

ศักยภาพของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยก้น (*Geloina expansa*) ในการดูดซับฟอสเฟตจากน้ำเสียในระบบจำลอง

Adsorption potential of calcium carbonate and calcium oxide derived from common geloina shells (*Geloina expansa*) for phosphate removal from simulated wastewater

จินตนา สและน้อย^{1*}, ศักดิ์สิทธิ์ ฤกษ์หรั่ง¹, ศรีณย์ สและน้อย² และ สุธิดา มะสกุล¹

Jintana Salaenoi^{1*}, Saksit Lerkring¹, Sarun Salaenoi² and Sutida Masakun¹

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

¹Department of Marine Science, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Bangkok, 10900

²วิชาเอกเศรษฐศาสตร์ธุรกิจ คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช จังหวัด นนทบุรี 11120

²Business Economics Program, School of Economics, STOU, Nonthaburi, Thailand 11120

บทคัดย่อ: การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับที่ผลิตจากเปลือกหอยก้น (*Geloina expansa*) โดยเปรียบเทียบระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เพื่อประเมินความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตภายใต้เงื่อนไขของ เวลา ปริมาณ วัสดุดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และพฤติกรรมการดูดซับตามแบบจำลองไอโซเทอม พบว่า เปลือกหอยก้นมีองค์ประกอบของ CaCO_3 , CaO และสารอนินทรีย์รวม เท่ากับ 96.23 ± 1.94 , 55.54 ± 0.17 และ $96.95 \pm 0.44\%$ โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่ง CaO จากเปลือกหอยมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตสูงกว่า CaCO_3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในทุกสภาวะที่ศึกษา โดยสามารถดูดซับฟอสเฟตได้สูงถึง 98.19% ภายในเวลา 150 นาที และยังคงประสิทธิภาพดีมากในช่วง pH เป็นกลางถึงด่าง ในขณะที่ CaCO_3 มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 31.02% ที่ pH 4 และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อค่า pH สูงขึ้น เมื่อพิจารณาในด้านปริมาณของวัสดุดูดซับพบว่า CaO ในปริมาณต่ำก็สามารถดูดซับฟอสเฟตได้ในระดับสูง (93.81% ที่ 0.02 g/50 mL) ขณะที่ CaCO_3 ยังด้อยกว่าในด้านปริมาณและความคงที่ของประสิทธิภาพ จากการวิเคราะห์สมการ Langmuir และ Freundlich isotherm แสดงให้เห็นว่า CaO มีคุณสมบัติการดูดซับแบบผิวเดียวที่มีประสิทธิภาพ ($q_{\text{max}} = 131.58 \text{ mg/g}$, $R^2 = 0.9637$) และเหมาะสมต่อการดูดซับในระบบที่มีลักษณะพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ ส่วน CaCO_3 มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ผิวและตำแหน่งดูดซับ การศึกษาชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การเปลี่ยนโครงสร้างของเปลือกหอยก้นจาก CaCO_3 ให้เป็น CaO จะช่วยเพิ่มศักยภาพในการดูดซับฟอสเฟตได้อย่างมีนัยสำคัญ แสดงถึงแนวทางในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางทะเลเพื่อการจัดการมลพิษอย่างเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: เปลือกหอยก้น; แคลเซียมออกไซด์; แคลเซียมคาร์บอเนต; การบำบัดน้ำเสีย; ไอโซเทอมการดูดซับ

ABSTRACT: This study investigates the phosphate adsorption efficiency of sorbent materials derived from common geloina shells (*Geloina expansa*) by comparing calcium carbonate (CaCO_3) and calcium oxide (CaO). The adsorption performance was evaluated under various conditions, including contact time, adsorbent dosage, pH, and adsorption behavior based on isotherm models. The chemical composition analysis of *G. expansa* shells revealed that the CaCO_3 , CaO and total inorganic content was 96.23 ± 1.94 , 55.54 ± 0.17 and $96.95 \pm 0.44\%$ by weight, respectively. Results revealed that CaO exhibited significantly higher phosphate adsorption efficiency ($P < 0.05$) than CaCO_3 under all tested conditions, achieving up to 98.19% removal within 150 minutes. CaO maintained high

* Corresponding author: ffsjid@ku.ac.th

Received: date; December 29, 2025 Revised: date; June 9, 2026

Accepted: date; June 10, 2026 Published: date; August 24, 2026

performance especially under neutral to alkaline conditions. In contrast, CaCO_3 achieved a maximum adsorption of only 31.02% at pH 4, with efficiency decreasing at higher pH levels. Regarding dosage, CaO demonstrated high phosphate removal efficiency (93.81%) even at low amounts (0.02 g/50 mL), while CaCO_3 showed less stable and performance. Isotherm analysis showed that the Langmuir and Freundlich models fit the CaO adsorption data well, indicating effective monolayer adsorption ($q_{\text{max}} = 131.58 \text{ mg/g}$, $R^2 = 0.9637$) on heterogeneous surfaces. While CaCO_3 showed limitations in surface area and active adsorption sites. These findings suggest that transforming common geloina shells into CaO via calcination significantly enhances phosphate adsorption capacity. This highlights the eco-friendly potential of utilizing marine biowaste for pollution management in wastewater treatment.

Keywords: *Geloina expansa* shell; calcium oxide; calcium carbonate; wastewater treatment; adsorption isotherm

บทนำ

ฟอสเฟตเป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศน้ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อมีฟอสเฟตสะสมในปริมาณสูงเกินระดับปกติในแหล่งน้ำ โดยเฉพาะในแหล่งน้ำเสียจากชุมชน เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม จะกระตุ้นให้เกิดภาวะยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) ซึ่งเป็นสภาวะการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่ายและพืชน้ำ เป็นผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงอย่างมาก และส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำรวมถึงสมดุลของระบบนิเวศน้ำ (Correll, 1998; Smith et al., 1999) ปัญหานี้ไม่เพียงเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพแหล่งน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค การประมง และการท่องเที่ยว ดังนั้น การหาแนวทางในการกำจัดฟอสเฟตอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะวิธีที่ใช้ประโยชน์จากทรัพยากรท้องถิ่นหรือวัสดุเหลือทิ้งที่มีศักยภาพ จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อฟื้นฟูคุณภาพแหล่งน้ำและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

แนวทางในการลดปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสียมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอน การกรอง การใช้พืชน้ำ และการดูดซับ โดยเทคนิคการดูดซับ (adsorption) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Crini and Lichtfouse, 2019) สามารถใช้วัสดุธรรมชาติหรือวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาดัดแปลงเป็นวัสดุดูดซับ โดยเฉพาะวัสดุดูดซับที่มีองค์ประกอบของแคลเซียม เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีรายงานว่าสามารถกำจัดฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนและการตกตะกอนร่วม (Li et al., 2016b) หนึ่งในวัสดุธรรมชาติที่น่าสนใจคือเปลือกหอยทะเล ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากครัวเรือนและอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะหอยก้น (*Geloina expansa* Mousson, 1849) ที่เป็นหอยสองฝาสกุลเดียวในวงศ์ Cyrenidae ซึ่งพบทั่วไปในระบบนิเวศป่าชายเลนและพื้นที่น้ำกร่อยในเขตร้อนของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ประเทศไทย มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ และอินโดนีเซีย (Rattanachot et al., 2020; Ong and Rachmawati, 2023) หอยชนิดนี้มีความสำคัญต่อระบบนิเวศในฐานะตัวกรองสารอินทรีย์ และยังเป็นแหล่งโปรตีนที่เข้าถึงได้ง่ายในระดับชุมชนชายฝั่ง

จากรายงานในฟิลิปปินส์ พบว่าการเลี้ยงหอยก้นมีความหนาแน่นเฉลี่ย 1.78 ± 0.83 ตัว/ตารางเมตร และให้ผลผลิตเฉลี่ย 0.257 กรัมแห้ง/ตัว/ตารางเมตร/เดือน (Trono et al., 2020) ขณะที่ในมาเลเซีย หอยก้นถูกเก็บเกี่ยวตลอดปีเพื่อบริโภคและจำหน่ายในตลาดสด (Norazlimi and Ramli, 2015) ซึ่งก็มีข้อกังวลว่าการเก็บเกี่ยวมากเกินไป อาจเกินขีดความสามารถในการฟื้นตัวของประชากรได้ (Mohd Ariffin et al., 2023) ในอินโดนีเซีย มีรายงานว่าหอยก้นกระจายตัวหนาแน่นในเขตน้ำตื้น โดยพบมากถึง 9.90 ตัว/ตารางเมตร ในขณะที่ในเขตน้ำลึกมีเพียง 0.78 ตัว/ตารางเมตร (Sila and Mustari, 2021) สำหรับประเทศไทย แม้จะยังไม่มีข้อมูลสถิติจากหน่วยงานกลาง แต่มีการใช้ประโยชน์จากหอยก้นในหลายชุมชนชายฝั่ง เช่น ระนอง ชุมพร และนครศรีธรรมราช ทั้งในด้านการบริโภค และการแปรรูปเปลือกหอยเป็นปูนขาวที่ใช้ปรับปรุงดินและในงานก่อสร้าง (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร, 2564; สมพร, 2561; กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2562) ซึ่งแสดงถึงศักยภาพของเปลือกหอยก้นในการพัฒนาเป็นทรัพยากรทางเศรษฐกิจระดับชุมชน หากมีการจัดการอย่างยั่งยืน (Kumaran et al., 2021; วิชัย, 2560)

