

ประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย
ถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก

ADSORPTION EFFICIENCY OF PHOSPHATE FROM
SYNTHETIC WASTEWATER USING ACTIVATED CARBON
FROM BETEL NUT BARK



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2565 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADSORPTION EFFICIENCY OF PHOSPHATE FROM
SYNTHETIC WASTEWATER USING ACTIVATED CARBON
FROM BETEL NUT BARK



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2022
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์
จากเปลือกหมาก
Adsorption Efficiency of Phosphate from Synthetic
Wastewater using Activated Carbon from Betel Nut Bark

ชื่อนักศึกษา นางสาว ไฉยยิกา เทพวงศ์ รหัสนักศึกษา 62050382
นางสาว วริศรา ศรีเดช รหัสนักศึกษา 62050442
นางสาว ศิริรัตน์ เกาะกลาง รหัสนักศึกษา 62050451



ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สุวรรณีย์ จรรยาพูน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
รศ.ดร. สุวรรณีย์ จรรยาพูน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก
ชื่อนักศึกษา	นางสาวไฉยิกา เทพวงศ์ รหัสนักศึกษา 62050382 นางสาววิศรา ศรีเดช รหัสนักศึกษา 62050442 นางสาวศิริรัตน์ เกาะกลาง รหัสนักศึกษา 62050451
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก โดยเผาเปลือกหมากในเตาถ่านในสภาวะอับอากาศ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นำถ่านที่ได้ไปแช่ในแมกนีเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปั่นกวนความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แช่โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วแช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาที่สภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ล้างด้วยน้ำกลั่นจนพีเอชเป็นกลาง จากนั้น วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ, คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตด้วยถ่านกัมมันต์โดยปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที แปรค่าระยะเวลา (30, 60, 90, 120 นาที) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (3, 5, 7, 9, 11) ความเข้มข้นฟอสเฟตในน้ำเสีย (5, 10, 15, 30, 60 มิลลิกรัมต่อลิตร) และปริมาณถ่านที่ใช้ (0.5, 1, 3, 5 กรัม) ศึกษาไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ จากผลการศึกษาพบว่า ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ก่อนทำการดูดซับด้วย SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ มีองค์ประกอบธาตุของ C, Mg, K เป็นองค์ประกอบหลัก โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์หลังการดูดซับ พบพีคของหมู่ฟอสเฟต (PO_4^{3-}), P-O และ O-P-O สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตของถ่านกัมมันต์คือ เวลาสัมผัส 60 นาที ค่า pH 3 ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านที่ใช้ 1 กรัม สามารถดูดซับฟอสเฟตได้ 90.53 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับแบบฟรุนดลิช ($R^2 = 0.9953$) และแบบแลงเมียร์ ($R^2 = 0.9288$) และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับ

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ($R^2 = 0.9988$) และค่า $q_e = 0.1647$

เอกสารนี้เขียนขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยในโครงการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

คำสำคัญ : ถ่านกัมมันต์, การดูดซับ, น้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต, เปลือกหมาก

Title	Adsorption Efficiency of Phosphate from Synthetic Wastewater using Activated Carbon from Betel Nut Bark
Students	Miss Yaiyika Thepwong Student ID 62050382 Miss Warissara Sridej Student ID 62050442 Miss Sirirat Koklang Student ID 62050451
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
School	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2022
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon

Abstract

This special project studied adsorption efficiency of phosphate in synthetic wastewater using activated carbon from betel nut bark. Betel nut bark was burnt in a charcoal incinerator under confined air condition at 400°C. The obtained charcoal was immersed in 1 M magnesium chloride and stirred at 250 rpm for 6 hrs, followed by impregnated in 5 M potassium hydroxide and at 250 rpm stirred for 6 hrs, and then soaked for 24 hrs. After soaking, the prepared charcoal was incinerated in a furnace at 600°C under absence of oxygen. Then, the activated charcoal was rinsed with distilled water several times until reaching neutral pH. The morphology of the prepared activated carbon was investigated using a Scanning Electron Microscopy- Energy-Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS). Physical and chemical properties were analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). Optimum conditions for phosphate adsorption in synthetic wastewater under agitating speed of 250 rpm were investigated by varying contact time (30, 60, 90, 120 min), pH value (3, 5, 7, 9, 11), phosphate concentration (5, 10, 15, 30, 60 mg/L) and amount of activated carbon (0.5, 1, 3, 5 g). Adsorption isotherms and kinetics of phosphate in synthetic wastewater were also studied. The experimental results showed that morphology of the activated carbon at 1,000x magnification has large pore sizes. C, Mg, K were the main elements. Chemical structure of activated carbon after adsorption found PO_4^{3-} , P-O and O-P-O peaks. The optimum conditions of phosphate adsorption by activated carbon were contact time

60 mins, pH 3, 10 mg/l of phosphate concentration and 1 g of activated carbon. Under these conditions, the adsorption efficiency of phosphate was 90.53 percent. The adsorption isotherm was best fitted with the Freundlich ($R^2 = 0.9953$) and Langmuir equations ($R^2 = 0.9288$). The chemical kinetics study was consistent with the pseudo second-order reaction ($R^2 = 0.9988$) and $q_e = 0.1647$.

Keywords: Activated carbon, Adsorption, Phosphate synthetic wastewater, Betel nut bark



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีความกรุณาจาก รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆในการดำเนินงานโครงการพิเศษ

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และ ผศ.ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรรมการโครงการพิเศษ ที่ได้ช่วยตรวจสอบ ตรวจสอบ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอกราบขอบคุณพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ศูนย์บริการเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมวัสดุ และศูนย์บริการเครื่องมือกลาง วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการตรวจสอบองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (Scanning Electron Microscopy- Energy-Dispersive Spectroscopy, SEM-EDS).

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ รุ่นพี่และเพื่อนๆ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำปรึกษาและกำลังใจในการทำโครงพิเศษตลอดระยะเวลาการดำเนินการ

ไฉยิกา เทพวงศ์
วริศรา ศรีเดช
ศิริรัตน์ เกาะกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 น้ำเสียและแหล่งกำเนิดน้ำเสีย	3
2.2 ฟอสฟอรัส	5
2.2.1 วัฏจักรฟอสฟอรัส	6
2.2.2 ปฏิกิริยาการเกิดยูโทรฟิเคชัน	6
2.3 หมาก	8
2.4 ไบโอบีโอส	11
2.4.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบ	12
2.5 ถ่านกัมมันต์	13
2.6 กระบวนการดูดซับ	17
2.6.1 ประเภทของการดูดซับ	17
2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	18
2.6.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	19
2.6.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	26
3.1 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	26
3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	26
3.1.3 วัสดุดูดซับ	27
3.2 วิธีทดลอง	28
3.2.1 การเตรียมตัววัสดุดูดซับถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก	28
3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต	29
3.2.3 วิเคราะห์หาคุณลักษณะทางการภาพและเคมีของตัวดูดซับ	29
3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์	30
3.2.4.1 ศึกษาระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม	30
3.2.4.2 ศึกษาความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสม	30
3.2.4.3 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นในการดูดซับที่เหมาะสม	31
3.2.4.4 ศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม	31
3.2.4.5 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์	32
3.2.4.6 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์	33
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	35
4.1 ผลวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์	35
4.1.1 ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมี	35
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา	40
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์	42
4.2.1 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสม	42
4.2.2 ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสม.....	43
4.2.3 ผลของความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม	44
4.2.4 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่เหมาะสม	45
4.2.5 ผลของการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟต	46
4.2.6 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับฟอสเฟต	48
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุปผลการวิจัย	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณน้ำเสียจากอาคารประเภทต่างๆ	4
2.2 ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน	12
2.3 คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ	13
3.1 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ	29
4.1 ความชื้นของเปลือกหมาก เปอร์เซ็นต์การผลิตไบโอชาร์ เปอร์เซ็นต์การผลิตถ่านกัมมันต์	35
4.2 วิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของเปลือกหมากและถ่านกัมมันต์	39
4.3 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของถ่านกัมมันต์	40
4.4 ค่าคงที่จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช	47
4.5 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียม	49
ก-1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต	59
ก-3.1 ผลการทดลองระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม	61
ก-3.2 ผลการทดลองความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับที่เหมาะสม	61
ก-3.3 ผลการทดลองความเข้มข้นในการดูดซับที่เหมาะสม	62
ก-3.4 ผลการทดลองปริมาณในการดูดซับที่เหมาะสม	62
ก-3.5 ผลการทดลองไอโซเทอร์มในการดูดซับที่เหมาะสม	62
ก-3.6 ผลการทดลองจลนพลศาสตร์ในการดูดซับที่เหมาะสม	63
ข-1.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab	64
ข-1.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าเฉลี่ยการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ.....	64
ข-1.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ.....	65
ข-2.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab	65
ข-2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในสภาวะที่ 3, 5, 7, 9 และ 11 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	66
ข-2.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในสภาวะที่ 3, 5, 7, 9 และ 11	66
ข-3.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab	67
ข-3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปริมาณความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10, 15, 30 และ 60 มิลลิกรัม ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-3.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปริมาณ ความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ 5, 10, 15, 30 และ 60 มิลลิกรัม	68
ข-4.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab	68
ข-4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปริมาณถ่านกัมมันต์ จากเปลือกหมากที่ 0.5, 1, 3 และ 5 กรัม ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์.....	69
ข-4.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกที่ 0.5, 1, 3 และ 5 กรัม	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ต้นหมาก	9
2.2 ใบหมาก	9
2.3 ดอกหมาก (จั่นหมาก).....	10
2.4 ผลหมาก	11
2.5 ลำดับการผลิตคาร์บอนกัมมันต์	15
2.6 Langmuir isotherm	20
2.7 Freundlich adsorption isotherm	21
3.1 เปลือกหมากผ่านการอบแห้ง	27
4.1 โครงสร้างทางเคมีของเปลือกหมาก (ก) และถ่านกัมมันต์ (ข) เลขคลื่นที่ $4,000-400\text{ cm}^{-1}$	36
4.2 เปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์ก่อน-หลังการดูดซับ.....	38
4.3 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 500 เท่า (ค) กำลังขยาย 500 เท่า	40
4.4 ลักษณะสัญญาณของพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (ก) และองค์ประกอบธาตุของถ่านกัมมันต์ (ข) วิเคราะห์ด้วย SEM-EDS	42
4.5 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์	43
4.6 ค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์	44
4.7 ความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตที่เหมาะสมในการดูดซับ	45
4.8 ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์	46
4.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดิช	46
4.10 จลนพลศาสตร์การดูดซับทางเคมี (ก) Pseudo-first order reaction (ข) Pseudo-second order reaction	48
ก-2 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ กับค่าการดูดกลืนแสง	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
FTIR	Fourier transform infrared
BET	Brunauer Emmett Teller
SEM	Scanning Electron Microscopy
EDX	Energy Dispersive X-ray



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

บ้านเรือนหรือที่พักอาศัย ถือเป็นแหล่งระบายน้ำเสียที่สำคัญประเภทหนึ่ง ซึ่งน้ำเสียเกิดจากกิจกรรมต่างๆภายในครัวเรือน น้ำเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือภาคการเกษตรร่วมด้วย หากไม่มีระบบการจัดการน้ำที่ดีและมีการบำบัดน้ำเสียก่อนระบายออกสู่แหล่งน้ำหรือสิ่งแวดล้อม อาจส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำได้

ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P) เป็นแหล่งอาหารของพืชหลายชนิดตามธรรมชาติ โดยเฉพาะสำหรับราย และแพลงก์ตอนพืช ส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะการใช้ผงซักฟอกในชีวิตประจำวัน เนื่องจากผงซักฟอกมีส่วนประกอบของฟอสเฟตในรูปเกลือฟอสเฟต (Phosphate, PO_4^{3-}) เมื่อมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านการบำบัด ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของพืชน้ำมากเกินไปก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการบำบัดฟอสเฟตก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ วิธีที่ใช้ในการบำบัดฟอสเฟตในน้ำโดยทั่วไป ได้แก่ กระบวนการทางเคมี กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางชีวภาพ หรือการผสมผสานระหว่างกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการดูดซับ เป็นต้น ดังนั้นกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวิธีบำบัดวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ทั่วไป เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย มีประสิทธิภาพสูงและมีราคาถูก

เปลือกหมากเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อยู่สูง จึงเหมาะที่จะนำไปแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ชีวภาพ เมื่อนำถ่านไปกระตุ้นด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวดูดซับ และทำให้พื้นผิวมีประจุบวกส่งผลให้ฟอสเฟตซึ่งเป็นประจุลบยึดติดกับประจุบวกของพื้นผิวถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก โดยใช้แมกนีเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นในการแปรรูปถ่านกัมมันต์ และได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ระยะเวลา ค่าพีเอช ความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับที่เหมาะสม รวมทั้งศึกษาไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์การดูดซับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณี 2. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก โดยผ่านการกระตุ้นด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ 1 โมลาร์ ปั่นกวนเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ ปั่นกวนเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และแช่ค้างคืนไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาในสภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

2. ศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ศึกษาการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของวัสดุดูดซับ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) และการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope - Energy-Dispersive Spectroscopy, SEM-EDS.)

3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัส (30, 60, 90, 120 นาที) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) (3, 5, 7, 9, 11) ปริมาณความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต (5, 10, 15, 30, 60 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (0.5, 1, 3, 5 กรัม)

4. ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก โดยใช้สมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm)

5. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับน้ำฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก โดยใช้ สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order, PFO) และอันดับสองเทียม (Pseudo-second order, PSO)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพและราคาถูก
2. เป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียและแหล่งกำเนิดน้ำเสีย

น้ำเสีย คือ น้ำที่มีสารที่ไม่พึงปรารถนาหรือสิ่งปนเปื้อนอยู่ การปะปนของสิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพของน้ำ สิ่งที่ปลอมปนในน้ำ ได้แก่ สารอินทรีย์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส สบู่ สารฆ่าแมลง สารที่ทำให้เน่าเหม็นและเชื้อโรคต่างๆ ถ้ามีจำนวนมากธรรมชาติก็ไม่สามารถปรับตัวให้ดีขึ้นได้ จึงทำให้น้ำเน่าเสีย นอกจากนี้ มูลฝอยสิ่งปนเปื้อนที่ทิ้งลงสู่แม่น้ำลำคลอง และสารเคมีที่ใช้ในการเกษตรกรรม จะถูกฝนชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ ก็จะทำให้เน่าเสียได้เช่นกัน (สิริลักษณ์ และคณะ, 2561., อรอนงค์, 2560.)

น้ำเสีย ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 หมายถึง ของเสียที่อยู่ในสภาพของเหลวรวมทั้งมลสารที่ปะปนและปนเปื้อนอยู่ในของเหลวเหล่านั้น แหล่งกำเนิดมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

1. แหล่งที่มีจุดกำเนิดแน่นอน (Point sources) ได้แก่ แหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

2. แหล่งที่มีจุดกำเนิดไม่แน่นอน (Non-point sources) ได้แก่ การเกษตร เป็นต้น
สิ่งแปลกปลอมในน้ำ แบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. สารอินทรีย์ ในน้ำทั้งจากชุมชนจะมีสารอินทรีย์พวกเศษอาหาร ไนโตรเจน รวมถึงสิ่งโสโครก จากครัวเรือน ซึ่งอาจมีจุลินทรีย์ก่อโรคปะปนมา บางชนิดอยู่ในรูปสารแขวนลอย เช่น น้ำมันซึ่งจะกั้นไม่ให้แสงแดดผ่านลงสู่ผิวน้ำ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ จำเป็นต้องใช้จุลินทรีย์และออกซิเจน ถ้าแหล่งน้ำมีสารอินทรีย์มาก จะทำให้ออกซิเจนในน้ำหมดไป เป็นเหตุให้น้ำมีกลิ่นเน่าเหม็น และยังเป็นอันตรายต่อพืชและสัตว์ในแหล่งน้ำอีกด้วย

2. สารอนินทรีย์และของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้น้ำกระด้าง สารเคมีบางตัว เช่น ไนเตรท ฟอสเฟต ทำให้สาหร่ายในน้ำเจริญเติบโต นอกจากนี้ ยังรวมถึงสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรด-ด่าง สารพิษ สารกัมมันตรังสี และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสารเหล่านี้เป็นอันตรายต่อคนและสัตว์น้ำ

แหล่งกำเนิดมลพิษของน้ำ แบ่งออกใหญ่ๆ ดังนี้

1. น้ำเสียจากชุมชน ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน น้ำเสียนี้มีสกปรกในรูปของสารอินทรีย์สูง น้ำเสียที่มาจากแหล่งชุมชนประกอบด้วยสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดฟอง เป็นภาพที่ไม่น่าชม สารบางอย่างที่ปะปนอยู่ยังเป็นอันตรายต่อร่างกาย เชื้อจุลินทรีย์ที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย ทำให้ผู้ใช้รับเอาจุลินทรีย์เข้าสู่ร่างกาย ก่อให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นหากมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้

มาก เนื่องจากไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แม่น้ำ ยังขาดการดูแลจัดการและควบคุมทั้งในแง่ของการสาธารณสุขโรค ภาวะเปื้อน และองค์กรผู้รับผิดชอบ ปริมาณน้ำเสียจากอาคารประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณน้ำเสียจากอาคารประเภทต่างๆ

ปริมาณน้ำเสียจากอาคารประเภทต่างๆ		
ประเภทอาคาร	หน่วย	ลิตร/วัน-หน่วย
อาคารชุด/บ้านพัก	ยูนิต	500
โรงแรม	ห้อง	1000
หอพัก	ห้อง	80
สถานบริการ	ห้อง	400
หมู่บ้านจัดสรร	คน	180
โรงพยาบาล	เตียง	800
ภัตตาคาร	ตารางเมตร	25
ตลาด	ตารางเมตร	70
ห้างสรรพสินค้า	ตารางเมตร	5.0
สำนักงาน	ตารางเมตร	3.0

ที่มา : สมาคมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (2536)

2. น้ำเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการอุตสาหกรรม ตั้งแต่ขั้นตอนการล้างวัตถุดิบ กระบวนการผลิตจนถึงการทำความสะอาดโรงงาน รวมทั้งน้ำเสียที่ยังไม่ได้รับการบำบัดหรือน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว แต่ยังไม่เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม องค์ประกอบของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำทิ้งประเภทและขนาดของโรงงาน นอกจากนี้ น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมยังมีอุณหภูมิสูงและถ้ามีปริมาณมากจะทำให้เกิดการแบ่งชั้นขึ้นระหว่างน้ำร้อนและน้ำเย็น น้ำร้อนเบาว่าจะลอยอยู่บนและมีปริมาณออกซิเจนน้อยกว่าน้ำเย็น ซึ่งจะทำให้กระทบกระเทือนต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ และคุณค่าในการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ก็ลดลงด้วย

3. น้ำเสียจากเกษตรกรรม ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมทางการเพาะปลูก การเลี้ยงสัตว์ น้ำเสียจากการเพาะปลูกจะมีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม และสารพิษต่าง ๆ ในปริมาณสูง ส่วนน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์ จะพบสิ่งสกปรกในรูปของสารอินทรีย์เป็นส่วนมาก และน้ำทิ้งที่มาจากการทำเกษตรกรรม ประกอบด้วยปุ๋ยส่วนเกินและสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ ซึ่งมีฤทธิ์

เอกสารนี้ตั้งค้ำอยู่ในแหล่งน้ำ ก่อให้เกิดความสกปรกในแหล่งน้ำ เป็นอันตรายต่อคนและสัตว์ที่ใช้น้ำ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ การใช้ปุ๋ยทางวิทยาศาสตร์ยังทำให้พืชน้ำ เช่น สาหร่าย ผักตบชวา เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุนำไปสู่ปัญหาการตื่นเงิน และเน่าเสียของน้ำเมื่อพืชน้ำตายลง กิจกรรมปศุสัตว์ เช่น ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ปีกและสุกร ตลอดจนการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำยังมีส่วนทำให้เกิดน้ำเน่าเสีย โดยการระบายน้ำที่ออกมาสู่แหล่งน้ำในบริเวณใกล้เคียง

2.2 ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P)

ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) มีส่วนสำคัญต่อจุดเริ่มต้นของสายใยอาหาร ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเจริญของผู้ผลิต คือ พืชต่างๆ ซึ่งฟอสฟอรัสเป็นแหล่งอาหารของพืชน้ำหลายชนิดตามธรรมชาติ โดยเฉพาะสาหร่าย และแพลงก์ตอนพืช แม้ว่าฟอสฟอรัสจะเป็นแหล่งอาหารของพืชน้ำ แต่การเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่มากเกินไปลงสู่แหล่งน้ำ ส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะการใช้ผงซักฟอกในชีวิตประจำวัน เป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งของการเกิดน้ำเน่าเสีย ผงซักฟอกมีส่วนประกอบของฟอสเฟตในรูปเกลือฟอสเฟต (Phosphate, PO_4^{3-}) ทำให้สมดุลในวัฏจักรของฟอสฟอรัสเปลี่ยนไป โดยฟอสฟอรัสมักจะพบได้ใน หิน ดิน แหล่งน้ำ น้ำเสีย และสิ่งมีชีวิต (ซีระวิทย์, 2548.)

