



การพัฒนาวัสดุดูดซับชนิดใหม่สำหรับการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ
Development of a novel adsorbent for removal of phosphate in water

สถบดี วรยาคุณ
Satabodee Wanyakhun

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชา
เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master
of Science in Technology and Environmental Management

Prince of Songkla University

2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การพัฒนาวัสดุดูดซับชนิดใหม่สำหรับการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ
Development of a novel adsorbent for removal of phosphate in water

สถปดี วรรณยาคุณ
Satabodee Wanyakhun

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชา
เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master
of Science in Technology and Environmental Management

Prince of Songkla University

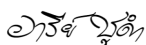
2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาวัสดุดูดซับชนิดใหม่สำหรับการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ
ผู้เขียน นายสภบดี วรรณาคูณ
สาขาวิชา เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

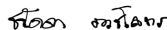
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ



Digitally signed : 2025.04.28 19:30:17 +07:00

(รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ ชูดำ)



Digitally signed : 2025.04.29 14:07:05 +07:00

.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดดา ภาวโหลทร)



Digitally signed : 2025.04.28 19:30:19 +07:00

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ ชูดำ)

วิลาสินี ศรีพรหม

Digitally signed : 2025.04.29 15:28:12 +07:00

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิลาสินี ศรีพรหม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม



Digitally signed : 2025.04.29 9:07:00 +07:00

(รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรมัยกุล)



Digitally signed : 2025.04.29 9:07:02 +07:00

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรมัยกุล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการ
สิ่งแวดล้อม



Digitally signed : 2025.04.29 19:43:06 +07:00

(ศาสตราจารย์ ดร. มิตรชัย จงเขียวชำนาญ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

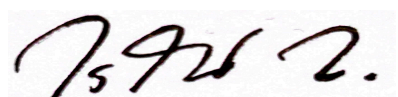
(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเองและได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ 
Digitally signed : 2025.04.28 19:30:20 +07:00

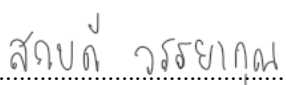
(รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ ชูดำ)

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

ลงชื่อ 
Digitally signed : 2025.04.29 9:07:04 +07:00

(รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรัมย์กุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ลงชื่อ 
Digitally signed : 2025.04.29 10:07:04 +07:00

(นายสถบดี วรรณาคูณ)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....สกลบดิ์ วรรณยาคุณ.....

(นายสกลบดิ์ วรรณยาคุณ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาวัสดุดูดซับชนิดใหม่สำหรับการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ
ผู้เขียน	นายสถบดี วรรณาคูณ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2567

บทคัดย่อ

การดูดซับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียเป็นวิธีการที่มีศักยภาพสูงในการกำจัดและกักเก็บฟอสฟอรัสนำมาใช้ประโยชน์ ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อภาคการเกษตร อีกทั้งยังช่วยให้เป็นไปตามข้อกำหนดทางกฎหมายเกี่ยวกับการปล่อยฟอสฟอรัส เพื่อลดและควบคุมปัญหายูโทรฟิเคชัน งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางใหม่ในพื้นที่ฟอสเฟตในแหล่งน้ำ โดยใช้วัสดุชนิดใหม่ที่ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการเผา (Ca-COS) ผังอยู่ในโพลิเมอร์ธรรมชาติชนิดครีโอลเจลที่ผ่านกระบวนการสร้างโครงข่ายแบบเชื่อมถึงกัน (Cry-Ca-COS) วัสดุดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพสูงในการดูดซับฟอสเฟตผ่านกระบวนการดูดซับทางเคมี บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับและการเกิดตะกอนในส่วนของเหลว จากการศึกษาวิจัยพบว่า Cry-Ca-COS สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากความสามารถในการคงรูปของวัสดุดูดซับหลังการใช้งาน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม วัสดุดังกล่าวสามารถกำจัดฟอสเฟตได้สูงสุดที่ $83.11\% \pm 0.68\%$ และมีความสามารถในการดูดซับที่ 9.97 มก./กรัม อีกทั้งแบบจำลองไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกัน โดยบ่งชี้ถึงกระบวนการดูดซับแบบดูดความร้อนที่มีการเคลือบพื้นผิวเป็นชั้นเดียว และเมื่อทดสอบกับตัวอย่างน้ำจริง Cry-Ca-COS แสดงประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟอสเฟต โดยมีค่าการกำจัดอยู่ในช่วง $98.48\% \pm 1.87\% - 99.16\% \pm 0.72\%$ ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า Cry-Ca-COS เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดและกักเก็บฟอสเฟตจากน้ำเสีย

คำสำคัญ : ฟอสเฟต, การดูดซับ, วัสดุครีโอลเจล, เปลือกหอยนางรม, การบำบัดน้ำเสีย

Thesis Title	Development of a novel adsorbent for removal of phosphate in water
Author	Mr.Satabdee Wanyakhun
Major Program	Technology and Environmental Management
Academic Year	2024

ABSTRACT

The adsorption of phosphorus from wastewater is a highly promising method for the removal and retention of phosphorus in the form of an essential organic substance for agriculture. It also promotes compliance with legal regulations regarding phosphorus discharge to control and mitigate eutrophication. This research presents a novel approach for phosphate recovery from water using a new material composed of calcium-rich calcined oyster shell (Ca-COS) embedded in a natural polymer cryogel (Cry-Ca-COS). This material demonstrated high efficiency in phosphate adsorption through chemisorption on the material surface and precipitation in the liquid phase. The Cry-Ca-COS adsorbent can be reused due to its ability to prevent the loss of adsorbent material after usage. Under optimal conditions, Cry-Ca-COS exhibited a maximum phosphate removal efficiency of $83.11\% \pm 0.68\%$ and an adsorption capacity of 9.97 mg/g. The Langmuir isotherm model and pseudo-second-order kinetic model showed good agreement with the experimental data, indicating an endothermic adsorption process with monolayer surface coverage. In real sample testing, Cry-Ca-COS demonstrated high phosphate removal efficiency ($98.48\% \pm 1.87\%$ – $99.16\% \pm 0.72\%$). This research highlights that Cry-Ca-COS is an environmentally friendly and highly effective material for phosphate removal and recovery from wastewater.

Keyword: Calcium-rich calcined oyster shell, Cryogel, Phosphate, Adsorption

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์และการสนับสนุนจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ซึ่งผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณอย่างสุดซึ้ง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ ชูดำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ให้คำแนะนำอันทรงคุณค่าในการวางแผนงานวิจัย ชี้แนะแนวทางการดำเนินงาน รวมถึงตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง และสนับสนุนการวิจัยอย่างเต็มที่ ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จของงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดดา ภาวโหลทร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิลาสินี ศรีพรม คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลาให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยสามารถปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณ คณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย และ สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่มอบทุนสนับสนุนการวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่งานบัณฑิตศึกษาและบุคลากรทุกท่านที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือด้านการประสานงาน รวมถึงหน่วยงานที่ให้บริการทดสอบตัวอย่าง ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จของงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และพี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการ ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุน และช่วยเหลือในทุกด้าน ตลอดจนบุคคลที่ให้ความอนุเคราะห์และความปรารถนาดีอีกมากมาย แม้ไม่สามารถเอ่ยนามได้ครบถ้วน ณ ที่นี้ ผู้วิจัยขอแสดงความซาบซึ้งและขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง

สlobดี วรยาคุณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
สัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/วิธีการวิจัย	4
2.1 ฟอสเฟต (Phosphate)	4
2.2 เทคโนโลยีการกำจัดฟอสเฟตโดยกระบวนการดูดซับ	6
2.3 วัสดุดูดซับฟอสเฟตจากเปลือกหอยนางรม	17
2.4 การประยุกต์ใช้ครีโอลเจลเป็นวัสดุรองรับตัวดูดซับ	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย/วิธีการวิจัย	21
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	21
3.1.1 วัสดุและสารเคมี	21
3.1.2 อุปกรณ์	22
3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์	22

สารบัญ (ต่อ)

3.2 การดำเนินงานวิจัย	22
3.2.1 การสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยนางรม	22
3.2.2 การสังเคราะห์ครีโอลเจล	23
3.2.3 การสังเคราะห์ครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่	25
3.2.4 การศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับ	26
3.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟต	27
3.3 กรอบการดำเนินงานวิจัย	30
บทที่ 4 ผลการศึกษา/ผลการวิจัย	31
4.1 ผลการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยนางรม	31
4.2 ผลการสังเคราะห์ครีโอลเจล	31
4.3 ผลการสังเคราะห์ครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่	32
4.4 ผลการศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับ	34
4.5 ผลการศึกษาการดูดซับฟอสเฟตโดยวัสดุดูดซับครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่	40
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย/อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	49
บรรณานุกรม	
ประวัติผู้เขียน	

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1 ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่างๆ ทางเคมี	16
ตารางที่ 2 องค์ประกอบของแคลเซียมของเปลือกหอยชนิดต่างๆ	17

รายการภาพประกอบ

ภาพ	หน้า
ภาพที่ 1 กรอบการดำเนินงานวิจัย	30
ภาพที่ 2 ลักษณะของผงเปลือกหอยนางรมที่เตรียมได้	31
ภาพที่ 3 ลักษณะของครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่ที่เตรียมได้	32
ภาพที่ 4 ผลการศึกษาปริมาณผงเปลือกหอยนางรมที่ผสมกับครีโอลเจลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟต	33
ภาพที่ 5 ผลการศึกษาปริมาณผงเปลือกหอยนางรมที่ผสมกับครีโอลเจลต่อความสามารถในการดูดซับฟอสเฟต	34
ภาพที่ 6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย SEM	35
ภาพที่ 7 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ	36
ภาพที่ 8 ผลการศึกษาชนิดของสารประกอบของตัวดูดซับ	38
ภาพที่ 9 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ	40
ภาพที่ 10 ผลการศึกษาปริมาณดูดซับที่เหมาะสม	42
ภาพที่ 11 ผลการศึกษาค่า pH ที่ส่งผลต่อการดูดซับ	43
ภาพที่ 12 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟตและไอโซเทอร์มของการดูดซับ	45
ภาพที่ 13 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับ	46
ภาพที่ 14 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับและอุณหพลศาสตร์การดูดซับ	47

สัญลักษณ์และคำย่อ

ATP	Adenosine Triphosphate (พลังงานที่เซลล์ใช้)
BET	Brunauer-Emmett-Teller (วิธีการวัดพื้นที่ผิวด้วยการดูดซับแก๊สไนโตรเจน)
ΔG°	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy)
ΔH°	การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy)
ΔS°	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (Entropy)
FTIR	Fourier-Transform Infrared Spectroscopy
g/(mg min)	กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที (หน่วยที่ใช้สำหรับอัตราการทำปฏิกิริยา)
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry (สหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์นานาชาติ)
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
J/mol	จูลต่อโมล (หน่วยพลังงานต่อจำนวนสารในหน่วยโมล)
J/mol/K	จูลต่อโมลต่อเคลวิน (หน่วยที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี)
K	เคลวิน (หน่วยวัดอุณหภูมิ)
L/mg	ลิตรต่อมิลลิกรัม (หน่วยที่ใช้ในการวัดปริมาณสารที่ดูดซึม)
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม (หน่วยที่ใช้วัดความเข้มข้นในสาร)
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร (หน่วยที่ใช้วัดความเข้มข้นในน้ำ)
mg P/g	มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกรัม (หน่วยที่ใช้วัดความเข้มข้นของฟอสฟอรัส)
M	Molarity (โมลาริตี - ความเข้มข้นของสารละลายที่แสดงในหน่วยโมล/ลิตร)
pH	Power of Hydrogen (ค่าความเป็นกรด-ด่าง)
% w/w	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อน้ำหนัก
SEM	Scanning Electron Microscope (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)
XRD	X-ray Diffraction (การกระจายของรังสีเอกซ์)
ไพโรไลซิส	Pyrolysis (กระบวนการย่อยสลายทางความร้อนในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน)
ชม. ⁻¹	หน่วยที่ใช้ในการวัดคลื่นความถี่หรือจำนวนคลื่นในสเปกตรัม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การเพิ่มขึ้นของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น การปล่อยน้ำเสียครัวเรือน น้ำเสียปศุสัตว์ การระบายน้ำจากการเกษตร และน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำเกินกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 62 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน ซึ่งเป็นสถานะที่แหล่งน้ำมีการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชรวดเร็วจนอาจนำไปสู่สภาวะน้ำเน่าเสียได้ (Mustafa *et al.*, 2008) ส่งผลกระทบต่อทัศนียภาพ คุณภาพน้ำ และเศรษฐกิจ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่พึ่งพาการท่องเที่ยวอย่างจังหวัดภูเก็ต ซึ่งมีรายงานการเกิดยูโทรฟิเคชันอยู่บ่อยครั้ง ส่งผลกระทบต่อภาพลักษณ์และรายได้จากการท่องเที่ยว (Jiwarungrueangkul *et al.*, 2024)

การพัฒนากระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำมีหลายวิธี ทั้งทางชีวภาพ เช่น ระบบ Biofilm membrane (Clark *et al.*, 2024) และ Sequencing Batch Reactor (Zheng *et al.*, 2024) รวมถึงกระบวนการเคมี เช่น Electrodialysis (Lou *et al.*, 2024) และ Reverse Osmosis (Dong *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตามการดำเนินการดังกล่าว มักมีค่าใช้จ่ายสูง (Bashar *et al.*, 2018) และอาจปลดปล่อยสารเคมีที่เป็นอันตรายลงสู่สิ่งแวดล้อม (Usman *et al.*, 2022) การใช้วัสดุธรรมชาติที่เป็นของเหลือทิ้ง เช่น เปลือกไข่ (Torit & Phihusut, 2019) และกระดองปู (Dai *et al.*, 2017) ได้รับการศึกษาเพื่อนำมาใช้ดูดซับฟอสฟอรัสอย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะเปลือกหอยนางรมที่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้สูงถึง 98% (Martins *et al.*, 2017) แต่มีข้อจำกัดเรื่องขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (Karunakaran *et al.*, 2022) จึงไม่เหมาะกับการใช้งานในกระบวนการดูดซับฟอสเฟตขนาดใหญ่ (Yuangawad & Na, 2011)

การใช้พอลิเมอร์รองรับ เช่น วัสดุครีโอลเจล ที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบมาโครพอร์ ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับและลดแรงดันย้อนกลับ อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และย่อยสลายได้ จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการพัฒนาการกำจัดมลพิษในน้ำ (Taweekarn *et al.*, 2022)

วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาตัวดูดซับชนิดใหม่สำหรับกำจัดฟอสเฟตในน้ำ ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยนางรมและวัสดุครีโอลิเจลที่สังเคราะห์จากพอลิเมอร์จากธรรมชาติ เพื่อให้ได้วัสดุดูดซับฟอสเฟตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับกำจัดฟอสเฟตในน้ำที่มีประสิทธิภาพสูง ราคาประหยัด เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

พัฒนาตัวดูดซับชนิดใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยนางรมและครีโอลิเจลที่สังเคราะห์จากพอลิเมอร์จากธรรมชาติ สำหรับกำจัดฟอสเฟตในน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาประหยัด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 มุ่งสังเคราะห์วัสดุดูดซับฟอสเฟตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่เป็นวัสดุผสมระหว่างครีโอลิเจลจากแป้งและผงเปลือกหอยนางรม
- 1.3.2 มุ่งศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับที่พัฒนาขึ้น
 - 1.3.2.1 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น SEM (Scanning Electron Microscope) และ BET (Brunauer-Emmett-Teller) สำหรับการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน
 - 1.3.2.2 วิเคราะห์ชนิดสารประกอบหมู่ฟังก์ชันและองค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิค FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy) และ XRD (X-ray diffraction)
- 1.3.3 มุ่งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟอสเฟต
 - 1.3.3.1 ทดสอบผลของปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม
 - 1.3.3.2 ทดสอบค่า pH ที่มีเหมาะสมต่อการดูดซับ
 - 1.3.3.3 ศึกษาผลกระทบของไอออนอื่นที่รบกวนการดูดซับ
 - 1.3.3.4 วิเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟตและผลต่อการดูดซับโดยใช้แบบจำลองไอโซเทอर्मของการดูดซับ ได้แก่ Langmuir และ Freundlich
 - 1.3.3.5 ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ (Kinetics) เพื่อหาสมการที่เหมาะสมกับกระบวนการ เช่น สมการ pseudo-first order และ pseudo-second order