เปลือกหอยทะเล มีโครงสร้างเฉพาะที่ประกอบด้วย 3 ชั้นหลัก ได้แก่ ชั้นนอก (periostracum) ชั้นกลาง (prismatic layer) และชั้นใน (nacreous layer) โดยชั้นนอกเป็นชั้นโปรตีนที่มีคอนไคโอลิน (conchiolin) ซึ่งช่วยป้องกันเปลือกจากการกัดกร่อน ชั้นกลางมีผลึกแคลไซต์ (calcite) รูปทรงปริซึมที่ให้ความแข็งแรงต่อแรงกด และชั้นในเป็นชั้นมุกที่ประกอบด้วยผลึกอะราโกไนต์ (aragonite) ขนาดเล็กเรียงซ้อนกันแบบ brick-and-mortar ทำให้มีความเหนียวและมันวาว (Prachayawarakorn et al., 2019;

Srisombat et al., 2018; Chen et al., 2021b; Zhou et al., 2019b) โครงสร้างดังกล่าวช่วยเสริมให้เปลือกหอยมีความทนทานต่อสิ่งแวดล้อมและศัตรูธรรมชาติ อีกทั้งยังมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับทางธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบหลักของเปลือกหอยทะเลที่อุดมด้วย CaCO_3 ซึ่งสามารถนำไปผ่านกระบวนการเผาแปรสภาพเป็น CaO ได้ ทำให้วัสดุมีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตเพิ่มขึ้น ทั้งจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี (Zhang et al., 2020a; Wang et al., 2019) นอกจากนี้ การใช้เปลือกหอยทะเลยังมีส่วนช่วยลดปัญหาขยะทะเล และส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียนในระดับชุมชนอีกด้วย

เปลือกสัตว์ทะเลหลายชนิดมีศักยภาพเป็นสารดูดซับในการกำจัดฟอสเฟตจากน้ำทิ้ง ได้แก่ เปลือกหอยนางรม (Namasivayam, et al., 2005; Chen et al., 2012; Tran, et al., 2021, Xu et al., 2023) เปลือกหอยเชลล์ (Yeom and Jung, 2009) เปลือกหอยแมลงภู่ (Paradelo et al., 2016) เปลือกหอยแครง (Nayeem et al., 2023) และเปลือกกุ้ง (Yamsomphong, et al., 2025) เป็นต้น ศักดิ์สิทธิ์ และคณะ (2567) รายงานความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจำลอง พบว่า CaCO_3 สามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่สุดที่เวลา 180 นาที ซึ่งมีร้อยละของการดูดซับเท่ากับ 23.84 ± 3.28 , 31.40 ± 1.78 และ 25.71 ± 2.41 ส่วน CaO แสดงการดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่สุดที่เวลา 150 นาที ซึ่งมีร้อยละของการดูดซับ เท่ากับ 99.37 ± 0.13 , 98.74 ± 0.67 และ 97.43 ± 1.08 เมื่อใช้ CaCO_3 และ CaO ที่ผลิตมาจากเปลือกหอยตลับ (*Meretrix meretrix*) เปลือกหอยแครงบิด (*Trisidos semitorta*) และที่ผลิตจากการค้า ตามลำดับ โดยพบว่าระยะเวลาที่มีผลต่อร้อยละของการดูดซับแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งสาเหตุที่ CaO มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่า CaCO_3 เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการกระจายขนาดรูพรุนซึ่งเกิดขึ้นได้จากการเผาหรือการให้ความร้อนสูง (Oladoja et al., 2015; Silvia et al., 2020) นอกจากนี้ Mohd Zain et al. (2022) รายงานการใช้เปลือกหอยแครง (*Anadara granosa*) ที่ผ่านกระบวนการเผาด้วยความร้อนสูงจนเปลี่ยนโครงสร้างเป็น CaO และนำมาใช้กำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ (KH_2PO_4) ด้วยวิธีการดูดซับ โดยใช้ปริมาณสารดูดซับ 5 ระดับ (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัม) ผสมกับฟอสเฟต 10 ppm นาน 60 นาที พบว่า สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้สูงสุด 94.96%

จากแนวทางการใช้ประโยชน์จากเปลือกหอยดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับที่ได้จากเปลือกหอยกันในรูปของ CaCO_3 และ CaO ในการกำจัดฟอสเฟตออกจากน้ำเสียจำลอง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ เวลา ปริมาณวัสดุ และค่า pH ของสารละลาย รวมถึงการวิเคราะห์พฤติกรรมดูดซับผ่านแบบจำลองไอโซเทอม เพื่อนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีดูดซับที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อันสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนในอนาคต

วิธีการศึกษา

วัสดุและสารเคมี

เปลือกหอยก้น (*G. Expansa*) นำมาจากแหล่งขายหอยในชุมชน ตำบลพุมเรียง อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี Potassium dihydrogen orthophosphate (KH_2PO_4 analytical grade, Ajax Finechem Pty Ltd, Australia) สำหรับเตรียมฟอสเฟตจำลองในน้ำเสีย และสารเคมีมาตรฐาน: Hydrochloric acid (HCl, reagent grade, 37%, Honeywell Fluka™, Austria), Sodium hydroxide (NaOH, analytical grade, Ajax Finechem Pty Ltd, Australia) และ deionized water (DI water)

การเตรียมวัสดุดูดซับ

การเตรียมวัสดุดูดซับ CaCO_3 เริ่มต้นด้วยการนำเปลือกหอยก้น (*G. Expansa*) มาล้างด้วยน้ำสะอาดหลายครั้ง เพื่อขจัดสิ่งสกปรก ฟันผง และสารเจือปนที่ติดมากับเปลือกหอย จากนั้นจึงนำไปตากจนแห้งสนิท และนำไปบดจนเป็นผงละเอียดจะได้ CaCO_3 ที่พร้อมสำหรับการใช้ในกระบวนการดูดซับฟอสเฟต

การเตรียม CaO ใช้วิธีการทางความร้อน ตามวิธีการของ Paradelo et al. (2016) โดยนำผงเปลือกหอยก้น (CaCO_3) มาเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนสถานะให้กลายเป็น CaO โดยสมบูรณ์ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุ

ให้เหมาะสมต่อการดูดซับสารฟอสเฟตจากน้ำเสียในขั้นตอนต่อไป การป้องกันความชื้นโดยเก็บผง CaO ใส่ใน ziplock bag แล้วเก็บในโถดูดความชื้นที่บรรจุด้วยเม็ดซิลิกาสำหรับดูดความชื้น

การทดสอบการดูดซับฟอสเฟต

น้ำเสียจำลอง (สารละลายฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 40 μM) ซึ่งเตรียมมาจากโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) วัสดุดูดซับที่ใช้ ได้แก่ CaCO_3 (ปริมาณ 0.5 g/50 ml) และ CaO (ปริมาณ 0.05 g/50 ml) เหตุผลของการใช้ CaCO_3 และ CaO ไม่เท่ากันเนื่องจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า CaO มีน้ำหนักเบากว่า และมีประสิทธิภาพดีกว่า CaCO_3 ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณที่น้อยเพื่อลดต้นทุน (หากในอนาคตจะมีการขยายระดับการผลิต) อีกทั้งการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับมากเกินไป อาจก่อให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสลดลง และลดประสิทธิภาพเฉลี่ยต่อหน่วยมวลของวัสดุดูดซับ ดังนั้น การเลือกปริมาณวัสดุดูดซับจึงต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพสูงสุดควบคู่ไปกับความคุ้มค่าและประสิทธิผลในการใช้งานจริง

การทดลองแต่ละชุดจะทำการกวนสารผสมในเครื่องเขยที่ความเร็ว 150 รอบ/นาที (rpm) ภายใต้อุณหภูมิห้อง (25 °C) เพื่อสร้างสภาวะการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างวัสดุดูดซับและสารละลายฟอสเฟต จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที เพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในสารละลาย การทดลองทั้งหมดทำซ้ำ 3 ครั้ง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟต ได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ (CaCO_3 ปริมาณ 0.25 ถึง 1.0 g/50 ml และ CaO ปริมาณ 0.02 ถึง 0.10 g/50 ml) และ pH ของสารละลาย (pH 4 ถึง 10) เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ การเปลี่ยนแปลงของประจุผิววัสดุ และรูปแบบฟอสเฟตในสารละลาย ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือในสารละลายใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer วัดที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร ด้วยวิธี molybdenum blue (กรมประมง, 2562; Masakun et al., 2026) จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างไปหาความเข้มข้นโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานฟอสเฟต โดยคำนวณค่าร้อยละการดูดซับฟอสเฟตตามสมการที่ 1

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

โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต และ C_e คือ ความเข้มข้น ณ สมดุลของฟอสเฟต

ในการศึกษาครั้งนี้ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย 3 ตัวแปร คือ ช่วงเวลาในการดูดซับ ปริมาณสารที่ใช้เป็นตัวดูดซับ และ pH ของสารละลายที่ใช้ดูดซับ อนึ่ง การศึกษาทางเคมีที่มีหลายตัวแปรนั้น จำเป็นจะต้องศึกษาทีละตัวแปร เพื่อที่จะได้ยืนยันผลของตัวแปรนั้นอย่างชัดเจน ดังนั้นในการทดลองนี้จะดำเนินการหาช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับเป็นลำดับแรก (ซึ่งมีการเปรียบเทียบทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในตัวดูดซับแต่ละชนิด) จากนั้นจะนำช่วงเวลาที่ดีที่สุดไปใช้เพื่อศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของสารดูดซับเป็นลำดับที่สอง (มีการเปรียบเทียบทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในตัวดูดซับแต่ละชนิด) และในลำดับสุดท้ายจึงนำเอาช่วงเวลาและปริมาณไปใช้ เพื่อศึกษาหา pH ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ (มีการเปรียบเทียบทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในตัวดูดซับแต่ละชนิด)

