

การปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยตะกอนดินผลิตน้ำประปาพร้อมกับเปลือกโกโก้

Enhancement of Phosphate Adsorption Efficiency in Synthetic Wastewater Using Water Treatment Plant Sludge Combined with Cocoa Husk

สุภาวดี น้อยน้ำใส, สิทธิศักดิ์ ไหวพริบ และ ฉัตรชัย ชามู

Supawadee Noinumsai, Sitthisak Waipib and Chatchai Chada

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ประเทศไทย

Environmental Science Program, Faculty of Science and Technology,

Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok, Thailand

Received: 28 November 2025, Received in revised form: 24 April 2026, Accepted: 27 April 2026

Available online: 18 May 2026

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา: เปลือกโกโก้เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีศักยภาพและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำ โดยเฉพาะสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารมลพิษและธาตุอาหารในน้ำเสีย จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาวัสดุดูดซับธรรมชาติที่มีต้นทุนต่ำและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันปัญหามลพิษทางน้ำโดยเฉพาะการปนเปื้อนของธาตุอาหารฟอสเฟตได้ทวีความรุนแรงอย่างต่อเนื่อง ที่ผ่านมามีการศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติการบำบัดน้ำของเปลือกโกโก้ พบว่า เปลือกโกโก้มีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารฟอสเฟตในน้ำได้ ซึ่งหากมีการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุดูดซับด้วยสารไคโตซานจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ตะกอนดินจากโรงผลิตน้ำประปามีองค์ประกอบของแร่ธาตุที่เหมาะสมต่อการจับกับฟอสเฟต ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารเคลือบไคโตซานจากวัสดุดูดซับที่ทำจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปา (S) ร่วมกับเปลือกโกโก้ (C)

วิธีดำเนินการวิจัย: ระเบียบวิธีการดำเนินการทดสอบการขึ้นรูปวัสดุดูดซับระหว่างตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปา (S) ร่วมกับเปลือกโกโก้ (C) ทั้งที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารไคโตซานและปรับปรุงด้วยสารไคโตซานในอัตราส่วน 100:0, 70:30, 50:50, 30:70 และ 0:100 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาขึ้นรูปโดยนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง การศึกษาหาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับในช่วงเวลาต่างๆ ได้แก่ 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม และการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Langmuir และ Freundlich วิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณค่าร้อยละการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย

ผลการวิจัย: ผลการศึกษาการขึ้นรูปของวัสดุดูดซับ พบว่าวัสดุดูดซับอัตราส่วน S-C (100:0) และ S-C (70:30) สามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดที่มีความเสถียรได้และไม่ละลายน้ำ ในขณะที่อัตราส่วน S-C (50:50) และ S-C (30:70) ไม่สามารถขึ้นรูปและละลายในน้ำกลั่นได้ ผลการศึกษาพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 สำหรับผลระยะเวลามาตรฐานของวัสดุดูดซับที่ไม่เคลือบและ

เคลือบด้วยสารไคโตซาน พบว่า วัสดุดูดซับเคลือบในอัตราส่วน S-C (70:30)+C และ S-C (100:0) สามารถเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าวัสดุดูดซับที่ไม่เคลือบไคโตซาน โดยเข้าสู่สมดุลภายใน 16 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไคโตซานจะส่งผลทำให้เวลาในสมดุลเร็วขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงผลพลศาสตร์การดูดซับ ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ ที่พบว่า วัสดุดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารไคโตซาน สามารถดูดซับความเข้มข้นฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ให้สูงกว่าวัสดุดูดซับที่ไม่เคลือบสารไคโตซาน ซึ่งมีร้อยละการกำจัดฟอสเฟตเท่ากับ 60.45% และ 47.68% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากมีการปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยสารไคโตซานอาจช่วยเพิ่มความพรุนส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับมากกว่าเดิม 27.00% นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์สมการไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงกลไกการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้งที่เคลือบด้วยสารไคโตซานและไม่เคลือบ เมื่อพิจารณาค่าของ R^2 ของสมการไอโซเทอมที่มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด พบว่าอัตราส่วน S-C(70:30)+C มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด โดยมีรูปแบบกระบวนการดูดซับที่สอดคล้องกับสมการของ Langmuir ($R^2 = 0.9950$) มากกว่า Freundlich ($R^2 = 0.9628$) โดยมีค่าความจุการดูดซับสูงสุด (q_{max}) เท่ากับ 72.4638 mg/g บ่งชี้ได้ว่าการดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับเป็นลักษณะการดูดซับชั้นเดียว

สรุปผลการวิจัย: ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับด้วยสารเคลือบไคโตซานนั้น ช่วยเพิ่มความพรุนและเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากหมู่แอมิโน (NH_2) ของไคโตซานสามารถถูกโปรตอนแตกกลายเป็นประจุบวกภายใต้สารละลายที่เป็นกรดเล็กน้อย ซึ่งสามารถดึงดูดและจับกับอนุภาคของไอออนฟอสเฟตที่มีประจุลบได้ดี จึงมีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับในน้ำเสียได้ ตลอดจนเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้ง และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมในท้องถิ่นได้อีกด้วย

คำสำคัญ: การดูดซับ; ฟอสเฟต; น้ำเสียสังเคราะห์; เปลือกโกโก้; ไคโตซาน

Abstract

Background and Objectives: Cocoa husks are agricultural waste with potential for use as phosphate adsorbents in wastewater treatment. It can be applied as adsorbent material for pollutants and nutrients in wastewater, making it an alternative to the development of natural adsorbent materials that are low-cost and non-toxic to the environment. Currently, water pollution problems, especially phosphate nutrient contamination, have intensified progressively. Prior research has demonstrated that cocoa husks can adsorb phosphate from water, and surface modification with chitosan significantly improves adsorption efficacy. Additionally, sludge from water treatment plants contain mineral compositions suitable for phosphate binding. Therefore, this study aimed to investigate the enhancement of phosphate adsorption efficiency in synthetic wastewater using chitosan-coated adsorbent materials made from sludge from water treatment plants (S) combined with cocoa husks (C).

Methodology: The methodological procedures involved testing the molding of adsorbent materials between soil sediment from water treatment plant sludge (S) and cocoa husks (C), both without chitosan surface modification and with chitosan surface modification at ratios of 100:0, 70:30, 50:50, 30:70, and 0:100 by weight. The materials were then molded by firing at temperature of 500°C for 2 hours. The study examined equilibrium time of adsorption at various time intervals, including 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, and 48 hours

respectively. To determine the optimal contact time and adsorption isotherms of phosphate in synthetic wastewater using Langmuir and Freundlich models. Residual phosphate concentration was analyzed using a spectrophotometer at a wavelength of 880 nanometers, followed by calculation of the phosphate removal percentage in wastewater.

Main Results: The molding study of adsorbent materials showed that adsorbent materials at ratios S-C (100:0) and S-C (70:30) could be molded into pellets with stability and water insolubility, making them suitable for selection in subsequent procedures. Meanwhile, ratios S-C (50:50) and S-C (30:70) could not maintain form and dissolved in distilled water. This dissolution behavior was attributed to the higher organic content in these ratios, which compromised the structural integrity and thermal stability of the pellets during the firing process. All adsorption experiments were conducted at an initial pH of 5, which was selected based on preliminary optimization studies as the optimal condition for maximum phosphate solution removal efficiency. Under these conditions, the protonation of chitosan's amino groups was maximized, facilitating strong electrostatic interactions with phosphate anions. For the equilibrium time study of uncoated and chitosan-coated adsorbent materials revealed that coated adsorbent materials at ratio S-C(70:30)+C and S-C(100:0) reached equilibrium faster than uncoated adsorbent materials, achieving equilibrium within 16 hours and 24 hours respectively. This occurred because surface modification with chitosan resulted in faster equilibrium time, indicating adsorption kinetics. The adsorption performance study found that adsorbent materials with chitosan solution surface modification could adsorb phosphate concentration in synthetic wastewater higher than adsorbent materials without chitosan coating, with phosphate removal efficiencies of 60.45% and 47.68%, respectively. This demonstrated that surface modification with chitosan coating increased adsorption performance by 27.00% compared to the original. Additionally, analysis of the adsorption isotherm equations demonstrated the adsorption mechanisms of both chitosan-coated and uncoated adsorbent materials. Based on R^2 values closest to unity, the S-C (70:30)+C ratio showed the best fit, with the adsorption process conforming more closely to the Langmuir isotherm model ($R^2 = 0.9950$) than to the Freundlich isotherm ($R^2 = 0.9628$). The maximum adsorption capacity (q_{max}) value is 72.4638 mg/g, indicating that the adsorption on the surface of the adsorbent material is characterized by a single layer of adsorption.