- 1.3.3.6 ทดสอบระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับและอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ
- 1.3.3.7 ศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ เช่น พลังงานอิสระ (Gibbs free energy) เอนทัลปี (Enthalpy) และเอนโทรปี (Entropy)
- 1.3.3.8 ทดสอบความหนาที่เหมาะสมของชั้นตัวดูดซับ
- 1.3.4 ทดสอบการใช้งานวัสดุดูดซับฟอสเฟตที่พัฒนาขึ้น ในตัวอย่างน้ำจริง ซึ่งเป็นน้ำเสียจากระบบบำบัดของเทศบาลเมืองปาดอง จังหวัดภูเก็ต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ตัวดูดซับชนิดใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย
- 1.4.2 ได้ต้นฉบับของผลงานวิจัยเพื่อเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติและ/หรือตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ

บทที่ 2

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/วิธีการวิจัย

2.1 ฟอสเฟต

2.1.1 ความสำคัญของฟอสเฟต

ฟอสเฟตเป็นสารประกอบหนึ่งของธาตุฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาของพืชและสัตว์ ฟอสเฟตมีบทบาทสำคัญในโครงสร้างและการทำงานของโมเลกุลชีวภาพหลายชนิด เช่น กรดนิวคลีอิก, ฟอสโฟลิพิด, ฟอสโฟโปรตีน และน้ำตาลฟอสเฟต (Cheng *et al.*, 2023) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ที่ช่วยรักษาความสมบูรณ์และการทำงานของเซลล์ (Wells *et al.*, 2009) ยังมีบทบาทสำคัญในการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการเมแทบอลิซึม (Shimizu, 2013)

ฟอสเฟตไม่ได้พบเพียงในรูปของสารอินทรีย์ในสิ่งมีชีวิตเท่านั้น แต่ยังมีสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ สารประกอบเหล่านี้มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะในระบบนิเวศที่ฟอสเฟตมีบทบาทในวัฏจักรฟอสฟอรัส ซึ่งช่วยรักษาสสมดุลของธาตุฟอสฟอรัสในสิ่งแวดล้อม (Xu *et al.*, 2024) วัฏจักรฟอสฟอรัสมีความสำคัญในการสร้างสารชีวโมเลกุลต่างๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ สิ่งที่แตกต่างกันจากวัฏจักรของธาตุอื่นๆ เช่น วัฏจักรคาร์บอนหรือไนโตรเจน คือวัฏจักรฟอสฟอรัส ไม่มีขั้นตอนที่เปลี่ยนสถานะเป็นแก๊ส การเคลื่อนที่ของฟอสฟอรัสในสิ่งแวดล้อมจึงเกิดขึ้นในรูปแบบของสารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ (Su & Saiardi, 2024) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การสลายตัวของหิน

กระบวนการเริ่มต้นจากการกร่อนตัวของหินที่มีแร่ฟอสฟอรัสในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ที่ถูกปล่อยออกมาเมื่อหินถูกกัดกร่อนด้วยอิทธิพลจากลมและฝน ฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตจะถูกชะล้างเข้าสู่ดินและน้ำ (Walton, 2025)

2. การดูดซับโดยพืช

ฟอสเฟตที่ถูกปล่อยออกมาจะถูกพืชดูดซับผ่านทางราก ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งพืชจะนำฟอสเฟตไปสร้างกรดนิวคลีอิก ฟอสโพลิพิด และอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต เพื่อใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมและการสังเคราะห์ด้วยแสง (Esparza-Reynoso *et al.*, 2024)

3. การถ่ายโอนไปยังสัตว์

การถ่ายโอนไปยังสัตว์เกิดขึ้นเมื่อสัตว์กินพืชเข้าไป ฟอสฟอรัสจะถูกถ่ายโอนไปยังร่างกายของสัตว์ในรูปแบบของฟอสเฟตที่อยู่ในเซลล์ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสร้างโครงสร้างทางสรีรวิทยาของสัตว์ เช่น กระดูกและฟัน (Zhao *et al.*, 2024)

4. การย่อยสลาย

เมื่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ตายลง ฟอสฟอรัสในร่างกายจะถูกปลดปล่อยออกมาโดยแบคทีเรียและจุลินทรีย์ ที่มีบทบาทในการย่อยสลายซึ่งทำให้ฟอสฟอรัสกลับสู่ดินอีกครั้ง (Esparza-Reynoso *et al.*, 2024)

5. การสะสมในดินและน้ำ

ฟอสเฟตจะถูกปล่อยออกมาสะสมอยู่ในดินและน้ำในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ ใช้ได้และสามารถดูดซับใหม่ได้โดยพืช ในช่วงการเจริญเติบโต หรือไหลไปยังระบบน้ำต่างๆ ทำให้ฟอสเฟตกลับเข้าสู่ระบบนิเวศ (Walton, 2025)

6. การหมุนเวียนในระบบน้ำ

ฟอสเฟตในน้ำจะถูกดูดซับโดยแพลงก์ตอนพืชและสัตว์น้ำ ส่งผลให้มีการสะสมฟอสเฟตในระบบน้ำ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสร้างความหลากหลายทางชีวภาพในระบบนิเวศวิทยาทางน้ำ (Walton, 2025)

2.1.2 การปนเปื้อนของฟอสเฟตในแหล่งน้ำ

การปลดปล่อยฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำมากเกินไปจนเกินกว่าที่สมดุลทางธรรมชาติจะรับไหว จึงถือเป็นปัญหาสำคัญ ซึ่งเกิดจากทั้งอิทธิพลของธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ โดยสาเหตุหลักในการปลดปล่อยฟอสฟอรัส ได้แก่ การกัดเซาะของดินและหิน จากกระแสน้ำและลม รวมถึงการ

ปลดปล่อยจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ซึ่งส่งผลให้ฟอสเฟตในแหล่งน้ำมีความเข้มข้นสูงเกินกว่าค่าที่เหมาะสม ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ในช่วงปีค.ศ. 2002 ถึง 2010 มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากกิจกรรมของมนุษย์ลงสู่แหล่งน้ำจืดทั่วโลกมากถึง 1.47 เทระกรัมของฟอสเฟตต่อปี โดยประเทศที่มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูงสุดคือประเทศจีน (คิดเป็นสัดส่วน 30%) รองลงมาคืออินเดีย สหรัฐอเมริกา สเปนและบราซิล (Mekonnen & Hoekstra, 2017)

ฟอสเฟตที่ถูกปล่อยเข้าสู่แหล่งน้ำในความเข้มข้นสูง มักมาจากการใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีฟอสฟอรัส เช่น ผงซักฟอก ซึ่งมีส่วนประกอบของฟอสเฟตในรูปของเกลือฟอสเฟต ส่งผลให้วัฏจักรฟอสฟอรัสในธรรมชาติเสียสมดุล ในระยะแรกเริ่มฟอสเฟตจะช่วยให้พืชน้ำและสาหร่ายเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้แหล่งน้ำมีความอุดมสมบูรณ์เกินไป (Mekonnen & Hoekstra, 2017)

เมื่อแหล่งน้ำอุดมไปด้วยผู้ผลิต เช่น สาหร่ายและแพลงก์ตอนพืช ทำให้มีการแพร่ขยายพันธุ์มากขึ้น ส่งผลให้ความต้องการออกซิเจนในน้ำเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะช่วงในเวลากลางคืนที่พืชน้ำต้องใช้กระบวนการหายใจเพื่อเอาออกซิเจน ส่งผลให้ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ การเจริญเติบโตอย่างหนาแน่นของพืชน้ำ ยังบดบังแสงที่ส่องลงมาบนผิวน้ำ ทำให้พืชน้ำที่อาศัยอยู่ในพื้นที่แสงน้อย ไม่สามารถเกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศทางน้ำตาย และก่อปัญหาน้ำเน่าเสียในที่สุด (Hallegraeff, 1993)

การปนเปื้อนของฟอสเฟตในแหล่งน้ำจากกิจกรรมของมนุษย์จึงส่งผลกระทบต่อที่รุนแรงต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งทำให้เกิดความไม่สมดุลในวัฏจักรฟอสฟอรัส ทั้งยังทำลายระบบนิเวศทางน้ำ การมีมาตรการควบคุม และจัดการอย่างเหมาะสมจึงมีความสำคัญเพื่อป้องกันและลดปัญหาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากฟอสเฟต

2.2 เทคโนโลยีการกำจัดฟอสฟอรัสโดยกระบวนการดูดซับ

แม้ว่าฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ แต่หากมีมากเกินไป จะทำให้เกิดปัญหามลพิษได้ เช่น สภาวะสาหร่ายบานสะพรั่ง ซึ่งนำไปสู่การลดลงของออกซิเจนในน้ำ และสร้างความเสียหายต่อระบบนิเวศ ดังนั้นการกำจัดฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตนี้จึงเป็นเรื่องที่สำคัญเพื่อรักษาคุณภาพน้ำ

การกำจัดโดยการดูดซับฟอสฟอรัส เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ ในการกำจัด ฟอสเฟตในแหล่งน้ำ โดยใช้สื่อกลางที่สามารถจับกับฟอสเฟตเมื่อเคลื่อนที่ผ่านในน้ำได้ กระบวนการนี้ ฟอสเฟตจะสัมผัสกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ตัวอย่างเช่น แคลเซียม หรือ เหล็ก (Brix *et al.*, 1999)

2.2.1 กระบวนการดูดซับฟอสฟอรัสประกอบด้วย 3 ขั้นตอนสำคัญ

(Du *et al.*, 2022)

1. การแพร่ภายนอก

ในขั้นตอนนี้ตัวถูกดูดซับ (ฟอสเฟต) จะเคลื่อนที่จากสารละลาย ไปยังผิวหน้า ของตัวดูดซับ

2. การแพร่ภายใน

เมื่อฟอสเฟตเข้าไปสู่ตัวดูดซับจะเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำซึ่งล้อมรอบ ตัวดูดซับ การแพร่ในขั้นตอนนี้มีความสำคัญเนื่องจากชั้นฟิล์มนี้อาจทำให้การ ดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าลง

3. การดูดซับ

ฟอสเฟตจะเข้าสู่โพรงภายในของตัวดูดซับ และเกิดการดูดซับขึ้น ซึ่งสามารถ เกิดพันธะเคมีหรือกายภาพกับวัสดุดูดซับได้

2.2.2 การดูดซับฟอสฟอรัสสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก (Du *et al.*, 2022)

1. การดูดซับแบบกายภาพ (Physisorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดจากแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างโมเลกุล เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ การดูดซับนี้สามารถคายดูดซับได้ง่าย โดยใช้ความร้อนสูง และมักจะมีพลังงานการคลายความร้อนต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล

2. การดูดซับแบบเคมี (Chemisorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของฟอสฟอรัส กับตัวดูดซับ ซึ่งต้องใช้พลังงานในการกระตุ้นและมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง การดูดซับประเภทนี้สามารถดูดซับได้ยากและเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิว ของตัวดูดซับ

2.2.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับและความดันสัมพัทธ์ของแก๊ส หรือความเข้มข้นของสารในสถานะอุณหภูมิคงที่ การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในระบบของเหลวและแก๊ส โดยสำหรับแก๊สความเข้มข้น มักแสดงในหน่วยร้อยละโดยโมล หรือความดันย่อยส่วนของเหลวในหน่วยมวล เช่น มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะแสดงในหน่วยมวลของสาร (Amarh *et al.*, 2021)

ปัจจุบัน IUPAC ได้จำแนกรูปแบบของไอโซเทอร์มการดูดซับออกเป็น 6 ประเภท

ไอโซเทอร์มประเภทที่ I เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นในตัวดูดซับที่มีรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร โดยการดูดจะเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวจนถึงจุดอิ่มตัว จึงเรียกว่า L-shape isotherm หรือ Langmuir isotherm

ไอโซเทอร์มประเภทที่ II และ III เกิดในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ โดยการดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว จนถึงแบบหลายชั้น ซึ่งประเภทที่ II มีแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่า เมื่อเทียบกับประเภทที่ III

ไอโซเทอร์มประเภทที่ IV เกิดในตัวดูดซับประเภทเมโซพอร์ส โดยมีลักษณะการดูดซับแบบหลายชั้น ซึ่งควบแน่นภายในรูพรุน (capillary condensation) ทำให้เกิดฮิสเทอรีซิสลูป

ไอโซเทอร์มประเภทที่ V เกิดในตัวดูดซับประเภทไมโครพอร์ส และเมโซพอร์ส แสดงการดูดซับแบบหลายชั้นและมีฮิสเทอรีซิสลูป เช่นเดียวกันกับประเภท IV แต่มีแรงยึดเหนี่ยวที่น้อยกว่า

ไอโซเทอร์มประเภทที่ VI เป็นการดูดซับแบบชั้นๆ ที่เกิดขึ้นในระบบดูดซับที่มีพื้นผิวเป็นเอกพันธ์ (homogeneous) โดยการดูดซับเกิดขึ้นเสร็จสมบูรณ์ทีละชั้น

2.2.4 รูปแบบของไอโซเทอร์มการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับ สามารถแบ่งออกเป็นหลายรูปแบบซึ่งแต่ละรูปแบบแสดงถึงลักษณะของการดูดซับที่แตกต่างกัน

2.2.4.1 ไอโซเทอรัมแบบ Langmuir

แบบจำลองไอโซเทอรัมการดูดซับของแลงเมียร์ ถูกพัฒนาโดย Irving Langmuir ในปี 1918 เพื่ออธิบายกระบวนการดูดซับของสาร บนพื้นผิวของวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดซับสารได้เพียงชั้นเดียว โดยเฉพาะการดูดซับแบบฟิสิกส์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ (Swenson & Stadie, 2019)

สมการไอโซเทอรัมของแลงเมียร์มีรูปแบบดังนี้

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

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

โดยที่	C_e	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)
	q_e	คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
	q_m	คือ ปริมาณสูงสุดของตัวดูดซับที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (mg/g)
	K_L	คือ ค่าคงที่พลังงานการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)
	q_m และ K_L	สามารถหาจากความชันและจุดตัดแกน y ของกราฟที่สร้างขึ้นระหว่าง $1/q_e$ และ $1/C_e$ ตามลำดับ (Taweekarn <i>et al.</i> , 2022)

นอกจากนี้ลักษณะสำคัญของไอโซเทอรัมแลงเมียร์ยังสามารถแสดงได้โดยค่าคงที่ R_L ซึ่งคำนวณจากสมการ (3) ดังนี้ (Taweekarn *et al.*, 2022)

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (3)$$

ค่าของ R_L ช่วยในการประเมินลักษณะการดูดซับ โดย

- ถ้า $0 < R_L < 1$ หมายถึงการดูดซับที่มีประสิทธิภาพดี
- ถ้า $R_L = 0$ หมายถึงการดูดซับที่ไม่สามารถผันกลับได้
- ถ้า $R_L = 1$ หมายถึงการดูดซับในลักษณะเส้นตรง
- ถ้า $R_L > 0$ หมายถึงการดูดซับที่มีประสิทธิภาพต่ำ

2.2.4.2 ไอโซเทอรัมแบบ Freundlich

ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช ใช้สำหรับการอธิบายการดูดซับหลายชั้นบนพื้นผิว ที่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous surfaces) (Karunakaran *et al.*, 2022)

สมการไอโซเทอรัมของฟรอนด์ลิชมีรูปแบบดังนี้

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

หรือสามารถแปลงให้อยู่ในรูปเชิงเส้นได้จากสมการ

$$\log(q_e) = \log(K_f) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (5)$$

โดยที่	C_e	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)
	q_e	คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ดูดซับบนหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
	K_f	คือ ค่าคงที่การดูดซับของฟรอนด์ลิชซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดซับ (L/mg)
	n	คือ พารามิเตอร์ ที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของการดูดซับสะท้อนถึงลักษณะการจัดเรียงโมเลกุลตัวดูดซับ
	K_f และ $1/n$	สามารถหาได้จากสมการเชิงเส้น ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ โดยค่าคงที่จะบ่งบอกถึงความหนาแน่นของการดูดซับ ที่มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับเมื่อปริมาณตัวถูกละลายลดลง ส่วนค่า n อธิบายลักษณะการดูดซับที่มีความเข้มข้นของการดูดซับแตกต่างกันในแต่ละระดับ ความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นว่า ถ้า $n > 1$ หมายถึงการดูดซับที่เกิดขึ้น จะมีความหลากหลายในการจัดเรียงของตัวดูดซับในแต่ละชั้น (Karunakaran <i>et al.</i> , 2022)

จากการวิเคราะห์สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิช พบว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นในระบบที่มีพื้นผิวตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จะมีลักษณะการดูดซับแบบหลายชั้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อตัวถูกดูดซับเข้าสู่พื้นผิวของตัวดูดซับจะมีการกระจายตัว และจัดเรียงของโมเลกุลที่เกิดขึ้นในหลายหลายระดับชั้น โดยมีความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันตามแต่ละชั้น