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมของการดูดซับฟอสเฟตของวัสดุดูดซับ CaCO_3 และ CaO ที่เตรียมจากเปลือกหอยกัน (พฤติกรรมดูดซับ เป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคของแก๊สหรือของเหลวเคลื่อนที่ไปยึดเกาะหรือสะสมบนพื้นผิวของแข็งหรือของเหลวโดยไม่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อสาร พฤติกรรมจึงเป็นคำศัพท์เฉพาะสำหรับการดูดซับ) โดยปรับปรุงวิธีการมาจาก เสาวภา (2559) เพื่อประเมินศักยภาพของวัสดุดูดซับผ่านแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนดลิช (Freundlich) โดยเตรียม CaCO_3 ปริมาณ 1.0 กรัม และนำไปดูดซับสารฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 9 ระดับ ได้แก่ 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 และ 500 μM โดยทำการดูดซับเป็นเวลา 180 นาที สำหรับ CaO จะใช้ปริมาณ 0.05 กรัม ในการดูดซับสารฟอสเฟตในระดับความเข้มข้นเดียวกัน โดยใช้ระยะเวลาการดูดซับ 150 นาที การทดลองทั้งหมดทำซ้ำ 3 ครั้ง ค่าการดูดซับที่ได้จากการทดลองในแต่ละ

ระดับความเข้มข้นจะถูกนำมาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (q_e) และค่าความเข้มข้นของสารที่สมดุลในสารละลาย (C_e) จากนั้นใช้ข้อมูลดังกล่าวสร้างกราฟไอโซเทอมการดูดซับตามแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

สำหรับแลงเมียร์ไอโซเทอม กราฟจะถูกสร้างโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_e และ $1/q_e$ ตามสมการที่ 2

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

โดยที่ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของวัสดุดูดซับ (mg/g) q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดแบบขั้นเดียว (mg/g) C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุล (mg/L) และ K_L คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองแลงเมียร์

สำหรับฟรุนดลิชไอโซเทอม จะสร้างกราฟโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C_e$ ตามสมการที่ 3

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad \dots 3$$

โดยที่ K_F คือ ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการดูดซับ $1/n$ คือ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของสารดูดซับ q_e และ C_e มีความหมายเช่นเดียวกับในแบบจำลองแลงเมียร์

ผลลัพธ์จากการสร้างกราฟทั้งสองแบบจำลองจะถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลอง และวิเคราะห์ลักษณะการดูดซับของวัสดุต่าง ๆ และเพื่อแสดงลำดับกระบวนการในการเตรียมวัสดุและศึกษาการดูดซับฟอสเฟตจากวัสดุดูดซับเปลือกหอยกันอย่างชัดเจน จึงได้จัดทำแผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมดไว้ดัง Figure 1

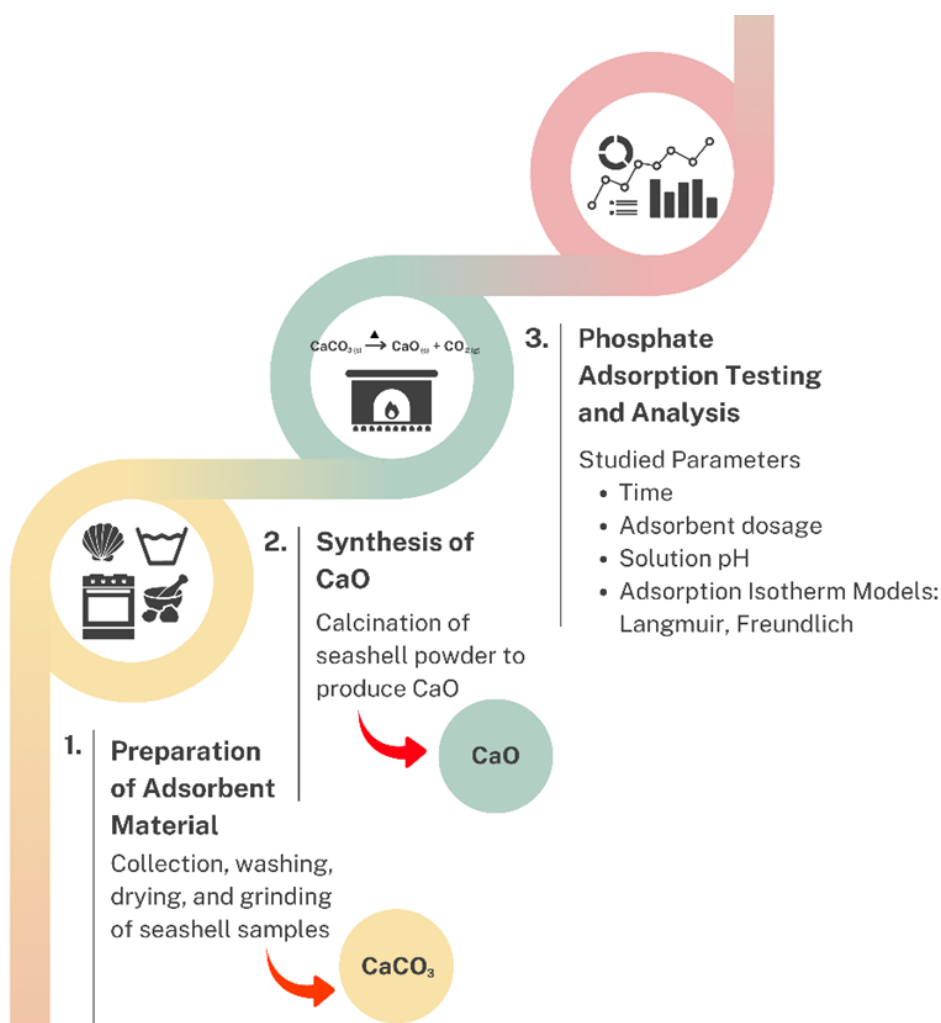


Figure 1 Schematic diagram summarizing the workflow of the phosphate adsorption study using adsorbents derived from *Geloina expansa* shells, including calcium carbonate (CaCO_3) and calcium oxide (CaO).

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยนำค่าการดูดซับที่ได้มาคำนวณหาอัตราการดูดซับ (Removal Efficiency) ของวัสดุต่าง ๆ โดยค่าผลลัพธ์ทั้งหมดจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD) เนื่องจากวิธีการศึกษามีตัวแปร 3 ตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องประกอบไปด้วย ช่วงเวลาในการดูดซับ ปริมาณสารที่ใช้เป็นตัวดูดซับ และ pH ของสารละลายที่ใช้ดูดซับ เพื่อที่จะได้ยืนยันผลของตัวแปรอย่างชัดเจน ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาที่แต่ละตัวแปร และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางสถิติของแต่ละตัวแปร สำหรับการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความสามารถในการดูดซับระหว่างกลุ่มวัสดุต่าง ๆ และระหว่างชนิดของสาร (CaCO_3 และ CaO) ใช้การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และทดสอบค่าความแตกต่างระหว่างสองกลุ่มด้วย t-test ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$ โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ SPSS (Perfect Statistics Professionally Presented) สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ และ Microsoft Excel สำหรับการจัดการข้อมูลเบื้องต้นและการสร้างกราฟต่าง ๆ

ผลการศึกษา

องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยก้น (*G. expansa*)

ลักษณะของเปลือกหอยก้นแห้งที่ผ่านการทำความสะอาด (Figure 2a) ถูกนำไปบดจนเป็นผงละเอียดจะได้ CaCO_3 ที่พร้อมสำหรับการใช้ในกระบวนการดูดซับฟอสเฟต (Figure 2b) จากนั้นนำมาเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะกลายเป็น CaO โดยสมบูรณ์ (Figure 2c) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยก้น พบว่ามีปริมาณ CaCO_3 เท่ากับ 96.23 ± 1.94 g/100 g น้ำหนักแห้ง ปริมาณสารอนินทรีย์รวมคิดเป็น $96.95 \pm 0.44\%$ (โดยน้ำหนัก) หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900°C พบว่ามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ $55.54 \pm 0.17\%$ ของน้ำหนักเริ่มต้น



Figure 2 Adsorbent materials used for phosphate adsorption: (a) raw *Geloina expansa* shells showing outer and inner surfaces, (b) calcium carbonate (CaCO_3) derived from *Geloina expansa* shells, and (c) calcium oxide (CaO) obtained by calcination of *Geloina expansa* shells.

ประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตของวัสดุดูดซับจากเปลือกหอยก้น

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในสารละลาย ($40 \mu\text{mol/L}$) ระหว่างวัสดุดูดซับ CaCO_3 และ CaO ตามระยะเวลา พบว่า CaO มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตสูงกว่า CaCO_3 อย่างชัดเจนในทุกช่วงเวลา โดยสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของสีของสารละลายฟอสเฟตหลังดูดซับ (Figure 3) ซึ่งสีของการดูดซับด้วย CaO มีความใสมากกว่าการดูดซับด้วย CaCO_3

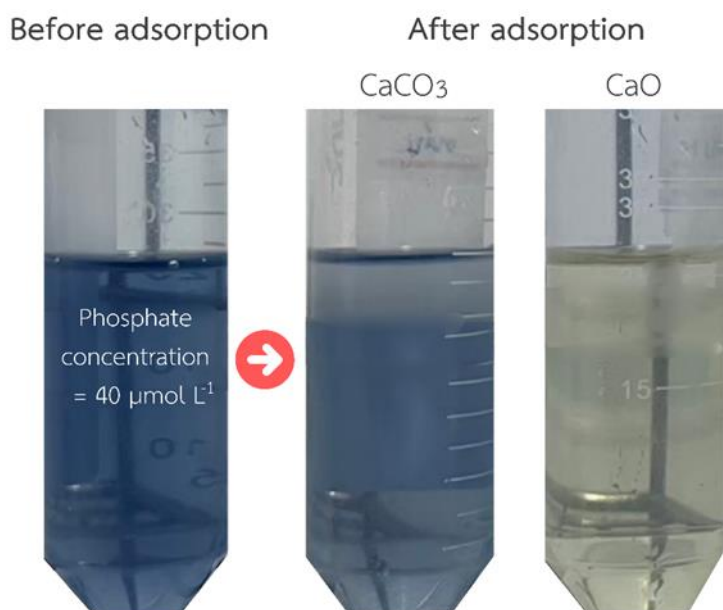


Figure 3 Visual color changes of the phosphate solution (40 µmol/L) before and after adsorption by calcium carbonate (CaCO₃) and calcium oxide (CaO) derived from *Geloina expansa* shells.

จากการคำนวณค่าร้อยละการดูดซับ พบว่า การดูดซับด้วย CaCO₃ มีค่าอยู่ในช่วง 24.16±0.26% ถึง 31.02±1.26% โดยประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 120 นาที ในขณะที่ CaO มีประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างชัดเจน โดยมีค่าการดูดซับอยู่ในช่วง 90.03±0.58% ถึง 98.19±1.26% และมีค่าคงตัวในช่วงเวลา 150-180 นาที (Figure 4)

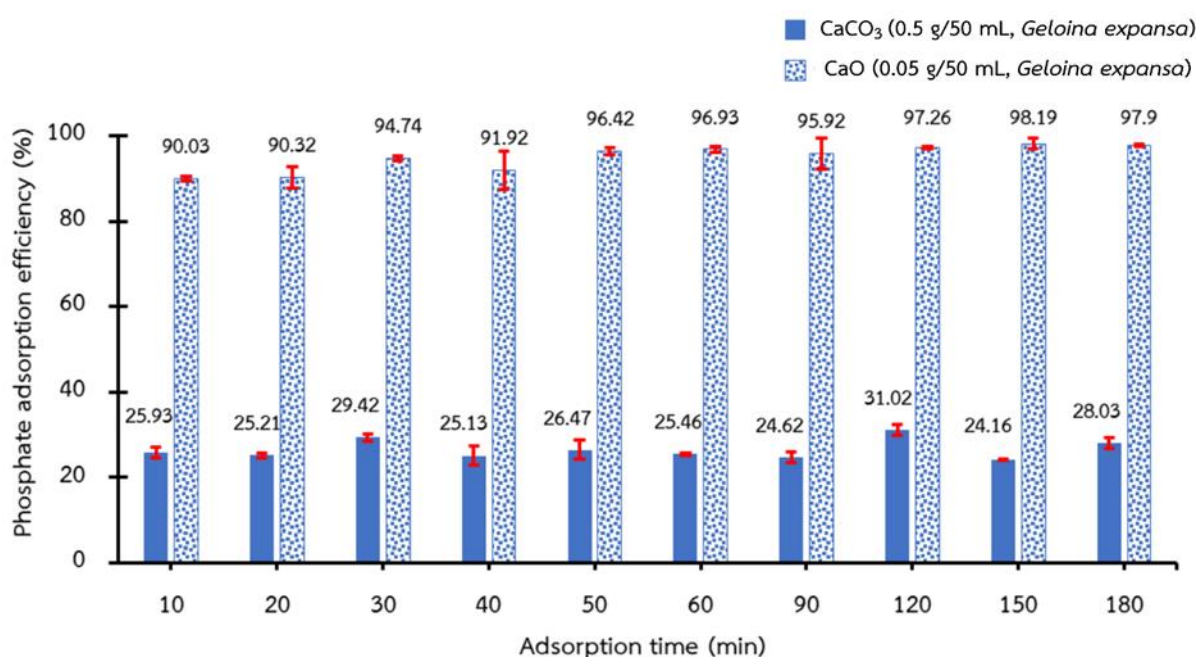


Figure 4 Effect of contact time on phosphate adsorption efficiency using calcium carbonate (CaCO₃) and calcium oxide (CaO) derived from *Geloina expansa* shells. Error bars represent standard deviation (n = 3).

การเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งปริมาณของวัสดุดูดซับมีผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตของวัสดุทั้งสองชนิด โดยที่ CaO แสดงประสิทธิภาพสูงมากกว่า

เมื่อเทียบกับ CaCO_3 ในทุกปริมาณที่ใช้ (Figure 5) ในกรณีของ CaCO_3 พบว่า การเพิ่มน้ำหนักวัสดุดูดซับจาก 0.25 g เป็น 1.0 g ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเกือบ 5 เท่า (Figure 5a) ส่วน CaO นั้นถึงแม้ว่าจะใช้น้ำหนักเพียง 0.02 g ก็สามารถดูดซับฟอสเฟตได้สูงถึง $93.81 \pm 2.89\%$ และเพิ่มขึ้นเป็น $99.75 \pm 0.02\%$ เมื่อใช้น้ำหนัก 0.10 g (Figure 5b)

สำหรับผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟต พบว่า วัสดุดูดซับทั้งสองชนิดมีพฤติกรรมดูดซับฟอสเฟตแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในช่วงค่า pH ที่ทดสอบ (pH 4, 7 และ 10) (Figure 6) CaCO_3 มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ pH 4 โดยประสิทธิภาพจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อ pH เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ pH 10 (เบสแก่) ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 59.47% สำหรับ CaO แสดงประสิทธิภาพสูงมากในทุกระดับ pH ที่ศึกษา โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ pH 7 (98.15%) และยังคงแสดงความคงที่ในการดูดซับฟอสเฟตแม้ในสภาวะเป็นกรดที่ pH 4 (91.29%) ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ ยังไม่พบว่า pH มีผลต่อการตกตะกอนฟอสเฟต

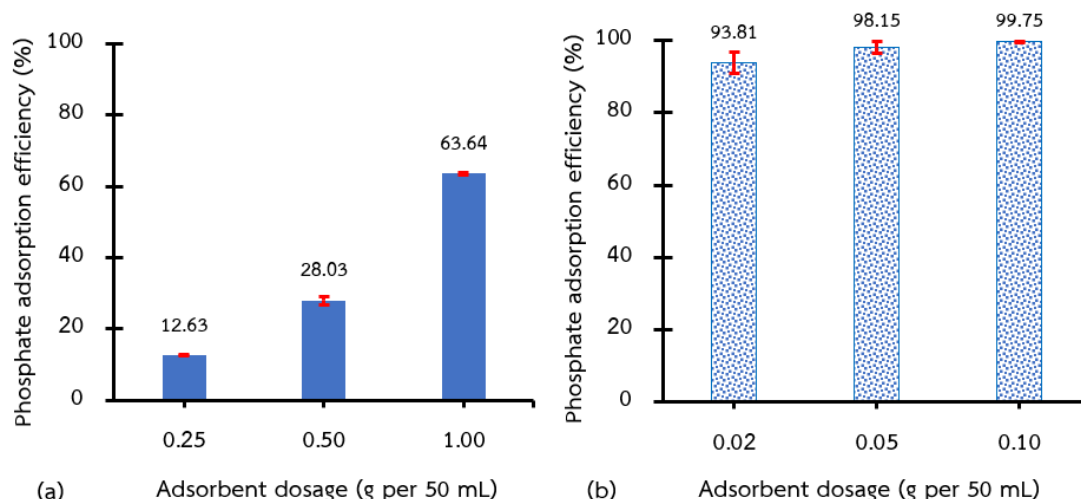


Figure 5 Effect of adsorbent dosage on the phosphate adsorption efficiency of *Geloina expansa* shell-derived adsorbents: (a) calcium carbonate (CaCO_3) and (b) calcium oxide (CaO). Error bars represent standard deviation ($n = 3$).

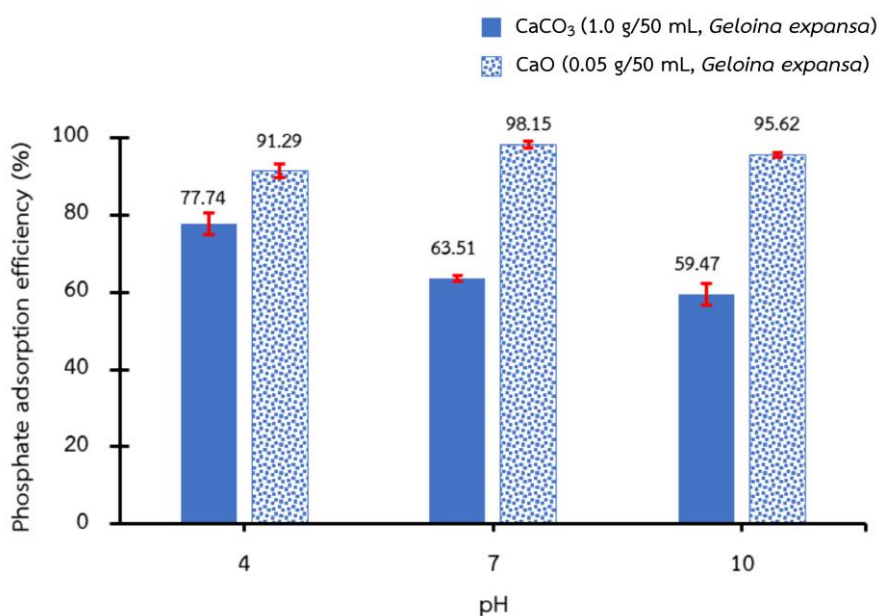


Figure 6 Effect of solution pH on phosphate adsorption efficiency using calcium carbonate (CaCO_3) and calcium oxide (CaO) derived from *Geloina expansa* shells. Error bars represent standard deviation ($n = 3$).

