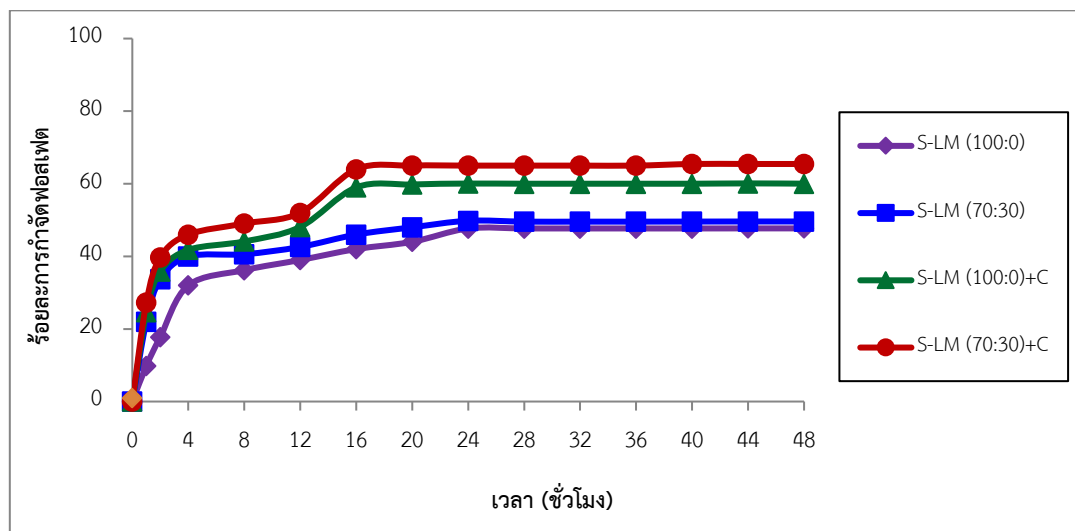
อัตราส่วนการขึ้นรูปและการละลายน้ำของตัวดูดซับจาก ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาสมไบโอมะม่วง	เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 500°C (เวลา 2 ชั่วโมง)	
	การขึ้นรูป	ทดสอบการละลาย
S-LM (100:0)	✓	ไม่ละลาย
S-LM (70:30)	✓	ไม่ละลาย
S-LM (50:50)	×	ละลาย
S-LM (30:70)	×	ละลาย
S-LM (0:100)	×	ละลาย

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ ✓ หมายถึง สามารถขึ้นรูปได้ สัญลักษณ์ × หมายถึง ไม่สามารถขึ้นรูปได้