การศึกษาและการใช้แบบจำลองนี้สามารถช่วยให้เข้าใจการดูดซับในระบบที่พื้นผิวไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ ในกระบวนการทางสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.5 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetics of Sorption)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ มีความสำคัญในการทำความเข้าใจกระบวนการเปลี่ยนแปลงการดูดซับสารต่างๆ บนตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปและทางเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับมีความเปลี่ยนแปลง เพื่ออธิบายกระบวนการเหล่านี้ สมการจลนพลศาสตร์ที่นิยมใช้ศึกษาได้แก่ สมการอัตราเร็วจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (pseudo first-order kinetic model) และสมการอัตราเร็วจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (pseudo second-order kinetic model) แบบจำลองนี้ช่วยให้การหาค่าคงที่ ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับในสภาวะสมดุล รวมทั้งกลไกที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Simonin, 2016)

2.5.5.1 สมการอัตราเร็วจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

อธิบายกระบวนการดูดซับที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในระหว่างการดูดซับ โดยสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (6)$$

โดยที่	q_e	คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
	q_t	คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลา (mg/g)
	k_1	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาทีก)

การอินทิเกรตสมการ (6) จากช่วงเวลา $t=0$ ถึง $t=t$ และจาก $q_t=0$ ถึง $q_t=t$ จะได้สมการในรูปสมการเชิงเส้นที่สามารถจัดเรียงใหม่ได้ดังนี้

$$\log (q_e - q_t) = \log (q_e) - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (7)$$

k_1 และ q_e สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดของกราฟระหว่าง $\log (q_e - q_t)$ เทียบกับเวลา จากการศึกษาสมการนี้ สามารถใช้ได้ดี ในกรณีที่กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นในลักษณะที่การดูดซับลดลงอย่างช้าๆ เมื่อเวลาผ่านไป

2.5.5.2 สมการอัตราเร็วจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

อธิบายกระบวนการที่อัตราการดูดซับของสาร มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในปริมาณที่สูงขึ้น โดยสมการอัตราเร็วจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสองสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (8)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 q_t คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลา (mg/g)
 k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (นาทีก)
 t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาทีก)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (8) ในช่วงเวลา $t=0$ ถึง $t=t$ และจาก $q_t=0$ ถึง $q_t=t$ สมการจะถูกจัดเรียงในรูปแบบเชิงเส้นดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (9)$$

ทั้งสมการอัตราเร็วจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและอัตราเร็วจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง เป็นเครื่องมือที่สำคัญ ในการศึกษากระบวนการดูดซับในเชิงจลนพลศาสตร์ โดยการเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสม ทำให้เข้าใจลักษณะการดูดซับในแต่ละระบบได้ดียิ่งขึ้นและนำไปสู่การออกแบบระบบการดูดซับที่มีประสิทธิภาพเพื่อสิ่งแวดล้อม เช่น ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย หรือการดูดซับสารพิษต่างๆ ในแหล่งน้ำโดยใช้ตัวดูดซับ

2.2.6 อุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ของการดูดซับ

การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ เป็นกระบวนการที่ช่วยในการทำความเข้าใจปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับ โดยสามารถอธิบายถึงสมดุลและลักษณะการเกิดปฏิกิริยา ด้วยการคำนวณค่าพลังงานพลังงานเสรีของกิบส์ (Gibbs free energy; ΔG° ค่าเอนทัลปี (enthalpy; ΔH°) และค่าเอนโทรปี (entropy; ΔS°) (Torit & Phihusut, 2019) ได้เสนอสมการอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

สมการพลังงานเสรีของกิบส์

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c \quad (10)$$

โดยที่ K_c คือ ค่าคงที่จุดสมดุล

R คือ ค่าคงที่แก๊ส 8.314 J/mol/K

T คือ อุณหภูมิ (K)

ค่าพลังงานเสรีของกิบส์ (ΔG°) ตัวบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้หรือไม่ โดยถ้า มีค่าติดลบ จะหมายถึงการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นได้เองในทิศทางไปข้างหน้า (Torit & Phihusut, 2019) โดยสมการการเชื่อมโยงระหว่างพลังงานเสรีของกิบส์ เอนทัลปี และเอนโทรปี

$$\ln K_c = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (11)$$

สมการนี้ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH°) และเอนโทรปี (ΔS°) สามารถบอกถึงลักษณะของกระบวนการดูดซับได้ (Ntsondwa *et al.*, 2022) โดยวิเคราะห์ผลค่าพลังงานพลังงานเสรีเอนทัลปี และเอนโทรปี ได้ยังดังนี้

ค่า Gibbs Free Energy (ΔG°) เมื่อมีค่าติดลบ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เอง ในทิศทางไปข้างหน้า แสดงถึงความเป็นไปได้สูงที่ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นในสภาวะสมดุล

ค่า Enthalpy (ΔH°) เมื่อมีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งต้องใช้พลังงานความร้อนเพื่อทำให้เกิดกระบวนการดูดซับเกิดขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากมีค่าเป็นลบ จะแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งจะปลดปล่อยพลังงานพลังงานออกมาในระหว่างกระบวนการดูดซับ

ค่า Entropy (ΔS°) เป็นค่าที่แสดงถึงระดับความไม่เป็นระเบียบหรือความเป็นอิสระของอนุภาคภายในระบบ สำหรับกระบวนการดูดซับ ค่าเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลง (ΔS°) สามารถอธิบายได้ดังนี้

กรณีที่ $\Delta S^\circ < 0$ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับซึ่งเดิมมีอิสระในการเคลื่อนไหวในสถานะแก๊สหรือสารละลาย เมื่อถูกดูดซับลงบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะสูญเสียอิสระ ทำให้ระบบมีความเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น เป็นลักษณะทั่วไปของกระบวนการดูดซับทั้งทางกายภาพและเคมี

กรณีที่ $\Delta S^\circ > 0$ พบในกรณีที่กระบวนการดูดซับมีการปลดปล่อยโมเลกุลของตัวทำละลายหรือโมเลกุลของน้ำออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับ ส่งผลให้ระบบโดยรวมมีระดับความไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับไอออนในสารละลายซึ่งมีการแทนที่โมเลกุลของน้ำที่เกาะอยู่เดิม

จากการวิเคราะห์ค่าพลังงานพลังงานอุณหพลศาสตร์ ทำให้สามารถคาดการณ์และอธิบายปฏิกิริยาการดูดซับ รวมถึงศึกษากลไกและการประยุกต์ใช้สำหรับงาน ในการดูดซับมลสารในสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

กระบวนการดูดซับฟอสเฟตเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ โดยอาศัยการจับตัวของไอออนฟอสเฟต (PO_4^{3-}) กับพื้นผิวของวัสดุดูดซับ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับดังกล่าวขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งส่งผลต่อกลไกและอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ (Kalaitzidou *et al.*, 2022) โดยรายละเอียดของปัจจัยที่สำคัญมีดังนี้

พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับเนื่องจากพื้นที่ผิวที่มากขึ้นจะเพิ่มจำนวนตำแหน่งว่างที่สามารถจับกับฟอสฟอรัสได้มากขึ้น ส่งผล

ให้ประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะวัสดุที่มีโครงสร้างรูพรุนหรือโครงข่ายที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง

ขนาดของตัวดูดซับมีผลต่ออัตราการแพร่ของฟอสฟอรัสเข้าสู่พื้นผิวดูดซับ โดยทั่วไปตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าและช่วยให้ฟอสฟอรัสเข้าถึงจุดดูดซับได้เร็วขึ้น ส่งผลให้อัตราการดูดซับสูงขึ้น อย่างไรก็ตามอนุภาคที่เล็กเกินไปอาจทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการกรองหรือการนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ฟอสฟอรัสที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงมักจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของน้ำที่แข็งแรง ส่งผลให้การแยกตัวออกจากสภาพสารละลายและการจับกับพื้นผิวของตัวดูดซับทำได้ยากขึ้น ปัจจัยนี้มีความเกี่ยวข้องกับรูปแบบทางเคมีของฟอสฟอรัส เช่น การอยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟตหรือพอลิฟอสเฟต

ค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการแตกตัวของฟอสเฟตในน้ำ รวมถึงสถานะประจุของทั้งไอออนฟอสฟอรัสและพื้นผิวของวัสดุดูดซับ โดยปกติการดูดซับฟอสเฟตจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสม เช่น ช่วงที่พื้นผิวของวัสดุดูดซับมีประจุบวก ซึ่งสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับฟอสเฟตซึ่งมีประจุลบได้ดีกว่า

อุณหภูมิสามารถส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการดูดซับ โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มการเคลื่อนไหวของโมเลกุลและอัตราการแพร่ ทำให้กระบวนการดูดซับทางเคมี (chemisorption) มีประสิทธิภาพดีขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิต่ำอาจส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาดูดซับเคลื่อนไปในทิศทางย้อนกลับหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยา

ความปั่นป่วนหรือการกวนของสารละลายมีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มของน้ำที่ห่อหุ้มผิวของตัวดูดซับ ซึ่งชั้นฟิล์มนี้จะเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของไอออนฟอสฟอรัสเข้าสู่ผิวดูดซับ หากความปั่นป่วนมีมาก ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลง ส่งผลให้ฟอสฟอรัสสามารถแพร่เข้าสู่ผิวดูดซับได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.2.8 ชนิดตัวดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย

การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยอาศัยกระบวนการดูดซับเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถเลือกใช้ตัวดูดซับได้หลากหลายชนิดทั้งจากวัสดุที่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นจากสารเคมีและวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตที่แตกต่างกันไปโดยมีรายละเอียดของตัวดูดซับและความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่างๆ ทางเคมี

Adsorbents	capacity (mg P/g)	Ref.
Bentonite	5	(Das <i>et al.</i> , 2006)
Coal ash	0.1–0.2	(Can & Yildiz, 2006)
Eggshell ash	47.62	(Torit & Phihusut, 2019)
Fly ash	9.15	(Xu <i>et al.</i> , 2010)
Crab shell	108.9	(Dai <i>et al.</i> , 2017)
Scallop shell	23	(Yeom & Jung, 2009)
Heat treated oyster shell	583.5	(Yuangsawad & Na, 2011)

จากตารางที่นำเสนอแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับบางชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตสูง เช่น Heat treated oyster shell ที่มีความสามารถในการดูดซับสูงถึง 583.5 mg P/g ขณะที่ Crab shell และ Red mud มีค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงตามลำดับที่ 108.9 mg P/g และ 95.8 mg P/g ตัวดูดซับเหล่านี้อาจถูกพิจารณาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีฟอสเฟตในระดับสูง เพื่อรักษาคุณภาพน้ำและป้องกันมลพิษในระบบนิเวศ

การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสีย ประสิทธิภาพของตัวดูดซับในสภาวะแวดล้อมจริง และต้นทุนในการจัดหาหรือผลิตวัสดุ ตัวดูดซับที่ได้จากธรรมชาติ เช่น เปลือกไข่หรือเปลือกปู อาจมีต้นทุนต่ำและยังสามารถนำมาใช้ได้อย่างยั่งยืน ในขณะที่ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นจากสารเคมี อาจให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าแต่ต้องคำนึงถึงต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.3 วัสดุดูดซับฟอสเฟตจากเปลือกหอยนางรม

เปลือกหอยนางรมประกอบไปด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในโครงสร้างของเปลือกหอย การศึกษาของ (Yuangsawad & Na, 2011) พบว่าเปลือกหอยนางรมมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่แตกต่างกันไปตามชนิดของหอย โดยการใช้เทคนิค Atomic- Absorption Spectroscopy (AAS) พบว่าเปลือกหอยแครง มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสูงที่สุดที่ 995.65 กรัมต่อกิโลกรัม ตามมาด้วยหอยนางรมที่มี ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 989.33 กรัมต่อกิโลกรัม และหอยแมลงภู่ที่ 958.93 กรัมต่อกิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของแคลเซียมของเปลือกหอยชนิดต่างๆ

ชนิดเปลือกหอย	แคลเซียม (Ca^{2+}) g/kg	แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) g/kg	%RSD
หอยนางรม	395.73	989.33	2.14
หอยแครง	398.26	995.65	2.87
หอยแมลงภู่	383.57	958.93	3.01

2.3.1 การประยุกต์ใช้เปลือกหอยนางรมเป็นวัสดุดูดซับ

ปัญหามลพิษจากฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและระบบนิเวศทางน้ำ การกำจัดสารพิษเหล่านี้จากแหล่งน้ำจึงมีความสำคัญ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารและการเกษตรที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำจากแหล่งธรรมชาติ การใช้วัสดุจากธรรมชาติหรือของเสียที่สามารถดูดซับสารพิษได้จึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการลดมลพิษในแหล่งน้ำ โดยเฉพาะเปลือกหอยนางรม ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติ ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนประกอบหลัก การนำเปลือกหอยนางรมมาใช้ในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการรักษาคุณภาพน้ำในสิ่งแวดล้อม

จากการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสฟอรัสของเปลือกหอยทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกหอยนางรม เปลือกหอยแครง และเปลือกหอยแมลงภู่ พบว่า เปลือกหอยที่มีขนาดละเอียดสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ดีกว่าเปลือกหอยที่มีขนาดหยาบ เนื่องจากมีรูพรุนมากกว่า ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวที่สามารถดูดซับได้มากขึ้น การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า

เปลือกหอยนางรมที่มีขนาดละเอียดสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ถึง 80.00% ในขณะที่เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ 76.36% และ 78.79% ตามลำดับ (Yuangswad & Na, 2011)

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าเปลือกหอยนางรมมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสได้ดีที่สุดในกลุ่มตัวอย่างซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างของเปลือกหอยที่มีรูพรุนขนาดเล็กและพื้นที่ผิวที่มีขนาดใหญ่กว่าหอยชนิดอื่นๆ ที่นำมาเปรียบเทียบ

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเปลือกหอยนางรมถูกเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อแปลงแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์จะทำให้เปลือกหอยนางรมมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นถึง 98% (Martins *et al.*, 2017)

2.4 การประยุกต์ใช้ครีโอลเจลเป็นวัสดุรองรับตัวดูดซับ

ครีโอลเจล (Cryogel) เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติโดดเด่น โดยเฉพาะในด้านการดูดซับน้ำ ซึ่งมักผลิตจากพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ผ่านกระบวนการ ครีโอลเจลชัน (Cryogelation) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการแช่แข็งของมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ในระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นเจล โดยกระบวนการนี้มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งประมาณ -5 ถึง -20 องศาเซลเซียส (Lozinsky, 2018)

โครงสร้างของครีโอลเจลมีลักษณะเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (macroporous) โดยมีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 10–100 ไมโครเมตร ซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง โครงสร้างดังกล่าวเกิดจากการเชื่อมพันธะระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ผ่านแรงยึดเหนี่ยว เช่น พันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้เกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติ (three-dimensional network) ที่มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูง (Lozinsky, 2018)

สมบัติที่สำคัญของครีโอลเจลคือความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี อันเนื่องมาจากโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ที่เอื้อต่อการกักเก็บน้ำ เมื่อดูดซับน้ำแล้ว โครงสร้างของครีโอลเจลจะไม่ละลาย แต่จะพองตัวและคงรูปเดิมไว้ คล้ายกับฟองน้ำ โครงสร้างที่ยืดหยุ่นของวัสดุยังช่วยให้ครีโอลเจลสามารถปรับตัวเข้ากับแรงกดดันจากภายนอกโดยไม่เกิดความเสียหาย (Mancino *et al.*, 2023)

งานวิจัยหลายฉบับได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของครีโอลเจลในการเป็นวัสดุรองรับสำหรับตัวดูดซับ เช่น (Suresh Kumar *et al.*, 2013) ได้ศึกษาการใช้ครีโอลเจลเป็นวัสดุรองรับไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมในการดูดซับสารหนูในน้ำเสีย พบว่าครีโอลเจลที่สังเคราะห์

ขึ้นมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดถึง 24.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพสูงในการกำจัดมลพิษ ในขณะที่งานวิจัยของ (Privar *et al.*, 2018) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ครีโอลเจลเป็นวัสดุรองรับโพลีเอทิลีนอิมีน (polyethyleneimine) สำหรับดูดซับโลหะหนัก เช่น ปรอตและทองแดง จากน้ำเสีย ซึ่งสามารถลดปริมาณโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4.1 กระบวนการสังเคราะห์ครีโอลเจล

กระบวนการสังเคราะห์ครีโอลเจลสามารถดำเนินการได้โดยเทคนิค ครีโอลเจลชัน (Cryogelation) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ การแยกเฟสด้วยการสร้างน้ำแข็ง การเชื่อมพันธะ และการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Kumar *et al.*, 2010) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

1. การแยกเฟสด้วยการสร้างน้ำแข็ง

เริ่มต้นจากการเตรียมสารละลายที่มีอนุภาคคอลลอยด์ โดยละลายมอนอเมอร์ในตัวทำละลาย จากนั้นนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิประมาณ -12 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งทำให้น้ำในระบบกลายเป็นน้ำแข็งและแยกเฟส ส่งผลให้อนุของพอลิเมอร์สามารถจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ

2. การเชื่อมพันธะ (Cross-linking)