Conclusions: Surface modification with chitosan coating enhanced phosphate adsorption performance due to the protonation of amino groups (NH_2) under slightly acidic conditions, enabling strong electrostatic attraction with negatively charged phosphate ions. This material demonstrates high potential for application as a low-cost adsorbent in wastewater treatment, while simultaneously adding value to agricultural waste and reducing local environmental problems.

Keywords: adsorption; phosphate; synthetic wastewater; cocoa husk; chitosan

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

Introduction

ทรัพยากรน้ำ จัดเป็นปัจจัยที่สำคัญในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต ทั้งนี้ปัญหาการเกิดมลพิษทางน้ำยิ่งในปัจจุบัน ได้ทวีความรุนแรงขึ้นทุกขณะ อันมีสาเหตุมาจากผู้ใช้น้ำส่วนใหญ่ขาดความรู้และจิตสำนึกรับผิดชอบต่อปัญหาที่เกิดขึ้น โดยมีการปล่อยสารมลพิษปนเปื้อนลงแหล่งน้ำ จนทำให้แหล่งน้ำเหล่านี้ไม่สามารถนำมาใช้อุปโภคและบริโภคได้ จึงก่อให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสภาพแวดล้อมโดยรอบ ซึ่งแหล่งที่มาของสารพิษส่วนใหญ่เกิดจาก กิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ และโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งธาตุอาหารฟอสเฟต (Phosphate) เป็นสารที่มักพบในการปนเปื้อนน้ำจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ หรือตัวการสำคัญหลักที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ เมื่อมีการสะสมของฟอสเฟตในแหล่งน้ำในระดับสูง จะส่งผลทำให้เกิดปัญหาการเจริญเติบโตของสาหร่ายอย่างรวดเร็วในแหล่งน้ำ (Eutrophication) ซึ่งจะทำให้เกิดการบดบังของการส่งผ่านของแสง ทำให้แหล่งน้ำมีปริมาณออกซิเจนต่ำ และก่อให้เกิดน้ำเน่าเสีย จนส่งผลทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำ ไม่สามารถอยู่รอดได้ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์น้ำจากแหล่งน้ำ จึงต้องมีการนำกระบวนการต่างๆ มาใช้ควบคุมและบำบัดน้ำเสียก่อนจะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษต่างๆ (Regional Environmental Office 13, 2019) ปัจจุบันการใช้วัสดุจากธรรมชาติในด้านเกษตรกรรมเพื่อบำบัดน้ำด้วยการดูดซับสารพิษและสารอาหาร ที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากนั่นก็คือ เปลือกโกโก้ (Cacao Husk) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตช็อกโกแลต ถือเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติหลากหลายที่สามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำได้ โดยเฉพาะการใช้ในการดูดซับสารมลพิษและสารอาหารในน้ำ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย หรือการปรับปรุงคุณภาพน้ำในทางการเกษตรและสิ่งแวดล้อมที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติการบำบัดน้ำเสียจากเปลือกโกโก้ พบว่าเปลือกโกโก้มีความสามารถในการดูดซับสารมลพิษในน้ำ เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ที่เป็นพิษบางชนิดที่ละลายในน้ำ รวมถึงธาตุอาหารฟอสเฟตได้ (Mekasamphan *et al.*, 2009) นอกจากนี้ยังมีการนำเปลือกโกโก้ไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตะกอนดินจากโรงผลิตน้ำประปาพร้อมกับเปลือกโกโก้ โดยการนำเศษวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตทิ้งจากการผลิตน้ำประปาและวัสดุเหลือทิ้งในภาคเกษตรกรรม มาพัฒนาขึ้นรูปและปรับปรุงพื้นผิววัสดุดูดซับ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการจัดการของเสีย สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเศษวัสดุเหลือใช้ และลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในชุมชนได้จริงในอนาคต ทั้งนี้งานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ กล่าวคือ เป็นการศึกษาที่ผสมผสานวัสดุเหลือทิ้ง 2 ชนิดจากท้องถิ่นจังหวัดพิษณุโลก ได้แก่ ตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปาและเปลือกโกโก้ มาขึ้นรูปเป็นวัสดุดูดซับร่วมกันพร้อมปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารไคโตซาน ซึ่งยังไม่มีรายงานการศึกษาคูณสมบัติของวัสดุทั้งสองชนิดร่วมกับการเคลือบไคโตซานเพื่อดูดซับฟอสเฟตมาก่อน ถึงแม้จะมีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้เปลือกโกโก้หรือตะกอนดินประปาแยกกันในการดูดซับสารมลพิษ แต่ยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบที่นำวัสดุทั้งสองชนิดมาผสมรวมกับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไคโตซานเพื่อดูดซับฟอสเฟต จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งในท้องถิ่นมาพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับแบบผสมที่มีต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Methodology

การเตรียมวัตถุดิบและการขึ้นรูปวัสดุดูดซับ

นำตะกอนดินที่ได้รับการควบคุมคุณภาพจากโรงผลิตน้ำประปาที่วัดสุตสวาสต์ ตำบลบ้านคลอง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก และเปลือกโกโก้ได้รับความอนุเคราะห์จากตำบลนครชุม อำเภอ นครไทย จังหวัดพิษณุโลก มาตากแดดให้แห้งและนำมาบดให้ละเอียดแล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร (Figure 1) ทำการทดสอบการขึ้นรูประหว่างตะกอนดินและเปลือกโกโก้ในอัตราส่วน 100:0, 70:30, 50:50, 30:70 และ 0:100 โดยน้ำหนัก นำไปผสมน้ำกลั่นจนมีความเหนียวพอผสมให้เข้ากัน นำมาขึ้นรูปให้เป็นแท่ง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป จากนั้นทดสอบการขึ้นรูปวัสดุดูดซับ โดยการทดสอบการละลายในอัตราส่วนต่างๆ ปริมาณ 1.000 กรัม ใส่ในน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



Figure 1 Raw material a) soil sludge and b) cocoa husk Fine grind and sift (sieve No. 30)

การเตรียมสารละลายฟอสเฟตสังเคราะห์

เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต (stock solution) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร (mg/L) โดยชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบไม่มีน้ำ (Anhydrous KH_2PO_4) จำนวน 219.50 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร โดยสารละลายมาตรฐานนี้มีค่าเทียบเท่าฟอสฟอรัส 50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (Tandulwasem, 2000) จากนั้นเจือจางสารละลายมาตรฐานเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ ได้แก่ 5, 10, 20, 30, 40 มิลลิกรัม/ลิตร โดยดูดสารละลายมาตรฐาน 100, 200, 400, 600 และ 800 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น แต่สำหรับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้สารละลายมาตรฐานโดยตรงสำหรับการใช้ในการทดลองในขั้นตอนต่อไป

การเตรียมสารละลายโคโคซาน

นำผงโคโคซานบริสุทธิ์ 1.5 กรัม มาละลายในกรดอะซิติกเข้มข้น 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนความเข้มข้นกรดอะซิติกเหลือ 1% โดยปริมาตร เพื่อให้ได้สารละลายโคโคซานที่เหมาะสม จากนั้นนำสารละลายไปเขย่าที่อุณหภูมิ 30°C ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้โคโคซานละลายเป็นเนื้อเดียวกันและพร้อมใช้งานทดลอง

การเคลือบผิววัสดุดูดซับด้วยไคโตซาน

การเคลือบไคโตซานบนวัสดุดูดซับทำโดยนำวัสดุดูดซับมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วกรองและผึ่งให้แห้ง จากนั้นแบ่งวัสดุดูดซับออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกไม่เคลือบ ส่วนที่สองแช่ในสารละลายไคโตซานในอัตราส่วน 5:1 (วัสดุดูดซับต่อไคโตซาน) แล้วแช่ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองและผึ่งให้แห้ง นำวัสดุดูดซับไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนความเป็นกรด-ด่างคงที่ ก่อนผึ่งให้แห้งและเก็บในตู้ดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

การศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟต

การศึกษาอิทธิพลของค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟอสเฟต ทำการศึกษาค่า pH ดังนี้ 0, 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 ของสารละลายฟอสเฟตสังเคราะห์ ซึ่งทำการเตรียมสารละลายที่ความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟต เท่ากับ 100 mg/L โดยใช้ปริมาณของวัสดุดูดซับทั้งที่ไม่เคลือบและเคลือบด้วยสารไคโตซานในอัตราส่วนที่สามารถขึ้นรูปได้ และระยะเวลาที่เหมาะสม จากนั้นเก็บตัวอย่างส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสมดุลของการดูดซับ

การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสมดุลของการดูดซับฟอสเฟตปริมาณ 1 กรัม ใส่ในขวดชมพูปริมาตร 125 มิลลิลิตร เติมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ฟอสเฟต ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปแช่ในเวลาที่ 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ จนถึงสภาวะสมดุลที่หาได้ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที โดยการทดลองดำเนินการซ้ำ 3 ครั้ง (n = 3) ในทุกชุดการทดลอง จากนั้นเก็บตัวอย่างส่วนใสไปทำการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

การทดสอบความสามารถในการดูดซับ

ทำการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยวิธีแอสคอร์บิก (Ascorbic acid method) โดยนำไปตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) คำนวณร้อยละการดูดซับฟอสเฟตที่ถูกดูดซับ ดังสมการที่ (1)

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

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (mg/L)

C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของฟอสเฟต (mg/L)

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมของวัสดุดูดซับ ทำโดยใช้ปริมาณวัสดุดูดซับ 1 กรัม ต่อสารละลายฟอสเฟตที่ความเข้มข้นในช่วง 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปแช่ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30°C จนถึงระยะเวลาสมดุลของการดูดซับ จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการดูดซับมาวิเคราะห์หาปริมาณของสารละลายฟอสเฟต จากนั้นนำมาศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับเพื่อใช้อธิบายรูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับฟอสเฟต ซึ่งประกอบด้วยสมการของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และ สมการของฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

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

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับ 1 กรัม (mg/g)

q_m คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่อิ่มตัวบนวัสดุดูดซับ 1 กรัม (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

K_L คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่ง (L/mg)

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

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับ 1 กรัม (mg/g)

n คือ ค่าคงที่แสดงถึงความแข็งแรงในการดูดซับ

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

K_F คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิชที่แสดงถึงความ สามารถในการดูดซับ (L/g)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย One-way ANOVA และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการทดลองรายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean $\pm$ SD)

Results

ผลการศึกษาการขึ้นรูปวัสดุดูดซับ

ผลการศึกษาการขึ้นรูประหว่างตะกอนดินประปาผสมกับเปลือกโกโก้ ในอัตราส่วน 100:0, 70:30, 50:50, 30:70, 0:100 โดยน้ำหนัก นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบการละลายหลังการขึ้นรูปวัสดุดูดซับด้วยการนำไปเขย่าละลายในน้ำกลั่น จะเห็นได้ว่าวัสดุดูดซับ อัตราส่วน 100:0 และ 70:30 สามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ ไม่ละลายน้ำ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในขั้นตอนต่อไป ในขณะที่อัตราส่วน S-C (50:50), S-C (30:70) และ S-C (0:100) ไม่สามารถคงรูปได้ โดยเม็ดวัสดุแตกร่วนและละลายเมื่อสัมผัสกับน้ำกลั่น ไม่เสถียร ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์วัตถุถูกเผาไหม้ทำให้โครงสร้างแตกร่วน (Table 1) สำหรับผลร้อยละการสูญเสีย น้ำหนัก (%weight loss) ก่อนและหลังการเผาพบว่า ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเปลือกโกโก้ที่เพิ่มขึ้น โดยวัสดุดูดซับอัตราส่วน S-C (100:0) มี %weight loss ประมาณร้อยละ 8-12 ซึ่งเป็นผลจากการสูญเสีย ความชื้นและอินทรีย์วัตถุปริมาณเล็กน้อยที่มีอยู่ในตะกอนดิน ส่วนอัตราส่วน S-C (70:30) มี %weight loss ประมาณ ร้อยละ 25-30 สำหรับอัตราส่วนที่มีสัดส่วนเปลือกโกโก้สูง ได้แก่ S-C (50:50), S-C (30:70) และ S-C (0:100) มี %weight loss ประมาณร้อยละ 35-42%, 45-50% และ 55-60 ตามลำดับ (Table 1) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอินทรีย์วัตถุจากเปลือกโกโก้ ถูกเผาไหม้ออกไปเป็นส่วนใหญ่ในระหว่างกระบวนการเผา ส่งผลให้โครงสร้างภายในของเม็ดวัสดุเกิดช่องว่างจำนวนมาก ขาดตัวประสานจากแร่ธาตุออกไซด์ที่จะยึดเหนี่ยวโครงสร้างไว้ จึงทำให้เม็ดวัสดุไม่มีความแข็งแรงเพียงพอและแตกร่วนเมื่อสัมผัสกับน้ำ

Table 1 Molding of adsorbent materials

Adsorbent	S:C ratio	% Weight loss	Pellet Forming	Water Solubility Test
S-C	100:0	8-12 %	✓	insoluble
S-C	70:30	25-30 %	✓	insoluble
S-C	50:50	35-42 %	×	Soluble and cracked
S-C	30:70	45-50 %	×	Soluble and cracked
S-C	0:100	55-60 %	×	Soluble and cracked

Note: The symbol ✓ means that pellets can be formed and X means that pellets cannot be formed (n = 3)

ผลการศึกษาค่า pH ของวัสดุดูดซับ

จากการศึกษาอิทธิพลของค่า pH ต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ค่า pH มีผลต่อปริมาณการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปริมาณการดูดซับแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH อยู่ในช่วง 1-5 และเริ่มลดลงเมื่อค่า pH หลังจาก pH มากกว่า 5 ซึ่งจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวัสดุดูดซับทั้งที่ไม่เคลือบและเคลือบในอัตราส่วนต่างๆ มีค่าความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 5 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการนำวัสดุดูดซับดังกล่าวไปใช้งานจริง (Figure 2)

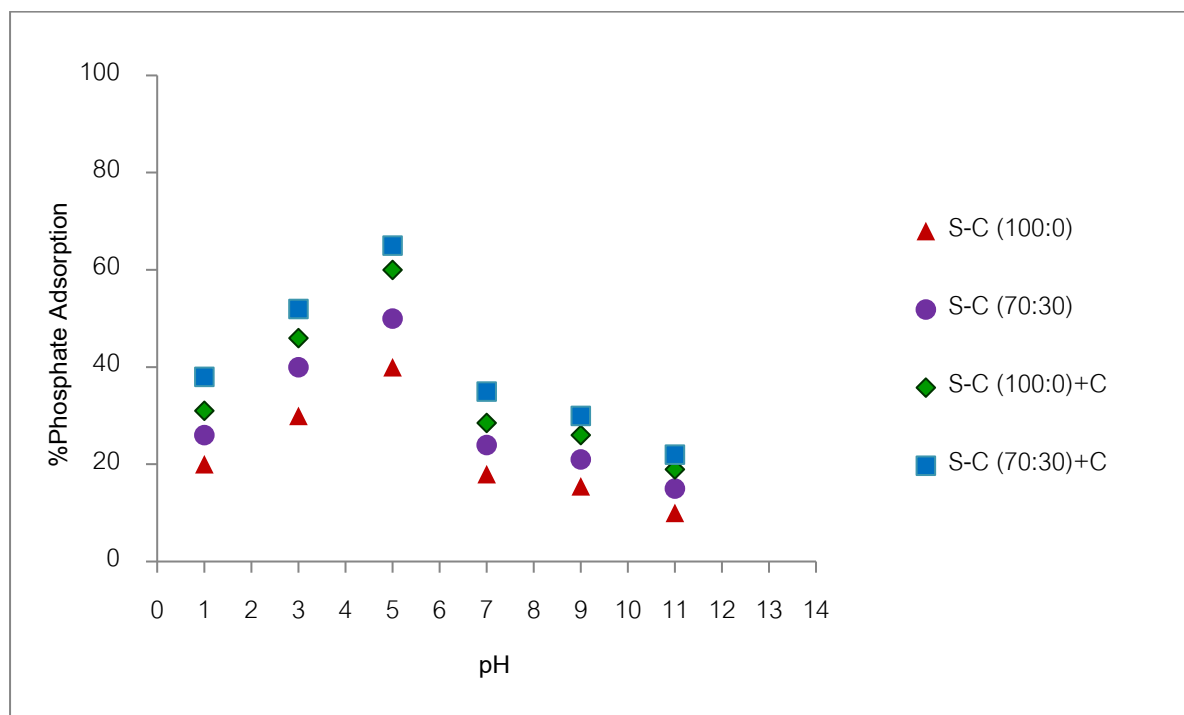


Figure 2 Effect of pH on phosphate adsorption (n = 3)

การศึกษาระยะเวลาสมดุลที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟอสเฟต

การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับที่ประกอบด้วยเปลือกโกโก้และตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปา ในอัตราส่วน 100:0, 70:30, 50:50, 30:70, และ 0:100 พบว่า วัสดุดูดซับทุกอัตราส่วนจะมีความสามารถในการลดปริมาณฟอสเฟตในน้ำได้อย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มว่าการผสมตะกอนดินในสัดส่วนที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากตะกอนดินมีองค์ประกอบของแร่ธาตุโลหะ ซึ่งมีคุณสมบัติในการเกิดพันธะเคมีและพันธะไฟฟ้าสถิตกับฟอสเฟต ทำให้ไอออนฟอสเฟตในน้ำสามารถยึดเกาะบนผิววัสดุดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้โครงสร้างของตะกอนดินยังมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ซึ่งช่วยให้การสัมผัสระหว่างผิววัสดุและไอออนฟอสเฟตมีโอกาสเกิดมากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการดูดซับมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น อีกทั้งการกระจายตัวของอนุภาคตะกอนดินในเนื้อวัสดุยังช่วยเสริมความแข็งแรงของวัสดุดูดซับ ทำให้คงรูปและใช้งานได้ยาวนานขึ้นเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำหรือความชื้นสูง

การศึกษาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับ พบว่า ตัวที่เคลือบไคโตซานเวลาที่ทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลอยู่ที่ประมาณ 16 ชั่วโมง แต่ตัวที่ไม่เคลือบไคโตซานเวลาที่ทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลอยู่ที่ประมาณ 24 ชั่วโมง (Figure 3) หลังจากนั้นการเพิ่มเวลาจะไม่ทำให้ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงถึงการอิ่มตัวของผิววัสดุดูดซับ อีกทั้งลักษณะของกราฟที่แสดงการดูดซับอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและค่อยๆ เข้าสู่สมดุล บ่งชี้ลักษณะที่สอดคล้องกับ Pseudo second order kinetic ทั้งนี้การ fitting kinetic model อย่างเป็นระบบ (Pseudo first order และ pseudo second order) พร้อมค่าพารามิเตอร์ (k , R^2) แสดงใน Table 7

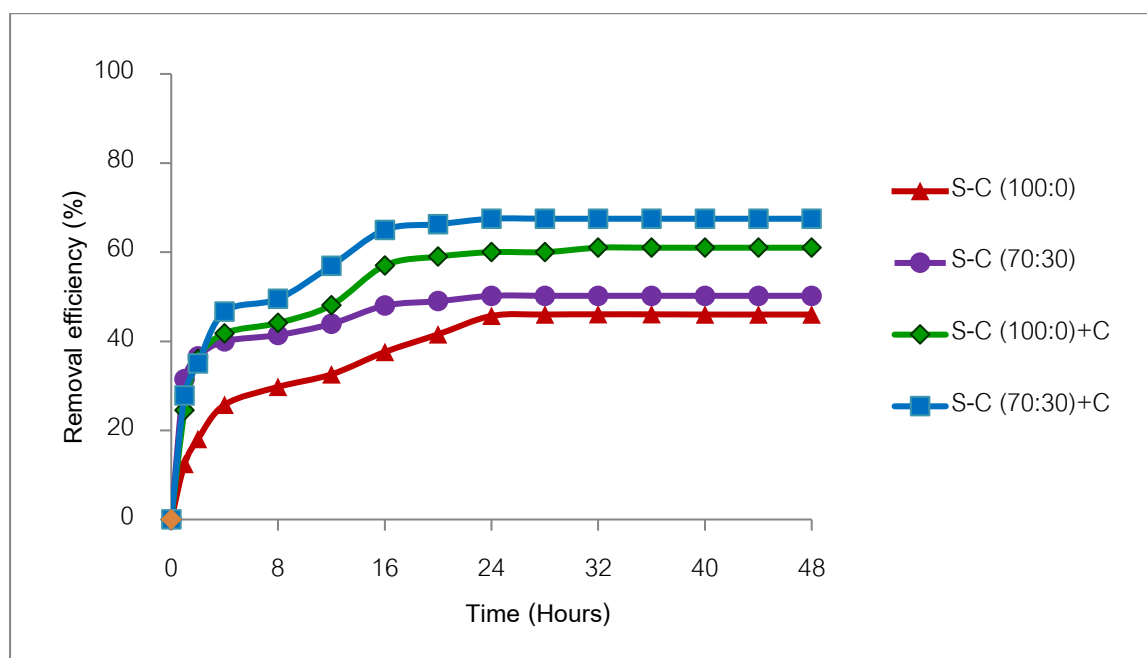


Figure 3 Equilibrium period of phosphate adsorption (n = 3)

ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด

ค่าความจุการดูดซับ (Adsorption Capacity; q_e)

จากผลการทดลองในข้างต้น ได้คำนวณค่าความจุการดูดซับ (q_e) ของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ โดยใช้สมการ $q_e = (C_0 - C_e) \times V/m$ ซึ่งได้จากผลการวิเคราะห์พบว่า วัสดุดูดซับ S-C(70:30)+C มีค่า q_e สูงที่สุดในทุกระดับความเข้มข้น โดยมีค่า q_e สูงสุดเท่ากับ 1.600 mg/g ที่ความเข้มข้น 40 mg/L แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไคโตซานช่วยเพิ่มความจุการดูดซับได้อย่างมีนัยสำคัญ (Table 2) เมื่อพิจารณาค่าความจุของปริมาณการดูดซับฟอสเฟตบนตัวดูดซับ S-C (100:0), S-C (70:30), S-C (100:0)+C, และ S-C (70:30)+C มีค่าเท่ากับ 36.6300 mg/g, 37.0370 mg/g, 50.0000 mg/g และ 72.4638 mg/g ตามลำดับ สำหรับค่าคงที่ในการกระจายตัวของการดูดซับ (K_L) ของวัสดุดูดซับ S-C (100:0), S-C (70:30), S-C (100:0)+C, และ S-C (70:30)+C มีค่าเท่ากับ 0.0570 L/mg, 0.0468 L/mg, 0.0296 L/mg และ 0.0160 L/mg ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตได้ดี ทั้งนี้ เนื่องจากเกิดกลไกการเกิดปฏิกิริยาโดยเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนประจุฟอสเฟตกับตัวดูดซับ ดังนั้นจึงเหมาะสมในการนำไปใช้งานในการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมในอนาคต

Table 2 Adsorption Capacity for phosphate adsorption onto adsorbent materials (n = 3)

C_0 (mg/L)	S-C(100:0)	S-C(70:30)	S-C(100:0)+C	S-C(70:30)+C
5	0.1200	0.2100	0.2050	0.2300
10	0.2970	0.3290	0.3164	0.3470
20	0.8980	0.9500	0.9500	1.0000
30	0.8500	1.0000	1.0420	1.2530
40	0.9500	1.1000	1.2000	1.6000
50	0.6750	1.0500	0.7130	1.4000

ผลการศึกษาความเข้มข้นสารละลายในการดูดซับที่เหลือด้วยตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาและเปลือกโกโก้ทั้งเคลือบและไม่เคลือบไคโตซาน ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ S-C (100:0), S-C (70:30), และ S-C (100:0)+C, S-C (70:30)+C พบว่าหลังการดูดซับจะมีปริมาณความเข้มข้นของฟอสเฟตเหลือที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ซึ่งมีค่าเหลืออยู่ในสารละลายเท่ากับ 2.70 ± 0.02 , 6.53 ± 0.03 , 10.00 ± 0.00 , 17.47 ± 0.01 , 24.00 ± 0.01 , และ 36.00 ± 0.00 mg/L ตามลำดับ (Table 3) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังการดูดซับฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 5, 10, 20, 30, 40, 50 (mg/L) พบว่าวัสดุดูดซับ S-C (70:30)+C สามารถดูดซับได้ดีที่สุด

ร้อยละการกำจัด

ผลการศึกษาพบว่าวัสดุดูดซับทั้ง 2 อัตราส่วนระหว่างตะกอนดินจากโรงผลิตน้ำประปากับเปลือกโกโก้ทั้งตัวที่ไม่เคลือบไคโตซานกับตัวที่เคลือบไคโตซาน มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ในทุกระดับความเข้มข้น โดยหลังจากดูดซับที่ความเข้มข้น 5, 10, 20, 30, 40, และ 50 mg/L

พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่สูงที่สุด คือ S-C (70:30)+C เท่ากับ 46.00 ± 0.01 , 69.40 ± 0.10 , 50.00 ± 0.11 , 41.77 ± 0.01 , 40.00 ± 0.10 , และ 28.00 ± 0.01 ตามลำดับ (Table 4 and Figure 4)

Table 3 Concentration of residual phosphate solution (C_e)

Initial concentration	Residual phosphate solution (C_e ; mg/L)			
	S-C (100:0)	S-C (70:30)	S-C (100:0)+C	S-C (70:30)+C
5	3.80 ± 0.01^a	2.90 ± 0.05^c	2.95 ± 0.05^b	2.70 ± 0.02^d
10	7.03 ± 0.01^a	6.71 ± 0.01^c	6.84 ± 0.03^b	6.53 ± 0.03^d
20	11.02 ± 0.01^a	10.50 ± 0.05^b	10.50 ± 0.05^b	10.00 ± 0.00^c
30	21.50 ± 0.50^a	20.00 ± 0.10^b	19.58 ± 0.02^c	17.47 ± 0.01^d
40	30.50 ± 0.10^a	29.00 ± 1.00^b	28.00 ± 0.10^c	24.00 ± 0.01^d
50	43.25 ± 0.05^a	39.50 ± 0.05^c	42.87 ± 0.10^b	36.00 ± 0.00^d

Note: Comparison of the adsorption capacity of different adsorbents for phosphate removal in synthetic wastewater based on residual phosphate concentrations at each concentration level ($n = 3$).