2. ผลการศึกษาระยะเวลาสมมูลต่อการดูดซับฟอสเฟต

ผลการศึกษาระยะเวลาสมมูลของการดูดซับฟอสเฟตสังเคราะห์โดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาสมไบโอมะม่วง พบว่า ตัวดูดซับที่เคลือบไคโตซานสามารถเข้าสู่สมมูลเร็วกว่าตัวดูดซับที่ไม่เคลือบไคโตซาน โดยมีระยะเวลาในการเข้าสู่สมมูลเท่ากับ 16 ชั่วโมง ขณะที่ตัวดูดซับที่ไม่เคลือบไคโตซานเวลาที่มีระยะเวลาเข้าสู่สมมูลของการดูดซับอยู่ที่ประมาณ 24 ชั่วโมง (รูปที่ 2) ดังนั้นจึงส่งผลให้ตัวดูดซับ S-LM (70:30)+C มีอัตราการดูดซับที่เร็วกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวดูดซับที่ไม่เคลือบไคโตซาน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าระยะเวลาสมมูลของตัวดูดซับที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ (16 - 24 ชั่วโมง) มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยสูตรรัตน์และคณะ (2562) ที่ศึกษาการดูดซับฟอสเฟตด้วยกากมันสำปะหลังดัดแปร ซึ่งใช้ระยะเวลาสมมูลประมาณ 20 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่มีองค์ประกอบโครงสร้างเซลลูโลสลักษณะคล้ายกัน จึงมีแนวโน้มระยะเวลาสมมูลที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาสมมูลของตัวดูดซับที่เคลือบไคโตซาน (16 ชั่วโมง) ซึ่งมีระยะเวลาสมมูลเร็วกว่างานวิจัยของปิยนุชและคณะ (2565) ที่ศึกษาผักตบชวาปรับสภาพด้วย NaOH ซึ่งใช้เวลาสมมูลถึง 48 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากการเคลือบไคโตซานช่วยเพิ่มจุดดูดซับที่ว่องไวต่อไอออนฟอสเฟตมากกว่าการปรับสภาพด้วยสารเบสเพียงอย่างเดียว สนับสนุนกลไกการดูดซับด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่เคลือบไคโตซานมีระยะเวลาสมมูลที่เร็วกว่า เนื่องจากกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นหลายรูปแบบร่วมกัน ได้แก่ การดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต โดยสารไคโตซานมีหมู่ฟังก์ชันแอมิโน ($-NH_2$) ที่สามารถโปรตอนเป็น $-NH_3^+$ ในสภาวะที่เหมาะสมทำให้เกิดแรงดึงดูดกับไอออนฟอสเฟต ($H_2PO_4^-$) ที่มีประจุลบ (Usevičiūtė et al., 2025) การสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) ของไคโตซานกับหมู่ฟอสเฟต และการเกิดพันธะเชิงซ้อนกับองค์ประกอบโลหะในตะกอนดิน โดยตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปามีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์ สามารถสร้างพันธะเชิงซ้อนกับฟอสเฟตผ่านกลไกการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ร่วมกับการเกิดตะกอนร่วมในรูปของ $AlPO_4$ หรือ $FePO_4$ (Zhang et al., 2021) นอกจากนี้ การเคลือบไคโตซานยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ โดยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนของวัสดุ ส่งผลให้การแพร่ของไอออนฟอสเฟตเข้าสู่ตำแหน่งการดูดซับภายในโครงสร้างเกิดขึ้นได้รวดเร็วยิ่งขึ้น (Usevičiūtė et al., 2025) สอดคล้องกับงานวิจัยของนพภูและพงศกร (2555) ได้ทำการศึกษาระยะเวลาสมมูลของตัวดูดซับที่ทำจากดินเหนียวและดินทรายแป้ง ตัวดูดซับที่ทำจากดินทั้งสองชนิดมีพฤติกรรมในการดูดซับนิเกิลที่คล้ายกัน คือ ความเข้มข้นของสารละลายจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก และหลังจากนั้นจะลดลงอย่างช้า ๆ จนค่อนข้างคงที่ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมมูลภายใน 1 ชั่วโมง อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Usevičiūtė et al. (2025) ที่ศึกษาการกำจัดฟอสเฟตโดยใช้ตัวดูดซับจากไบโอชาร์ที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน พบว่าตัวดูดซับที่เคลือบไคโตซานสามารถเข้าสู่สมมูลการดูดซับได้เร็วกว่าที่ไม่เคลือบไคโตซาน ซึ่งมีระยะเวลาเข้าสู่สมมูลภายใน 120 นาที และสามารถดูดซับฟอสเฟตได้สูงถึง 88.07% ภายใน 30 นาทีแรก ซึ่งเร็วกว่าไบโอชาร์ที่ปรับปรุงด้วยเซอร์โคเนียมถึง 2 เท่า ทั้งนี้เนื่องจาก

การเคลือบโคโดซานไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความเร็วในการดูดซับเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพและความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับอีกด้วย นอกจากนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2021) ผลการศึกษาคุณสมบัติการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตด้วย CaCO_3 จากเปลือกไข่ไก่และ CaO จากเปลือกไข่ไก่เผา พบว่า การใช้ CaO จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับ พบว่ามีระยะเวลาในการดูดซับเร็วกว่า โดยมีระยะเวลาสมดุลเท่ากับ 30 นาที และมีประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่า 97.00% เมื่อเทียบการใช้ CaCO_3 จากเปลือกไข่ไก่ ซึ่งมีระยะเวลาสมดุลนานถึง 180 นาที และมีประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตอยู่ที่ 80.00% (เสาวภา, 2559)



รูปที่ 2 ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับฟอสเฟตของตัวดูดซับ โดยกำหนดให้สัญลักษณ์ S-LM (100:0) S-LM (70:0) หมายถึง ตัวดูดซับที่ทำจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาผสมไบโอม่วงที่ไม่เคลือบอัตราส่วน 100:0 และ 70:30 และ S-LM (100:0)+C S-LM (70:0)+C หมายถึง ตัวดูดซับที่ทำจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาผสมไบโอม่วงที่เคลือบโคโดซาน อัตราส่วน 100:0 และ 70:30

3. ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์หลังการดูดซับตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาผสมไบโอม่วงทั้งที่ไม่เคลือบ ได้แก่ S-LM (100:0) S-LM (70:30) และเคลือบโคโดซาน ได้แก่ S-LM (100:0)+C และ S-LM (70:30)+C แสดงให้เห็นได้ว่าในน้ำเสียสังเคราะห์เหลือความเข้มข้นของฟอสเฟตที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยพบว่าหลังจากดูดซับที่ความเข้มข้น 5 10 20 30 40 และ 50 (มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่าอัตราส่วน S-LM (70:30)+C สามารถดูดซับได้ดีที่สุด ซึ่งมีปริมาณการเหลือของฟอสเฟตอยู่ที่ 2.80 ± 0.01 6.70 ± 0.01 10.02 ± 0.01 17.47 ± 0.01 25.00 ± 0.01 และ 35.00 ± 0.01 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับนี้มีประสิทธิภาพสูงสุดในทุกระดับความเข้มข้น ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการกำจัดของ S-LM (70:30)+C เท่ากับ $44.00 \pm 0.05\%$ $66.00 \pm 0.05\%$ $49.90 \pm 0.10\%$ $1.77 \pm 0.01\%$ $37.50 \pm 0.10\%$ และ $30.00 \pm 0.02\%$ ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ทั้งนี้เนื่องจากตัวดูดซับมีความสามารถในการลดปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ จึงมีแนวโน้มว่าการผสมตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปาในสัดส่วนที่เหมาะสมจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากตะกอนดินมีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์ ซึ่งสามารถเกิดพันธะกับฟอสเฟตได้ดี (ตารางที่ 2) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Taweekarn *et al.* (2024) พบว่าไฮโดรเจลที่ผสมอนุภาคนาโนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตได้ดี โดยสามารถกำจัดฟอสเฟตได้สูงถึง 99.99%

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	S-LM (100:0)	S-LM (70:30)	S-LM (100:0)+C	S-LM (70:30)+C
5	3.95 ± 0.05 ^a	3.01 ± 0.01 ^b	2.95 ± 0.01 ^c	2.80 ± 0.01 ^d
10	7.15 ± 0.03 ^a	6.95 ± 0.01 ^b	6.83 ± 0.01 ^c	6.70 ± 0.01 ^d
20	11.33 ± 0.02 ^a	11.08 ± 0.01 ^b	10.50 ± 0.01 ^c	10.02 ± 0.01 ^d
30	21.50 ± 0.01 ^a	20.00 ± 0.00 ^b	19.58 ± 0.01 ^c	17.47 ± 0.01 ^d
40	32.50 ± 0.05 ^a	30.50 ± 0.01 ^b	28.00 ± 0.02 ^c	25.00 ± 0.01 ^d
50	44.36 ± 0.01 ^a	40.00 ± 0.01 ^c	42.87 ± 0.01 ^b	35.00 ± 0.01 ^d