ระหว่างกระบวนการแช่แข็ง จะมีการเติมสารเชื่อมพันธะ เช่น N,N'-methylenebisacrylamide เพื่อเชื่อมพันธะระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ในสารละลาย ทำให้เกิดโครงสร้างสามมิติที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่น

3. การพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)

หลังจากการแช่แข็งและการเชื่อมพันธะแล้ว ระบบจะเข้าสู่กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะของเหลวในรูปสารละลายเป็นของแข็ง การละลายน้ำแข็งออกในขั้นตอนสุดท้าย จะทำให้เกิดรูพรุนต่อเนื่องกันภายในโครงสร้าง ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำหรือสารมลพิษอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การประยุกต์ใช้ครีโอลเจลเป็นวัสดุดูดซับแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพ การพัฒนาครีโอลเจลคอมโพสิตมีบทบาทสำคัญ

ในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารพิษโดยมีงานวิจัยหลายชิ้นที่ยืนยันถึงความสามารถในการดูดซับที่ยอดเยี่ยมและการนำไปใช้ที่หลากหลาย ทำให้ครีโอลเจลเป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจสำหรับการวิจัยและการประยุกต์ใช้งานสำหรับดูดซับมลสารในสิ่งแวดล้อม

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย/วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ตัวดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ ผงเปลือกหอยนางรม คาร์บอนแอคทีฟ และคาร์บอนแอคทีฟที่ผสมผงเปลือกหอยนางรม โดยมุ่งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คาร์บอนแอคทีฟที่ผสมผงเปลือกหอยนางรมเป็นองค์ประกอบ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสามชนิด ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน รายละเอียดของกระบวนการทดลองมีดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

- 1) ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต
(Disodium Hydrogen Phosphate, Na_2HPO_4 , Qrec)
- 2) แอสคอร์บิก (Ascorbic Acid, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$, Orec)
- 3) ฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein solution 1%, Orec)
- 4) กรดซัลฟิวริก 5 N (Sulfuric acid, H_2SO_4 , 98% Orec)
- 5) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH, Merck)
- 6) เอทานอล (Ethanol 70%, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, Commercial Grade, Merck)
- 7) โพแทสเซียมแอมโมเนียมไทโอไซเตรต
- 8) แอมโมเนียมโมลิบเดตเตตระไฮเดรต
- 9) แป้งข้าวเจ้า ยี่ห้อช้างสามเศียร
- 10) แป้งมันสำปะหลัง ยี่ห้อช้างสามเศียร
- 11) น้ำปูนใส
- 12) น้ำกลั่น (Ultra pure water)

3.1.2 อุปกรณ์

- 1) ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ WTE binder FD115, Germany
- 2) Hot plate stirrer ยี่ห้อ WIGGENS รุ่น WH240-HT
- 3) กระดาษกรอง ยี่ห้อ Whatman ขนาด 0.45 ไมโครเมตร
- 4) pH meter
- 5) ตู้ดูดความชื้น (Desiccators) ยี่ห้อ Northman รุ่น VWT-08
- 6) ตู้เย็น ยี่ห้อ Samsung
- 7) ไชริงจ์ (Syringe) ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 8) เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง รุ่น GR-200
- 9) เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PIONEER
- 10) เตาเผา ยี่ห้อ Lenton
- 11) ป้อนดูดสุญญากาศ ยี่ห้อ Gast Manufacturing
- 12) CA Syringe Filters

3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์

- 1) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Dynamica รุ่น HALO RB-10 ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่จากการดูดซับ

3.2 การดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกหอยนางรม

การดูดซับฟอสเฟตจากน้ำเสียหรือสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมถือเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในการรักษาคุณภาพน้ำและลดผลกระทบจากมลพิษ งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาตัวดูดซับฟอสเฟตโดยใช้เปลือกหอยนางรม ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีศักยภาพในการดูดซับสารเคมี โดยดัดแปลงกระบวนการจากงานวิจัยของ (Martins *et al.*, 2017) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับดูดซับฟอสเฟตในน้ำ โดยกระบวนการเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกหอยนางรมทำได้ดังนี้

1. การเตรียมเปลือกหอยนางรม

เปลือกหอยนางรมที่เก็บรวบรวมได้จะถูกบดหยาบ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับกระบวนการดูดซับ จากนั้นล้างด้วยน้ำประปาจนสะอาด แล้วล้างซ้ำด้วยน้ำกลั่น เพื่อขจัดสิ่งสกปรกและสารตกค้าง ก่อนนำไปอบแห้ง

2. การอบแห้งเปลือกหอยนางรม

หลังจากล้างสะอาดแล้ว เปลือกหอยนางรมจะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้แห้งสนิท ลดความชื้นที่อาจรบกวนกระบวนการเผาหรือการดูดซับในขั้นตอนถัดไป

3. การเผาเปลือกหอยนางรม

เปลือกหอยนางรมที่แห้งแล้วจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและโครงสร้างภายในของเปลือกหอย ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟอสเฟต

4. การร่อนและการบดไล่ความชื้น

เปลือกหอยที่เผาแล้วจะถูกบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดรู 0.125 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ผงเปลือกหอยที่มีขนาดสม่ำเสมอ จากนั้นนำไปอบซ้ำที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นที่อาจยังหลงเหลืออยู่จากขั้นตอนก่อนหน้านี้

3.2.2 การสังเคราะห์ครีโอลเจล

การสังเคราะห์ครีโอลเจลในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาขั้นตอนจากห้องปฏิบัติการเบื้องต้น และดัดแปลงกระบวนการจากงานของ (Taweekarn *et al.*, 2022) ให้เหมาะสมกับการผลิตครีโอลเจลสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเตรียมส่วนผสมของแป้ง

ชั่งแป้งข้าวเจ้า 62.5 กรัม และแป้งมันสำปะหลัง 18.75 กรัม จากนั้นนำแป้งทั้งสองชนิดมาผสมเข้าด้วยกัน

2. การผสมกับน้ำปูนใส

ค่อย ๆ เติมน้ำปูนใสปริมาตร 500 มิลลิลิตร ลงในส่วนผสมแป้ง โดยน้ำปูนใสที่ใช้เตรียมขึ้นจากการผสมปูนแดง 15 กรัม กับน้ำกลั่น 6 ลิตร ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยให้แป้งมีความหนืดและใส เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเป็น ครีโอลเจล หลังจากเติมน้ำปูนใสแล้ว กวนส่วนผสมจนแป้งสุก โดยมีลักษณะเหนียว ใส ไม่ข้นหรือเหลวจนเกินไป

3. การให้ความร้อนแก่แป้ง

เริ่มต้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยกวนส่วนผสมเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90, 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียส โดยในแต่ละช่วงอุณหภูมิจะใช้เวลาการกวน 20 นาที เท่า ๆ กัน เพื่อให้ได้แป้งที่มีความสม่ำเสมอและเหมาะสมต่อการขึ้นรูป

4. การขึ้นรูปและแช่แข็ง

เทส่วนผสมที่ได้ลงในภาชนะพลาสติกทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร และสูง 15 เซนติเมตร แล้วนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จำนวน 3 รอบ โดยในแต่ละรอบจะนำออกจากช่องแช่แข็งแล้วปล่อยให้คืนสภาพที่อุณหภูมิห้องก่อนแช่แข็งซ้ำ

5. การเตรียมตัวดูดซับครีโอลเจล

หลังจากแช่แข็งครบ 3 รอบ ให้นำวัสดุออกมาตัดส่วนหัวและท้ายทิ้ง แล้วตัดเป็นแผ่นขนาดความหนา 2.5 เซนติเมตร จากนั้นแช่ใน

เอทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารตกค้าง และอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จะได้วัสดุดูดซับครีโอลเจลพร้อมใช้งาน

3.2.3 การสังเคราะห์ครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่

การเตรียมครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมเป็นองค์ประกอบนั้น ได้ทำการดัดแปลงกระบวนการจากวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ครีโอลเจลพื้นฐาน โดยเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาเปลือกหอยนางรมเข้าไปในกระบวนการ เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นที่แตกต่างกันต่อคุณสมบัติของวัสดุที่ได้ โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. การเตรียมส่วนผสมแป้ง

ชั่งแป้งข้าวเจ้า 62.5 กรัม และแป้งมันสำปะหลัง 18.75 กรัม แล้วนำมาผสมให้เข้ากัน

2. การละลายและให้ความร้อน

ค่อยๆ เติมน้ำปูนใสปริมาตร 500 มิลลิลิตร ลงในส่วนผสมแป้ง โดยใช้อัตราส่วนในการเตรียมน้ำปูนใส โดยใช้ปูนแดง 15 กรัมต่อน้ำกลั่น 6 ลิตร น้ำปูนใสช่วยให้แป้งมีลักษณะหนืดและใส เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป

จากนั้นกวนส่วนผสมด้วยความร้อนเริ่มต้นที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90, 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียส โดยกวนที่แต่ละอุณหภูมิเป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้แป้งสุกจนมีลักษณะหนืด ใส ไม่ข้นหรือเหลวจนเกินไป

3. การเติมผงเปลือกหอยนางรม

หลังจากแป้งสุกเรียบร้อยแล้ว ให้นำแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาเปลือกหอยนางรมมาเติมลงในส่วนผสม โดยใช้ในความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0.5%, 1%, 2.5%, 5%, 10% และ 15% โดยคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักแป้งทั้งหมด

4. การขึ้นรูปและกระบวนการแช่แข็ง

เทส่วนผสมลงในภาชนะพลาสติกทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร และสูง 15 เซนติเมตร จากนั้นนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จำนวน 3 รอบ โดยในแต่ละรอบจะนำออกจากช่องแช่แข็งแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปแช่แข็งซ้ำ

5. การปรับแต่งขนาดและอบแห้ง

เมื่อนำวัสดุออกจากกระบวนการแช่แข็งครบทั้ง 3 รอบแล้ว ให้ตัดส่วนหัวและท้ายทิ้ง แล้วตัดเป็นแผ่นครีโอลเจลที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนและช่วยคงโครงสร้างของเจล

ขั้นสุดท้าย อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที เพื่อไล่ความชื้นและให้ได้วัสดุดูดซับครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสม พร้อมสำหรับการทดสอบสมบัติการดูดซับฟอสเฟต

3.2.4 การศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับ

3.2.4.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้างและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

การศึกษาลักษณะโครงสร้างและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นจะดำเนินการโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) โดยจะทำการศึกษาที่บริเวณผิวหน้า, ผิวด้านล่าง, และภาพตัดขวาง (cross section) ของตัวดูดซับในกลุ่มครีโอลเจล

3.2.4.2 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ

การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นจะดำเนินการโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์จากสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET)

3.2.4.3 การวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของสารประกอบของตัวดูดซับ

การวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของสารประกอบที่ประกอบเป็นตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นจะดำเนินการโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)

3.2.4.4 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นจะดำเนินการโดยใช้เทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) เพื่อระบุชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับฟอสเฟต การวิเคราะห์สเปกตรัมอินฟราเรดช่วยให้สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันก่อนและหลังการดูดซับ ซึ่งเป็นหลักฐานสำคัญที่บ่งชี้ถึงกลไกการจับฟอสเฟตของวัสดุครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่

3.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟต

การทดลองการดูดซับดัดแปลงวิธีการของ (Taweekarn *et al.*, 2022) โดยจะดำเนินการโดยใช้ตัวดูดซับทั้ง 3 แบบ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกหอยนางรม ครีโอลเจล และครีโอลเจลที่มีแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่ ในการกำจัดฟอสเฟตแอนไอออน โดยการเติมตัวดูดซับลงในสารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 1 ลิตร จากนั้นทำการกวนสารที่ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที แล้วกรองสารละลายด้วย CA Syringe Filters เพื่อกรองเอาตัวดูดซับออก ก่อนนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสเฟตแอนไอออนที่เหลือโดยใช้วิธีแอสคอร์บิก และตรวจวัดความเข้มข้นด้วย Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

3.2.5.1 พีเอชของสารละลาย (pH)

การศึกษาพีเอชของสารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตในช่วงพีเอช 5-9 เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดฟอสเฟต

3.2.5.2 ปริมาณของตัวดูดซับ

การศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ดีที่สุดและคุ้มค่าที่สุด โดยใช้ตัวดูดซับชนิดครีโอลเจล 1 ขึ้นต่อการทดลองการดูดซับ 1 ครั้ง และตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกหอยนางรมในปริมาณ 0.5, 1, 2.5, 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ที่ผสมลงในครีโอลเจล

3.2.5.3 ระยะเวลาในการดูดซับ

การศึกษาระยะเวลาในการดูดซับฟอสเฟตที่ 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 360, 720 และ 1440 นาที เพื่อหาระยะเวลาที่สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ดีที่สุด

3.2.5.4 ผลของอุณหภูมิ

การศึกษาผลของอุณหภูมิในการดูดซับที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 40 องศาเซลเซียส เพื่อหาอุณหภูมิที่สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ดีที่สุด

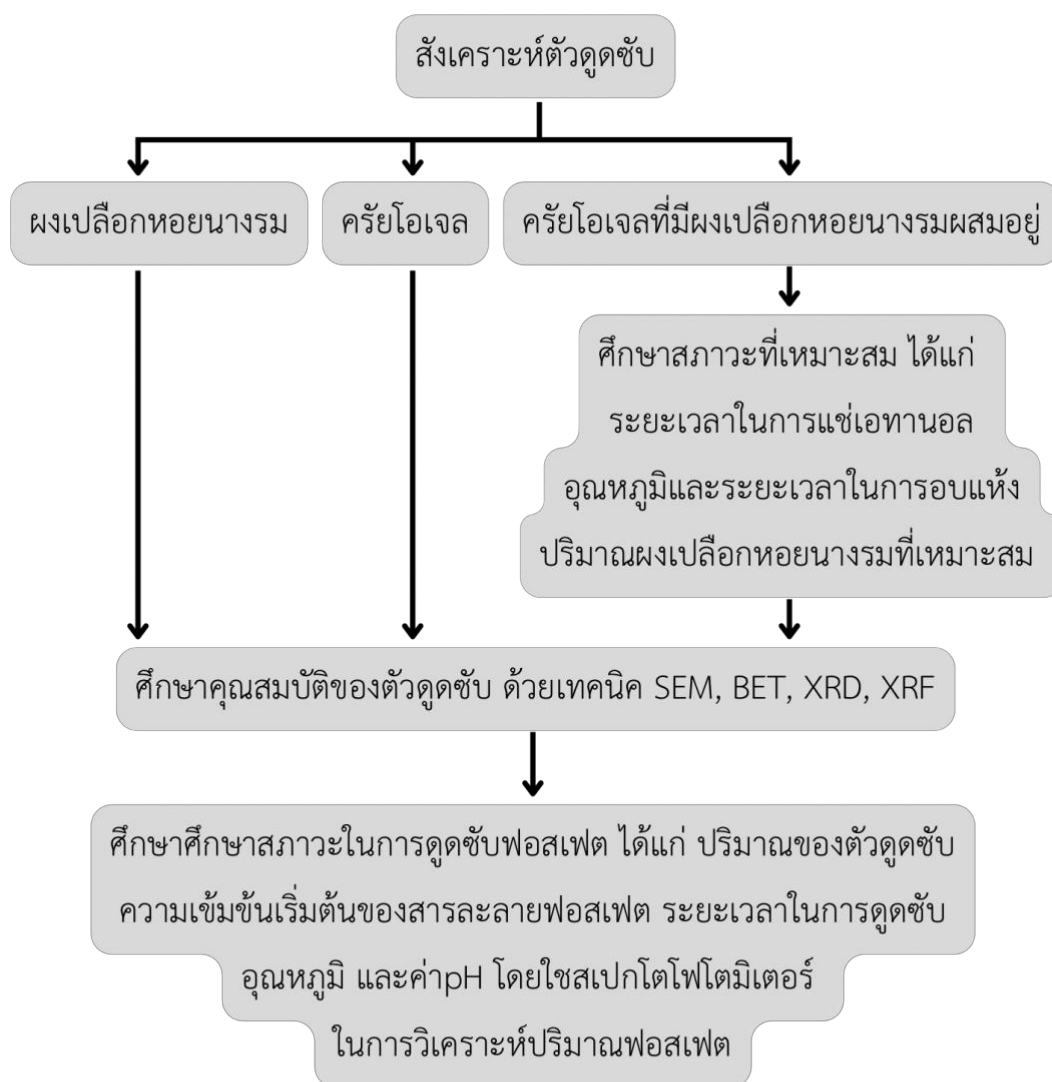
3.2.5.5 ผลของตัวรบกวน

การศึกษาความสามารถของตัวรบกวนที่สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำทะเล โดยตัวรบกวนที่ศึกษาจะเป็นไอออนที่พบได้ทั่วไปในน้ำทะเล ได้แก่ คลอไรด์ (Cl^-), ซัลเฟต (SO_4^{2-}), ไนเตรต (NO_3^-), แมกนีเซียม (Mg^{2+}), แคลเซียม (Ca^{2+}), และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-)