ไอโซเทอมการดูดซับ

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ และ ฟรอนด์ลิช เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดซับฟอสเฟต โดยใช้ CaCO_3 และ CaO จากเปลือกหอยกันพบว่า ข้อมูลจากการทดลองสอดคล้องกันทั้งสองแบบจำลอง โดยค่าความสอดคล้อง (R^2) อยู่ในระดับสูง (Figure 7 และ Table 1)

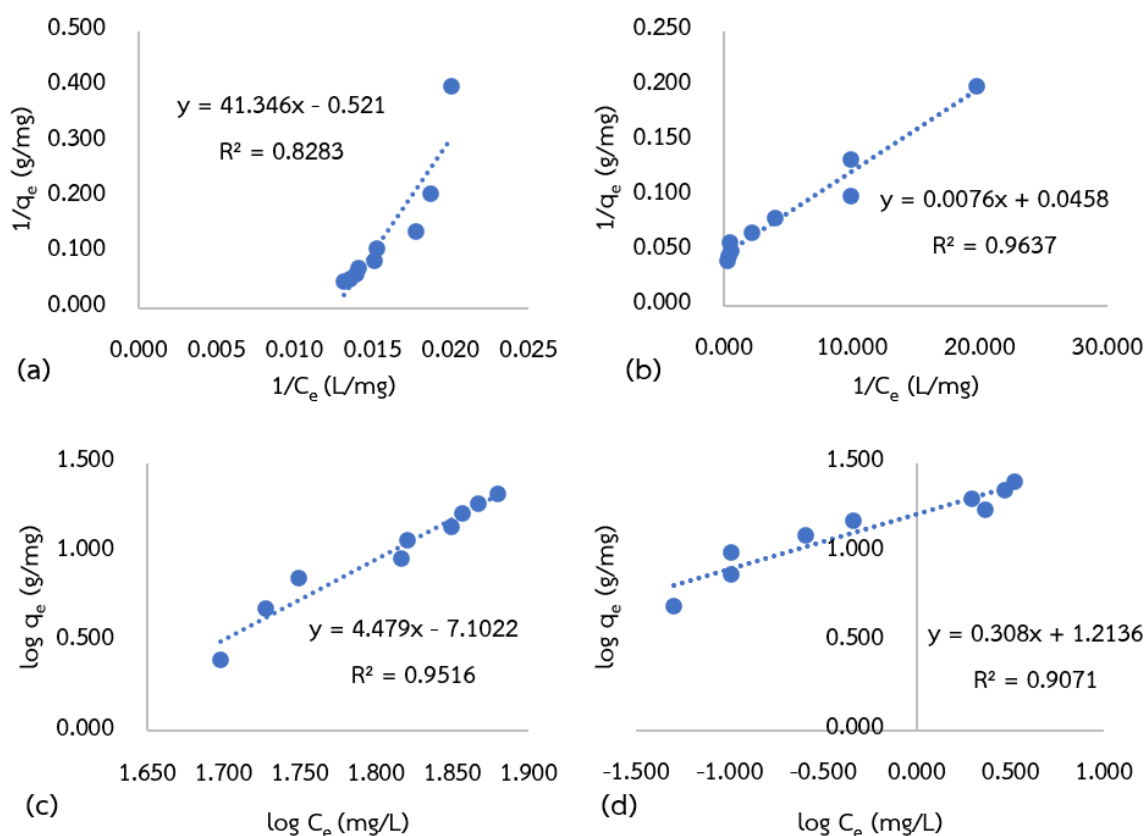


Figure 7 Phosphate adsorption isotherms of *Geloina expansa* shell-derived adsorbents analyzed using the Langmuir and Freundlich models: (a) Langmuir isotherm for calcium carbonate (CaCO_3), (b) Langmuir isotherm for calcium oxide (CaO), (c) Freundlich isotherm for calcium carbonate (CaCO_3), and (d) Freundlich isotherm for calcium oxide (CaO).

Table 1 Langmuir and Freundlich isotherm parameters for phosphate adsorption onto calcium carbonate (CaCO_3) and calcium oxide (CaO) derived from *Geloina expansa* shells

Type of adsorbent	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm			
	$q_{\max}$ (mg/g)	K_L	R^2	K_F	$1/n$	n	R^2
CaCO_3	0.0242	79.19	0.8283	7.91×10^{-8}	4.479	0.223	0.9516
CaO	131.58	0.165	0.9637	16.36	0.308	3.25	0.9071

จาก **Table 1** สรุปค่าพารามิเตอร์สำคัญของไอโซเทอมของแลงเมียร์ ได้แก่ CaO มีค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด ($q_{\max}$) ถึง 131.58 mg/g และค่า K_L เท่ากับ 0.165 L/mg ในส่วนของ CaCO_3 มี $q_{\max}$ ต่ำมากเพียง 0.0242 mg/g แม้ค่า K_L จะสูงถึง 79.19 L/mg

สำหรับแบบจำลองของฟรันทซ์นั้น CaO มีค่า $K_f = 16.36$ และค่า $n = 3.25 (>1)$ แสดงถึงการดูดซับที่ติดบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ และในส่วนของ CaCO_3 มีค่า K_f ต่ำมาก (7.91×10^{-8}) และ $n = 0.223 (<1)$ บ่งชี้ว่าการดูดซับฟอสเฟตเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา

กราฟของแลงเมียร์ (เดิม) เป็นเส้นโค้งแบบไฮเพอร์โบลา (Hyperbolic curve) ซึ่งในช่วงแรกที่มีความเข้มข้นต่ำ กราฟจะชันขึ้นอย่างรวดเร็ว (เป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มข้น) แต่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนตำแหน่งการดูดซับบนพื้นผิวเต็ม (Monolayer saturation) กราฟจะค่อย ๆ ลาดลงจนเป็นเส้นราบขนานกับแกนนอน ส่วนกราฟของฟรันทซ์ (เดิม) เป็นเส้นโค้งแบบเอกซ์โพเนนเชียล/พาวเวอร์ (Power function curve) แสดงถึงการดูดซับบนพื้นผิวที่มีพลังงานไม่สม่ำเสมอ (Heterogeneous surface) กราฟจะโค้งชันเรื่อย ๆ ตามค่ายกกำลัง การที่กราฟของทั้งสองสมการเปลี่ยนจาก "เส้นโค้ง" ในสภาวะธรรมชาติ มาเป็น "เส้นตรง" ได้เนื่องจาก "การเปลี่ยนรูปทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Transformation) ของตัวแปรบนแกน X และแกน Y" (ไม่ใช่เพราะพฤติกรรมของการดูดซับจริงเป็นเส้นตรง แต่โดยการแปลงค่าจริงไปเป็นค่าที่ผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์แล้ว) เช่น สัดส่วนส่วนกลับ หรือค่าลอการิทึม ส่งผลให้เกิดความสัมพันธ์เชิงเส้นที่สอดคล้องกับทฤษฎีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อปรับความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear relationship) ให้เข้าสู่รูปแบบของสมการเส้นตรงมาตรฐาน (Standard Linear Equation) ซึ่งช่วยให้สามารถคำนวณหาค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์และจลนศาสตร์ได้อย่างแม่นยำผ่านค่าความชัน (Slope) และจุดตัดแกน Y (Y-intercept)

วิจารณ์

เปลือกหอยก้นมี CaCO_3 เป็นองค์ประกอบหลักในสัดส่วนที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Hamester et al. (2012) ที่ระบุว่าหอยทะเลทั่วไปมีปริมาณ CaCO_3 อยู่ในช่วง 92–97% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่ามีปริมาณสารอนินทรีย์รวมในระดับสูง สอดคล้องกับรายงานของ Chen et al. (2020) ระบุว่าเปลือกหอยทะเลจะมีสารอนินทรีย์ (ซึ่งส่วนใหญ่คือ CaCO_3 และสารประกอบแคลเซียมอื่นๆ) ในสัดส่วนประมาณ 90–98% ของน้ำหนักเปลือกแห้ง ถือได้ว่าหอยทะเลสามารถเป็นแหล่งแคลเซียมธรรมชาติที่มีศักยภาพ