หมายเหตุ: a b c d ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

4. ผลการศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับ

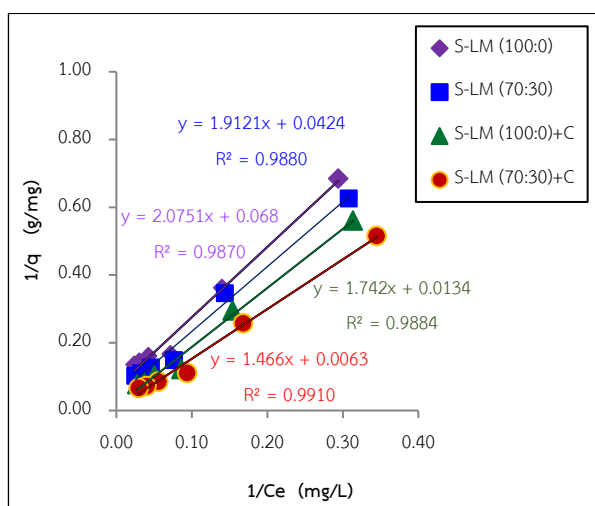
ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต พบว่าตัวดูดซับระหว่างตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปา กับ ไบโม่วังทั้งที่ไม่เคลือบและเคลือบไคโตซาน มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ในทุกระดับความเข้มข้น โดยพบว่าหลังจากดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 10 20 30 40 และ 50 (มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่สูงที่สุด คือ S-LM (70:30)+C เท่ากับ $44.00 \pm 0.05\%$ $66.00 \pm 0.05\%$ $49.90 \pm 0.10\%$ $41.77 \pm 0.01\%$ $37.50 \pm 0.10\%$ และ $30.00 \pm 0.02\%$ ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวดูดซับที่เคลือบผิวด้วยไคโตซานจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตสูงกว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้เคลือบ ทั้งนี้เนื่องจากไคโตซานมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดประจุบวกได้ เมื่ออยู่ในสภาวะเหมาะสมจึงสามารถดึงดูดธาตุอาหาร ฟอสเฟตซึ่งเป็นประจุลบได้อย่างดี จึงส่งผลให้กระบวนการดูดซับมีประสิทธิภาพสูงและมีแนวโน้มการกำจัดฟอสเฟตที่ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Dey *et al.* (2022) ที่ระบุว่าการสังเคราะห์ตัวดูดซับชีวภาพด้วยไบโม่วังเพื่อกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณไบโม่วังตั้งแต่ 1 กรัม ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส 87.00% ขณะที่เพิ่มไบโม่วังเป็น 2 3 4 5 และ 6 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มสูงขึ้นถึง 100.00% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไบโม่วังสามารถกำจัดฟอสฟอรัส ตั้งแต่ 2 กรัมขึ้นไป ยังสอดคล้องงานวิจัยของ ปาจารย์และวนิดา (2564) ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ทั้งที่ไม่เคลือบและเคลือบด้วยไคโตซาน พบว่าการเคลือบไคโตซานจะทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์สูงถึง 80.00% ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของไคโตซานที่มีหมู่เอมีนจำนวนมากที่เคลือบบนผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้เกิดแรงดึงดูดฟลูออไรด์แทรกเข้าไปภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพการดูดซับและเกิดแรงดึงดูดจับกับอนุภาคฟลูออไรด์ได้มากขึ้น

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟอสเฟต (%)

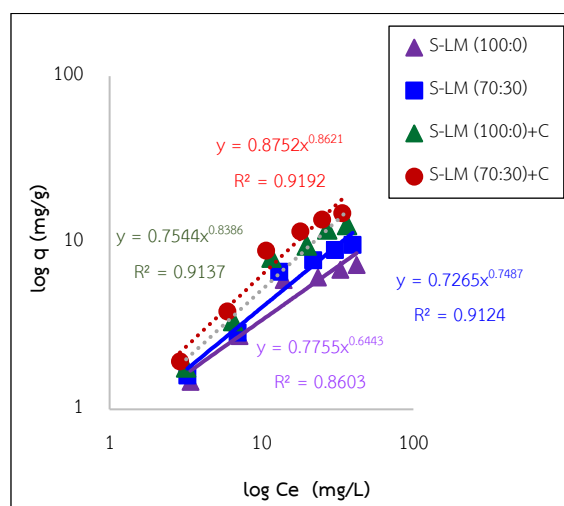
ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟอสเฟต (%)			
	S-LM (100:0)	S-LM (70:30)	S-LM (100:0)+C	S-LM (70:30)+C
5	21.00 ± 1.00 ^d	39.80 ± 0.01 ^c	41.00 ± 0.00 ^b	44.00 ± 0.50 ^a
10	28.55 ± 0.01 ^d	30.50 ± 0.07 ^c	31.64 ± 0.03 ^b	66.00 ± 0.50 ^a
20	43.37 ± 0.01 ^d	44.60 ± 0.02 ^c	47.50 ± 0.10 ^b	49.90 ± 0.10 ^a
30	28.33 ± 0.01 ^d	33.33 ± 0.01 ^c	34.72 ± 0.02 ^b	41.77 ± 0.01 ^a
40	18.75 ± 0.01 ^d	23.75 ± 0.01 ^c	30.00 ± 0.50 ^b	37.50 ± 0.10 ^a
50	11.29 ± 0.01 ^d	20.00 ± 0.00 ^b	14.26 ± 0.01 ^c	30.00 ± 0.02 ^a