- ฟอสฟอรัสในแหล่งดิน

ฟอสฟอรัสในหิน หรือที่เรียกว่า หินฟอสเฟต ถือเป็นแหล่งฟอสฟอรัสปฐมภูมิที่เป็นจุดเริ่มต้นของวัฏจักรฟอสฟอรัส เพราะฟอสฟอรัสที่คงสถานะอยู่บนโลกส่วนใหญ่มาจากแหล่งของหินเป็นหลัก ก่อนที่จะมีการแตกย่อย และปลดปล่อยเป็นฟอสฟอรัสในดิน น้ำ และในพืช และสัตว์ต่อไป

- ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ และน้ำเสีย

ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำธรรมชาติ และแหล่งน้ำเสีย สามารถพบได้ในรูปของแข็งหรือสารแขวนลอย และสารละลาย แบ่งเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. ออโรฟอสเฟต (Orthophosphate) หรือฟอสฟอรัสละลายน้ำ (Soluble reactive phosphorus) เป็นสารประกอบฟอสฟอรัสที่ละลายได้ดีน้ำ จัดเป็นแหล่งฟอสฟอรัสที่มีความสำคัญต่อแพลงก์ตอนพืชสำหรับนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต ได้แก่ Trisodium phosphate (Na_3PO_4), Disodium phosphate (Na_2HPO_4), Monosodium phosphate (NaH_2PO_4), Diammonium phosphate ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$)

2. โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) เป็นสารประกอบฟอสฟอรัสที่พบมากในแหล่งน้ำเสีย ที่มาจากส่วนผสมของสารซักล้าง และทำความสะอาดต่างๆ ทั้งจากครัวเรือน และภาคโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อแตกตัวจะได้สารออโรฟอสเฟตออก ได้แก่ Sodium hexametaphosphate ($\text{Na}_3(\text{PO}_4)_6$), Sodium triphosphate ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$), Tetrasodium pyrophosphate ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$), สารออโรฟอสเฟต (Orthophosphate) ถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolysis) ในน้ำ จะได้สารกลับไปเป็นออโร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphate) เป็นสารประกอบชีวภาพที่ได้จากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุทั้งในพืช และในสัตว์ ได้แก่ Nucleic acid, Phospholipids, Sugar phosphate

ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปต่างๆในแหล่งน้ำธรรมชาติ และแหล่งน้ำเสียจะถูกแพลงก์ตอนพืชนำไปใช้สำหรับกระบวนการเจริญเติบโต และการแพร่จำนวน ซึ่งมักพบปรากฏการณ์ที่เกิดจากปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำมากเกินไปที่ เรียกว่า “ยูโทรฟิเคชัน”

- ฟอสฟอรัสในสิ่งมีชีวิต

ฟอสฟอรัสในพืชพบเป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อในราก ลำต้น ดอก และผล โดยทำหน้าที่สำคัญ คือ ช่วยเร่งและส่งเสริมการเจริญเติบโตของรากแก้ว รากแขนง และรากฝอย ช่วยให้รากดูดซึมน้ำ และแร่ธาตุๆได้ดีขึ้น รวมถึงช่วยกระตุ้นการออกดอก และการเติบโตของผล และเมล็ด

ฟอสฟอรัสที่พบในร่างกายสัตว์ และมนุษย์จะพบมากเป็นส่วนประกอบของกระดูก และฟัน ซึ่งจะอยู่ในรูปของเกลืออนินทรีย์ฟอสฟอรัสเป็นส่วนใหญ่ รองลงมาจะพบในรูปของสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ ฟอสโฟโปรตีน กรดนิวคลีอิก ฟอสโฟลิปิด และเฮกโซสฟอสเฟต ในเนื้อเยื่อต่างๆของร่างกาย

2.2.1 วัฏจักรฟอสฟอรัส (Phosphorus Cycle)

คือ วัฏจักรทางชีวธรณีเคมี อธิบายถึงการแปลงสภาพของธาตุฟอสฟอรัสและสารประกอบที่มีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบในธรรมชาติ โดยกระบวนการที่ฟอสฟอรัสถูกหมุนเวียนจากดินสู่ทะเล และจากทะเลสู่ดิน เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการการตกตะกอน ฟอสฟอรัสนำมาใช้หมุนเวียนระหว่างสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต ลักษณะการตกตะกอนของสารอินทรีย์ไปสู่พื้นน้ำ เช่น ทะเล แหล่งน้ำต่างๆ ส่วนหนึ่งของฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต รวมทั้งโครงกระดูก เปลือกหอย ซากปะการังใต้ทะเล มหาสมุทร และโพทิสต์ในทะเล ที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ สามารถนำสารประกอบฟอสเฟตเหล่านี้ไปใช้ได้ ซึ่งทำให้มีปริมาณแพลงก์ตอนพืชเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อแพลงก์ตอนพืชเหล่านี้ถูกกินโดยแพลงก์ตอนสัตว์ และสัตว์อื่นๆ ต่างกินกันต่อไปตามห่วงโซ่อาหาร ฟอสฟอรัสจะถูกถ่ายทอดไปตามลำดับชั้นเช่นเดียวกัน จนกระทั่งในที่สุดสิ่งมีชีวิตต่างๆ เหล่านี้ตายหรือขับถ่ายลงน้ำ จะมีจุลินทรีย์บางพวกเปลี่ยนฟอสฟอรัสให้เป็นสารประกอบฟอสเฟตอยู่ในน้ำอีกครั้ง (พจนาน, 2563)

2.2.2 ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)

ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) หรือสาหร่ายสะพรั่ง คือ มลภาวะจากธาตุอาหารพืช (Nutrient pollution) ที่เกิดขึ้นจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายในแหล่งน้ำจืดต่าง ๆ เช่น ในแม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง ทะเลสาบ หรือในอ่างเก็บน้ำ รวมถึงตามน่านน้ำและริมชายฝั่งทะเล ปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่งนับเป็นอีกหนึ่งปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำต่างๆ ทั่วโลก ในธรรมชาติการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของ

สาหร่าย หรือการสะพรั่ง (Bloom) ของแพลงก์ตอนพืชในแหล่งน้ำ คือ หนึ่งในปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงแทนที่ทางระบบนิเวศ (Ecological succession) ใช้เวลาหลายสิบปีถึงหลายร้อยปีในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ของแหล่งน้ำ แต่ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา กิจกรรมของมนุษย์กลายเป็นปัจจัยสำคัญที่เร่งให้ปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่งในแหล่งน้ำทั่วโลกเกิดขึ้นบ่อยครั้ง และทวีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ (วารสาร, 2565)

สาเหตุของปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่ง เกิดจากมลภาวะจากธาตุอาหารพืช เนื่องจากมีธาตุอาหารหลักในแหล่งน้ำมากเกินไป โดยเฉพาะสารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen) และฟอสฟอรัส (Phosphorus) ส่งผลให้สาหร่ายและแพลงก์ตอนพืชในแหล่งน้ำเจริญเติบโตและแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว เพราะไนโตรเจนมีส่วนสำคัญต่อการสร้างโปรตีนกรดนิวคลีอิก และฟอสฟอรัสที่เป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิกและสารประกอบต่าง ๆ ภายในเซลล์ของพืช นอกจากนี้ ในธรรมชาติ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสต่างก็เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นในธรรมชาติ แต่มีปริมาณที่ต่ำมาก หากเปรียบเทียบกับปริมาณที่สิ่งมีชีวิตต้องการ และส่วนใหญ่ธาตุทั้งสองนี้ยังอยู่ในรูปของสารประกอบที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง ดังนั้นจึงจำกัดความได้ว่าปริมาณของธาตุอาหารเหล่านี้กลายเป็นปัจจัยจำกัด (Limiting factors) ต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตกลุ่มออโตโทรป (Autotrophs) หรือกลุ่มแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายต่าง ๆ ซึ่งเป็นผู้ผลิตเบื้องต้นของระบบนิเวศแหล่งน้ำ

ถึงแม้ว่าไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักของบรรยากาศโลก แต่มีสิ่งมีชีวิตเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่สามารถตรึงไนโตรเจนในอากาศ และนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยตรง ดังนั้น สิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่จึงจำเป็นต้องแสวงหาไนโตรเจนจากแหล่งอาหารอื่น เช่น จากการบริโภคสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นหรือจากสภาพแวดล้อมที่แตกต่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จากภาวะการปนเปื้อนของสารประกอบเหล่านี้ในธรรมชาติที่เป็นผลมาจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น

1. การใช้ปุ๋ยเคมีในภาคการเกษตร มีส่วนผสมของสารประกอบไนโตรเจน เช่น ไนเตรท ไนไตรท์ และแอมโมเนียม ที่ทำให้เกิดการสะสมของธาตุอาหารในดินปริมาณสูง และเมื่อเกิดฝนตกหรือการไหลบ่าของน้ำ (Surface Runoff) สารประกอบเหล่านี้ จึงถูกพัดพาลงสู่แม่น้ำ ลำคลอง รวมไปถึงแหล่งน้ำใต้ดินในธรรมชาติ

2. น้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน มีทั้งสารประกอบฟอสฟอรัส เช่น กลุ่มฟอสเฟตและโพลีฟอสเฟต และสารประกอบไนโตรเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศกำลังพัฒนาที่มีการลักลอบปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติรวม ถึงการทิ้งน้ำเสียจากครัวเรือน โดยปราศจากการบำบัด

3. การเติบโตและการขยายตัวของประชากรโลก ความต้องการบริโภคของประชากรที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อการผลิตสินค้าและสารเคมีต่าง ๆ มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะสารซักฟอกและผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดบ้านเรือน ซึ่งเพิ่มอัตราการปนเปื้อนของสารประกอบเหล่านี้ในธรรมชาติมากกว่าเดิม 2 ถึง 3 เท่า ส่งผลทำให้แหล่งน้ำในหลายทวีปทั่วโลกยากต่อการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ อธิการบดีเป็นผู้พิมพ์และจัดพิมพ์ขึ้นเพื่อเป็นเอกสารอ้างอิงเท่านั้น ไม่มีการเผยแพร่ ห้ามนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ผลกระทบจากปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) หรือ สาหร่ายสะพรั่ง

1. แหล่งน้ำเกิดภาวะขาดออกซิเจน ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) หรือ สาหร่ายสะพรั่ง ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำตายลง ซากพืชและสาหร่าย จะจมลงสู่ท้องน้ำหรือก้นสมุทร แบคทีเรียจะทำการย่อยสลายซากพืชเหล่านี้ โดยการดึงออกซิเจนจาก แหล่งน้ำมาใช้ในปริมาณมาก ทำให้แหล่งน้ำเกิดภาวะขาดออกซิเจน และเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า เขตมรณะ (Dead zone) หรือบริเวณพื้นที่ในมหาสมุทรหรือแหล่งน้ำที่มีปริมาณของออกซิเจนต่ำมาก ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวกลายเป็นเขตขาดออกซิเจนจนกระทั่งสิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำรงอาศัยอยู่ได้

2. เกิดกระแสน้ำแดง (Red tide) หรือซีปลาวาฬ เกิดจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของ จุลินทรีย์หรือแพลงก์ตอนบางชนิดที่ทำให้สีของน้ำในทะเล และทะเลสาบเปลี่ยนไป ความแปรปรวนที่ เกิดขึ้นต่อระบบนิเวศและคุณสมบัติทางเคมีของแหล่งน้ำ เช่น การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในช่วง กลางวันและกลางคืน ปริมาณของตะกอน ความขุ่นของน้ำ และปริมาณของสารประกอบต่าง ๆ ในน้ำ ที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตมากมายหลายชนิด

3. สุขภาพของมนุษย์ การเกิดโรคหรือความเจ็บป่วยจากการมีน้ำเป็นแหล่งสื่อการ แพร่กระจาย (Water-borne disease) และการบริโภคอาหารทะเลปนเปื้อน

4. เศรษฐกิจและการท่องเที่ยว ได้รับผลกระทบโดยตรงจากการเน่าเสียของน้ำ การลดลงของ จำนวนสัตว์น้ำ และการเพิ่มขึ้น ของเขตมรณะ

2.3 หมาก (Betel Nuts) (เมดไทย, 2563.)