เมื่อ CaCO_3 ถูกเผาที่อุณหภูมิ 900°C จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือทางกายภาพผ่านกระบวนการแคลซิเนชัน (calcination) กลายเป็น CaO โดยมีน้ำหนักคงเหลือประมาณ 50–60% ของน้ำหนักเปลือกแห้ง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zhou et al. (2019a) ซึ่ง CaO ที่ได้มีลักษณะผลึกแบบลูกบาศก์สมมาตร (face-centered cubic, FCC) ประกอบด้วยไอออน Ca^{2+} และ O^{2-} ที่เรียงตัวอย่างมีระเบียบในรูปแบบคล้ายกับโซเดียมคลอไรด์ (NaCl-type structure) โครงสร้างผลึกของ CaO นี้มีความโปร่งโล่ง (open structure) ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ส่งผลให้ CaO มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เกิดเป็น Ca(OH)_2 ที่สามารถปลดปล่อยไอออน Ca^{2+} ออกมาในปริมาณมาก ในทางตรงกันข้าม CaCO_3 มักปรากฏในรูปของผลึกหลายชนิด (polymorphs) ที่สำคัญ ได้แก่ แคลไซต์ (calcite) และ อารากอนไนต์ (aragonite) โดยแคลไซต์มีระบบผลึกแบบตรีโกณ (trigonal) และอารากอนไนต์มีระบบผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ซึ่งทั้งสองชนิดมีการจัดเรียงของอนุภาคที่ซับซ้อน เนื่องจากมีหมู่คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งเป็นแอนไอออนที่มีพันธะโควาเลนต์ภายในกลุ่ม ทำให้โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงแต่ไม่เปิดกว้างต่อการแพร่ของไอออนในสารละลาย (Addadi and Weiner, 1997; Zhang et al., 2018) ดังนั้น ในสภาวะปกติ CaCO_3 จะมีความเสถียรและไม่ละลายน้ำมากนัก ส่งผลให้การปลดปล่อยไอออน Ca^{2+} เพื่อทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตเกิดขึ้นได้อย่างจำกัดและช้า ทำให้ความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของ CaO สูงกว่า CaCO_3 อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อเกิด Ca(OH)_2 ซึ่งสร้างสภาวะต่างในสารละลาย และเอื้อต่อการตกตะกอนของไอออนฟอสเฟตในรูปแบบที่เสถียร เช่น แคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) (Zeng et al., 2004b; Chen et al., 2021a; Li et al., 2016a) ขณะที่กลไกของ CaCO_3 ในการดูดซับฟอสเฟตอาศัยการแลกเปลี่ยนไอออนและการเกิดพันธะพื้นผิว ซึ่งให้ประสิทธิภาพต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับกลไกการตกตะกอนของ CaO (Zhou et al., 2018) ลักษณะโครงสร้างที่พรุน พื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น และสมบัติความเป็นเบสของ CaO หลังกระบวนการแคลซิเนชันจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้วัสดุนี้มีศักยภาพสูงในการดูดซับและกำจัดฟอสเฟตออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เวลาในการดูดซับมีผลสำคัญต่ออัตราการดูดซับ โดยในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ ฟอสเฟตจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วบนพื้นผิวของวัสดุที่มีตำแหน่งจับประจุว่างอยู่เป็นจำนวนมาก จากนั้นอัตราการดูดซับจะช้าลงเมื่อเข้าสู่ช่วง intraparticle diffusion ซึ่งเป็นการแพร่ของไอออนเข้าสู่รูพรุนภายในวัสดุ และกระบวนการจะสิ้นสุดเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุล (Ho and McKay, 1999) สังเกตเห็นได้ว่า CaO มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 150 นาที และคงตัวจนถึง 180 นาที สอดคล้องกับรายงานของ Zeng et al. (2004a) ที่ระบุว่า การเพิ่มเวลาในการสัมผัสจาก 30 เป็น 120 นาที สามารถเพิ่มการกำจัดฟอสเฟตได้อย่างมีนัยสำคัญก่อนจะเข้าสู่จุดอิ่มตัว

ปริมาณวัสดุดูดซับมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟต เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักวัสดุดูดซับจะเพิ่มพื้นที่ผิวรวมและจำนวนจุดจับยึด (active sites) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ฟอสเฟตสามารถเกาะยึดและทำปฏิกิริยาได้ อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างระหว่าง CaCO_3 และ CaO ที่พบว่า CaO มีประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญนั้น สามารถอธิบายได้จากธรรมชาติทางเคมีและโครงสร้างของวัสดุ CaO ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าทำให้มีจุดจับยึดมากกว่า และยังสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับฟอสเฟตได้รวดเร็วกว่า CaCO_3 อีกทั้ง CaO สามารถเพิ่มค่า pH ในสารละลาย จึงส่งเสริมการตกตะกอนของฟอสเฟตในรูปของแคลเซียมฟอสเฟตได้ดีกว่า ทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับที่เหนือกว่า อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับมากเกินไป อาจก่อให้เกิดการรวมตัวของอนุภาค (aggregation) ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสลดลง และลดประสิทธิภาพเฉลี่ยต่อหน่วยมวลของวัสดุดูดซับ นอกจากนี้ การใช้วัสดุในอัตราส่วนที่สูงเกินไปเมื่อเทียบกับปริมาณฟอสเฟต อาจทำให้มี active sites เหลือใช้โดยไม่ได้เกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้การดูดซับไม่เต็มประสิทธิภาพและสิ้นเปลืองวัสดุโดยไม่จำเป็น (Chen et al., 2021c) ดังนั้นการเลือกปริมาณวัสดุดูดซับจึงต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพสูงสุดควบคู่ไปกับความคุ้มค่าและประสิทธิภาพในการใช้งานจริง

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าค่า pH มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตของวัสดุดูดซับ เนื่องจาก pH มีอิทธิพลต่อทั้งสถานะประจุของพื้นผิววัสดุและรูปแบบไอออนฟอสเฟตในสารละลาย สำหรับ CaCO_3 ประสิทธิภาพสูงสุดที่ pH ต่ำ (เป็นกรด) เนื่องจากในสภาพเป็นกรดนั้น พื้นผิววัสดุมีแนวโน้มมีประจุบวกมากขึ้น ทำให้ดึงดูดไอออนฟอสเฟตที่มีประจุลบได้ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อ pH สูงขึ้น CaCO_3 มีการละลายลดลง ส่งผลให้การปลดปล่อย Ca^{2+} ลดน้อยลง และทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Zhang et al. (2020b) ที่พบว่า CaCO_3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตสูงในสภาวะกรด โดยเฉพาะเมื่อ pH ต่ำกว่า 6.5 ในทางกลับกัน CaO แสดงประสิทธิภาพสูงในช่วง pH กว้าง เนื่องจาก CaO จะละลายเป็น Ca(OH)_2 ในน้ำ ทำให้ปล่อย Ca^{2+} ได้อย่างรวดเร็ว และสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟต เพื่อก่อตัวเป็นตะกอนแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในช่วง pH ที่เป็นกลางถึงด่างอ่อน (Ye et al., 2017) นอกจากนี้ CaO ยังแสดงเสถียรภาพในการดูดซับฟอสเฟตได้ดีแม้ในสภาวะกรด ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบสำคัญเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมจริงที่ค่า pH อาจเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา สำหรับฟอสเฟตในน้ำ จะอยู่ในรูปแบบไอออนที่แตกต่างกันตามค่า pH ได้แก่ H_3PO_4 , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} และ PO_4^{3-} โดยที่รูปแบบที่มีประจุลบ เช่น H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} จะพบมากในช่วง pH 6–8 ซึ่งเหมาะสมต่อการจับกับ Ca^{2+} เพื่อเกิดการตกตะกอนแคลเซียมฟอสเฟต (Zeng et al., 2004b) เมื่อ pH สูงเกิน 9 พื้นผิววัสดุอาจมีประจุลบซึ่งก่อให้เกิดแรงผลักกับฟอสเฟต และ Ca^{2+} อาจตกตะกอนกับ OH^- แทน ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง (Liu et al., 2019) ดังนั้น CaO จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานในช่วง pH กว้าง ส่วน CaCO_3 เหมาะสำหรับระบบที่สามารถควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วงกรดได้

สำหรับการวิเคราะห์ไอโซเทอม พารามิเตอร์ไอโซเทอมในแบบจำลองการดูดซับ เช่น ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (KL) และค่าคงที่ของฟรุนดลิช (Kf) มีความสำคัญในการให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับกลไกการดูดซับ ซึ่งบ่งชี้พฤติกรรมของการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของสารดูดซับ การใช้แบบจำลองแลงเมียร์ สามารถแสดงลักษณะการดูดซับที่จำกัดเฉพาะพื้นที่การดูดซับบนพื้นผิว ซึ่งแสดงถึงกระบวนการดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับมลพิษที่จำกัด โดยการคำนวณค่าคงที่ (KL) จะทราบความเข้มข้นที่มลพิษอิ่มตัวและไม่สามารถดูดซับเพิ่มเติมได้อีก (Langmuir, 1918) ในขณะที่แบบจำลองฟรุนดลิชบ่งชี้ถึงการดูดซับที่ไม่จำกัด และแสดงการกระจายของตำแหน่งการดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับมลพิษที่แตกต่างกันในพื้นที่ต่าง ๆ บนพื้นผิวของสารดูดซับ ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (Kf) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับของมลพิษต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นสูง พารามิเตอร์เหล่านี้สามารถอธิบายการกระจายของโมเลกุลมลพิษบนพื้นผิวของสารดูดซับ และบ่งชี้ว่ากลไกการดูดซับนั้นเป็นแบบทางกายภาพหรือทางเคมี นอกจากนี้ยังสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของสารดูดซับในกระบวนการกำจัดมลพิษต่าง ๆ ได้อีกด้วย (Chang et al., 2020)

การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองแลงเมียร์แสดงให้เห็นว่า CaO จากเปลือกหอยก้นมีศักยภาพในการดูดซับฟอสเฟตสูงในลักษณะการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) บนพื้นผิวที่มีพลังงานสม่ำเสมอ (homogeneous surface) ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกที่ชัดเจนและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงของ CaO รวมถึงกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบนผิวโลหะออกไซด์ (Ho and McKay, 1999; Fan et al., 2011; Li et al., 2016a) ในทางกลับกัน CaCO_3 แม้มีค่า K_L สูงที่บ่งชี้แรงยึดเหนี่ยวกับฟอสเฟตค่อนข้างมาก แต่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนต่ำ ทำให้ปริมาณการดูดซับ (q_{max}) ต่ำ ผลนี้สะท้อนข้อจำกัดด้านโครงสร้างของ CaCO_3 ที่ไม่มีตำแหน่งดูดซับเพียงพอ (Foo and Hameed, 2010) ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองฟรุนดิชชี้ให้เห็นว่า CaO มีการดูดซับที่เหมาะสมบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (heterogeneous surface) และอาจเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) ซึ่งเป็นกลไกการดูดซับแบบกายภาพ (physisorption) บนวัสดุที่มีความพรุนสูงและผิวขรุขระ (Limousin et al., 2007; Foo and Hameed, 2010) ส่วน CaCO_3 มีค่า $n < 1$ ซึ่งแสดงว่าการดูดซับฟอสเฟตไม่เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพในเงื่อนไขนี้ สอดคล้องกับค่าการดูดซับที่ต่ำในแบบจำลองแลงเมียร์ และบ่งชี้ข้อจำกัดของโครงสร้างและพื้นผิววัสดุที่ขาดตำแหน่งดูดซับที่เหมาะสม สรุปได้ว่า CaO จากเปลือกหอยก้นมีคุณสมบัติเป็นวัสดุดูดซับฟอสเฟตที่เหนือกว่า CaCO_3 อย่างชัดเจน ทั้งในแง่ปริมาณการดูดซับสูงสุดและความสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอม โดยเฉพาะแบบจำลองแลงเมียร์ซึ่งบ่งชี้ถึงการดูดซับแบบผิวเดียวที่มีประสิทธิภาพ ความเบี่ยงเบนจากค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองไอโซเทอมที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นเฉพาะนั้น เกิดจากหลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น การอิมมัลชันของตำแหน่งการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ ปฏิกริยาระหว่างสารดูดซับกับสารมลพิษ หรือการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของตำแหน่งการดูดซับที่ความเข้มข้นสูงขึ้น โมเลกุลของสารมลพิษอาจมีปฏิสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับโมเลกุลอื่น ๆ บนพื้นผิวของสารดูดซับ ส่งผลให้กระบวนการดูดซับอิมมัลชันและป้องกันการดูดซับสารมลพิษเพิ่มเติม แบบจำลองแลงเมียร์อธิบายลักษณะการดูดซับที่ตำแหน่งจำกัดบนพื้นผิว และความเบี่ยงเบนจากแบบจำลองจะเกิดขึ้นเมื่อการดูดซับอิมมัลชัน ซึ่ง ณ จุดนั้นจะไม่มีตำแหน่งให้สารมลพิษจับอีกต่อไป แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในกลไกการดูดซับจากการดูดซับทางกายภาพไปเป็นการแข่งขันระหว่างโมเลกุล (Tran et al., 2020)

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นประสิทธิภาพอันโดดเด่นของ CaO ในการดูดซับฟอสเฟต อย่างไรก็ตาม มีการพัฒนาคุณสมบัติของ CaO ให้ดีขึ้นเพื่อการบำบัดน้ำทิ้ง เช่น การทำเป็นสารประกอบ CaO-biochar ที่เตรียมจากเปลือกไข่และฟางข้าว ซึ่งแสดงประสิทธิภาพที่ยอดเยี่ยมในการดูดซับฟอสเฟตในช่วง pH ที่กว้าง (5–11) และสามารถดูดซับได้สูงสุด 231 มก./กรัม โดยจะใช้เป็นแนวทางในการเตรียมของเสียทางการเกษตรเพื่อการกู้คืนฟอสเฟตจากสารละลายในน้ำ และสามารถนำไปใช้โดยตรงเพื่อเป็นปุ๋ยปลดปล่อยช้าในดินซึ่งจะช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน และควบคุมค่า pH ของดิน (Liu et al., 2019) การสร้างวัสดุคอมโพสิตชนิดใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง (นาโน-CaO₂/BC) โดยใช้ biochar ที่มีรูพรุนในการบรรจุอนุภาคนาโนแคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (CaO₂) วัสดุคอมโพสิตนาโน-CaO₂/BC นี้ถูกนำไปใช้ในการกำจัดและนำฟอสเฟตกลับมาใช้ใหม่จากน้ำเสียที่มีฟอสฟอรัส ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตของวัสดุคอมโพสิตได้รับการตรวจสอบโดยใช้สารละลายที่มีค่า pH ต่างกัน การดูดซับนี้สอดคล้องกับแลงเมียร์-ฟรุนดิชไอโซเทอม โดยมีความจุการดูดซับสูงสุดที่สมดุลคือ $213.22 \pm 13.57 \text{ mg/g}$ (Li et al., 2020) นอกจากนี้ Cao et al. (2023) ได้สังเคราะห์แคลเซียมแลนทานัมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH) โดยใช้วิธีการตกตะกอนร่วมแบบไฮโดรเทอร์มอลอย่างง่ายเพื่อกำจัดฟอสเฟตออกจากน้ำเสีย พบว่า สามารถใช้ได้โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดถึง 194.04 มิลลิกรัม P/กรัม

สรุป

CaCO_3 และ CaO ซึ่งเป็นวัสดุดูดซับที่ผลิตจากเปลือกหอยก้น (*G. expansa*) มีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้ โดยที่ CaO มีศักยภาพในการดูดซับฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่า CaCO_3 ในด้านปัจจัยของเวลา ปริมาณวัสดุดูดซับ และ pH โดยสามารถดูดซับได้ในอัตราที่สูงมากแม้จะใช้ในปริมาณน้อย มีความเสถียรในการทำงานในช่วง pH กว้าง และมีสมบัติเชิงโครงสร้างที่เหมาะสมต่อกระบวนการดูดซับมากกว่า CaCO_3 อย่างชัดเจน การวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับบ่งชี้ว่า พื้นผิวของ CaO มีลักษณะสมบูรณ์และสามารถเกิดการดูดซับแบบเคมีและฟิสิกส์ได้ดี ในขณะที่ CaCO_3 มีพื้นที่ผิวดูดซับจำกัด และไม่มีสมบัติที่เอื้อต่อการดูดซับฟอสเฟตในปริมาณสูง งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนโครงสร้างของเปลือกหอยก้นจาก CaCO_3 เป็น CaO จะช่วยเพิ่มศักยภาพในการดูดซับฟอสเฟต ซึ่ง CaO เป็นวัสดุที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย และยังชี้ให้เห็นถึง

ศักยภาพในการใช้ของเหลือทิ้งทางทะเลเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำอย่างเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สอดคล้องกับแนวทางการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมในระดับชุมชนและอุตสาหกรรม

ข้อเสนอแนะ

สำหรับแนวคิดในการศึกษาเพิ่มเติม ควรมุ่งเน้นในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนของวัสดุดูดซับ การนำวัสดุที่ดูดซับไปแล้วกลับมาใช้ซ้ำ และการทดลองใช้วัสดุดูดซับในระบบบำบัดน้ำเสียตามธรรมชาติ ทั้งนี้เพื่อประเมินถึงความเหมาะสมและความคุ้มค่าต่อการใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. 2562. รายงานการใช้ประโยชน์ทรัพยากรชายฝั่งทะเลภาคใต้ตอนบน. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมประมง. 2562. คู่มือการวิเคราะห์น้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงและการตรวจรับรองมาตรฐานฟาร์ม. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- วิชัย ภู่งามดี. 2560. การจัดการทรัพยากรท้องถิ่นอย่างยั่งยืน: กรณีศึกษาหอยพื้นบ้านภาคใต้. มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์.
- สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร. 2564. ฐานข้อมูลเกษตรกรและการใช้วัสดุจากธรรมชาติ. กรุงเทพฯ
- สมพร จันทร์หอม. 2561. การใช้ประโยชน์จากเปลือกหอยในระดับชุมชน. วารสารเกษตรชุมชน. 12: 45-53.
- เสาวภา ไวยสุศรี. 2559. การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 3: 475-486.
- ศักดิ์สิทธิ์ ฤกษ์หิรัญ, กังสดาญ์ บุญปราบ, ชีระพงศ์ ดั่งดี และจินตนา สและน้อย. 2567. ประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากเปลือกหอยทะเล. ในการประชุมวิชาการนวัตกรรมเกษตรและทรัพยากรธรรมชาติ ครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่ 14-15 สิงหาคม 2567 คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี จ.สงขลา
- Addadi, L., and S. Weiner. 1997. Biomineralization: A pavement of structural complexity. Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure. 26: 127-152.
- Cao, Y., X. Wu, B. Li, X. Tang, X. Lin, P. Li, H. Chen, F. Huang, C. Wei, J. Wei, and G. Qiu. 2023. Ca-La layered double hydroxide (LDH) for selective and efficient removal of phosphate from wastewater. Chemosphere. 325: 138378.
- Chang, C. K., H. Tun, and C. C. Chen. 2020. An activity-based formulation for Langmuir adsorption isotherm. Adsorption. 26: 375-386.
- Chen, H., M. Liu, and Q. Zhao. 2021a. Mechanical properties of *Geloina expansa* shell layers. Materials Science and Engineering. 52: 789-797.
- Chen, H., Y. Zhao, J. Wang, and J. Zhang. 2021b. Enhancement of phosphate removal by using waste shell-derived CaO. Environmental Science and Pollution Research. 28: 10834-10844.
- Chen, W. T., C. W. Lin, P. K. Shih, and W. L. Chang. 2012. Adsorption of phosphate into waste oyster shell: thermodynamic parameters and reaction kinetics. Desalination and Water Treatment. 47: 86-95.
- Chen, Z., Y. Liu, S. Lu, and J. Zhang. 2021c. Effective removal of phosphate from aqueous solutions using porous calcium oxide derived from waste eggshells. Journal of Environmental Chemical Engineering. 9: 104753.