5. ไอโซเทอมของการดูดซับฟอสเฟต

เมื่อเปรียบเทียบค่าไอโซเทอมของตัวดูดซับ (adsorption isotherm) ในอัตราส่วน S-LM (100:0) S-LM (70:30) S-LM (100:0)+C และ S-LM (70:30)+C ที่ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้นเท่ากับ 5 10 20 30 40 และ 50 (มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยใช้สมการของ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm (รูปที่ 3 และรูปที่ 4) และสามารถสรุปค่าคงที่ของทั้งสองแบบจำลองได้ดังตารางที่ 4 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า R^2 สมการของไอโซเทอมแลงเมียร์ และไอโซเทอมฟรุนดิช พบว่าสมการของแลงเมียร์มีค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าระบบการดูดซับฟอสเฟต เมื่อพิจารณาค่า R^2 ตัวดูดซับของ S-LM (100:0) S-LM (70:30) S-LM (100:0)+C และ S-LM (70:30)+C มีค่าเท่ากับ 0.9870 0.9880 0.9884 และ 0.9910 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสมการของไอโซเทอมแลงเมียร์มีค่า R^2 สูงกว่าสมการไอโซเทอมฟรุนดิช แสดงว่าตัวดูดซับทุกอัตราส่วนเป็นระบบการดูดซับฟอสเฟตที่พื้นผิวแบบชั้นเดียว สอดคล้องกับงานวิจัยของเสาวภา (2559) พบว่าตัวดูดซับจะสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ได้ดีกว่าฟรุนดิช แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของปิยнуและคณะ (2565) พบว่าผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ โดยมีค่าความจุในการดูดซับฟอสเฟตสูงสุดเท่ากับ 2.39 มิลลิกรัมต่อกรัม กล่าวได้ว่าผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายเบส ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟต และสอดคล้องกับงานวิจัยของสุรัตน์และคณะ (2562) พบว่าการดูดซับฟอสเฟตด้วยกากมันสำปะหลังดัดแปร โดยกากมันสำปะหลังถูกดัดแปรพื้นที่ผิวด้วยเมทิลเอมีนสำหรับการดูดซับในสารละลายฟอสเฟตสังเคราะห์เป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งสามารถคำนวณความสามารถของการดูดซับสูงสุดได้เท่ากับ 5.128 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับความจุการดูดซับสูงสุดในงานวิจัยนี้พบว่า S-LM (70:30)+C มีความจุการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 17.39 มิลลิกรัมต่อกรัม และ S-LM (70:30) มีค่าเท่ากับ 15.15 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าการศึกษาที่ผ่านมา โดยทั่วไปจะมีค่า Q เท่ากับ 2.39 มิลลิกรัมต่อกรัม (ปิยнуและคณะ, 2565) และ 5.128 มิลลิกรัมต่อกรัม (สุรัตน์และคณะ, 2562) แนวโน้มนี้บ่งชี้ว่าการผสมผสานระหว่างวัสดุที่มีโครงสร้างพรุนจากไบโมาะม่วงกับตะกอนดินโรงงานผลิตน้ำประปา เมื่อทำการเคลือบไคโตซานเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุบวกบนพื้นผิว ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตกับไอออนฟอสเฟตที่มีประจุลบได้ดีกว่า และกลไกการดูดซับแบบชั้นเดียวตามแบบจำลองแลงเมียร์ เป็นการสนับสนุนว่าพื้นผิวตัวดูดซับมีความสม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพในการดึงดูดฟอสเฟตอย่างมีระบบ ทั้งนี้ความจุการดูดซับที่สูงขึ้นสามารถยืนยันศักยภาพของตัวดูดซับที่พัฒนาขึ้นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียจริง



รูปที่ 3 Langmuir Adsorption Isotherm



รูปที่ 4 Freundlich Adsorption Isotherm

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของสมการ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm

ตัวดูดซับ	Langmuir			Freundlich		
	$q_m(\text{mg/g})$	$K_L (\text{L/mg})$	R^2	$K_f(\text{ug/mg})$	$1/n (\text{L/g})$	R^2
S-LM (100:0)	14.7059	0.1411	0.9870	0.7755	0.6443	0.8603
S-LM (70:30)	23.5849	0.0811	0.9880	0.7265	0.7487	0.9124
S-LM (100:0)+C	74.6269	0.0233	0.9884	0.7544	0.8386	0.9137
S-LM (70:30)+C	158.7302	0.0092	0.9910	0.8752	0.8621	0.9192