3.2.5.6 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียตัวอย่าง

การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียจะใช้วัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น และกำหนดค่า pH, ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้, และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เพื่อประเมินประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยใช้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้น

3.3 กรอบการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 1 กรอบการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการศึกษา/ผลการวิจัย

4.1 ผลการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยนางรม

การพัฒนาตัวดูดซับฟอสเฟตจากเปลือกหอยนางรมโดยดัดแปลงวิธีจากวิธีการของ (Martins *et al.*, 2017) ผลการศึกษาพบว่า หลังจากนำเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการบดหยาบและล้างทำความสะอาดแล้ว นำไปอบจนแห้งสนิท จากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเปลือกหอยนางรมให้เหมาะสมกับการดูดซับฟอสเฟต จากนั้นนำวัสดุที่เผาแล้วไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.125 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ขนาดผงที่มีความละเอียด หลังจากนั้น นำผงเปลือกหอยนางรมไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จึงได้ผงเปลือกหอยนางรมที่มีเนื้อละเอียดและสีขาว ซึ่งพร้อมสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 2 ลักษณะของผงเปลือกหอยนางรมที่เตรียมได้

4.2 ผลการสังเคราะห์ครีโอลเจล

การพัฒนาครีโอลเจลที่มีประสิทธิภาพสูงมีความสำคัญในด้านต่างๆ โดยเฉพาะในกระบวนการดูดซับสารหรือมลพิษ การทำให้แห้งสนิทของครีโอลเจลเป็นขั้นตอนสำคัญ เนื่องจากกระบวนการนี้ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับและทำให้ครีโอลเจลสามารถคงสภาพอยู่ได้นานขึ้น ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับในระยะยาว งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการทำให้แห้ง

สนิทยของครัยโอเจล โดยการใช้การแช่ในเอทานอลและการอบแห้งสนิทเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ และรักษาคุณภาพของครัยโอเจลให้คงสภาพได้นานที่สุด

ผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาในการแช่เอทานอลมีผลต่อการดูดซับของครัยโอเจล โดยการแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและ 48 ชั่วโมง พบว่า โครงสร้างของครัยโอเจลไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งสองตัวอย่างมีลักษณะคงรูปและแข็งตัวดี อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งมีผลต่อกระบวนการทำให้แห้งสนิท โดยครัยโอเจลที่แช่ในเอทานอล 24 ชั่วโมงสามารถทำให้แห้งสนิทได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ขณะที่ครัยโอเจลที่แช่ในเอทานอล 48 ชั่วโมงต้องใช้เวลานานขึ้นในการอบแห้งเป็น 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิเดียวกัน

จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้แห้งสนิทของครัยโอเจล คือ การแช่ครัยโอเจลในเอทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ซึ่งผลลัพธ์นี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตครัยโอเจลที่มีคุณภาพสูงและมีประสิทธิภาพในการใช้งานได้ดี



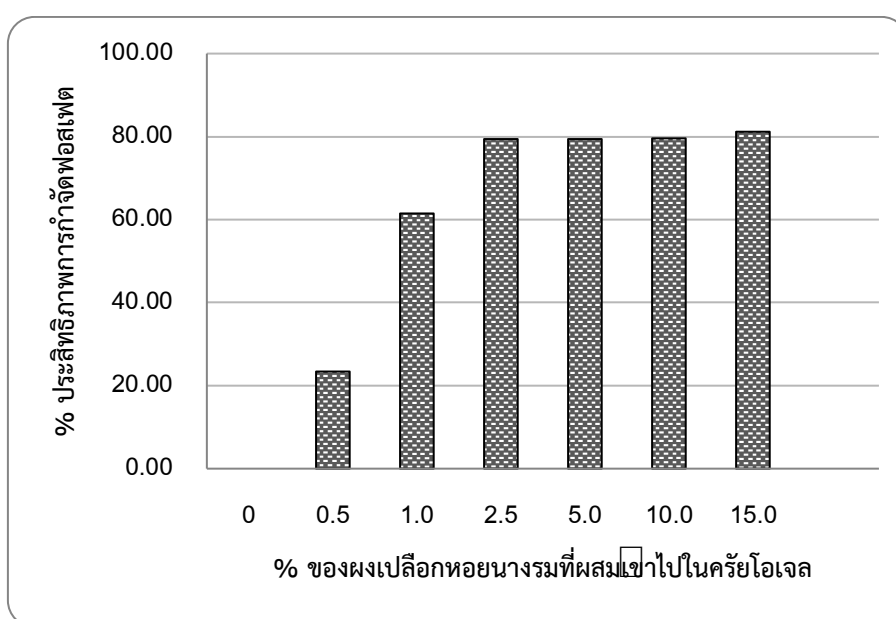
ภาพที่ 3 ลักษณะของครัยโอเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่เตรียมได้

4.3 ผลการสังเคราะห์ครัยโอเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่

การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตของครัยโอเจลที่ผสมด้วยผงเปลือกหอยนางรมในปริมาณต่างๆ โดยใช้สารละลายฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 12 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร และกำหนดระยะเวลาในการทดลอง 1 ชั่วโมง

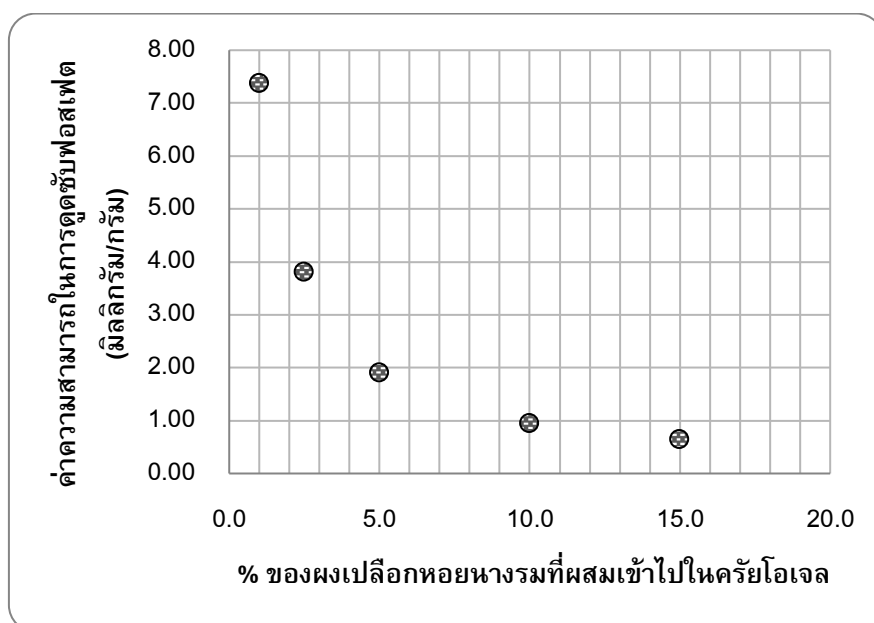
จากผลการทดลองซึ่งแสดงในภาพที่ 4 และ 5 พบว่า ปริมาณผงเปลือกหอยนางรมที่เหมาะสมคือ 1% โดยน้ำหนักของแป้งครีโอล 100 กรัม ซึ่งสามารถกำจัดฟอสเฟตได้สูงถึง 61.48% และมีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตสูงสุดเท่ากับ 7.38 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ

ผลการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่าการเติมผงเปลือกหอยนางรมในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของครีโอลในการดูดซับฟอสเฟตได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในด้านประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ



ภาพที่ 4

ผลการศึกษาปริมาณผงเปลือกหอยนางรมที่ผสมกับครีโอลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟต



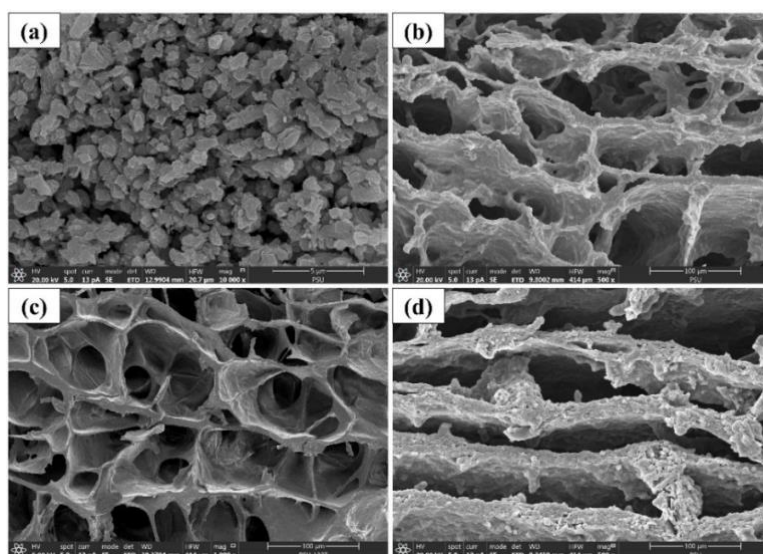
ภาพที่ 5 ผลการศึกษาปริมาณผงเปลือกหอยนางรมที่ผสมกับครีโอลเจลต่อความสามารถในการดูดซับฟอสเฟต

4.4 ผลการศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับ

4.4.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของตัวดูดซับ

การศึกษาลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของผงเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบการปล่อยสนาม (Field Emission Scanning Electron Microscope; FESEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่า อนุภาคของผงเปลือกหอยนางรมมีลักษณะรวมตัวกันเป็นก้อน (ภาพที่ 6a) ซึ่งผลการสังเกตนี้สอดคล้องกับรายงานของ (Torit & Phihusut, 2019) ที่ศึกษาลักษณะโครงสร้างของผงเปลือกไข่หลังผ่านกระบวนการเผา

เมื่อผงเปลือกหอยนางรมถูกนำไปผสมกับวัสดุครีโอลเจล พบว่าโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุผสมมีลักษณะเฉพาะของครีโอลเจล ได้แก่ โครงข่ายพอลิเมอร์ที่เชื่อมโยงถึงกัน (interconnected polymeric network) และมีโพรงขนาดใหญ่ (macropores) ที่กระจายตัวอยู่ภายในเนื้อวัสดุ (ภาพที่ 6b และ 6c) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาโดย (Boonkanon *et al.*, 2021)



ภาพที่ 6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย SEM ของ

- (a) อนุภาคผงเปลือกหอยนางรม
- (b) วัสดุครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่
- (c) วัสดุครีโอลเจล
- (d) วัสดุครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่หลังผ่านการดูดซับฟอสเฟต

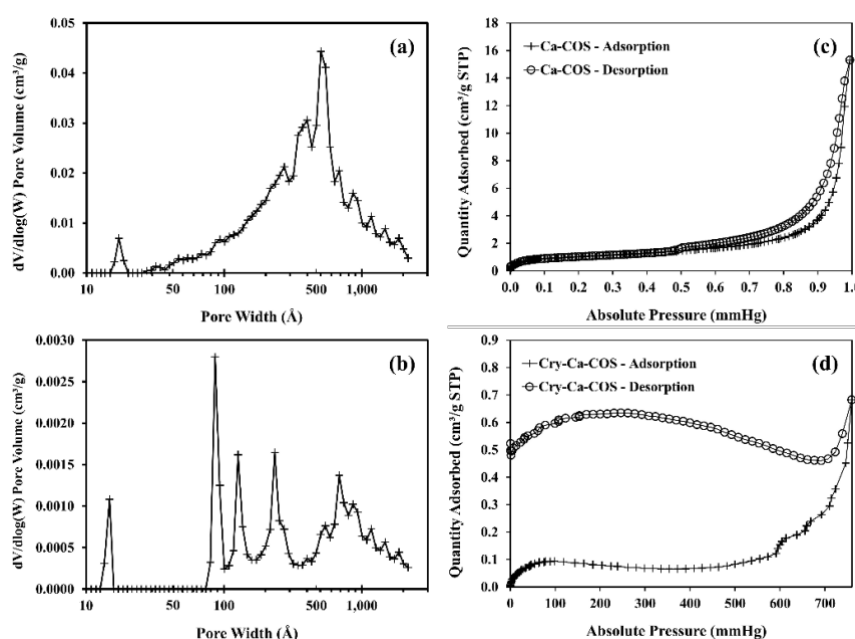
4.4.2 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุด้วยเทคนิคการดูดซับและการคายดูดซับแก๊สไนโตรเจนตามทฤษฎีของเบตต์ (Brunauer–Emmett–Teller; BET) พบว่าผงเปลือกหอยนางรม ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) เท่ากับ 3.597 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวม (total pore volume) เท่ากับ 0.022 มิลลิลิตรต่อกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (average pore diameter) เท่ากับ 24.44 นาโนเมตร ซึ่งแสดงค่าที่สูงกว่าผงเปลือกไข่ที่รายงานโดย (Torit & Phihusut, 2019) ซึ่งมีค่า 2.96 ตร.ม./กรัม, 0.0076 มล./กรัม และ 10.25 นาโนเมตร ตามลำดับ

ครีโอลเจลที่ผสมผงเปลือกหอยนางรม มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่ามาก โดยมีค่าเพียง 0.389 ตารางเมตรต่อกรัม, ปริมาตรรูพรุนรวม 0.001 มิลลิลิตรต่อกรัม, และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย 9.65 นาโนเมตร ซึ่งผลนี้สอดคล้องกับรายงานของ (Ding *et al.*, 2018) ที่รายงานว่า การกักเก็บบอนุภาคละเอียดไว้ในแมทริกซ์พอลิเมอร์ของครีโอลเจล ส่งผลให้รูพรุนบางส่วนถูกอุดตัน

การลดลงของขนาดรูพรุนเฉลี่ยและพื้นที่ผิวในวัสดุคาร์บอนโอเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่ แสดงให้เห็นถึงการรบกวนโครงสร้างของโครงข่ายพอลิเมอร์จากการเติมผงอนุภาค อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของรูพรุนจากกราฟ (ภาพที่ 7a และ 7b) ยังแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวัสดุมีช่วงของรูพรุนอยู่ในช่วง 5–200 นาโนเมตร และ 9–200 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงของเมโซพอร์ (mesopores) และ แมโครพอร์ (macropores)

นอกจากนี้ รูปแบบของไอโซเทอรัมที่ได้จากการดูดซับไนโตรเจนทั้งในผงเปลือกหอยนางรมและวัสดุผสม แสดงรูปแบบไอโซเทอรัมแบบที่ IV พร้อมกับห้วงฮิสทีรีซิสแบบ H3 (ภาพที่ 7c และ 7d) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ไม่มีโซพอร์และรูพรุนที่มีการกระจายตัวหลากหลายขนาด (Thommes *et al.*, 2015) คุณสมบัตินี้บ่งชี้ถึงความสามารถในการให้ฟอสเฟตซึมผ่านเข้าสู่ตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และส่งผลให้วัสดุดูดซับมีศักยภาพสูงในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำ



ภาพที่ 7 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ

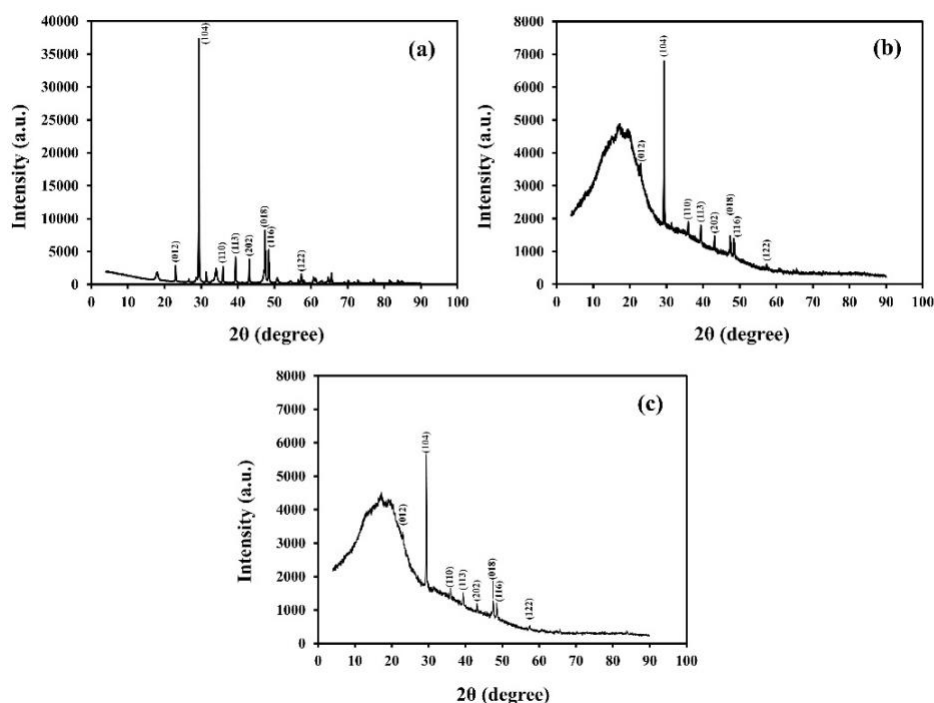
- (a) การกระจายตัวของขนาดรูพรุนบนพื้นที่ผิวของผงเปลือกหอยนางรม
- (b) การกระจายตัวของขนาดรูพรุนบนพื้นที่ผิวของคาร์บอนโอเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่
- (c) ไอโซเทอรัมของการดูดซับและการคายดูดซับของผงเปลือกหอยนางรม
- (d) ไอโซเทอรัมของการดูดซับและการคายดูดซับของคาร์บอนโอเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่