- Chen, X., Q. Zhang, and D. Wu. 2020. Inorganic composition and potential uses of mollusk shells in environmental applications. *Environmental Science and Pollution Research*. 27: 34515–34525.
- Correll, D. L. 1998. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *Journal of Environmental Quality*. 27: 261–266.
- Crini, G., and E. Lichtfouse. 2019. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*. 17: 145–155.
- Fan, H., J. Li, Q. Li, and H. Liu. 2011. Adsorption of phosphate onto aluminum and iron modified rice husk biochars. *Bioresource Technology*. 102: 5634–5638.
- Foo, K. Y., and B. H. Hameed. 2010. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*. 156: 2–10.
- Hamestera, M. R. R., P. S. Balzera, and D. Beckerb. 2012. Characterization of calcium carbonate obtained from oyster and mussel shells and incorporation in polypropylene. *Materials Research*. 15: 204-208.
- Ho, Y. S., and G. McKay. 1999. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*. 34: 451–465.
- Kumaran, M., C. Ramachandran, and S. Prakash. 2021. Mangrove bivalves and their socio-economic roles in coastal livelihoods. *Journal of Coastal Studies*. 37: 145–156.
- Langmuir, I. 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*. 40: 1361-1403.
- Li, R., J. J. Wang, Z. Zhang, and S. Liu. 2016a. Phosphate adsorption characteristics of calcium-based biochars from various feedstocks. *Royal Society of Chemistry Advances*. 6: 100791–100800.
- Li, X., Y. Xie, F. Jiang, B. Wang, Q. Hu, Y. Tang, T. Luo, and T. Wu. 2020. Enhanced phosphate removal from aqueous solution using resourceable nano-CaO₂/BC composite: Behaviors and mechanisms. *Science of The Total Environment*. 709: 136123.
- Li, Y., B. Li, X. Liu, and T. Zhu. 2016b. Removal of phosphate from aqueous solution using calcium silicate derived from waste concrete. *Journal of Environmental Management*. 180: 59–65.
- Limousin, G., J. P. Gaudet, L. Charlet, S. Szenknect, V. Barthès, and M. Krimissa. 2007. Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. *Applied Geochemistry*. 22: 249–275.
- Liu, X., F. Shen, and X. Qi. 2019. Adsorption recovery of phosphate from aqueous solution by CaO-biochar composites prepared from eggshell and rice straw. *Science of the Total Environment*. 666: 694-702.
- Masakun, S., F. Nualprasertsuk, and J. Salaenoi. 2026. Investigation of the effectiveness of sea purslane (*Sesuvium portulacastrum*) as phosphate adsorbent material. *Results in Surfaces and Interfaces*. 22: 100699.
- Mohd Ariffin, M. Y., M. F. Azmi, and N. N. Shah. 2023. Status of edible bivalves and sustainability issues in Terengganu, Malaysia. *Malaysian Fisheries Journal*. 22: 11–19.
- Mohd Zain, N., N. J. Md Salleh, N. F. Hisamuddin, N. Fatihah, S. Hashim, and N. H. Abdullah. 2022. Adsorption of phosphorus using cockle shell waste. *Industrial and Domestic Waste Management*. 2: 30-38.
- Namasivayam, C., A. Sakoda, and M. Suzuki. 2005. Removal of phosphate by adsorption onto oyster shell powder—kinetic study. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 80: 356–358.

- Nayeem, A., F. Mizi, M. F. Ali, and J. H. Shariffuddin. 2023. Utilization of cockle shell powder as an adsorbent to remove phosphorus-containing wastewater. *Environmental Research*. 216: 114514.
- Norazlimi, N. A., and R. Ramli. 2015. Community-based utilization of bivalves in Setiu Wetlands, Malaysia. *Asian Journal of Environmental Management*. 2: 23–31.
- Oladoja, N. A., R. O. A. Adelagun, A. L. Ahmad, and I. A. Ololade. 2015. Phosphorus recovery from aquaculture wastewater using thermally treated gastropod shell. *Process Safety and Environmental Protection*. 98: 296–308.
- Ong, L. H., and R. Rachmawati. 2023. The ecological role of mangrove bivalves in nutrient cycling. *Asian Pacific Biodiversity*. 18: 443–452.
- Paradelo, R., M. Conde-Cid, L. Cutillas-Barreiro, M. Arias-Estévez, J. C. Nóvoa-Muñoz, E. Álvarez-Rodríguez, and A. Núñez-Delgado. 2016. Phosphorus removal from wastewater using mussel shell: Investigation on retention mechanisms. *Ecological Engineering*. 97: 558–566.
- Prachayawarakorn, S., W. Chaيسان, and K. Piyachomkwan. 2019. Characterization of organic matrix in periostracum of *Geloina expansa* shell. *Kasetsart Journal Natural Science*. 53: 12–20.
- Rattanachot, W., S. Chanmuang, and W. Sinsakul. 2020. Utilization of bivalve mollusks in Thai coastal communities. *Marine Science Review*. 45: 129–137.
- Sila, F., and M. Mustari. 2021. Habitat distribution and abundance of *Geloina expansa* in different intertidal zones. *Journal of Coastal Research*. 37: 366–372.
- Silvia, L., A. Amilia, L. Awathifi, M. Mashuri, Z. Arifin, B. A. Subagyo, and M. Zainuri. 2020. The effect of variation concentration sodium hydroxide (NaOH) on the structure of calcium carbonate (CaCO₃) based on natural sand. *Key Engineering Materials*. 860: 267–273.
- Smith, V. H., G. D. Tilman, and J. C. Nekola. 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*. 100: 179–196.
- Srisombat, L., S. Niyomwas, and S. Phongthai. 2018. Microstructure and mineral composition of *Geloina expansa* shell. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 40: 789–796.
- Tran, T. H., A. H. Le, T. H. Pham, D. T. Nguyen, S. W. Chang, W. J. Chung, and D. D. Nguyen. 2020. Adsorption isotherms and kinetic modeling of methylene blue dye onto a carbonaceous hydrochar adsorbent derived from coffee husk waste. *Science of the Total Environment*. 725: 138325.
- Tran, T. T., N. N. T. Tran, S. Sugiyama, and J. C. Liu. 2021. Enhanced phosphate removal by thermally pretreated waste oyster shells. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 23: 177–185.
- Trono, N. R., M. D. Santos, and E. Cebrian. 2020. Population structure and productivity of *Geloina expansa* in a mangrove forest of the Philippines. *Philippine Journal of Science*. 149: 85–93.
- Wang, S., B. Gao, A. R. Zimmerman, Y. Li, L. Ma, W. G. Harris, and K. W. Migliaccio. 2019. Removal of arsenic by magnetic biochar prepared from waste biomass. *Science of The Total Environment*. 675: 196–206.
- Xu, C., R. Liu, and L. Chen. 2023. Removal of phosphorus from domestic sewage in rural areas using oyster shell-modified agricultural waste–rice husk biochar. *Processes*. 11: 2577.

- Yamsomphong, K., H. Xu, P. Yang, N. Yotpanya, T. Yokoi, and F. Takahashi. 2025. Transforming waste into wealth in sustainable shrimp aquaculture: Effective phosphate removal and recovery using shrimp shell-derived adsorbents. *Separation and Purification Technology*. 357: 129982.
- Ye, H., Y. Jin, and X. Wang. 2017. Phosphate removal from aqueous solution using calcined calcium-rich materials. *Desalination and Water Treatment*. 59: 197–206.
- Yeom, S. H., and K. Y. Jung. 2009. Recycling wasted scallop shell as an adsorbent for the removal of phosphate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 15: 40–44.
- Zeng, L., X. Li, and C. Gao. 2004a. Removal of phosphate from wastewater using calcium chloride modified zeolite. *Journal of Environmental Sciences*. 16: 912–915.
- Zeng, L., X. Li, and J. Liu. 2004b. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using calcium-based materials. *Water Research*. 38: 1318–1326.
- Zhang, G., H. Huang, X. Xu, Y. Wang, and Y. Tang. 2018. Insight into aragonite-to-calcite transformation of CaCO_3 polymorphs. *Crystals*. 8: 161.
- Zhang, Y., Y. Chen, Y. Zhao, and H. Liu. 2020a. Removal of phosphate from water using calcium carbonate derived from natural shells. *Water, Air, & Soil Pollution*. 231: 163.
- Zhang, Y., D. He, and H. Lin. 2020b. Recycling waste seashells into eco-friendly bio-adsorbents for phosphate removal. *Journal of Cleaner Production*. 261: 121209.
- Zhou, J., R. Liu, and W. Jin. 2018. Enhanced phosphate removal from water using modified calcium oxide particles: Equilibrium, kinetics, and mechanisms. *Powder Technology*. 338: 888–896.
- Zhou, Y., Y. Wang, and J. Li. 2019a. Thermal decomposition and phase transformation of marine shell-derived calcium carbonate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 138: 229–237.
- Zhou, Y., L. Wang, and X. Li. 2019b. Structural composition of marine bivalve shells: A review. *Marine Materials Science*. 45: 123-135.