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาตัวดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปาผสมใบมะม่วง ในอัตราส่วน 100:0 70:30 50:50 30:70 และ 0:100 โดยน้ำหนัก พบว่า S-LM (100:0) และ S-LM (70:30) สามารถขึ้นรูปได้ด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในขณะที่อัตราส่วนอื่นไม่สามารถรักษารูปร่างได้หลังการเผา ทั้งนี้เนื่องจากตะกอนดินทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและช่วยรักษาโครงสร้างของเม็ดตัวดูดซับ การปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับด้วยการเคลือบไคโตซาน S-LM (70:30)+C ส่งผลให้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลลดลงจาก 24 ชั่วโมงเหลือ 16 ชั่วโมง และมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตเพิ่มขึ้นจาก 44.00% เป็น 60.00% ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสูงสุดถึง 66.00% ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับตัวดูดซับที่ไม่เคลือบ การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับพบว่า ข้อมูลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลอง Langmuir isotherm มากกว่า Freundlich isotherm โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9910 และ 0.9192 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 17.39 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งบ่งชี้ว่าตัวดูดซับ S-LM (70:30)+C มีประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุด ตัวดูดซับที่พัฒนาขึ้นผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีต้นทุนต่ำและสามารถลดความเข้มข้นฟอสเฟตให้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จึงมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียจากชุมชนได้จริง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ หลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรสุพรรณบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์สารเคมีและเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับทำงานวิจัยนี้ รวมทั้งเกษตรกรผู้ปลูกมะม่วง อำเภอนครหลวงที่ให้ความอนุเคราะห์ใบมะม่วงนำดอกไม้สีทองและมะม่วงเบอร์ 4 และตะกอนดินที่ได้มาจากโรงผลิตน้ำประปาเขตเทศบาลบ้านคลองจังหวัดพิษณุโลก ตลอดจนหน่วยงานที่สนับสนุนแหล่งทุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน ววน.): งบประมาณด้าน ววน. ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2568 รหัสโครงการ RDI-1-68-35

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2565). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2565. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 330 หน้า
- ดวงพร แก่นแก้ว และอัจฉรา ดวงเดือน. (2550). การดูดซับฟลูออไรด์โดยใช้ดินเหนียวที่ปรับสภาพด้วยเถ้าแกลบดำ. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 112 - 120.
- ธเรศ ศรีสถิต และกิตติพันธ์ คงสืบชาติ. (2567). ดินเผาดูดซับจากดินเหนียวและขี้เถ้าเพื่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์. การวิจัยสิ่งแวดล้อมประยุกต์ 26(2): 1 - 12.

- นพภูณ เสี่ยมศักดิ์ และพงศกร พรณรัตน์ศิลป์. (2555). ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลของดินเหนียวและดินทรายปนทรายแป้ง. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา* 23(3): 46 - 53.
- ปาจริย์ บุญทวี และวนิดา ชูอักษร. (2564). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.สุวรรณภูมิ* 5(1): 100 - 101.
- ปิยนุช ใจแก้ว, ชาญชัย คหาปนะ และณภัทร โพธิ์วัน. (2565). ประสิทธิภาพของผักตบชวาต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตปลากระป๋อง. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา* 10(1): 52 - 60.
- รัฐพล หงส์เกรียงไกร, อุษารัตน์ คาทับทิม, วิริญญา เดชอุดม และวรารุณี หวังแววกกลาง. (2562). การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวดูดซับไบโผกแว. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.ธัญบุรี* 9(1): 31 - 39.
- สุदारัตน์ สมบัติศรี, ณัฐวุฒิ สุไชยจิต และชัยสิทธิ์ ภาวะ. (2562). การดูดซับทางชีวภาพฟอสเฟตด้วยกากมันสำปะหลังดัดแปร. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร* 13(1): 170 - 179.
- เสาวภา ไวยสุศรี (2559). การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* 26(3): 475 - 486.
- APHA-AWWA-WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). Washington DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Denver.
- Babatunde, A.O. and Zhao, Y.Q. (2007). Constructive Approaches Toward Water Treatment Works Sludge Management: An International Review of Beneficial Reuses. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 37(2): 129 - 164. doi: 10.1080/10643380600776239.
- Bhatnagar, A., Sillanpää, M. and Witek-Krowiak, A. (2015). Agricultural waste peels as versatile biomass for water purification - A review. *Chemical Engineering Journal* 270: 244 - 271. doi: 10.1016/j.cej.2015.01.135.
- Correll, D.L. (1998). The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: a review. *Journal of Environmental Quality* 27(2): 261 - 266. doi: 10.2134/jeq1998.00472425002700020004x.
- De Gisi, S., Lofrano, G., Grassi, M. and Notarnicola, M. (2016). Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review. *Sustainable Materials and Technologies* 9: 10 - 40. doi: 10.1016/j.susmat.2016.06.002.
- Dey, S., Sreenivasulu, A., Veerendra, G.T.N., Phani Manoj, A.V., and Haripavan, N. (2022). Synthesis and characterization of mango leaves biosorbents for removal of iron and phosphorus from contaminated water. *Applied Surface Science Advances* 11: 100292. doi: 10.1016/j.apsadv.2022.10292.
- Dey, S. and Haripavan, N. (2023). Applications of Plants Leaf-Based Biosorbents for Removal of Iron and Phosphorus from Contaminated Water: A Review. *Biomedical Materials & Devices* 1: 122 - 145. doi: 10.1007/s44174-022-00029-w.
- Guibal, E. (2004). Interactions of metal ions with chitosan-based sorbents: a review. *Separation and Purification Technology* 38(1): 43 - 74. doi: 10.1016/j.seppur.2003.10.004.