The mean values followed by the same English letter within a row are not significantly different at the 95% confidence level

Table 4 Removal Percentage

Initial concentration	% Removal			
	S-C (100:0)	S-C (70:30)	S-C (100:0)+C	S-C (70:30)+C
5	24.00 ± 0.00^d	42.00 ± 1.00^b	41.00 ± 0.00^c	46.00 ± 0.01^a
10	29.70 ± 0.10^d	32.90 ± 0.05^b	31.64 ± 0.01^c	69.40 ± 0.10^a
20	44.90 ± 0.00^d	47.50 ± 0.01^b	47.50 ± 0.05^c	50.00 ± 0.11^a
30	28.33 ± 0.01^d	33.33 ± 0.01^c	34.72 ± 0.01^b	41.77 ± 0.01^a
40	23.75 ± 0.05^d	27.50 ± 0.05^c	30.00 ± 0.00^b	40.00 ± 0.10^a
50	13.50 ± 0.05^d	21.00 ± 0.01^b	14.26 ± 0.01^c	28.00 ± 0.01^a

Note: a b c d different letters in the horizontal direction. The means that there is a statistically significant difference of $p < 0.05$ ($n = 3$)

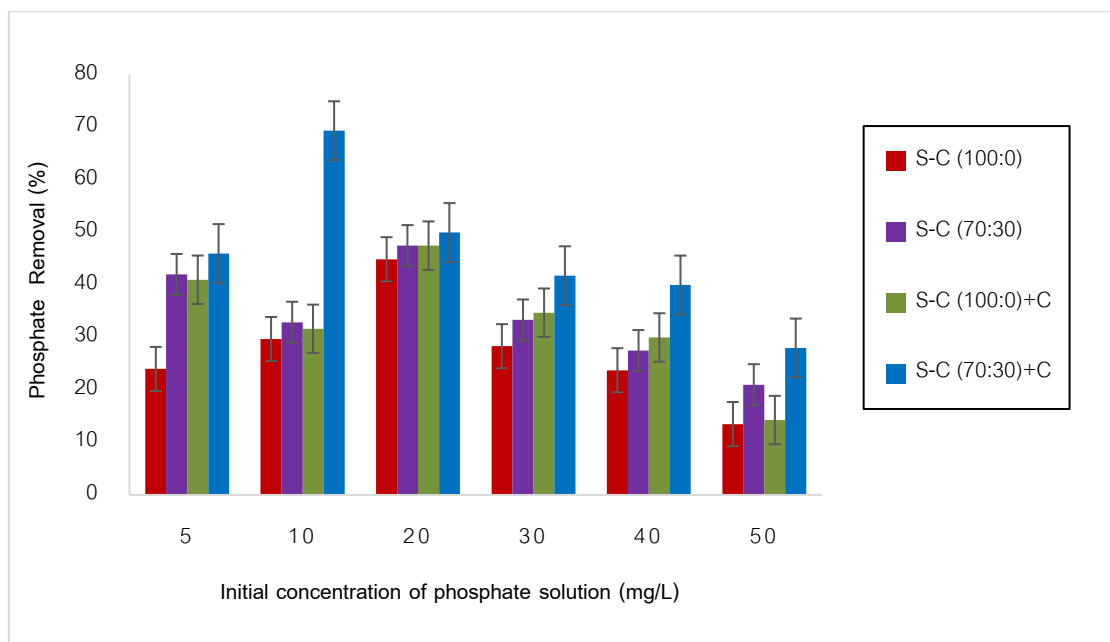


Figure 4 Phosphate removal efficiency in synthetic wastewater at concentrations of 5, 10, 20, 30, 40, and 50 mg/L (n = 3)

ไอโซเทอมของการดูดซับฟอสเฟต

ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ของวัสดุดูดซับฟอสเฟตทั้ง 2 อัตราส่วน คือ S-C (100:0), S-C (70:30), S-C (100:0)+C, และ S-C (70:30)+C ที่ความเข้มข้น 5, 10, 20, 30, 40, และ 50 mg/L ถูกคำนวณโดยใช้สมการแบบจำลอง Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm (Figure 5 and Figure 6) สามารถสรุปค่าคงที่ของ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm (Table 5 and Table 6) ซึ่งจาก Table 5 และ Table 6 เมื่อพิจารณา R^2 พบว่าสมการของไอโซเทอมแลงเมียร์ มีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการไอโซเทอมฟรอนด์ลิช แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับรูปแบบการดูดซับของไอโซเทอมแลงเมียร์ โดยพิจารณาค่า R^2 ของตัวดูดซับในอัตราส่วน S-C (100:0), S-C (70:30), S-C (100:0)+C, S-C (70:30)+C มีค่าเท่ากับ 0.9812, 0.9857, 0.9904 และ 0.9950 ตามลำดับ แสดงว่าในทุกอัตราส่วนบนพื้นที่ผิวเป็นระบบการดูดซับพื้นผิว เป็นชั้นเดียว บ่งชี้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) บนพื้นผิววัสดุดูดซับ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า $1/n$ ของ Freundlich isotherm อยู่ในช่วง (0.7441-0.8553) ($0 < 1/n < 1$) บ่งชี้ว่าการดูดซับเป็นแบบการดูดซับที่ดี (Favorable adsorption) ค่า K_L จาก Langmuir isotherm แสดงว่า S-C(100:0) มีความสัมพันธ์ต่อฟอสเฟตสูงสุด ($K_L = 0.0570$ L/mg) ขณะที่ค่า q_{max} ของ S-C(70:30)+C สูงถึง 72.4638 mg/g ซึ่งสูงกว่าวัสดุที่ไม่เคลือบไคโตซานอย่างชัดเจน ยืนยันบทบาทของไคโตซานในการเพิ่มตำแหน่งการดูดซับ

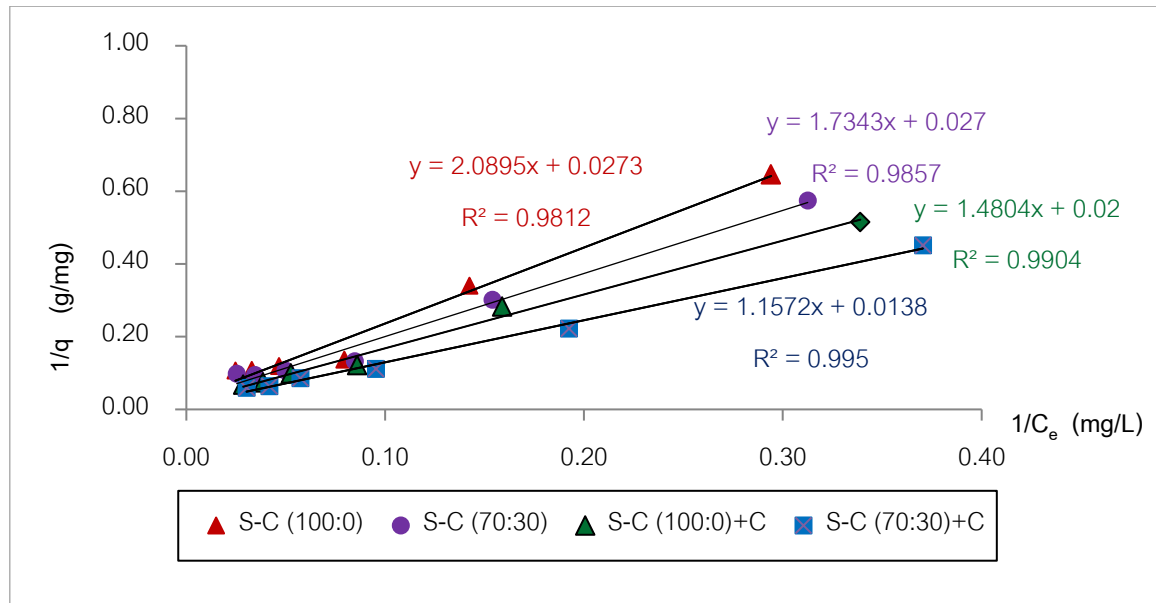


Figure 5 Langmuir Adsorption Isotherm (n = 3)