ชื่อสามัญ : Areca nut, Areca nut palm, Areca palm, Betel nut palm, Betel Nuts

ชื่อวิทยาศาสตร์ : Areca catechu L. จัดอยู่ในวงศ์ปาล์ม (ARECACEAE) ซึ่งแต่เดิมใช้ชื่อวงศ์ ว่า Palmae หรือ Palmaceae

ชื่อท้องถิ่น : หมากเมีย (ทั่วไป), หมากสง (ภาคใต้), แซ (กะเหรี่ยง-แม่ฮ่องสอน), สีชะ (กะเหรี่ยง-ภาคเหนือ), มะ (ช่อง-ตราด), เขียด (ชาวนน-นครราชสีมา), ปี่แฉ (มลายู-ภาคใต้), ปิงน้อ (จีน แต่จิว), ปิงกลาง (จีนกลาง)

ลักษณะของต้นหมาก แบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่

1. ต้นหมาก มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปเอเชียเขตร้อน จัดเป็นไม้ยืนต้นจำพวกปาล์ม ลักษณะเป็น ไม้ยืนต้นมีลำต้นเดี่ยวไม่แตกกอ เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ไม่มีรากแก้ว อาศัยรากฝอยกระจายรอบโคน ความสูงของต้นประมาณ 10-15 เมตร ลำต้นตั้งตรง เป็นต้นเดี่ยวไม่แตกกิ่งก้าน ลักษณะของลำต้นเป็น รูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8-12 เซนติเมตร เปลือกลำต้นเป็นรอยขั้วรอบๆ ขึ้นไป ตลอดลำต้น (รูปที่ 2.1) ในระยะแรกจะเจริญเติบโตด้านกว้างและด้านสูง แต่หลังจากหยุดการ

เจริญเติบโตจะเจริญเติบโตด้านความสูงแทน ต้นหมากมีตายอดส่วนปลายสุดของลำต้น ถ้ายอดตาย หมากจะตาย ตายอดจะเป็นที่เกิดของใบหลังจากใบร่วงหล่นจะทิ้งรอยติดของใบไว้ เรียกว่า “ข้อ” ข้อ

ของต้นหมากสามารถคำนวณหาอายุหมากได้ 1 ปี โดยหมากจะมีใบหรือข้อเพิ่มขึ้น 5 ใบ หรือ 5 ข้อ ต้นหมากจะมีเนื้อเป็นเส้นยาวจับตัวกันแน่นบริเวณเปลือกนอกลึกเข้าไปประมาณ 2 เซนติเมตร แต่ส่วนกลางของลำต้นเป็นเส้นไม่อัดแน่น และมีเนื้อไม้อ่อนนุ่มคล้ายกับฟองน้ำ จึงทำให้ต้นหมากเหนียวและสามารถโยกเอนได้มาก ขยายพันธุ์ด้วยวิธีการเพาะเมล็ด เจริญเติบโตได้ดีที่ระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงกว่า 700 เมตร



รูปที่ 2.1 ต้นหมาก (เมตไทย, 2563)

2. ใบหมาก เกิดจากเนื้อเยื่อส่วนปลายยอด โดยเรียงประกอบแบบขนนก เรียงเวียนหนาแน่นที่ปลายยอด ก้านใบรวมยาวได้ประมาณ 130-200 เซนติเมตร ลักษณะของใบย่อยรูปใบหอก ปลายใบแหลม โคนใบเรียวแคบ ใบอ่อนมีรอยแยก ใบมีขนาดกว้างประมาณ 2.5-6 เซนติเมตร และยาวประมาณ 50-70 เซนติเมตร แผ่นใบเรียบหนา ส่วนปลายลำต้นประกอบด้วยโคนกาบใบ เรียกว่า กาบใบหุ้มลำต้น (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ใบหมาก (เมตไทย, 2563)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลได้หันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ดอกหมาก (จันทน์หมาก) จะออกตามซอกโคนก้านใบหรือกาบนอก ดอกออกรวมกันเป็นช่อขนาดใหญ่ประกอบไปด้วยโคนจันทน์ยึดติดอยู่ที่ข้อของลำต้น ก้านช่อดอกเป็นเส้นยาวแตกออกโดยรอบแกนกลาง มีกลีบหุ้มช่อขนาดใหญ่ยาวประมาณ 40 เซนติเมตร เป็นมันเงา มีใบประดับหุ้มอยู่ ดอกเป็นแบบแยกเพศอยู่บนต้นเดียวกัน กลีบดอกเป็นสีขาวแกมสีเหลืองมี 6 กลีบ เรียงเป็นชั้น 2 ชั้น สีเขียว ยาวประมาณ 5-6 มิลลิเมตร ดอกมีเกสรเพศผู้ 6 อัน มีเกสรเพศเมียเป็นเส้น 3 เส้นบาง ๆ แผ่ออก ดอกเพศผู้จะมีขนาดเล็กและอยู่ตรงส่วนปลายของก้านช่อดอก ส่วนดอกเพศเมียจะค่อนข้างใหญ่และอยู่ที่โคนก้านช่อดอก (รูปที่ 2.3) ดอกเพศผู้จะใช้เวลาประมาณ 21 วัน หลังจากนั้น 5 วัน ดอกเพศเมียจะเริ่มบาน



รูปที่ 2.3 ดอกหมาก (จันทน์หมาก) (เมตไทย, 2563)

4. ผลหมาก หมากออกผลเป็นทะลาย ลักษณะของผลเป็นรูปทรงกลม รูปกลมรี รูปไข่ รูปไข่ปลายแหลม หรือรูปกระสวยขนาดเล็ก โดยเฉลี่ยแล้วผลที่รวมกันเป็นทะลาย ในหนึ่งทะลายจะมีผลอยู่ประมาณ 10-150 ผล ผลมีผิวเรียบ มีกลีบเลี้ยงติดเป็นขั้วผล ผลมีขนาดกว้างประมาณ 5 เซนติเมตร และยาวประมาณ 7 เซนติเมตร (รูปที่ 2.4) เปลือกของผลดิบหรือผลสดจะเป็นสีเขียวเข้ม เรียกว่าหมากดิบ เมื่อแก่เปลือกผลจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองส้มทั้งผลหรือสีแดงแกมส้ม เรียกว่า หมากสุก หรือหมากสง

ผลประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ

- 4.1 เปลือกชั้นนอก (ส่วนของเปลือกที่เป็นเยื่อบาง ๆ สีเขียว เนื้อเปลือกมีเส้นใยละเอียดเหนียว)
- 4.2 เปลือกชั้นกลาง (เป็นเส้นใยหนามากมองเห็นชัด)
- 4.3 เปลือกชั้นใน (เป็นเยื่อบาง ๆ ละเอียดติดอยู่กับเนื้อหมาก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 เมล็ดหรือเนื้อหามาก เมื่ออ่อนจะนิ่ม เนื้อส่วนผิวจะมีลายเส้นสีเหลืองถึงสีน้ำตาล ส่วนเนื้อจะเป็นสีเหลืองอ่อน ๆ ถึงสีเหลืองเข้มอมแดง ภายในผลมีเมล็ดเดี่ยว มักออกผลในช่วงเดือนพฤษภาคม

สารประกอบสำคัญที่พบในผลหมาก คือ arecoline, guvacoline, arecolidine, guvacine, tannic acid, gallic acid และ gum (George *et al.* 2006) และในเปลือกหมากประกอบไปด้วย lignin, cellulose และ phenol



รูปที่ 2.4 ผลหมาก (เมตไทย, 2563)

2.4 ไบโอชาร์ (Biochar)

ถ่านชีวภาพ หรือ ไบโอชาร์ (Biochar) คือ วัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากการให้ความร้อนมวลชีวภาพ (biomass) หรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ หรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ไม้ กิ่งไม้ หญ้า ฟางข้าว เปลือกหมากและซังข้าวโพด โดยองค์ประกอบหลักของชีวมวลอินทรีย์คือ เซลลูโลส (Cellulose) เส้นใยเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นตัวยึดเซลลูโลสเข้าด้วยกัน และลิกนิน (Lignin) ทำหน้าที่ให้เสถียรยึดเหนี่ยวกันอย่างแข็งแรง นำมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและอากาศหรือจำกัดอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุด ซึ่งกระบวนการเผาไหม้เรียกว่า การแยกสลายด้วยความร้อนหรือกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อยมาก (กุลธิดา, 2564., ธนศิษฐ์, 2562., ศิริลักษณ์ และคณะ, 2561.)

การแยกสลายด้วยความร้อนหรือกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) แบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ

1. การแยกสลายด้วยความร้อนอย่างช้า (Slow pyrolysis) อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 300-600 องศาเซลเซียส แต่จะใช้เวลาเป็นชั่วโมง หากใช้อุณหภูมิเฉลี่ยในการเผาไหม้ประมาณ 500 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตของถ่านชีวภาพมากกว่า 20-50% ที่เหลือเป็นแก๊สที่จุดติดไฟได้และมีของเหลว

บางส่วนที่ควบแน่นได้ (ธนศิษฐ์, 2562) เมื่อผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนอย่างช้า จะทำให้ลักษณะผิวของชีวมวลเปลี่ยนไป คือ เริ่มมีรูพรุน ธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอน ได้แก่ ไฮโดรเจน (H_2)

ออกซิเจนจะแตกตัวในรูปของแก๊ส (gasification process) ที่เรียกว่า การคาร์บอนเซชัน (carbonization) อนุภาคคาร์บอนอิสระ (free - radical carbon) ที่มีอยู่จะรวมกลุ่มกันเป็นถ่านชีวภาพที่มีประจุลบ ซึ่งช่วยดูดซับไอออนโลหะหนักหรือธาตุอาหารที่มีประจุบวกได้ แต่ยังคงมีน้ำมันดิน (tar) ตกค้างอยู่ในช่องว่าง (pore) (กุลชิตา, 2564)

2. การแยกสลายด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว (Fast pyrolysis) อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 700 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเป็นวินาที ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และที่เหลือได้แก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ได้แก่ H_2 , CO และ CH_4 และถ่านชีวภาพ (Biochar) (ธนศิษฐ์, 2562, ศิริลักษณ์ และคณะ, 2561)

ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการการแยกสลายด้วยความร้อน

กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน	ถ่าน (Char)	ของเหลว (Liquid)	แก๊ส (Gas)
แบบช้า (Slow Pyrolysis) - ใช้อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 500°C) - ใช้เวลานานเป็นชั่วโมง	35%	30%	35%
แบบเร็ว (Fast Pyrolysis) - ใช้อุณหภูมิปานกลาง (500-600 °C) - ใช้เวลาน้อยหรือสั้น (เป็นวินาที)	12%	75%	13%

หมายเหตุ : อุณหภูมิโดยเฉลี่ยในการเผาไหม้ประมาณ 500 °C จะได้ผลผลิตที่เป็นถ่านชีวภาพมากกว่า 50% (winsley, 2007)

ที่มา : จันทรพีญ และคณะ (2564)

2.4.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบ

คุณสมบัติและองค์ประกอบพื้นฐานของถ่านชีวภาพมีลักษณะแตกต่างจากถ่านไม้ที่ผ่านการเผาไหม้โดยทั่วไป ได้แก่ ถ่านชีวภาพมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยน้ำหนักมากกว่าธาตุชนิดอื่นๆ และไม่เกิดการแปรสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากไม่ได้ผ่านการสัมผัสกับออกซิเจนขณะให้ความร้อน อีกทั้งคาร์บอนเป็นสารอะโรมาติกที่มีลักษณะเป็นวงแหวนคาร์บอน 6 อะตอม ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์โดยไม่มีออกซิเจนและไฮโดรเจน (Chen และคณะ, 2017)

ถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็นรูพรุน มีองค์ประกอบของคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N), ซัลเฟอร์ (S) และขี้เถ้า (Ash) แต่องค์ประกอบจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของชีวมวล และปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการไพโรไลซิสในการผลิตถ่านชีวภาพ เช่น อุณหภูมิ อุณหภูมิเอกซาร์นี้และระยะเวลา เป็นต้น (ศิริลักษณ์และอริสา, 2556; ออริสา, 2561) ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพ	สมบัติ
1. องค์ประกอบของธาตุ	- คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์
2. ความคงตัว	- สลายตัวได้ช้ามีอายุการใช้งานได้ยาวนาน
3. พื้นที่ผิวจำนวนมาก	- ช่วยดูดซับธาตุอาหารไว้บนพื้นที่ผิวทั้งภายนอกและภายในรูพรุนได้
4. มีความพรุนจำนวนมาก	- ช่วยกักเก็บน้ำทำให้ดินมีรูพรุนไม่จับตัวแน่นและเป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์
5. มีความพรุนจำนวนมาก	- ช่วยดูดซับธาตุอาหารที่มีประจุบทำให้มีธาตุอาหารที่อุดมสมบูรณ์ - ช่วยปลดปล่อยธาตุอาหารให้กับพืชอย่างช้า ๆ - ช่วยปรับค่า pH ของดินและน้ำและช่วยดูดซับก๊าซเรือนกระจก ลดปัญหาโลกร้อน

ที่มา : รายงานกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย การใช้องค์ความรู้ผลงานวิจัยและนวัตกรรมการผลิตถ่านดูดกลิ่น 3 In 1 จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อการส่งเสริมรายได้ในพื้นที่เป้าหมาย (จันทร์เพ็ญ และคณะ, 2564)

2.5 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon, Activated charcoal)

ถ่านกัมมันต์ หรือ คาร์บอนกัมมันต์ มีชื่อเรียกภาษาอังกฤษว่า Activated carbon หรือ Activated charcoal คือ ถ่านที่ต้องนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี หรือวิธีทางกายภาพก่อน เพื่อให้โครงสร้างทางกายภาพของถ่านเกิดรูพรุนหรือรอยแตกขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรจำนวนมาก โดยขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับ เมื่อมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้การดูดซับของโมเลกุลขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น และพื้นที่ผิวจำเพาะภายในสูงประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นหลัก (ร้อยละ 87 ถึง 97) และมีธาตุอื่นๆ เป็นองค์ประกอบอยู่บ้าง เช่น ออกซิเจน (O), ไฮโดรเจน (H), กำมะถัน (S) และไนโตรเจน รวมทั้งสารประกอบต่างๆ ทั้งที่มีอยู่เดิมในวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตหรือสารที่เติม โดยปกติปริมาตรรูพรุนรวมของคาร์บอนกัมมันต์มีมากกว่า $0.2 \text{ cm}^3/\text{g}$ และบางชนิด มีมากกว่า $1 \text{ cm}^3/\text{g}$ มีพื้นที่ผิวจำเพาะภายในมากกว่า $400 \text{ m}^2/\text{g}$ และบางชนิดอาจมีได้ถึง $1,000\text{-}2,500 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีความกว้างรูพรุนอยู่ในช่วง 0.3 นาโนเมตรถึงหลายพันนาโนเมตร (สัมฤทธิ์, 2564, ฉวีวรรณ, 2562)

การกระตุ้น (Activation) เป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้ผิวที่มีความว่องไวมากขึ้น เพื่อเพิ่มคุณภาพด้วยเอกสารนี้ เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ มาผ่านกระบวนการกระตุ้นให้กลายเป็นถ่านกัมมันต์ซึ่งประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ได้แก่

1. เพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทนที่

2. เพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นที่ผิว โดยทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยการจัดเปลี่ยนโครงสร้างอะตอมของคาร์บอนใหม่

3. การกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุ ในถ่านกัมมันต์มักพบอินทรีย์วัตถุ หรืออนินทรีย์วัตถุหลงเหลืออยู่ ทำให้บดบังการทำหน้าที่ในการดูดซับ

4. การเผาสารทาร์ (Tar) ที่เหลืออยู่

5. การขยายขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในถ่าน

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถใช้วัสดุจำพวกที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น เปลือกไม้ กะลามะพร้าว เปลือกหมาก เป็นต้น

กระบวนการกระตุ้นแบ่งออกเป็น 2 วิธี (รูปที่ 2.5) คือ

1. การกระตุ้นทางกายภาพหรือการกระตุ้นทางความร้อน (Physical activation หรือ Thermal activation) เป็นการนำถ่านที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้ในสภาพอับอากาศ หรือจำกัดอากาศทำให้มีออกซิเจนน้อย มากระตุ้นโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือไอน้ำที่มีอุณหภูมิกระตุ้น (Activation temperature) ประมาณ $600\text{--}950^\circ\text{C}$ ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานสูงมาก เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายทางอ้อม นอกจากนี้ ตามด้วยกระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซของถ่าน (Char gasification) ด้วยสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) และยังไม่สามารถควบคุมคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ให้คงที่ได้ จึงทำให้เกิดผิวและรูพรุนในปริมาณน้อย

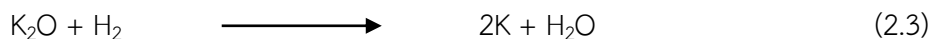
2. การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการเปลี่ยนวัตถุดิบในสภาวะเฉื่อย โดยใช้สารเคมีบางชนิด เช่น ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2), กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ $450\text{--}900^\circ\text{C}$ (สัมฤทธิ์, 2021)

การกระตุ้นถ่านด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) นำเอาวัตถุดิบที่ต้องการมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ ผสมกับสารละลายที่มีไอออนของโพแทสเซียมไอออน จะแทรกซึมเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัตถุดิบ เมื่อให้ความร้อนแก่โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์พื้นที่ผิวสูง มีปฏิกิริยาแสดง ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

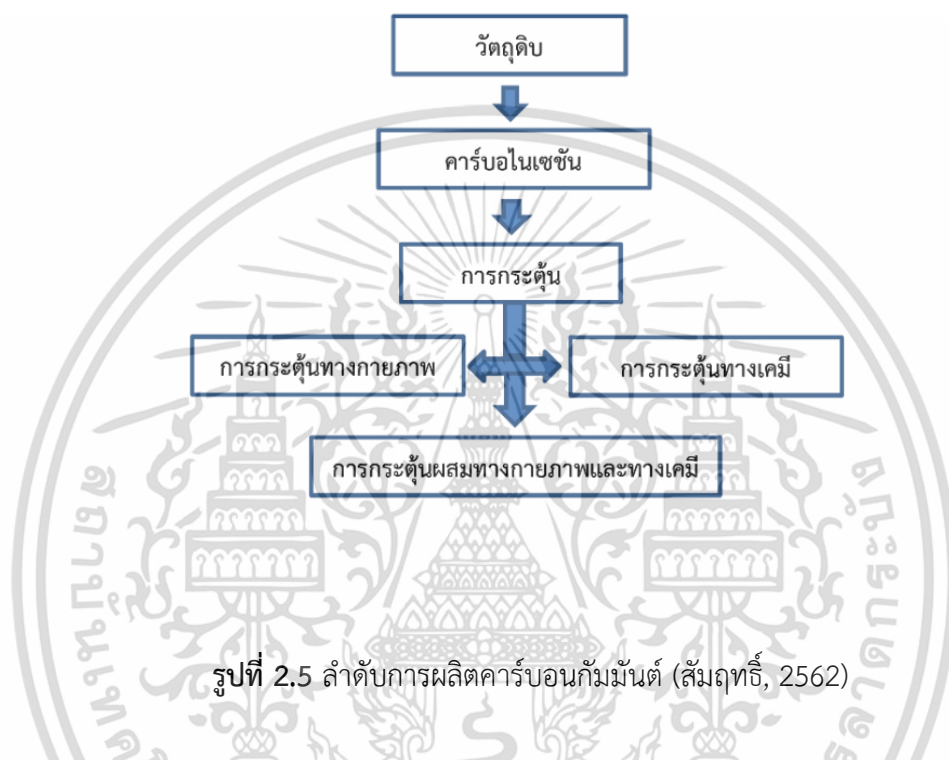


สมการที่ 2.1 และ 2.2 เป็นการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เกิดเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และน้ำ ซึ่งเป็นสารทำให้คาร์บอนในถ่านเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน

(Gasification) เมื่อทำปฏิกิริยาแล้ว โพแทสเซียมออกไซด์จะถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอน กลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัว ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอนได้ และเกิดรูพรุนได้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.5 ลำดับการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ (สัมฤทธิ์, 2562)

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตออกมาได้หลากหลายรูปแบบ สามารถแบ่งประเภทตามลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ได้ 5 แบบ ดังนี้

1. ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder activated carbon) ถ่านกัมมันต์แบบผงเป็นรูปแบบดั้งเดิมของถ่านที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ขนาดผงถ่านจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.15-0.25 mm เหมาะกับการใช้งานแบบเติมลงในภาชนะของเหลวมากกว่าการบรรจุในท่อ และปล่อยของเหลวไหลผ่านผงถ่าน เนื่องจากเป็นวิธีที่สูญเสียผงถ่านได้ง่ายกว่าผงถ่านที่ผ่านการใช้งานมาแล้วไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ สามารถกำจัดได้โดยการเผาหรือฝังกลบ

2. ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (Granular activated charcoal) มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่ เมื่อเทียบกับถ่านแบบผงและพื้นที่ผิวภายนอกมีขนาดเล็กกลึง เหมาะสำหรับดูดซับก๊าซและไอระเหย เนื่องจากอัตราการแพร่กระจายเร็วกว่า

3. ถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่ง (Extruded activated carbon) เป็นถ่านที่นำมานำมาขึ้นรูปเป็นลักษณะรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.8-45 mm เหมาะสำหรับการกรองดูดซับก๊าซ เนื่องจากมีความแข็งแรงเชิงกลสูงและมีปริมาณฝุ่นละอองต่ำ

ไม่ว่าการนี้... ฟังสน... ยักพิง... มิมี... เติ... แบบ... ดึง... โย... แต่... ดึง... ย... ย... ถึง... เจ้า... ของ... เอกสาร... ทุก... ครั้ง... ที่... มี... การ... นำ... ไป... ใช้

4. ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค (Impregnated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดพิเศษที่ได้เติมโมเลกุลสาร อนินทรีย์ลงไปในโครงสร้าง เช่น โลหะเงิน, ไอโอดีน และไอออนบวก ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al), แมงกานีส (Mn), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe), ลิเทียม (Li) และแคลเซียม (Ca) มีคุณสมบัติในการกรองสาร ฆ่าเชื้อโรค และนิยมนำมาใช้กับระบบกรองน้ำของเครื่องกรองน้ำ

5. ถ่านกัมมันต์เคลือบพอลิเมอร์ (Polymer-Coated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกเคลือบด้วยพอลิเมอร์ที่เข้ากันได้ทางชีวภาพ เพื่อให้ผิวเรียบ และดูดซึมได้โดยไม่ปิดกั้นรูพรุน ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารพิษจากเลือดออก

คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ แบ่งได้ 6 คุณลักษณะ คือ

1. ไอโอดีนัมเบอร์ (Iodine number) เป็นค่าสำคัญที่ใช้บอกประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ และเป็นตัวบ่งชี้พื้นที่ผิวทั้งหมดโดยการดูดซับไอโอดีนจากสารละลายเทียบกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ จำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับไว้ด้วยถ่านกัมมันต์ 1 g เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลัง ถูกดูดซับเป็น 0.01 mol/cm^3

2. ค่าความหนาแน่น (Apparent density) ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าความหนาแน่นสูงจะเป็นถ่านที่มีคุณภาพสูงสามารถดูดซับได้ดี

3. ค่าความแข็ง (Hardness / Abrasion number) เป็นค่าความต้านทานต่อการสึกกร่อนของถ่านกัมมันต์ จะบอกถึงความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสีและความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันอย่างชัดเจนตามชนิดวัสดุ และระดับที่ถ่านถูกกระตุ้น

4. ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ถ่านที่มีขนาดอนุภาคละเอียดมากเท่าใดก็จะยิ่งเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านให้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้โมเลกุลก๊าซถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้างถ่านได้เร็วขึ้น

5. ปริมาณเถ้า (Ash content) หากปริมาณเถ้ามากประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จะลดลง และลดประสิทธิภาพการนำถ่านไปกระตุ้นซ้ำ

6. เมทิลีนบลู (Methylene blue) ถ่านกัมมันต์ที่โครงสร้างมีรูพรุนจะดูดซับโมเลกุลขนาดกลาง เช่น สีย้อม เมทิลีนบลูสารที่ให้สีนี้ถูกใช้เป็นตัวแทนของสารที่มีโมเลกุลขนาดกลาง ค่าเมทิลีนบลูมีหน่วยวัดเป็น mg/g

เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งประสิทธิภาพในการกรองหรือดูดซับสารจะต่ำลง เนื่องจากที่ว่างภายในโครงสร้างถ่านมีน้อยลงจึงต้องทำการเปลี่ยนถ่านเก่าออกและใส่ถ่านใหม่เข้าไปทดแทนโดยถ่านที่ถูกใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ด้วยการนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นซ้ำ (Re-Activated) เพื่อกำจัดสารต่างๆ ที่ถ่านดูดซับไว้ออกไปให้หมดก่อน (ฉวีวรรณ, 2562.)

ลักษณะที่สำคัญที่จะกำหนดความสามารถของคาร์บอนในการดูดซับอนุภาคสารถูกดูดซับ

ได้แก่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีที่มีเหตุอันสมควรและต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การกระจายขนาดอนุภาค (Pore size distribution)

2. ความจุการดูดซับ (Adsorptive capacity) สำหรับประสิทธิภาพของคาร์บอนกัมมันต์ที่เป็นสารดูดซับที่ดีจะต้องมีสมบัติ คือ พื้นที่ผิวสูง ระดับความว่องไวต่อปฏิกิริยาของพื้นผิวสูง สามารถดูดซับสารได้ทั่วไป และมีขนาดรูพรุนเหมาะสม (สัมฤทธิ์, 2564)

ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งตามขนาดของรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์ ได้ 3 ขนาด ได้แก่

1. ถ่านกัมมันต์ชนิด Micropores เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 1 nm ปริมาตร 0.2-0.6 cm³/g พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นจำนวนมากกว่า 100-1,500 m²/g ,มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับ และพลังงานดูดซับ (Adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มมากขึ้นที่ความดันต่างๆรูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกว่า “การกระจายตัวของรูพรุน (Pore size distribution) ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ และวิธีการกระตุ้นตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) มักนิยมใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับไอรระเหยและก๊าซ (ปรียาพา และคณะ, 2556)

2. ถ่านกัมมันต์ชนิด Mesopores เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนระหว่าง 1-100 nm ปริมาตร 0.1-0.5 cm³/g พื้นที่ผิว 20-100 m²/g ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูพรุน ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gels) อะลูมินาเจล (Alumina gels) และตัวเร่งปฏิกิริยาอะมิโนซิลิเกต (Aminosilicate catalyst) มักนำไปใช้ประโยชน์สำหรับดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

3. ถ่านกัมมันต์ชนิด Macropores เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 100-200 nm ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 cm³/g พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 m²/g โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่จะเป็นตัวช่วยให้สารที่จะถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น

2.6 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณผิวระหว่างของแข็งและของเหลวรวมถึงการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายออกจากสารละลายไปอยู่บนผิวของของแข็ง โดยสารที่สามารถดูดซับอะตอมหรือโมเลกุลสารอื่นเรียกว่า “สารดูดซับ (Adsorbent) และอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) การดูดซับอาจจะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) หรือทางเคมี (Chemisorption) จะขึ้นอยู่กับชนิดแรงที่ก่อให้เกิดการดูดซับ (วรวิทย์, 2558)

2.6.1 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการจัดแบ่งประเภทของการดูดซับพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของสารดูดซับ โดยสามารถแบ่งกระบวนการดูดซับได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้ (นันทนวล, 2552)

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) เกิดจากการรวมแรง 2

ชนิด คือ แรงกระจาย (Dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน และการดูดซับทางกายภาพจะไม่มีแรงกระตุ้น (Activation energy) มาเกี่ยวข้อง (นันทนวล, 2552, วรวิทย์, 2558)

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น (activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง (นันทนวล, 2552, วรวิทย์, 2558)

3. การดูดซับด้วยประจุ (Ionic adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างสารถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวด้วยแรงของประจุที่ตรงกันข้าม (Electrical attraction) ซึ่งทำให้อิออนของสารถูกดูดซับติดอยู่ที่พื้นผิวสารดูดซับในตำแหน่งที่มีประจุตรงกันข้าม อิออนที่มีประจุสูงจะถูกติดได้ดีกว่าพวกที่มีประจุต่ำๆ และอิออนที่มีขนาดเล็ก (นันทนวล, 2552.)

2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (นันทนวล, 2552) ได้แก่

1. ธรรมชาติของตัวดูดซับ

1.1 พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน มีผลความสามารถของวัสดุตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น และโครงสร้างของรูพรุนมีส่วนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น

1.2 ขนาดของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับ กรณีที่เป็นตัวดูดซับไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีขนาดเล็กลง ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

1.3 เคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) เฉพาะที่อยู่บนผิววัสดุดูดซับจะมีสมบัติที่มีผลกับกระบวนการดูดซับ

2. ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

2.1 ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการละลายสูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย

2.2 น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2.3 ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล โดยความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

2.4 ผลของอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

2.5 ค่า pH การดูดซับจะขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

3. ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านของชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือ การแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion)

2.6.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มในการดูดซับ (Adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ซึ่งสร้างโดยจากการวัดปริมาณของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวถูกดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ (วรวิทย์, 2558, ศนิตา, 2550)

1. ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) เหมาะสมสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือแบบที่ง่ายที่สุด โดยมีสมมติฐาน (วรวิทย์, 2558, ศนิตา, 2550) ดังนี้

- 1.1. โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
- 1.2. แต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น
- 1.3. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงได้
- 1.4. พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะถูกดูดซับสมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$q_e = \frac{q_0 K C_e}{1 + K C_e} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K q_0 C_e} + \frac{1}{q_0} \quad (2.6)$$

เมื่อ q_e = ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (mg/L)

q_0 = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/L)

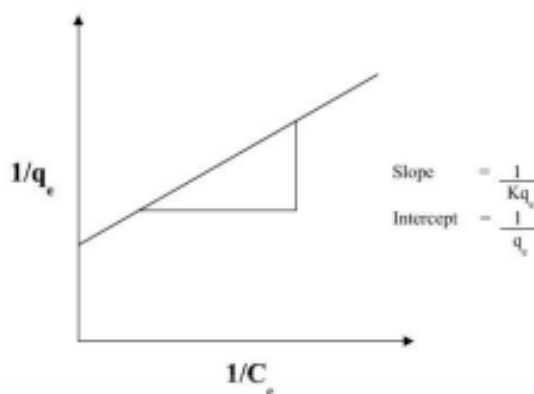
K = ค่าคงที่การดูดซับ

C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/g)

เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q_e}$ และ $\frac{1}{C_e}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{K q_0}$ และจุดตัดบน

แกน y เท่ากับ $\frac{1}{q_0}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 Langmuir isotherm (ศรีณย์, 2550)

2. ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) สามารถใช้ได้กับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ อธิบายการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) เป็นไอโซเทอร์มที่พัฒนามาจากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) โดยการดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับซึ่งจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) สามารถเขียนสมการการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) (วรวิทย์, 2558, ศรีณย์, 2550) ได้ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8

$$q_e = KC_e^n \quad (2.7)$$

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_f \quad (2.8)$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สุด (mg/L)

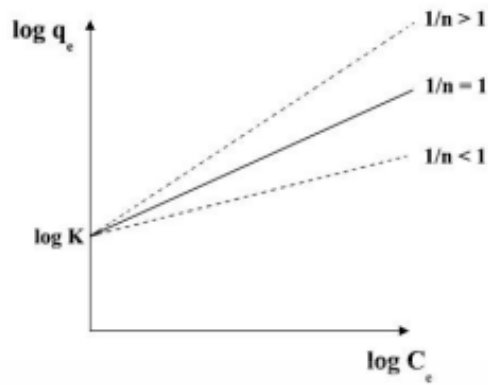
q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

K_f = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

n = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_c$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 Freundlich adsorption isotherm (ศรีณย์, 2550)

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นเส้นตรง

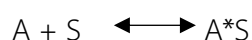
ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น (C) หรือมีปริมาณพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับในปริมาณที่จำกัดการดูดซับ

ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มากหรือมีบริเวณพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

2.6.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ เป็นสมการที่ใช้อธิบายอัตราเร็วของการดูดซับแบ่งออกได้เป็นสมการสองอันดับ คือ สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order, PFO) และอันดับสองเทียม (Pseudo-second order, PSO) เป็นสมการที่อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังพบขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion) เป็นอีกสมการจลนพลศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้อธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับ (วรวิทย์, 2558, ศรีณย์, 2550, อติศักดิ์, 2561)

1. สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม เป็นสมการอธิบายภายใต้สมมุติฐานการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับ และการดูดซับเป็นทางเคมี ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้จลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับได้ดังนี้ (วรวิทย์, 2558)



โดย A คือ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) S คือ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbent) และ A*S คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbate compound) ซึ่งสามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับ

หนึ่งได้ตั้งสมการที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.9)$$

โดยที่ k = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที่⁻¹)

q_t = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g)

q_e = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

เมื่อทำการอินทิเกรต (Integral) สมการ (2.5) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ ซึ่งจะได้สมการที่ 2.10

$$\log \frac{q_e}{q_e - q_t} = \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.10)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น จะได้สมการที่ 2.11

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.11)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $\frac{-k_1}{2.303}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$

2. สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง เป็นสมการอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมเป็นอย่างมากอีกหนึ่งสมการ ภายใต้สมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมากจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (Active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับได้ดังนี้ (วรวิทย์, 2558)



โดยสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง สามารถเขียนอัตราเร็วการดูดซับได้ดังสมการที่ 2.12

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.12)$$

โดยที่ k = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (นาที่⁻¹)

ดังนั้น เมื่อทำการอินทิเกรต (Integral) สมการที่ 2.8 โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ จนถึง $q_t = t$ จะได้สมการที่ 2.13

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} - k_2 t \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูในจังหวัดภูเก็ตเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จัดให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น จะได้สมการที่ 2.14
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.14)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q_t}$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_e}$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{k_2 q_e^2}$

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คณิตา และคณะ (2565) ศึกษาการดูดซับและปลดปล่อยแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต ด้วยฟางข้าวและแกลบข้าว เพื่อใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน โดยกระบวนการเตรียมตัวดูดซับ นำฟางข้าวและแกลบข้าวมาล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก หลังจากนั้นนำมาอบแห้งเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น เก็บรักษาในถุงพลาสติกป้องกันความชื้น เพื่อนำมาใช้ทดลอง ถ่านฟางข้าวและถ่านแกลบข้าว เตรียมได้จากฟางข้าว แกลบข้าวที่ผ่านการล้างและอบแห้ง เผาในเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดและเก็บรักษาในถุงพลาสติกป้องกันความชื้น พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับและปลดปล่อยแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟต โดยการดูดซับแอมโมเนียได้ดีที่สุดในสารละลายที่มี pH 5 เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง การดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่สุดในสารละลายที่มี pH 5 ระยะเวลา 6 ชั่วโมง และสามารถอธิบายการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตได้ด้วย สมการ Pseudo second order และไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลอง Langmuir และการเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวดูดซับจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นได้

สมสกุล และสุภาวดี (2559) ศึกษาการปรับปรุงตัวดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา โดยกระบวนการเตรียมตัวดูดซับ นำตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำประปาเทศบาลเมืองอุดรดิตถ์ ตากให้แห้ง ร้อนผ่านตะแกรงร่อนดิน เบอร์ 30 และนำตะกอนดินผสมกับน้ำ (ค่า pH = 7) จากนั้นไปเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และนำไปอบที่อุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นและเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ การเตรียมสารละลายฟอสเฟตสังเคราะห์สำหรับใช้ในงานวิจัย เตรียมจากสารละลายฟอสเฟต Anhydrous KH_2PO_4 ที่มีสารละลายฟอสเฟตความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม ต่อสารละลายฟอสเฟตที่ความเข้มข้นในช่วง 0.1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30°C จนถึงระยะเวลาสมดุลของการดูดซับ จากนั้น กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 และวิเคราะห์หาปริมาณของสารละลายฟอสเฟต (PO_4^{3-}) นำน้ำสังเคราะห์ที่ผ่านการกรองแยกจากตัวดูดซับ มาทำการวิเคราะห์แบบแอสคอบิก (Ascorbic Acid) โดยนำไปตรวจที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตรด้วยเครื่อง Spectrophotometer พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับฟอสเฟตในตัวดูดซับที่มี

การกระตุ้นด้วยกรด มีระยะเวลาการดูดซับที่ 24 ชั่วโมง และปฏิกิริยาเป็นไปตามไอโซเทอร์มของการดูดซับ คือ การดูดซับฟอสเฟตของวัสดุดูดซับจากตะกอนโรงบำบัดน้ำที่ถูกระตุ้นด้วยกรดสูงกว่าวัสดุดูดซับที่ไม่ถูกระตุ้นด้วยกรดเล็กน้อย เนื่องจากกรดอะซิติก (CH_3COOH) มีสมบัติทางเคมี ซึ่งมี H^+ เป็นประจุบวกจึงมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ที่มีไอออนเป็นประจุลบ ซึ่งสามารถอธิบายการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียได้ด้วยไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Freundlich

คณิตา และคณะ (2564) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตในสารละลายด้วยกากกาแฟเพื่อใช้ประโยชน์เป็นวัสดุปรับปรุงดิน โดยกระบวนการเตรียมถ่านจากกากกาแฟ นำถ่านกากกาแฟมาแช่ในกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ในอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปรับ pH ให้เป็นกลางด้วยน้ำกลั่น และนำไปเผา 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นและเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ การเตรียมสารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟต สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมได้จากโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) โดยละลายสาร KH_2PO_4 (ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง) 0.1098 กรัม ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร การเตรียมสารละลายปรับค่า pH โดยทำการปรับ pH ของสารละลายที่เตรียมได้ ให้เป็น 5, 7 และ 9 ด้วย 0.1 โมลาร์ HCl หรือ 0.1 โมลาร์ NaOH ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 60 นาที กรองตัวดูดซับออกด้วยกระดาษกรอง จากนั้นนำสารละลายไปวัดค่า pH ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม ศึกษาระยะเวลาที่สัมผัสได้แก่ 1, 5, 15, 30, 60 และ 120 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตในสารละลายที่มี pH 7 ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 60 นาที ปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสม คือ 1 กรัม ซึ่งสามารถอธิบายปฏิกิริยาของการดูดซับเป็นไปตามสมการ Pseudo-second order และไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Freundlich

Addie et al. (2022) ศึกษาการดูดซับฟอสเฟตด้วยถ่านชีวภาพจากต้นสนดักลาส ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สำหรับปรับปรุงคุณภาพดิน โดยกระบวนการเตรียมตัวดูดซับ นำถ่านต้นสนดักลาส 200 กรัมใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 2,000 มิลลิลิตร มาแช่ในแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) ที่ความเข้มข้น 0.52 โมลาร์ เตรียมได้จากแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) 84.7 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ นำไบโอชาร์ที่ผ่านการแช่แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 2,000 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 5 โมลาร์ ปริมาตร 800 มิลลิลิตร เตรียมได้จากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 280.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นน้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลา 6 ชั่วโมง และแช่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ พบว่า ประสิทธิภาพของการดูดซับฟอสเฟตในสารละลายที่มี pH น้อยกว่า 10.3 ปฏิกริยาเป็นไปตามสมการ Pseudo-second order และไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Freundlich และสมการ Langmuir



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือ

1. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของวัสดุ (Surface Area Pore Size and Pore Volume Distribution Analyzer, BET) รุ่น iO-C-XR-XR-XR บริษัท Quanta Chrome ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) รุ่น IRTracer-100 บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่น Quanta 250 บริษัท Fei Company ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) รุ่น Labtech บริษัท โปรวิชัน โซแอนติฟิค จำกัด ประเทศไทย
5. เครื่องวัดกรด-เบส (pH meter) รุ่น Fiveeasy Plus Fer 20 บริษัท METTLER TOLEDO ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
6. ชุดกรองลดความดัน รุ่น A-3S บริษัท Tokyo Rikakikai Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น
7. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง รุ่น MS3002TS/00 บริษัท METTLER TOLEDO ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
8. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น ML204/01 บริษัท METTLER TOLEDO ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
9. ตู้อบ (Oven) รุ่น MEMMERT บริษัท ITS (Thailand) Co., Ltd. ประเทศไทย
10. เครื่องเผา รุ่น L9/12P บริษัท CHAVACHOTE CO., LTD ประเทศไทย
11. เครื่องบด
12. กระดาษกรองใยแก้ว (Whatman) เบอร์ 42
13. เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.2 สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) Complete range of Analytical reagent grade (RPE) บริษัท Carlo Erba Reagent S.A.S ประเทศฝรั่งเศส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต กรุณาแจ้งให้ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทราบ

3. กรดแอสคอร์บิก ($C_6H_8O_6$) Analytical Reagent (AR) บริษัท Chem-Supply Pty Ltd. ประเทศออสเตรเลีย
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) Complete range of Analytical reagent grade (RPE) บริษัท Carlo Erba Reagent S.A.S ประเทศฝรั่งเศส
5. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) Complete range of Analytical reagent grade (RPE) บริษัท Carlo Erba Reagent S.A.S ประเทศฝรั่งเศส
6. แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) Complete range of Analytical reagent grade (RPE) บริษัท Carlo Erba Reagent S.A.S ประเทศฝรั่งเศส
7. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) Analytical Reagent Grade บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
8. แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_2MoO_4$) Complete range of Analytical reagent grade (RPE) บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
9. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาทเรต ($C_8H_4K_2O_{12}Sb_2 \cdot 3H_2O$) Laboratory Unilab Reagent บริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
10. ฟีนอล์ฟทาลีน ($C_6H_4COOC(C_6H_4-4-OH)_2$) Complete range of Analytical reagent grade (RPE) บริษัท Carlo Erba Reagent S.A.S ประเทศฝรั่งเศส

3.1.3 วัสดุชุดขับ

เปลือกหอยมาก ได้รับความอนุเคราะห์จากกลุ่มชุมชนตำบลปะเหลียน ตำบลปะเหลียน อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 เปลือกหอยผ่านการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีทดลอง

3.2.1 การเตรียมวัสดุดูดซับถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก

1. ชั่งน้ำหนักของเปลือกหมาก จากนั้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักหลังอบ หา %ความชื้น ดังสมการที่ 3.1

$$\frac{\text{ปริมาณความชื้น}}{(\text{เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก})} = \frac{\text{ผลต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบและหลังอบ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)}} \times 100 \quad (3.1)$$

2. นำเปลือกหมากที่ได้ ไปบดที่เครื่องบด จากนั้น ร่อนคัดแยกขนาด 250 เมช โดยใช้ตะแกรงบดแบบหยาบ เก็บเปลือกหมากที่บดไว้ แล้วไว้ขวดสีชา เพื่อนำไปทำถ่านกัมมันต์

3. นำเปลือกหมากที่ได้จากข้อ 2 ไปเผาที่เตาเผา อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ในสภาวะอับอากาศ ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักก่อนและหลังเผา คำนวณหาผลผลิตร้อยละไปโอซาร์ ดังสมการที่ 3.2

$$\text{ร้อยละผลผลิต (\%yield)} = \frac{\text{ผลผลิตจริง}}{\text{ผลผลิตทางทฤษฎี}} \times 100 \quad (3.2)$$

4. นำถ่านชีวภาพไปกระตุ้นด้วยสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในอัตราส่วน 1:5 โดยนำถ่านชีวภาพที่ได้ไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้น กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้น นำไปแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และแช่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้น กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์

5. ชั่งน้ำหนักถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในอัตราส่วน 1:5 โมลาร์ จากนั้น นำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ในสภาวะอับอากาศ จากนั้น ล้างด้วยน้ำกลั่น จนค่าพีเอช (pH) เป็นกลาง นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักหลังเผา คำนวณหาร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ ดังสมการที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสต็อคสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบปริมาตร

3.2.3 วิเคราะห์หาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของเปลือกหอย และถ่านกัมมันต์จากเปลือกหอยด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) โดยใช้สภาวะดังแสดงในตารางที่ 3.1

2. วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (Scanning Electron Microscope - Energy-Dispersive Spectroscopy, SEM-EDS) ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกหอย โดยใช้สภาวะดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