- Ho, Y.S. (2006). Isotherms for the Sorption of Lead onto Peat: Comparison of Linear and Non-Linear Methods. *Polish Journal of Environmental Studies* 15(1): 81 - 86.
- Huang, W., Wang, S., Zhu, Z., Li, L., Yao, X., Rudolph, V. and Haghseresht, F. (2008). Phosphate removal from wastewater using red mud. *Journal of Hazardous Materials* 158(1): 35 - 42. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.01.061.
- Huang, W., Zhang, Y. and Li, D. (2017). Adsorptive removal of phosphate from water using mesoporous materials: A review. *Journal of Environmental Management* 193: 470 - 482. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.02.030.
- Loganathan, P., Vigneswaran, S., Kandasamy, J. and Bolan, N.S. (2014). Removal and recovery of phosphate from Water Using Sorption. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 44(8): 847 - 907. doi: 10.1080/10643389.2012.741311.
- Natrayan, L., Kaliappan, S., Dheeraj Kumar Reddy, C.N., Karthick, M., Sivakumar, N.S., Patil, P.P. and Thanappan, S. (2022). Development and characterization of carbon-based adsorbents derived from agricultural wastes and their effectiveness in adsorption of heavy metals in wastewater. *Bioinorganic Chemistry and Applications* (1): 1659855. doi: 10.1155/2022/1659855.
- Sharpley, A., Jarvie, H.P., Buda, A., May, L., Spears, B. and Kleinman, P. (2013). Phosphorus Legacy: Overcoming the Effects of Past Management Practices to Mitigate Future Water Quality Impairment. *Journal of Environmental Quality* 42(5): 1308 - 1326. doi: 10.2134/jeq2013.03.0098.
- Smith, V.H. and Schindler, D.W. (2009). Eutrophication science: where do we go from here?. *Trends in Ecology & Evolution* 24(4): 201 - 207. doi: 10.1016/j.tree.2008.11.009.
- Sowmya, A. and Meenakshi, S. (2013). An efficient and regenerable quaternary amine modified chitosan beads for the removal of nitrate and phosphate anions. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 1(4): 906 - 915. doi: 10.1016/j.jece.2013.07.031.
- Taweekarn, T., Wongniramaikul, W., Roop-o, P., Towanlong, W., and Choodum, A. (2024). Recovering Phosphate from Complex Wastewater Using Macroporous Cryogel Compositated Calcium Silicate Hydrate Nanoparticles. *Molecules* 29: 228. doi: 10.3390/molecules29010228.
- Usevičiūtė, L., Kaklauskas, A., Danila, V. and Januševičius, T. (2025). Enhanced aqueous phosphate removal using chitosan-modified zirconium-loaded cork biochar. *Scientific Reports* 15: 29240. doi: 10.1038/s41598-025-14819-x.
- Yang, Y., Zhao, Y.Q., Babatunde, A.O., Wang, L., Ren, Y.X. and Han, Y. (2006). Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption on dewatered alum sludge. *Separation and Purification Technology* 51(2): 193 - 200. doi: 10.1016/j.seppur.2006.01.013.
- Zhang, X., Liu, X., Zhang, Z. and Chen, Z. (2021). Removal of phosphate from aqueous solution by chitosan coated and lanthanum loaded biochar derived from urban dewatered sewage sludge: adsorption mechanism and application to lab-scale columns. *Water Science and Technology* 84(12): 3891 - 3906. doi: 10.2166/wst.2021.485.