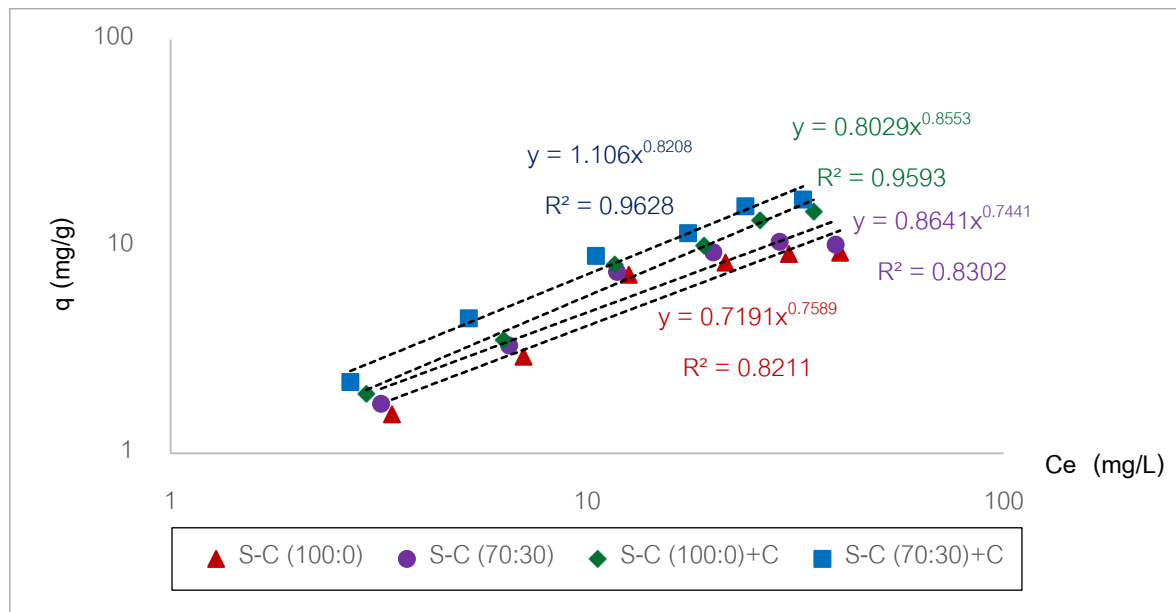


Figure 6 Freundlich Adsorption Isotherm (n = 3)

Table 5 Langmuir Isotherm constant of phosphate adsorption

Adsorbent	Langmuir Isotherm		
	Q_{max} (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2
S-C (100:0)	36.6300	0.0570	0.9812
S-C (70:30)	37.0370	0.0468	0.9857
S-C (100:0)+C	50.0000	0.0296	0.9904
S-C (70:30)+C	72.4638	0.0160	0.9950

Table 6 Freundlich Isotherm constant of phosphate adsorption ($n = 3$)

Adsorbent	Freundlich Isotherm		
	K_f (mg/g)	$1/n$ (L/mg)	R^2
S-C (100:0)	0.7191	0.7589	0.8211
S-C (70:30)	0.8641	0.7441	0.8302
S-C (100:0)+C	0.8029	0.8553	0.9593
S-C (70:30)+C	1.1060	0.8208	0.9628

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟต

จากข้อมูลการดูดซับฟอสเฟตตามระยะเวลาสัมผัสของวัสดุดูดซับทุกอัตราส่วน ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์ทั้ง pseudo first order และ pseudo second order (Table 7) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลอง pseudo second-order มีค่า R^2 สูงกว่า pseudo first order ในทุกอัตราส่วน ($R^2 = 0.9990-0.9998$) บ่งชี้ว่ากลไกการดูดซับฟอสเฟตมีแนวโน้มเป็นแบบการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) ที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนหรือแบ่งปันอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุดูดซับกับฟอสเฟต โดยวัสดุดูดซับ S-C(70:30)+C มีค่า q_e สูงสุดเท่ากับ 1.3985 mg/g และค่า K_2 เท่ากับ 0.3031 g/mg.h ซึ่งสูงกว่าวัสดุที่ไม่เคลือบไคโตซาน แสดงให้เห็นว่าไคโตซานช่วยเพิ่มทั้งความจุและอัตราเร็วในการดูดซับ

Table 7 Kinetic parameters for phosphate adsorption onto adsorbent material

Adsorbent	Pseudo first order			Pseudo second order		
	q_e (mg/g)	K_1 (1/h)	R^2	q_e (mg/g)	K^2 (g/mg.h)	R^2
S-C(100:0)	0.5552	0.1101	0.9897	0.6697	0.1839	0.9990
S-C(70:30)	0.9127	0.1708	0.9822	1.0447	0.2066	0.9996
S-C(100:0)+C	0.6342	0.1873	0.9760	0.7195	0.3357	0.9994
S-C(70:30)+C	1.2793	0.3065	0.9644	1.3985	0.3031	0.9998

Note: Pseudo first order and pseudo second order kinetic parameters for phosphate adsorption

at $C_0 = 50$ mg/L, pH 5, and 30°C

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตกับวัสดุดูดซับในงานวิจัยอื่น

จากตารางเปรียบเทียบ พบว่า วัสดุดูดซับ S-C(70:30)+C ของงานวิจัยนี้มีค่า $q_{\max}$ สูงถึง 72.4638 mg/g ซึ่งสูงกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่นที่รายงานในวรรณกรรมอย่างชัดเจน โดยสูงกว่าเม็ดตะกอนดินประปา ที่มีค่า $q_{\max}$ เพียง 4.68 mg/g (Noinumsai & Vinitnantharat, 2017) ประมาณ 15 เท่า และสูงกว่าผักตบชวาปรับสภาพด้วย NaOH ที่มีค่า $q_{\max}$ 2.39 mg/g (Jaikaew *et al.*, 2022) ประมาณ 30 เท่า ทั้งนี้ แม้แต่สูตร S-C(100:0)+C ที่ใช้ตะกอนดินประปาเพียงอย่างเดียวรวมกับการเคลือบไคโตซาน ก็ยังมีค่า $q_{\max}$ ถึง 50.0000 mg/g (Table 8) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลือบไคโตซานมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ ผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันจุดเด่นของงานวิจัยนี้ในการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งจากตะกอนดินประปาพร้อมกับเปลือกโกโก้ ทำการปรับปรุงพื้นที่ด้วยการเคลือบไคโตซาน ซึ่งทำให้ได้วัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าวัสดุดูดซับที่ไม่ได้เคลือบพื้นที่ผิวอย่างมีนัยสำคัญ

Table 8 Comparison of maximum phosphate adsorption capacity ($q_{\max}$) of various adsorbents

Adsorbent	$q_{\max}$ (mg/g)	Isotherm Model	Reference
S-C(70:30)+C	72.4638	Langmuir	This study
S-C(100:0)+C	50.0000	Langmuir	This study
Macadamia nutshell AC (Pb^{2+})	37.0300	Langmuir	Meethai & Moonsri (2024)
Water hyacinth + NaOH	2.3900	Langmuir	Jaikaew <i>et al.</i> (2022)
Tea residue charcoal	≈95% removal	N/A	E-Tae <i>et al.</i> (2022)
WTP sludge granule (HA)	4.6800	Langmuir	Noinumsai & Vinitnantharat (2017)

Discussion

ผลการศึกษาการขึ้นรูประหว่างตะกอนดิน (S) ผสมกับเปลือกโกโก้ (C) ในอัตราส่วน 100:0, 70:30, 50:50, 30:70 และ 0:100 ซึ่งวัสดุดูดซับที่ทำการศึกษานำมาทดสอบการขึ้นรูปด้วยการละลายพบว่า S-C(100:0) และ S-C (70:30) สามารถขึ้นรูปได้คงตัว จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัสดุดูดซับ ส่วน S-C(50:50), S-C(30:70) และ S-C(0:100) ไม่สามารถขึ้นรูปได้ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนที่มีสัดส่วนของเปลือกโกโก้สูงจะมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมาก ซึ่งถูกเผาไหม้หมดระหว่างกระบวนการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส ทำให้โครงสร้างเม็ดขาดตัวประสานและแตกร่วน ในทางตรงกันข้ามอัตราส่วนที่มีตะกอนดินเป็นองค์ประกอบหลักจะมีแร่ธาตุออกไซด์ที่ช่วยเชื่อมโครงสร้างให้คงรูปได้ดีหลังการเผา โดยผลการศึกษาของงานวิจัยนี้พบว่าอัตราส่วน S-C(100:0) และ S-C(70:30) ซึ่งมีตะกอนดินในสัดส่วนสูง สามารถขึ้นรูปได้อย่างมีเสถียรภาพ ซึ่งสอดคล้องกับ Noinumsai & Vinitnantharat (2017) ที่พบว่าตะกอนดินจากโรงผลิตน้ำประปาสามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดได้เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อีกทั้งยังสอดคล้องกับ Wongmukda *et al.* (2020) ที่ศึกษาการผลิตเม็ดดินเผาจากตะกอนดินประปาต่อจากมันสำปะหลังในอัตราส่วน 80:20 พบว่าสามารถขึ้นรูปได้แข็งแรง มีความพูนสูง และการดูดซึมน้ำสูง ซึ่งยืนยันได้ว่าอัตราส่วนที่มีตะกอนดินเป็นองค์ประกอบหลักจะให้ผลการขึ้นรูปที่ดี