4.4.3 ผลการศึกษาชนิดของสารประกอบของตัวดูดซับ

ผลการศึกษาชนิดของสารประกอบในตัวดูดซับโดยการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าผงเปลือกหอยนางรมแสดงพีคที่คมชัดในตำแหน่งมุม 2θ ได้แก่ 23.0° , 29.4° , 36.0° , 39.4° , 43.1° , 47.6° , 48.5° และ 57.3° ซึ่งสามารถสอดคล้องกับระนาบผลึก (012), (104), (110), (113), (202), (018), (116) และ (122) ตามลำดับ โดยพีคเหล่านี้เป็นลักษณะเฉพาะของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) อ้างอิงจากแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 83-0577 (Ma *et al.*, 2009) นอกจากนี้ยังตรวจพบพีคเพิ่มเติมในมุม 2θ ที่ 54.3° , 64.7° และ 65.6° ซึ่งตรงกับระนาบผลึก (220), (311) และ (222) ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตามแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 78-0649 ผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่าผงเปลือกหอยนางรมมีองค์ประกอบของแคลเซียมทั้งในรูปของคาร์บอเนตและออกไซด์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟต

สำหรับครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่ พบว่า พีคที่เป็นลักษณะเฉพาะของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ยังคงปรากฏอยู่ แต่มีความเข้มของพีคลดลง นอกจากนี้ยังพบโหนดกว้างบริเวณมุม 2θ ประมาณ 20° ซึ่งแสดงถึงลักษณะของโครงสร้างอสัณฐานของแบงก์ครีโอลเจล (Ding *et al.*, 2018) ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของอะตอมแคลเซียมในผงเปลือกหอยนางรมที่ผสมอยู่ในครีโอลเจลยังคงไม่เปลี่ยนแปลงไปจากผงเปลือกหอยนางรมเดิม

ภายหลังจากที่วัสดุทั้งสองชนิดถูกใช้ในการดูดซับฟอสเฟต พบว่าพีคเฉพาะของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ยังคงปรากฏในตำแหน่งเดิม แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของผลึกแคลเซียมอย่างมีนัยสำคัญหลังจากกระบวนการดูดซับ ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานศึกษาก่อนหน้านี้ของ (Torit & Pihusut, 2019) ที่ใช้เปลือกไข่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในการดูดซับฟอสเฟต ซึ่งพบผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน



ภาพที่ 8 ผลการศึกษาชนิดของสารประกอบของตัวดูดซับ

- (a) ของผงเปลือกหอยนางรม
- (b) ของครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่
- (c) ของครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่หลังผ่านการดูดซับฟอสเฟต

4.4.4 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้เทคนิค FTIR (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy) พบว่าผงเปลือกหอยนางรมที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสมีแถบการดูดกลืนที่สำคัญซึ่งสัมพันธ์กับโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยสามารถตรวจพบแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งความถี่ 875, 1421, 1799, 2512 และ 2919 cm^{-1} (Torit & Phihusut, 2019) ซึ่งแถบเหล่านี้ยังปรากฏอยู่ในผงเปลือกหอยนางรมที่ยังไม่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส โดยเปรียบเทียบกันพบว่าผงเปลือกหอยนางรมที่ไม่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสมีความเข้มของแถบการดูดกลืนสูงกว่า แสดงให้เห็นถึงปริมาณของ CaCO_3 ที่ยังคงอยู่ในปริมาณมากกว่า

เมื่อพิจารณาวัสดุครีโอลเจลที่มีการผสมผงเปลือกหอยนางรม พบว่าแถบการดูดกลืนดังกล่าวมีการเลื่อนตำแหน่งและลดความเข้มลง ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากการซ้อนทับกับแถบการดูดกลืนของโมเลกุลแป้งในครีโอลเจล

พีคที่ตำแหน่ง 712 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะ Ca-O ยังคงปรากฏอยู่ทั้งในผงเปลือกหอยนางรมที่ผ่านและไม่ผ่านไฟโรไลซิส ขณะที่แถบการดูดกลืนที่ 3644 cm^{-1} ปรากฏเฉพาะในผงเปลือกหอยนางรมที่ผ่านกระบวนการไฟโรไลซิส โดยแถบนี้สัมพันธ์กับการมีอยู่ของ Ca(OH)_2 ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง CaO กับไอน้ำในอากาศ อย่างไรก็ตาม แถบดังกล่าวไม่ปรากฏในผงเปลือกหอยนางรมที่ยังไม่ผ่านกระบวนการไฟโรไลซิสและในครีโอลเจลที่มีการผสมผงเปลือกหอยนางรม สันนิษฐานว่า Ca(OH)_2 ที่เกิดขึ้นอาจทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลแป้งของครีโอลเจล ส่งผลให้แถบการดูดกลืนดังกล่าวหายไป

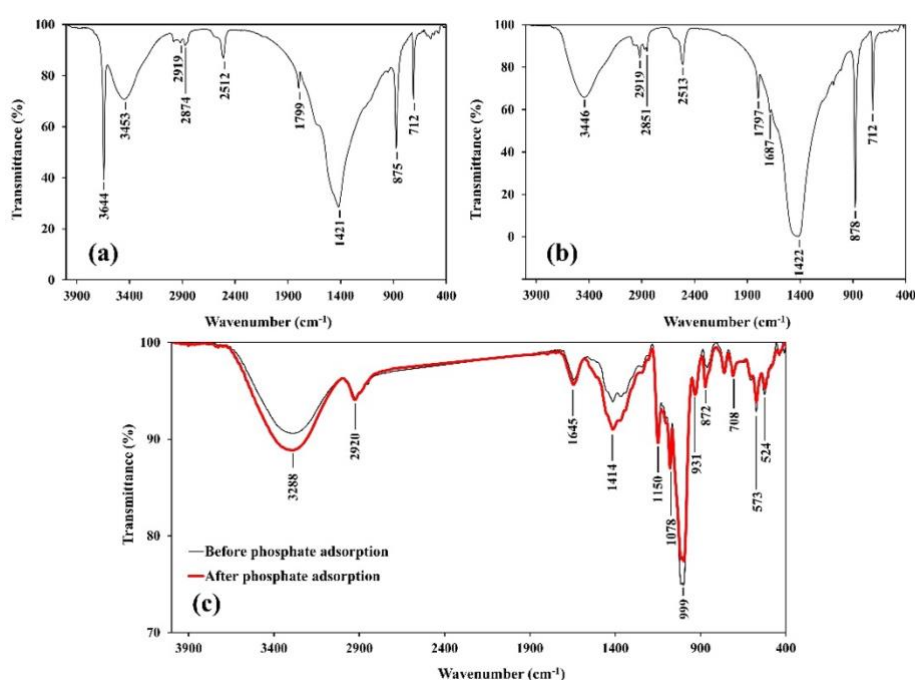
ในสเปกตรัมของครีโอลเจลที่มีการผสมผงเปลือกหอยนางรม พบแถบการดูดกลืนกว้างบริเวณความถี่ประมาณ 3300 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการยืดตัวของพันธะ O-H ในหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง และอาจมีการซ้อนทับกับหมู่ไฮดรอกซิลจากผงเปลือกหอยนางรมที่ความถี่ 3453 cm^{-1} นอกจากนี้ แถบที่ 1645 cm^{-1} แสดงถึงการงอของพันธะ C-O จากอะไมโลเพกติน และอาจซ้อนทับกับการสั่นของพันธะ O-H จากน้ำที่ถูกดูดซับ

แถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 2920 cm^{-1} และ 1150 cm^{-1} สัมพันธ์กับการยืดของพันธะ C-H และการสั่นของพันธะ C-O-C ตามลำดับ ซึ่งพบได้ในโครงสร้างพันธะไกลโคซิดิกของโมเลกุลแป้ง ในขณะเดียวกัน การสั่นของพันธะ C-O ในอะไมโลเพกตินปรากฏเป็นแถบที่มีความเข้มข้นในช่วง 1078–931 cm^{-1} โดยมีจุดสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1000 cm^{-1} ซึ่งอาจเกิดจากการซ้อนทับกับการสั่นของกลุ่ม CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่เป็นองค์ประกอบทางธรรมชาติของผงเปลือกหอยนางรม

นอกจากนี้ การสั่นแบบยืดของ CO_3^{2-} ยังพบที่ 1063 cm^{-1} เช่นเดียวกับในวัสดุที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ ส่วนการสั่นของพันธะ P-O ปรากฏที่ 963 cm^{-1} และในช่วง 1000–1100 cm^{-1} (Boonkanon *et al.*, 2021; Destainville *et al.*, 2003; Taweekarn *et al.*, 2022; Wongniramaikul *et al.*, 2018) พีคที่ตำแหน่ง 483 cm^{-1} , 573 cm^{-1} และ 606 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับการสั่นของหมู่ O-P-O แบบงอและเสี้ยวรูปทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร (Liga & Natalija, 2012; Siva Rama Krishna *et al.*, 2007) ยืนยันการมีอยู่ของกลุ่มฟอสเฟตในโครงสร้างครีโอลเจล

หลังจากกระบวนการดูดซับฟอสเฟต พบว่าแถบการสั่นของครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมยังคงปรากฏในตำแหน่งเดิม แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงในความเข้มข้นของบางแถบ โดยเฉพาะแถบที่ตำแหน่งประมาณ 3300 cm^{-1} มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจสัมพันธ์กับหมู่ O-H จากฟอสเฟตที่ถูกดูดซับ เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) ที่มีการรายงานไว้ว่าแถบลักษณะดังกล่าวสามารถพบได้ในช่วงความถี่ 3570–3420 cm^{-1}

อีกทั้ง การเพิ่มขึ้นของความเข้มของพีคที่ 872 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับพันธะ C-O จากกลุ่ม CO_3^{2-} อาจเป็นผลจากการสั่นของกลุ่ม HPO_4^{2-} ที่ถูกดูดซับอยู่บนวัสดุ และอาจแสดงถึงการเกิดเฟสของอะพาไทต์ที่มีการขาดแคลเซียม ($\text{Ca}_{10-x}(\text{HPO}_4)_x(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{OH})_{2-x}$) นอกจากนี้ แถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1414 cm^{-1} ซึ่งมีความเข้มเพิ่มขึ้นหลังการดูดซับฟอสเฟต ยังอาจช่วยสนับสนุนการเกิดของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีการแทนที่คาร์บอนเตตจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในสารละลายฟอสเฟตอีกด้วย



ภาพที่ 9 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

- (a) ผงเปลือกหอยนางรมที่ยังไม่ผ่านกระบวนการฟิโรไลซิส
- (b) ผงเปลือกหอยนางรมที่ผ่านกระบวนการฟิโรไลซิส
- (c) ครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่

4.5 ผลการศึกษาการดูดซับฟอสเฟตโดยวัสดุดูดซับครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่

4.5.1 ผลการศึกษาปริมาณดูดซับที่เหมาะสม

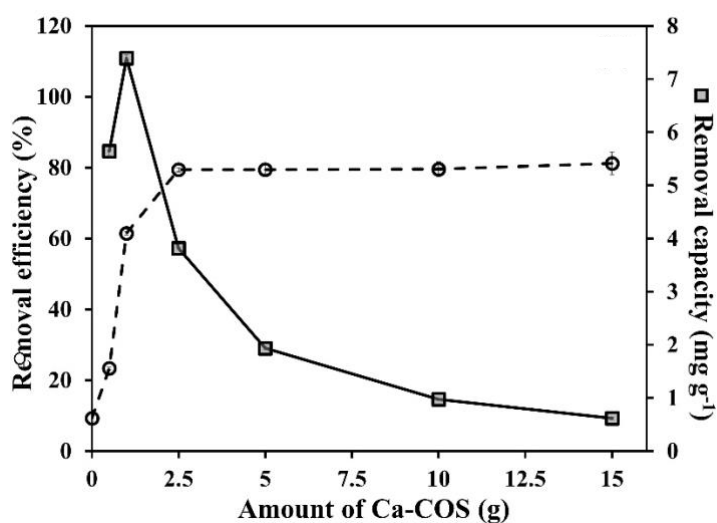
จากการศึกษาผลของปริมาณผงเปลือกหอยนางรมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ (แสดงในภาพที่ 10) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงเปลือกหอยนางรมตั้งแต่ 0 ถึง 2.5 กรัม (คิดเป็น 0–2.5% w/w) ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน

จาก $9.28\% \pm 0.84\%$ เป็น $79.41\% \pm 0.52\%$ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณผงเปลือกหอยนางรม จาก 2.5 กรัมเป็น 15 กรัม ไม่ได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด ซึ่งอาจเนื่องมาจากข้อจำกัดของครีโอลเจลในการรองรับปริมาณของผงเปลือกหอยนางรม กล่าวคือ การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากเกินไปอาจทำให้โครงสร้างของครีโอลเจลเกิดการอุดตัน ส่งผลให้พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับผสมลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผงเปลือกหอยนางรมเพียงอย่างเดียว ตามที่สนับสนุนโดยผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุด้วยเทคนิค BET ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลดลงของพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ

นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณผงเปลือกหอยนางรมจาก 1% เป็น 2.5% w/w ในวัสดุครีโอลเจลส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตต่อหน่วยมวลของวัสดุ (Q_e) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จาก 7.38 ± 0.06 มิลลิกรัมต่อกรัม เหลือเพียง 3.81 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการเติมผงเปลือกหอยนางรมในปริมาณที่มากเกินไปอาจรบกวนสมดุลของโครงสร้างวัสดุดูดซับและจำกัดการเข้าถึงของสารมลพิษในสารละลาย

จากข้อมูลข้างต้นจึงสรุปได้ว่า ปริมาณผงเปลือกหอยนางรมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผสมในวัสดุครีโอลเจลคือ 1 กรัม ต่อครีโอลเจล 100 กรัม โดยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตสูงสุดภายใต้ข้อจำกัดของโครงสร้างวัสดุ

ในขณะเดียวกัน วัสดุครีโอลเจลที่ไม่ผสมผงเปลือกหอยนางรมแสดงประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตได้เพียง $9.28\% \pm 0.84\%$ เท่านั้น ซึ่งผลดังกล่าวอาจเกิดจากการมีอยู่ของไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) ที่ฝังตัวอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ของครีโอลเจล ซึ่งสามารถมีบทบาทในการจับยึดฟอสเฟตได้บางส่วน ทั้งนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถของครีโอลเจลคอมโพสิตที่ประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในการดูดซับฟอสเฟตอย่างมีประสิทธิภาพ (Taweekarn *et al.*, 2022)



ภาพที่ 10 ผลการศึกษาปริมาณดูดซับที่เหมาะสม

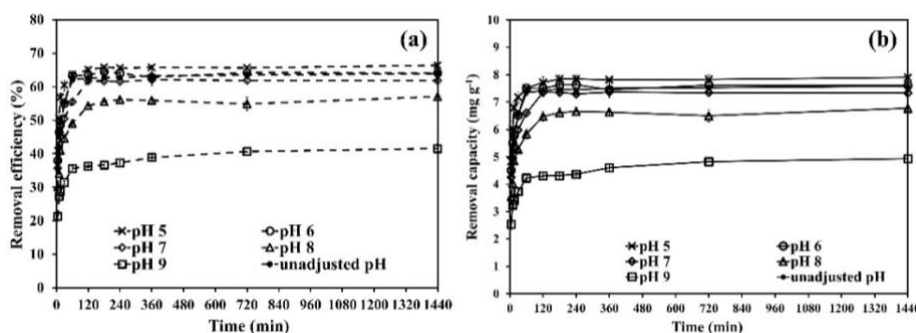
4.5.2 ผลการศึกษาค่า pH ส่งผลต่อการดูดซับ

การศึกษาผลของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตได้ดำเนินการโดยการปรับค่า pH ของสารละลายฟอสเฟตมาตรฐานในช่วง 5.0–9.0 โดยใช้ HCl 0.1 M หรือ NaOH 0.1 M ในปริมาณที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ค่า pH ของสารละลายเปลี่ยนแปลงไปหลังจากกระบวนการดูดซับฟอสเฟตในระยะเวลาสมดุล 60 นาที โดยก่อนการดูดซับ pH อยู่ที่ 6.9 และหลังการดูดซับค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 10.2 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากการเพิ่มปริมาณ OH^- ที่แยกออกจาก $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการเผา (Martins *et al.*, 2017) รวมถึงน้ำปูนใสส่วนเกินที่ใช้ในการเตรียมครีโอลเจล