ผลการศึกษาอิทธิพลของค่า pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า pH เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกลไกการดูดซับ กล่าวคือ ค่า pH เท่ากับ 5 จะส่งผลให้ร้อยละการดูดซับฟอสเฟตเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับ pH ของสารละลายให้เป็นกรด (pH ต่ำ) นั้นจะส่งผลปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิววัสดุดูดซับ เพิ่มขึ้น ทำให้กลไกการดูดซับฟอสเฟตที่เป็นไอออนลบเกิดขึ้นได้มาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า pH สูงกว่า 7 จะเกิดการตกตะกอนของไฮดรอกไซด์มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเช่นกัน นอกจากนี้บริเวณที่มีการเคลือบไคโตซานบริเวณเปลือกโกโก้มีหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ หมู่อะมิโน (NH_2) ซึ่งจะเป็นประจุบวกของในสารละลาย จึงเกิดแรงดึงดูดและจับกันกับประจุลบของฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ดังนั้นวัสดุดูดซับที่เคลือบด้วยสารไคโตซานจึงมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าไม่เคลือบไคโตซาน ซึ่งสอดคล้องกับ Elsheikh *et al.* (2018) ผลการศึกษา pH เท่ากับ 5 พบว่าเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟอสเฟตบนแร่ธาตุดินเหนียว kaolinite, montmorillonite, และ allophane มากที่สุด เนื่องจาก pH เท่ากับ 5 จะเป็นช่วงค่าที่สมดุลทำให้สามารถจับกับฟอสเฟตที่อยู่ในรูปประจุลบ ($H_2PO_4^-$) จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้สูงเมื่อเทียบกับค่า pH อื่น

ผลการศึกษาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับฟอสเฟตสังเคราะห์ โดยใช้วัสดุดูดซับที่ทำมาจากตะกอนดินประปา ผสมเปลือกโกโก้ และทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน พบว่าวัสดุดูดซับที่ได้ปรับปรุงด้วยการเคลือบไคโตซาน มีระยะเวลาสมดุลการดูดซับเร็วกว่าวัสดุดูดซับที่ไม่เคลือบไคโตซาน โดยมีระยะเวลาสมดุลเท่ากับ 16 ชั่วโมง ส่วนของวัสดุดูดซับที่ไม่เคลือบไคโตซาน มีระยะเวลาสมดุลที่ 24 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Jaikaew *et al.* (2022) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของผักตบชวาต่อการดูดซับฟอสเฟตจากกระบวนการผลิตปลาร้า ผลการศึกษาพบว่า การปรับปรุงพื้นที่ผิวของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยร้อยละการดูดซับฟอสเฟตของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH จะมีระยะเวลาเข้าสู่สมดุลที่เร็วกว่าผักตบชวาที่ไม่ได้ทำการปรับปรุง ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพด้วย NaOH เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับฟอสเฟต ซึ่งเป็นไอออนลบได้มากขึ้น จึงส่งผลทำให้การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงชั่วโมงแรก หลังจากนั้นร้อยละการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมง และมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงจนถึงระยะเวลาที่ 24 ชั่วโมง

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าเปลือกโกโก้ได้เมื่อได้รับการปรับปรุงด้วยการเคลือบไคโตซาน ประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติของไคโตซานซึ่งมีหมู่อะมิโน (NH_2) ที่สามารถโปรตอนเป็นประจุบวกในสภาวะกรดอ่อน จึงเกิดการเกิดแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตกับฟอสเฟตที่มีประจุลบได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ไคโตซานอาจมีส่วนช่วยเพิ่มความพรุนและพื้นที่ผิวของโครงสร้างเปลือกโกโก้ ทำให้จำนวนตำแหน่งที่สามารถจับอนุมูลฟอสเฟตมีมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความเสถียร ลดการเสื่อมสลายของวัสดุในน้ำ และเอื้อต่อการนำกลับมาใช้ซ้ำได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกโกโก้ที่ไม่ผ่านการเคลือบ จะเห็นได้ว่าวัสดุที่เคลือบไคโตซานมีประสิทธิภาพเหนือกว่าอย่างชัดเจน ทั้งในด้านกลไกการจับประจุ ความแข็งแรงของโครงสร้าง และพื้นที่ผิวที่มากขึ้น จึงถือเป็นวัสดุดูดซับที่เหมาะสมกว่าในการประยุกต์ใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสียที่มีฟอสเฟตสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Aini *et al.* (2023) ที่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวเปลือกโกโก้ (Cacao husk) ด้วยสารพอลิเมอร์ประจุบวก ผลการศึกษาพบว่าพื้นผิวเปลือกโกโก้ที่ปรับปรุงด้วยสารพอลิเมอร์ประจุบวก (CH-T) จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตได้สูงถึงร้อยละ 96 ซึ่งบ่งชี้ว่าการดัดแปลงเปลือกโกโก้ให้มีประจุบวกด้วยสาร CH จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต้นทุนต่ำและเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งยังสอดคล้องกับการดูดซับออร์โธฟอสเฟตจากวัสดุดูดซับที่ทำมาจากกากชา ถ่านกากชา และถ่าน

กากชาแบบเม็ด ในความเข้มข้นของสารละลายระหว่าง 1.0-25.0 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่สุด ในสารละลายเข้มข้น 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีร้อยละการดูดซับ เท่ากับ 95.26 ± 0.13 , 94.70 ± 0.08 และ 95.18 ± 0.10 ตามลำดับ (E-Tae *et al.*, 2022) อีกทั้งยังตรงกับผลการศึกษาของ Jaikaew *et al.* (2022) ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เปรียบเทียบผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยการหาความสามารถในการดูดซับไอโอดีน โดยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าไอโอดีน เท่ากับ 282.05 ± 4.15 มิลลิกรัมต่อกรัมวัสดุดูดซับ ในขณะที่ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.3, 0.5 และ 0.7 โมลาร์ มีค่าไอโอดีนเท่ากับ 401.50 ± 2.08 , 522.79 ± 4.16 และ 546.80 ± 7.21 มิลลิกรัมต่อกรัมวัสดุดูดซับ ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้ค่า ไอโอดีนนัมเบอร์ของผักตบชวาที่ปรับสภาพมีค่าสูงสุดคือ 546.80 ± 7.21 มิลลิกรัมต่อกรัมวัสดุดูดซับ เมื่อปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ดังนั้นจึงเลือกผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ มาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียต่อไป

ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับของวัสดุดูดซับฟอสเฟต ได้แก่ S-C (100:0), S-C (70:30), S-C (100:0)+C และ S-C (70:30)+C ได้รับการศึกษาภายใต้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตที่ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้แบบจำลอง Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสเฟตที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลายหลังการดูดซับ จากผลการวิเคราะห์กราฟและค่าคงที่ของทั้งสองแบบจำลอง พบว่า วัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไคโตซานในอัตราส่วน S-C (70:30)+C จะเห็นได้ว่ามีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตสูงที่สุด โดยมีค่าคงที่ Langmuir (K_L) และ Freundlich (K_F) สูงกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่นอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการเคลือบด้วยไคโตซานช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวที่มีประจุบวกและตำแหน่งดูดซับที่ใช้ทำงานได้ (Active sites) ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของวัสดุและไอออนฟอสเฟตมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Jaikaew *et al.* (2022) พบว่า ไอโซเทอมการดูดซับฟอสเฟตของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH สอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ โดยมีค่าความจุในการดูดซับฟอสเฟตสูงสุดเท่ากับ 2.39 มิลลิกรัม กล่าวได้ว่า ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายเบส มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตและมีความน่าสนใจนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียต่อไป เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Karintaritip *et al.* (2022) ที่ได้ศึกษาการปลดปล่อยออร์โธฟอสเฟตและการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยฟางข้าวและแกลบข้าว ผลการศึกษาเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่เข้าใกล้ 1 จะสอดคล้องกับสมการ Langmuir มากกว่าสมการ Freundlich ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็น homogeneous และกระบวนการดูดซับจะเกิดบนพื้นผิววัสดุดูดซับเพียงชั้นเดียว ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีจุดอิ่มตัวที่แน่นอน อีกทั้งยังสอดคล้องกับ Meethai & Moonsri (2024) ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 สูงสุด จะเห็นได้ว่ากระบวนการดูดซับมีลักษณะของการดูดซับตามสมการของ Langmuir มากที่สุด และทำให้ทราบว่า การดูดซับของ Pb^{2+} บนถ่านกัมมันต์นี้เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) มีค่าปริมาณการดูดซับ Pb^{2+} สูงสุดเท่ากับ 37.03 mg/g ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ K_L มีค่าเท่ากับ 0.4042 L/mg โดย Freundlich isotherm แสดงถึงความหลากหลายของวัสดุดูดซับและการเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นผิว โดยค่า K_F และค่า n คือ

ค่าคงที่ของ Freundlich ซึ่งแสดงถึงปริมาณการดูดซับและความหนาแน่นของการดูดซับ ซึ่งหากค่า K_F มีค่ามากแสดงถึงปริมาณการดูดซับมีมาก ส่วนค่า n หากมีค่าสูงแสดงว่ามีแรงดึงดูดที่แข็งแรงระหว่างสารวัสดุดูดซับและตัวถูกดูดซับ

Conclusions

ผลการศึกษาอัตราส่วนการขึ้นรูประหว่างตะกอนดินผสมกับเปลือกโกโก้ ในอัตราส่วน 100:0, 70:30, 50:50, 30:70 และ 0:100 โดยน้ำหนัก พบว่า S-C (100:0) และ S-C(70:30) สามารถขึ้นรูปได้และไม่ละลายน้ำ จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในขั้นตอนต่อไป โดยการศึกษาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับ พบว่า ตัวที่เคลือบไคโตซานเวลาที่ทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลอยู่ที่ประมาณ 16 ชั่วโมง แต่วัสดุดูดซับที่ไม่เคลือบไคโตซานเวลาที่ทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลอยู่ที่ประมาณ 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาศักยภาพการดูดซับฟอสเฟตด้วยวัสดุดูดซับทั้งที่ไม่เคลือบและเคลือบด้วยไคโตซานในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า pH สูงสุดต่อการดูดซับอยู่ที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดซับจะลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นสารละลายในการดูดซับที่เหลือด้วยตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาและเปลือกโกโก้ทั้งเคลือบและไม่เคลือบไคโตซาน ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ S-C (100:0), S-C (70:30), และ S-C (100:0)+C, S-C (70:30)+C พบว่าหลังการดูดซับจะมีปริมาณความเข้มข้นของฟอสเฟตเหลือที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ซึ่งมีค่าเหลืออยู่ในสารละลายเท่ากับ 2.70 ± 0.02 , 6.53 ± 0.03 , 10.00 ± 0.00 , 17.47 ± 0.01 , 24.00 ± 0.01 และ 36.00 ± 0.00 mg/L ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังการดูดซับฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 5, 10, 20, 30, 40, 50 (mg/L) พบว่าวัสดุดูดซับ S-C (70:30)+C สามารถดูดซับได้ดีที่สุด ผลการศึกษาศักยภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าวัสดุดูดซับทั้งที่ไม่เคลือบไคโตซานและเคลือบไคโตซาน มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ในทุกระดับความเข้มข้น โดยพบว่าหลังจากดูดซับที่ความเข้มข้น 5, 10, 20, 30, 40, และ 50 mg/L พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่สูงที่สุด คือ S-C (70:30)+C เท่ากับ 46.00 ± 0.01 , 69.40 ± 0.10 , 50.00 ± 0.11 , 41.77 ± 0.01 , 40.00 ± 0.10 , และ 28.00 ± 0.01 ตามลำดับ ผลการศึกษาค่าไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องกับรูปแบบการดูดซับของไอโซเทอมแลงเมียร์ โดยมีค่า R^2 ของตัวดูดซับในอัตราส่วน S-C (100:0), S-C (70:30), S-C (100:0)+C, S-C (70:30)+C มีค่าเท่ากับ 0.9812, 0.9857, 0.9904 และ 0.995 ตามลำดับ โดยมีค่าความจุการดูดซับสูงสุด (q_{max}) เท่ากับ 72.4638 mg/g บ่งชี้ได้ว่าการดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับเป็นลักษณะการดูดซับชั้นเดียว ทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าวัสดุดูดซับเมื่อได้รับการปรับปรุงด้วยการเคลือบไคโตซาน มีประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของไคโตซานซึ่งมีหมู่เอมีโน (NH_2) ที่สามารถโปรตอนเป็นประจุบวกในสภาวะกรดอ่อน จึงเกิดการเกิดแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตกับฟอสเฟตที่มีประจุลบได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นจากผลการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) แสดงให้เห็นว่าวัสดุดูดซับที่ทำจากตะกอนดินผลิตน้ำประปาพร้อมกับเปลือกโกโก้ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไคโตซานมีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังขาดการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค BET, SEM, FTIR และ kinetic model fitting อย่างสมบูรณ์ หากในอนาคตมีความต้องการนำไปใช้งานจริงในระดับ Scale ที่ใหญ่ขึ้นจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม ได้แก่ การสร้างแบบจำลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต นอกจากนี้ควรศึกษาการทดสอบกับน้ำเสียจริง และการประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ สำหรับ Scale-up ต่อไป

Acknowledgments

ขอขอบคุณแหล่งทุนสนับสนุนงบประมาณ จากกองทุนพัฒนากาการวิจัยและบริหารจัดการงานวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ประจำปีงบประมาณ 2568 (รหัสโครงการ RDI-2-68-01) ที่ส่งเสริมให้บุคลากรทำวิจัย รวมถึงขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่อนุเคราะห์เครื่องมือวิจัย และขอบคุณหลักสูตรเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในการอนุเคราะห์ให้เตาเผาอุณหภูมิสูง ตลอดจนการให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างจากสถานที่ต่างๆ เช่น เปลือกโกโก้จากวิสาหกิจนครชุม อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก และตะกอนดินจากโรงประปาวัดสุดสวัสดิ์ ตำบลบ้านคลอง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลกที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

- Aini, N., Mufandi, I., Jamilatun, S., & Rahayu, A. (2023). Exploring cacao husk waste–surface modification, characterization, and its potential for removing phosphate and nitrate ions. *Journal of Ecological Engineering*, 24(12). 282–292.
- Elsheikh, M. A., Muchaonyerwa, P., Johan, E., Matsue, N., & Henmi, T. (2018). Mutual adsorption of lead and phosphorus onto selected soil clay minerals. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 8(2), 67-81.
- E-Tae, S., Tangkananuruk, K., Silberg, C.V., & Semawimol, N. (2022). Investigation of adsorption efficiency of orthophosphate and ammonium in solution and wastewater by tea residue and tea residue charcoal. *Engineering Journal of Research and Development*. (2022), 33(3), 81-92. (in Thai)
- Jaikaew, P., Kahapana, C., & Phowan, N. (2022). Efficacy of water hyacinth on phosphate absorption from Pla-ra production process. *The Journal of Industrial Technology: Suan Sunandha Rajabhat University*, 10(1), 52-61. (in Thai)
- Karintaritip, S., Tangkananuruk, K., Rungrattanaubon, T., & Wararam, W. (2022). Adsorption and Desorption of Ammonium and Orthophosphate by Rice Straw and Rice Husk for Soil Amendment. *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, 22(1), 133-144. (in Thai)
- Meethai, S., Seekhamjeen, P., & Moonsri, P. (2024). The effective removal of the metal ion Pb^{2+} from an aqueous solution by activated carbon prepared from macadamia nut shell: isotherm and thermodynamic studies. *Journal of Vocational Education in Agriculture*, 8(2), 32-47. (in Thai)
- Mekasamphan, J., Mekasamphan, C., & Achimanangkul, S. (2009). Aquatic ecosystem and water quality research: Project report on monitoring the carrying capacity for recreational use in national parks,

Erawan National Park, Kanchanaburi Province and Kaeng Krachan National Park, Phetchaburi Province (1st ed.). Faculty of Fisheries, Kasetsart University. (in Thai)

Noinumsai, S., & Vinitnantharat, S. (2017). Humic Acid Adsorption by Adsorbent Granule Derived from Sludge of Water Supply Production. *Burapha Science Journal*, 22(2), 58-73. (in Thai).

Regional Environmental Office 13. (2019). Water pollution. Retrieved from <https://epo13.pcd.go.th/th/news/detail/49278>. (in Thai)

Tandulwasem, M. (2000). Water Quality Analysis Handbook (4th ed.). Chulalongkorn University Press. (in Thai)

Wongmukda, K., Supinya, Mullasir., Panjai., & Saueprasearsit. (2020). Production of Lightweight Expanded Clay Aggregate from Water Treatment Sludge and Cassava Sludge. Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Kantarawichai District, MahaSarakhm, Thailand. (in Thai)

Wongmukda, K., Morarasee, S., & Saueprasearsit, P. (2020). Production of Lightweight Expanded Clay Aggregate from Water Treatment Sludge and Cassava Sludge. *Journal of Science and Technology Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 39(4), 472-479. (in Thai)