นอกจากนี้ การปรับค่า pH ของสารละลายฟอสเฟตก่อนการดูดซับให้สูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตลดลง (แสดงในภาพที่ 11a) และความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตก็ลดลงด้วย (แสดงในภาพที่ 11b) ซึ่งผลนี้สัมพันธ์กับประจุที่ผิววัสดุและพฤติกรรมทางเคมีฟิสิกส์ของฟอสเฟตในน้ำในช่วง pH ดังกล่าว การศึกษาจุดที่มีประจุเป็นศูนย์ (pHpzc) พบว่า pHpzc มีค่าประมาณ 6.8 ดังนั้นผิวของวัสดุดูดซับครีโอลเจลที่ผสมผงเปลือกหอยนางรมจะมีประจุบวกเมื่อ pH ของสารละลายฟอสเฟตต่ำกว่า 6.8 เนื่องจาก H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} เป็นแอนไอออนฟอสเฟตที่มีอยู่มากที่สุดในช่วง pH นี้ (Dai *et al.*, 2018) ทำให้การกำจัดฟอสเฟตมีอัตราสูงขึ้นที่ pH ต่ำกว่าเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างผิววัสดุที่มีประจุบวกกับไอออนฟอสเฟตที่มีประจุลบ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตที่ pH 5 ($63.59\% \pm 0.16\%$) กับ pH 6.3 (โดยไม่มีการปรับ pH ซึ่งเป็นค่า pH ของน้ำเสียทั่วไป (Fang *et al.*, 2018) $62.11\% \pm$

0.95%) พบว่าอัตราการกำจัดแตกต่างกันเพียง -2.33% ดังนั้นผลการศึกษานี้จึงเลือกที่จะไม่ปรับค่า pH ในการใช้งานจริงเพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย



ภาพที่ 11 ผลการศึกษาค่า pH ที่ส่งผลต่อการดูดซับ

(a) ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตโดยวัสดุครีโอลเจล

(b) ความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตโดยวัสดุครีโอลเจล

4.5.3 ผลการศึกษาการถูกรบกวนจากไอออนอื่นที่ส่งผลต่อการดูดซับ

การศึกษาผลกระทบจากไอออนอื่นที่อาจรบกวนการดูดซับฟอสเฟตได้ดำเนินการโดยการเติมไอออนที่อาจรบกวน ได้แก่ ไอออน Cl^- , SO_4^{2-} และ NO_3^- ในความเข้มข้น 10 mM ซึ่งถูกผสมในสารละลายฟอสเฟตก่อนกระบวนการดูดซับ ผลการศึกษา พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตยังคงอยู่ที่ $61.08\% \pm 0.45\%$ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเพียง -0.75%

ในทางตรงกันข้าม ไอออนคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ที่ถูกผสมในสารละลายฟอสเฟตแยกจากไอออนอื่นๆ มีศักยภาพในการจำกัดการดูดซับฟอสเฟต (Seliem *et al.*, 2016; Taweekarn *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2019) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่ม CO_3^{2-} ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตของครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่ลดลงเหลือ $44.97\% \pm 0.77\%$ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เป็น -26.9% ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการที่ CO_3^{2-} จับตัวและตกตะกอนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แทนที่จะตกตะกอนเป็นฟอสเฟตแคลเซียม (Lee *et al.*, 2005)

นอกจากนี้ควรสังเกตว่าความเข้มข้นของ CO_3^{2-} ที่ทดสอบในครั้งนี้อยู่ที่ (10 mM) สูงกว่าฟอสเฟต (85 nM) ซึ่งมากกว่า 100 เท่า จึงอาจเป็นปัจจัยที่ทำให้การดูดซับฟอสเฟตได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

4.5.4 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟต

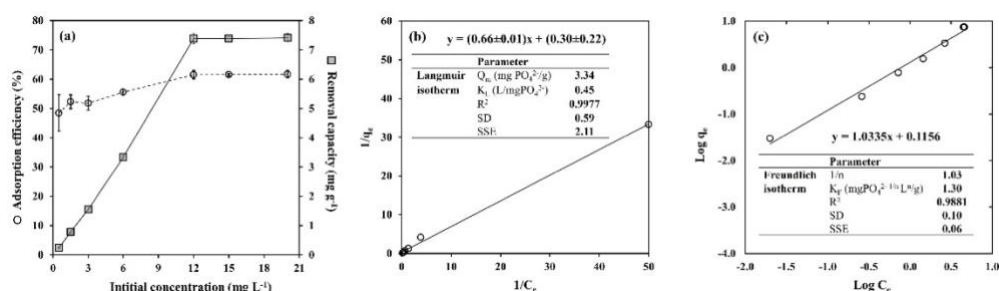
และไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในสารละลายได้ดำเนินการในช่วงความเข้มข้นจาก 0.5 ถึง 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นที่พบได้ทั่วไปในน้ำเสีย (Martins *et al.*, 2017) โดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 1 ชั่วโมง ผลการศึกษา พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 0.5 เป็น 12 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการกำจัดฟอสเฟตเพิ่มขึ้นจาก $48.50\% \pm 6.26\%$ เป็น $61.54\% \pm 1.47\%$

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเข้มข้นให้มากกว่า 12 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่น 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟต โดยวัสดุครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่ (ตามภาพที่ 12a) สอดคล้องกับค่าความสามารถในการดูดซับ (Q_e) สูงสุดที่ 7.38 ± 0.85 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อความเข้มข้นฟอสเฟตอยู่ที่ 12 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคงที่หลังจากนั้น บ่งชี้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มลดลงเมื่อความเข้มข้นฟอสเฟตสูงขึ้น โดยสามารถอธิบายได้จากการขาดความสมดุลระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ (Martins *et al.*, 2017)

จากผลการศึกษาได้ทำการศึกษาด้วยแบบจำลองไอโซเทอร์มทั้งแบบ Langmuir (ตามภาพที่ 12b) และ Freundlich (ตามภาพที่ 12c) โดยพบว่าแบบจำลอง Langmuir ให้การปรับเข้าที่ดีกว่า ($R^2 = 0.9977$) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การดูดซับฟอสเฟตเกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่ในลักษณะชั้นเดียว ผ่านกระบวนการดูดซับแบบเคมี นอกจากนี้ค่าคงที่มิติ (R_L) จากแบบจำลองของ Langmuir isotherm ที่คำนวณจากสมการ (15) (Almanassra *et al.*, 2020; Selim *et al.*, 2016) มีค่าระหว่าง 0.33 ถึง 0.99 ซึ่งบ่งชี้ว่าการดูดซับสามารถลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ($0 < R_L < 1$)

การดูดซับฟอสเฟตโดยวัสดุครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่สามารถเกิดขึ้นได้ด้วย 2 กลไก กลไกแรกคือ การดูดซับฟอสเฟตจากผงเปลือกหอยนางรมที่หลุดออกจากวัสดุครีโอลเจลผสม ซึ่งมีการสังเกตพบของแข็งแขวนลอยในสารละลายฟอสเฟตหลังการดูดซับ ซึ่งบ่งชี้ถึงการก่อกวนของตะกอนแคลเซียมฟอสเฟตผ่านกระบวนการนิวคลีชันแบบโฮโมจีเนียสและ/หรือเฮเทอโรจีเนียส (Almanassra *et al.*, 2020; Selim *et al.*, 2016) กลไกที่สองคือ การดูดซับฟอสเฟตบนพื้นผิวของวัสดุครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสม



ภาพที่ 12 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟตและไอโซเทอร์มของการดูดซับ

(a) ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟต

(b) แบบจำลองไอโซเทอร์มแบบ Langmuir

(c) แบบจำลองไอโซเทอร์มแบบ Freundlich

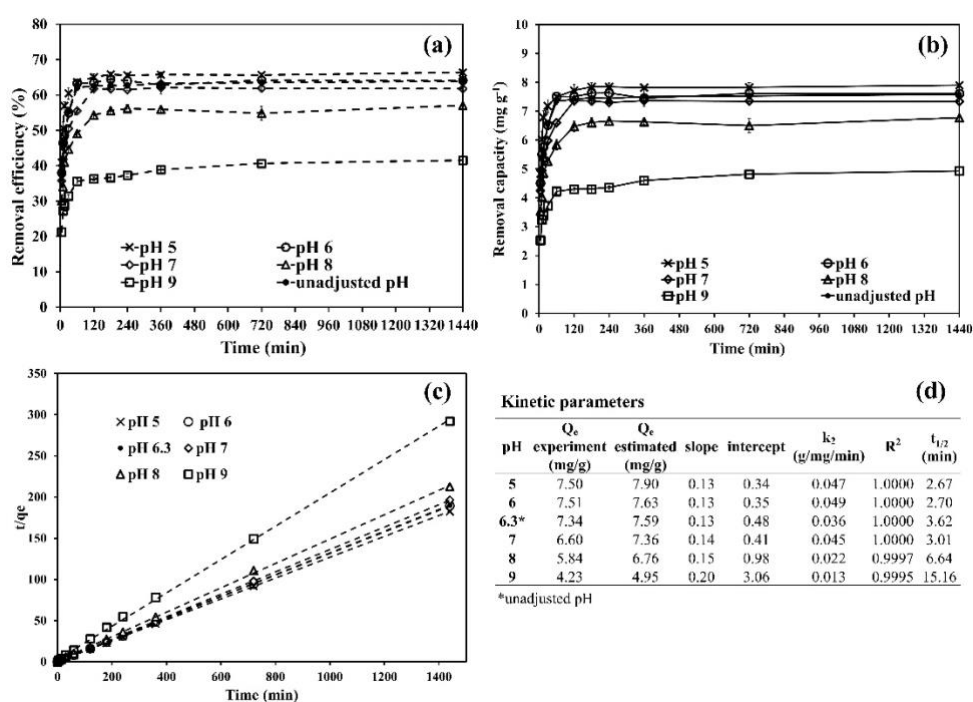
4.5.5 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับฟอสเฟตได้ดำเนินการในช่วงเวลา 0-1440 นาที ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า วัสดุครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตที่ $37.28\% \pm 0.95\%$ ภายใน 5 นาที และเพิ่มขึ้นเป็น $62.11\% \pm 0.95\%$ ภายใน 60 นาที โดยมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเป็น $63.91\% \pm 0.79\%$ หลังจาก 1440 นาที (pH = 6.3) (ตามภาพที่ 13a)

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาในการประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิตโพลิเมอร์อื่นๆ เช่น ครีโอลเจลที่มีแคลเซียมซilikเกตไฮดรตผสมอยู่ (Taweekarn *et al.*, 2022) และวัสดุดูดซับจาก โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีแคลเซียมซilikเกตไฮดรตผสมอยู่ (Ding *et al.*, 2018) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโพลิเมอร์ในวัสดุครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่อาจมีส่วนช่วยในการลดอัตราการดูดซับ ทำให้ระยะเวลาในการสร้างสมดุลนานขึ้น

จากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของวัสดุครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 4.42 ± 0.11 – 7.34 ± 0.13 mg/g ภายใน 60 นาที โดยไม่มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ตามภาพที่ 13b) นอกจากนี้ ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเมื่อผ่านเวลา 60 นาทีเป็นต้นไป ซึ่งอาจเกิดจากการลดลงของตัวดูดซับบนพื้นผิววัสดุ เนื่องจากเกิดกลไกการดูดซับระหว่างแคลเซียมกับฟอสเฟต (Torit & Phihusut, 2019) ทำให้ฟอสเฟตมีความยากลำบากในการเข้าไปยังตัวดูดซับแคลเซียมที่เหลือ เนื่องจากแรงผลักดันจากเฟสขนาดใหญ่ (Mezenner & Bensmaili, 2009)

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับเทียบกับแบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (pseudo-first-order) และจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (pseudo-second-order) พบว่าจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสองให้การปรับเข้าที่ดีกว่า ($R^2 = 0.9995$) (ตามภาพที่ 13c) ซึ่งบ่งชี้ว่าการดูดซับฟอสเฟตบนวัสดุครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่เกิดขึ้นผ่านกระบวนการดูดซับแบบเคมี ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาจากวัสดุครีโอลเจลที่มีแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตผสมอยู่ (Taweekarn *et al.*, 2022) และวัสดุดูดซับจากโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตผสมอยู่ (Ding *et al.*, 2018)



ภาพที่ 13 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับ

(a) ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต

(b) ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อความสามารถในการกำจัดฟอสเฟต

(c) ผลศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

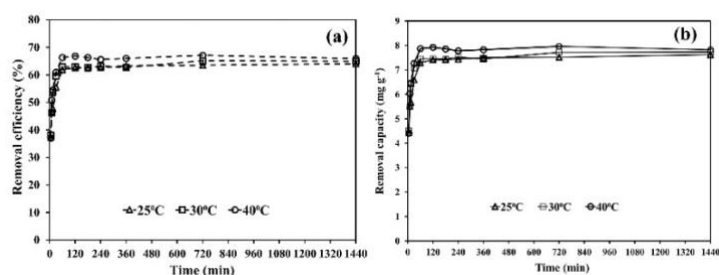
(d) ตารางผลศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

4.5.6 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับและอุณหพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 25 ถึง 40 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟต (ตามภาพที่ 14a) และความสามารถในการดูดซับของวัสดุคาร์บอนโอเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่ (ตามภาพที่ 14b) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงกระบวนการดูดซับที่เป็นเอนโดเทอร์มิก ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการใช้ผงเปลือกไขในการดูดซับฟอสเฟต (Torit & Phihusut, 2019)

นอกจากนี้ยังพบว่า พลังงานกระตุ้น (E_a) ที่คำนวณสำหรับการดูดซับฟอสเฟตของวัสดุคาร์บอนโอเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่ โดยใช้สมการที่ 12 มีค่าเท่ากับ 81.9 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งสูงกว่าค่าที่ใช้ระบุถึงกระบวนการดูดซับแบบฟิสิกส์ ($E_a < 40$ กิโลจูลต่อโมล) ซึ่งหมายความว่ากระบวนการดูดซับฟอสเฟตนี้เป็นไปแบบเคมี ($E_a > 40$ กิโลจูลต่อโมล)

การลดลงของค่า (ΔG°) (ตามภาพที่ 14c) แสดงถึงการดูดซับฟอสเฟตที่มีความเป็นไปได้มากขึ้นและเกิดขึ้นเองในอุณหภูมิที่สูงขึ้น ค่าบวกของ (ΔH°) บ่งบอกว่าธรรมชาติของกระบวนการดูดซับฟอสเฟตในครั้งนี้เป็นเอนโดเทอร์มิก ในขณะที่ค่าบวกของ (ΔS°) ชี้ให้เห็นการเพิ่มขึ้นของตัวถูกดูดซับที่บริเวณผิวของตัวดูดซับคาร์บอนโอเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่



ภาพที่ 14 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับและอุณหพลศาสตร์การดูดซับ

- (a) อุณหภูมิเหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต
- (b) อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อความสามารถในการกำจัดฟอสเฟต
- (c) อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

4.5.7 ผลการศึกษาระดับความหนาของวัสดุครีโเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่

การศึกษานี้ทำการทดลองกับวัสดุครีโเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่ โดยเตรียมวัสดุในรูปแบบทรงกระบอก ขนาดความหนา 2.5 เซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 เซนติเมตร จากนั้นได้ทำการแบ่งวัสดุออกเป็นแผ่นที่มีความหนาต่างกันเพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟต

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อแบ่งวัสดุครีโเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมออกเป็น 3 ชั้นที่มีความหนา 0.83 เซนติเมตร แต่ละชั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตสูงถึง $83.11\% \pm 0.68\%$ ซึ่งสูงกว่าการแบ่งออกเป็นสองชั้นที่มีความหนา 1.25 เซนติเมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตเท่ากับ $71.33\% \pm 0.95\%$ ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ฟอสเฟตสามารถเข้าถึงได้

ดังนั้นวัสดุดูดซับครีโเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่ถูกออกแบบให้มีความหนา 0.83 เซนติเมตร และใช้ 3 ชั้นในการดูดซับฟอสเฟตจากสารละลาย 1 ลิตร ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตได้ดียิ่งขึ้น

4.5.8 การประยุกต์ใช้ในตัวอย่างน้ำจริง

ผลการศึกษาการนำวัสดุครีโเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมมาใช้สำหรับดูดซับฟอสเฟตจากตัวอย่างน้ำจริงจำนวน 5 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างน้ำเสียจากครัวเรือนก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลตำบลป่าตอง จังหวัดภูเก็ต 1 ตัวอย่าง ตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงบำบัดน้ำเสียของเทศบาลตำบลป่าตอง 2 ตัวอย่าง และตัวอย่างน้ำผิวดินจากคลองปากบาง เทศบาลตำบลป่าตอง 2 ตัวอย่าง โดยมีการตรวจสอบดัชนีคุณภาพน้ำก่อนและพบว่าค่าฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำอยู่ในช่วง 1.05 ± 0.01 ถึง 1.77 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้วัสดุครีโเจลที่ผสมผงเปลือกหอยนางรมจำนวน 3 ชั้นที่มีความหนา 0.83 ซม. ต่อปริมาตรน้ำ 1 ลิตร พบว่าสามารถลดค่าฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าฟอสเฟตหลังการใช้วัสดุครีโเจลจะอยู่ในช่วง 0.17 ± 0.01 ถึง 0.29 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตอยู่ระหว่าง $83.40\% \pm 0.48\%$ ถึง $84.75\% \pm 0.40\%$ และเมื่อใช้วัสดุครีโเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมจำนวน 5 ชั้น ค่าฟอสเฟตถูกลดลงไปจนต่ำกว่าระดับที่สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันได้ (0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร) (Almanassra *et al.*, 2020; Seliem *et al.*, 2016) และแสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตที่สูงมากอยู่ในช่วง $98.48\% \pm 1.87\%$ ถึง $99.16\% \pm 0.72\%$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย/อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้พัฒนาวัสดุครีโอลเจลที่มีผงเปลือกหอยนางรมผสมอยู่เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับการกำจัดและฟื้นฟูฟอสเฟตจากน้ำ โดยใช้กลไกการดูดซับแบบเคมี (chemisorption) และการตกตะกอน (precipitation) โครงสร้างของครีโอลเจลที่มีขนาดใหญ่ช่วยป้องกันการสูญเสียวัสดุดูดซับและทำให้สามารถฟื้นฟูวัสดุได้ง่ายหลังการใช้งาน ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม วัสดุดูดซับนี้สามารถกำจัดฟอสเฟตได้สูงสุดถึง 9.97 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตอยู่ที่ $83.11\% \pm 0.68\%$ ข้อมูลจากการทดลองตรงกับแบบจำลองของสมดุลการดูดซับแบบ Langmuir และจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (pseudo-second-order) ซึ่งบ่งชี้ถึงการดูดซับฟอสเฟตที่ผิววัสดุครีโอลเจลผ่านการดูดซับแบบเคมี ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานเปิดการกระตุ้น (activation energy) ที่ประมาณ 81.9 กิโลจูลต่อโมล ค่าความเอนทัลปี (ΔH° , 9.3 กิโลจูลต่อโมล) ที่เป็นบวกยืนยันถึงกระบวนการดูดซับที่มีลักษณะเป็นเอนโดเทอร์มิก ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการดูดซับที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสำหรับการประยุกต์ใช้วัสดุดังกล่าวกับน้ำตัวอย่างจริงจากเทศบาลปาดอง จังหวัดภูเก็ต พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตอยู่ในช่วง $98.48\% \pm 1.87\%$ ถึง $99.16\% \pm 0.72\%$

บรรณานุกรม

- Almanassra, I. W., Kochkodan, V., Subeh, M., McKay, G., Atieh, M., & Al-Ansari, T. (2020). Phosphate removal from synthetic and treated sewage effluent by carbide derive carbon. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101323. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101323>
- Amarh, F., Voegborlo, R. B., Essuman, E. K., Agorku, E. S., Tettey, C. O., & Kortei, N. K. (2021). Effects of soil depth and characteristics on phosphorus adsorption isotherms of different land utilization types: Phosphorus adsorption isotherms of soil. *Soil and Tillage Research*, 213, 105139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105139>
- Bashar, R., Gungor, K., Karthikeyan, K. G., & Barak, P. (2018). Cost effectiveness of phosphorus removal processes in municipal wastewater treatment. *Chemosphere*, 197, 280-290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.169>
- Boonkanon, C., Phatthanawiwat, K., Chuenchom, L., Lamthornkit, N., Taweeakarn, T., Wongniramaikul, W., & Choodum, A. (2021). Preparation and Characterization of Calcium Cross-Linked Starch Monolithic Cryogels and Their Application as Cost-Effective Green Filters. *Polymers*, 13(22), 3975. <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/22/3975>
- Brix, J., Rüdiger, S., Bukau, B., Schneider-Mergener, J., & Pfanner, N. (1999). Distribution of Binding Sequences for the Mitochondrial Import Receptors Tom20, Tom22, and Tom70 in a Presequence-carrying Preprotein and a Non-cleavable Preprotein*. *Journal of Biological Chemistry*, 274(23), 16522-16530. <https://doi.org/https://doi.org/10.1074/jbc.274.23.16522>
- Can, M. Y., & Yildiz, E. (2006). Phosphate removal from water by fly ash: Factorial experimental design. *Journal of Hazardous Materials*, 135(1), 165-170. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.036>
- Cheng, Y., Narayanan, M., Shi, X., Chen, X., Li, Z., & Ma, Y. (2023). Phosphate-solubilizing bacteria: Their agroecological function and optimistic application

บรรณานุกรม (ต่อ)

- for enhancing agro-productivity. *Science of The Total Environment*, 901, 166468.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166468>
- Clark, G. G., Geisler, D., Coey, E. J., Pollitz, L. J., Zaki, F. R., Huang, C., Boppart, S. A., & Nguyen, T. H. (2024). Influence of phosphate on bacterial release from activated carbon point-of-use filters and on biofilm characteristics. *Science of The Total Environment*, 914, 169932.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169932>
- Dai, H., Tan, X., Zhu, H., Sun, T., & Wang, X. (2018). Effects of Commonly Occurring Metal Ions on Hydroxyapatite Crystallization for Phosphorus Recovery from Wastewater. *Water*, 10(11).
- Dai, L., Tan, F., Li, H., Zhu, N., He, M., Zhu, Q., Hu, G., Wang, L., & Zhao, J. (2017). Calcium-rich biochar from the pyrolysis of crab shell for phosphorus removal. *Journal of Environmental Management*, 198, 70-74.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.057>
- Das, J., Patra, B. S., Baliarsingh, N., & Parida, K. M. (2006). Adsorption of phosphate by layered double hydroxides in aqueous solutions. *Applied Clay Science*, 32(3), 252-260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.02.005>
- Destainville, A., Champion, E., Bernache-Assollant, D., & Laborde, E. (2003). Synthesis, characterization and thermal behavior of apatitic tricalcium phosphate. *Materials Chemistry and Physics*, 80(1), 269-277.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(02\)00466-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0254-0584(02)00466-2)
- Ding, S., Fang, D., Pang, Z., Luo, B., Kuang, L., Wang, H., Zhang, Q., Shen, Q., & Ji, F. (2018). Immobilization of powdery calcium silicate hydrate via PVA covalent cross-linking process for phosphorus removal. *Science of The Total Environment*, 645, 937-945.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.197>
- Dong, H., Lin, T., & SenGupta, A. K. (2020). Field validation of multifunctional ion exchange process for reverse osmosis pretreatment and phosphate recovery

บรรณานุกรม (ต่อ)

- during impaired water reuse. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101347.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101347>
- Du, M., Zhang, Y., Wang, Z., Lv, M., Tang, A., Yu, Y., Qu, X., Chen, Z., Wen, Q., & Li, A. (2022). Insight into the synthesis and adsorption mechanism of adsorbents for efficient phosphate removal: Exploration from synthesis to modification. *Chemical Engineering Journal*, 442, 136147.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136147>
- Esparza-Reynoso, S., Ayala-Rodríguez, J. Á., & López-Bucio, J. (2024). *Pseudomonas putida* configures *Arabidopsis* root architecture through modulating the sensing systems for phosphate and iron acquisition. *Plant Science*, 342, 112028.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2024.112028>
- Fang, D., Huang, L., Fang, Z., Zhang, Q., Shen, Q., Li, Y., Xu, X., & Ji, F. (2018). Evaluation of porous calcium silicate hydrate derived from carbide slag for removing phosphate from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 354, 1-11.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.001>
- Hallegraeff, G. M. (1993). A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*, 32, 79-99.
- Jiwarungrueangkul, T., Kongpuen, O., Sangmanee, C., Yucharoen, M., Tipmanee, D., Phongphattarawat, S., Buapet, P., & Sompongchaiyakul, P. (2024). Weekly variations of nutrients and their associations with phytoplankton blooms in the urban coastal waters of Andaman Sea coast: A case study in Patong Bay, Phuket, Thailand. *Marine Pollution Bulletin*, 198, 115824.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115824>
- Kalaitzidou, K., Zouboulis, A., & Mitakak, M. (2022). Thermodynamic Study of Phosphate Adsorption and Removal from Water Using Iron Oxyhydroxides. *Water*, 14(7).
- Karunakaran, K., Usman, M., & Sillanpää, M. (2022). A Review on Superadsorbents with Adsorption Capacity ≥ 1000 mg g⁻¹ and Perspectives on Their Upscaling for Water/Wastewater Treatment. *Sustainability*, 14(24).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Kumar, A., Mishra, R., Reinwald, Y., & Bhat, S. (2010). Cryogels: Freezing unveiled by thawing. *Materials Today*, 13(11), 42-44.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70202-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70202-9)
- Lee, C. W., Kwon, H.-B., Jeon, H. P., & Koopman, B. L. (2005). Phosphate Recovery from Water as Hydroxyapatite with Activated Oystershell. *Materials Science Forum*, 486-487, 177 - 180.
- Liga, B., & Natalija, B. (2012). Research of Calcium Phosphates Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Book. INTECH Open Access Publisher.
- Lou, X.-Y., Wang, J., Liang, J., Liu, S., Wang, R., Deng, L., Li, D., Hu, X., & Chen, H. (2024). Sequence closed-loop recovery of fluoride, phosphate, and sulfate anions from phosphogypsum leachate via precipitation-electrodialysis-crystallization approaches. *Separation and Purification Technology*, 342, 127014.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127014>
- Lozinsky, V. I. (2018). Cryostructuring of Polymeric Systems. 50.(†) Cryogels and Cryotropic Gel-Formation: Terms and Definitions. *Gels*, 4(3).
<https://doi.org/10.3390/gels4030077>
- Mancino, R., Caccavo, D., Barba, A. A., Lamberti, G., Biasin, A., Cortesi, A., Grassi, G., Grassi, M., & Abrami, M. (2023). Agarose Cryogels: Production Process Modeling and Structural Characterization. *Gels*, 9(9).
- Martins, M. C., Santos, E. B. H., & Marques, C. R. (2017). First study on oyster-shell-based phosphorous removal in saltwater — A proxy to effluent bioremediation of marine aquaculture. *Science of The Total Environment*, 574, 605-615.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.103>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2017). Global Anthropogenic Phosphorus Loads to Freshwater and Associated Grey Water Footprints and Water Pollution Levels: A High-Resolution Global Study. *Water Resources Research*, 54, 345 - 358.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Mezenner, N. Y., & Bensmaili, A. (2009). Kinetics and thermodynamic study of phosphate adsorption on iron hydroxide-eggshell waste. *Chemical Engineering Journal*, 147(2), 87-96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.06.024>
- Mustafa, S., Zaman, M. I., & Khan, S. (2008). Temperature effect on the mechanism of phosphate anions sorption by β -MnO₂. *Chemical Engineering Journal*, 141(1), 51-57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.10.020>
- Ntsondwa, S., Msomi, V., & Basitere, M. (2022). Evaluation of the Adsorptive Process on Adsorbent Surfaces as a Function of Pressure in an Isosteric System Compared with Adsorption Isotherm. *ChemEngineering*, 6(4).
- Privar, Y., Malakhova, I., Pestov, A., Fedorets, A., Azarova, Y., Schwarz, S., & Bratskaya, S. (2018). Polyethyleneimine cryogels for metal ions sorption. *Chemical Engineering Journal*, 334, 1392-1398. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.097>
- Seliem, M. K., Komarneni, S., & Abu Khadra, M. R. (2016). Phosphate removal from solution by composite of MCM-41 silica with rice husk: Kinetic and equilibrium studies. *Microporous and Mesoporous Materials*, 224, 51-57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.11.011>
- Shimizu, K. (2013). 3 - Metabolic regulation by global regulators in response to culture environment. In K. Shimizu (Ed.), *Bacterial Cellular Metabolic Systems* (pp. 95-213). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781908818201.95>
- Simonin, J.-P. (2016). On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 300, 254-263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.079>
- Siva Rama Krishna, D., Siddharthan, A., Seshadri, S. K., & Sampath Kumar, T. S. (2007). A novel route for synthesis of nanocrystalline hydroxyapatite from eggshell waste. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 18(9), 1735-1743. <https://doi.org/10.1007/s10856-007-3069-7>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Su, X. B., & Saiardi, A. (2024). The role of inositol in the environmental organic phosphate cycle. *Current Opinion in Biotechnology*, 90, 103196. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.copbio.2024.103196>
- Suresh Kumar, P., Önnby, L., & Kirsebom, H. (2013). Arsenite adsorption on cryogels embedded with iron-aluminium double hydrous oxides: Possible polishing step for smelting wastewater? *Journal of Hazardous Materials*, 250-251, 469-476. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.02.022>
- Swenson, H., & Stadie, N. P. (2019). Langmuir's Theory of Adsorption: A Centennial Review. *Langmuir*, 35(16), 5409-5426. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00154>
- Taweekarn, T., Wongniramaikul, W., & Choodum, A. (2022). Removal and recovery of phosphate using a novel calcium silicate hydrate composite starch cryogel. *Journal of Environmental Management*, 301, 113923. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113923>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodríguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87, 1051 - 1069.
- Torit, J., & Phihusut, D. (2019). Phosphorus removal from wastewater using eggshell ash. *Environ Sci Pollut Res Int*, 26(33), 34101-34109. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3305-3>
- Usman, M. O., Aturagaba, G., Ntale, M., & Nyakairu, G. W. (2022). A review of adsorption techniques for removal of phosphates from wastewater. *Water Science and Technology*, 86(12), 3113-3132. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.382>
- Walton, C. R. (2025). The nature of the rock record: Through the lens of the rock cycle. In A. Anbar & D. Weis (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (Third edition) (pp. 775-801). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99762-1.00120-0>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Wells, G. D., Selvadurai, H., & Tein, I. (2009). Bioenergetic provision of energy for muscular activity. *Paediatric Respiratory Reviews*, 10(3), 83-90. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prrv.2009.04.005>
- Wongniramaikul, W., Limsakul, W., & Choodum, A. (2018). A biodegradable colorimetric film for rapid low-cost field determination of formaldehyde contamination by digital image colorimetry. *Food Chemistry*, 249, 154-161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.021>
- Xu, K., Deng, T., Liu, J., & Peng, W. (2010). Study on the phosphate removal from aqueous solution using modified fly ash. *Fuel*, 89(12), 3668-3674. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.034>
- Xu, M.-J., Cui, Y.-W., Huang, M.-Q., & Sui, Y. (2024). Simultaneous inorganic nitrogen and phosphate removal by aerobic-heterotrophic fungus *Fusarium keratoplasticum* FSP1: Performance, pathway and application. *Bioresource Technology*, 393, 130141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130141>
- Yeom, S. H., & Jung, K.-Y. (2009). Recycling wasted scallop shell as an adsorbent for the removal of phosphate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 15(1), 40-44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jiec.2008.08.014>
- Yuangswad, R., & Na, D. (2011). Recycling oyster shell as adsorbent for phosphate removal.
- Zhang, Z., Wang, X., & Zhao, J. (2019). Phosphate recovery from wastewater using calcium silicate hydrate (C-S-H): sonochemical synthesis and properties [10.1039/C8EW00643A]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 5(1), 131-139. <https://doi.org/10.1039/C8EW00643A>
- Zhao, M., Zhong, S., Zhou, X., & Yu, Z. (2024). Biochar derived from animal and plant facilitates synergistic transformation of heavy metals and phosphorus in sewage sludge composting. *Environmental Pollution*, 357, 124396. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124396>

บรรณานุกรม (ต่อ)

Zheng, C., Zhang, J., Ni, M., & Pan, Y. (2024). Phosphate recovery from urban sewage by the biofilm sequencing batch reactor process: Key factors in biofilm formation and related mechanisms. *Environmental Research*, 252, 118985. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118985>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายสlobดี วรรณาคูณ

รหัสประจำตัวนักศึกษา 6330221002

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการ สิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต	2562

ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2563

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Satabodee Kaewnoo ^a, Worawit Wongniramaikul ^a, Chanita Boonkanon ^a, Tarawee Taweekarn ^a, Bussakorn Kleangklaio ^a, Somsak Limwongsakorn ^b, Chanadda Phawachalotorn ^c, Diana S. Aga ^d, Aree Choodum ^a, *. (2024). “Effective recovery of phosphate from wastewater using biodegradable calcium-rich shell wastes composite macroporous cryogel.”, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 691 (2024) 133857.

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ตัวแทนประกันชีวิต บริษัท เอไอเอ จำกัด