วิธีวิเคราะห์	สภาวะ	
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) 100X	WD (mn)	6.5
	EHT (kV)	20.00
	Signal	SE1
	Noise Reduction	Line Avg
500X	WD (mn)	6.5
	EHT (kV)	20.00
	Signal	SE1
	Noise Reduction	Line Avg
1,000X	WD (mn)	6.5
	EHT (kV)	20.00
	Signal	SE1
	Noise Reduction	Line Avg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

3.2.4.1 ศึกษาระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ได้จากข้อ 3.2.1 จำนวน 1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เปิดน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ในข้อ 1
3. นำไปปั่นจนที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที แปรค่าระยะเวลาสัมผัส 30, 60, 90 และ 120 นาที
4. นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับโดยใช้เครื่องกรองลดความดัน
5. เปิดสารละลายที่ได้จากข้อ 4 มา 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร
6. เติมน้ำยารวม (Combined Reagent) 8 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
7. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 อีก 2 ข้าง
9. ชูดควบคุม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับ
10. คำนวณความเข้มข้นฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต ดังสมการที่ 3.3

$$\text{ความเข้มข้นฟอสเฟต (mg - P/L)} = \frac{\text{มวลที่ได้จากกราฟ (\mu\text{g})}}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ml)}} \times \text{Dilution factor} \quad (3.3)$$

11. คำนวณ % การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต ดังสมการที่ 3.4

$$\text{Adsoption Percentage (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e = ความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับของน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.2.4.2 ศึกษาความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสม

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ได้จากข้อ 3.2.1 จำนวน 1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เปิดน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ในข้อ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปรับค่าพีเอช (pH) ของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยแปรค่าที่ pH 3, 5, 7, 9 และ 11 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.1 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 โมลาร์

4. นำไปปั่นจนที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.1

5. นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับโดยใช้เครื่องกรองลดความดัน

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5-11 ในหัวข้อ 3.2.4.1

3.2.4.3 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นในการดูดซับที่เหมาะสม

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ได้จากข้อ 3.2.1 จำนวน 1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต โดยแปรค่าความเข้มข้น 5, 10, 15, 30 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ในข้อ 1

3. ปรับค่าพีเอช (pH) ของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.2 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.1 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 โมลาร์

4. นำไปปั่นจนที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.1

5. นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับโดยใช้เครื่องกรองลดความดัน

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5-11 ในหัวข้อ 3.2.4.1

3.2.4.4 ศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ได้จากข้อ 3.2.1 โดยแปรค่าปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5, 1, 3 และ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต ที่ความเข้มข้นที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ในข้อ 1

3. ปรับค่าพีเอช (pH) ของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4.2 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.1 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 โมลาร์

4. นำไปปั่นจนที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้

จากข้อ 3.2.4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับโดยใช้เครื่องกรองลดความดัน

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5-11 ในหัวข้อ 3.2.4.1

3.2.4.5 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ 1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เปิดน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, 30 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ในข้อ 1
3. ปรับค่าพีเอช (pH) ในน้ำเสียที่พีเอชเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2
4. นำไปปั่นกวนที่ความเร็วรอบที่ 250 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1
5. นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับโดยใช้เครื่องกรองลดความดัน
6. เปิดสารละลายที่ได้จากข้อ 5 มา 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร
7. เติมน้ำยารวม (Combined Reagent) 8 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
8. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 อีก 2 ซ้ำ
10. คำนวณความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (q_e) ดังสมการที่

3.5

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{W} \times V \quad (3.5)$$

- เมื่อ
- C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - C_e = ความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับของน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - V = ปริมาณของน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต (มิลลิลิตร)
 - W = ปริมาณของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

11. คำนวณหาไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยนำค่าการดูดซับของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าสู่สมดุลเมื่อใช้ความเข้มข้นต่างๆ ที่ได้จากข้อ 10 มาพล็อตแบบจำลองไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังสมการที่ 3.6 และการดูดซับแบบฟรุนดลิช ดังสมการที่ 3.7 สวจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Kq_e C_e} + \frac{1}{q_0} \quad (3.6)$$

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (3.7)$$

เมื่อ q_e = ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_0 = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K = ค่าคงที่การดูดซับ

C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

n = ความแรงของการดูดซับ (Adsorption intensity)

$\frac{1}{n}$ = ปัจจัยที่เกี่ยวกับความไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneity)

K_F = ค่าคงที่การดูดซับที่สมดุลของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

3.2.4.6 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ 1 กรัม ใส่ในปิกรอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิดน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, 30 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในปิกรอร์ในข้อ 1
3. ปรับค่าพีเอช (pH) ในน้ำเสียที่พีเอชเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2
4. นำไปปั่นจนที่ความเร็วรอบที่ 250 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที
5. นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับโดยใช้เครื่องกรองลดความดัน
6. ปิดสารละลายที่ได้จากข้อ 5 มา 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร
7. เติมน้ำยารวม (Combined Reagent) 8 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
8. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 อีก 2 ซ้ำ
10. คำนวณจลนพลศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต จากสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังสมการที่ 3.8 และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ดังสมการที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3.8)$$

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3.9)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาที่สัมผัส ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟต ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ และ จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์

ความชื้นของเปลือกหมาก เเปอร์เซ็นต์การผลิตไบโอชาร์จากเปลือกหมากแห้ง เเปอร์เซ็นต์การผลิตถ่านกัมมันต์จากไบโอชาร์ ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความชื้นของเปลือกหมาก เเปอร์เซ็นต์การผลิตไบโอชาร์ เเปอร์เซ็นต์การผลิตถ่านกัมมันต์

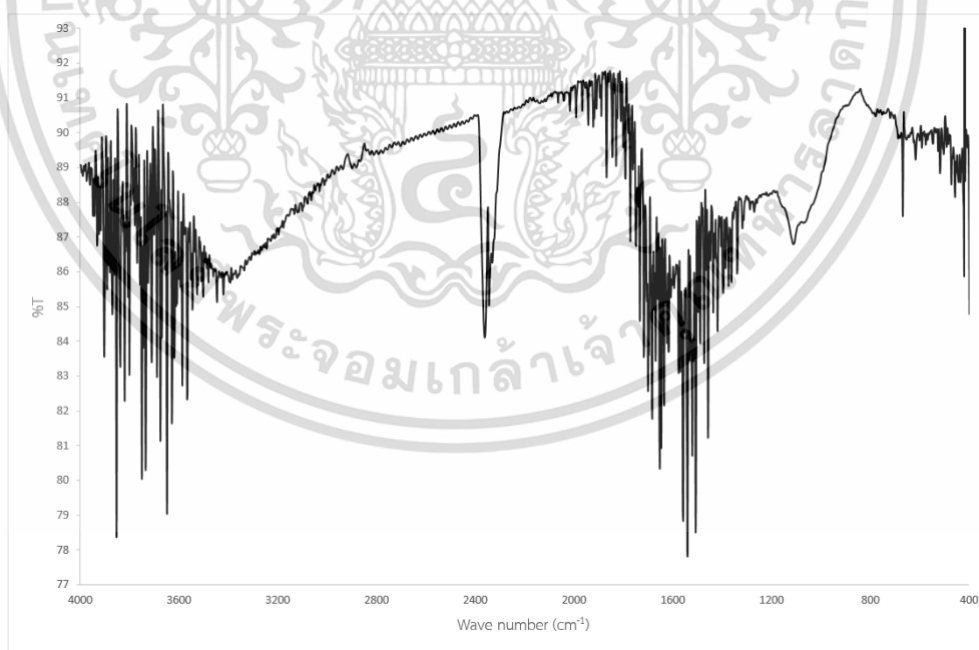
	ผลที่ได้
เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	77.299
เปอร์เซ็นต์การผลิตร้อยละไบโอชาร์ (%yield)	44.185
เปอร์เซ็นต์การผลิตร้อยละถ่านกัมมันต์ (%yield)	60.169

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมี

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่ไม่ผ่านการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ และหลังการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (รูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.2) ปรากฏพีคของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon compound) พีค C-C Stretching (Alkane) ที่เลขคลื่นประมาณ $>1,200\text{ cm}^{-1}$, พีค C-H Bending ที่เลขคลื่นช่วง $1,375\text{--}1,450\text{ cm}^{-1}$, พีค C=C Stretching (Alkene) ที่เลขคลื่นช่วง $1,580\text{--}1,600\text{ cm}^{-1}$, พีค C≡C Stretching (Alkyne) ที่เลขคลื่นช่วง $1,600\text{--}1,650\text{ cm}^{-1}$ และ C=C (Aromatic) ที่เลขคลื่นช่วง $1,450\text{--}1,600\text{ cm}^{-1}$ พีคของสารประกอบฮาโลเจน (Halogen compound) C-Cl ที่เลขคลื่นช่วง $600\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ พีคของสารประกอบคาร์บอนิล (Carbonyl compound) พีค C=O Stretching ที่เลขคลื่นช่วง $1,600\text{--}1,700\text{ cm}^{-1}$ และพีคของสารประกอบเอสเทอร์ (Esther compound) C-O Stretching ที่เลขคลื่นช่วง $1,000\text{--}1,300\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเอกสารนี้เป็นหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของเซลลูโลส (Cellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของพืชทุกชนิด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

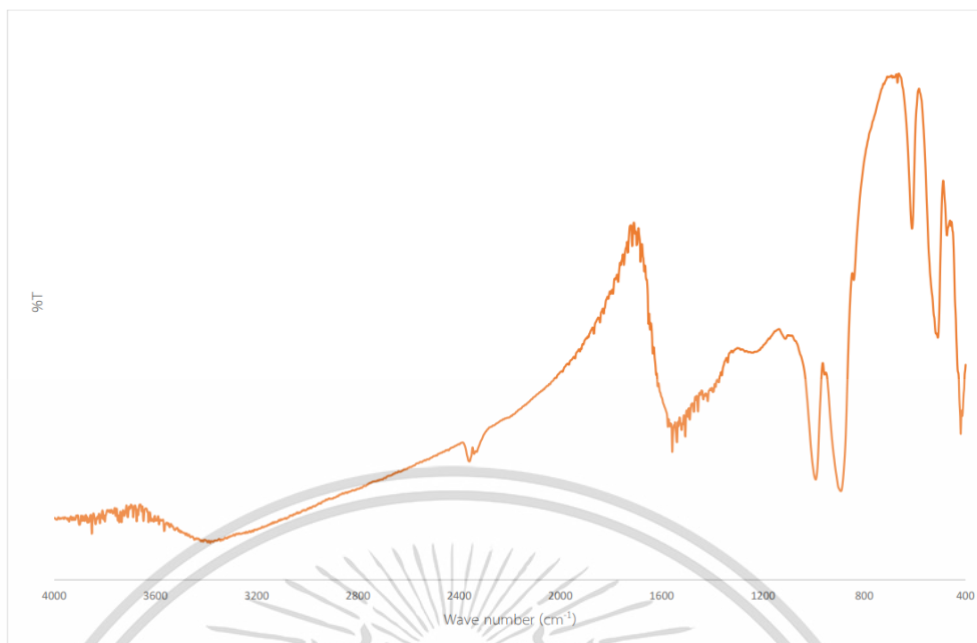
หลักของเปลือกหามากหมาก พีคของสารประกอบอินทรีย์ (Organic compound) ที่เลขคลื่นช่วง 3,364.8, 1,521.8, 1,363.6 และ 822.1 cm^{-1}

เปลือกหามากจะพบหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างจากหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ O-H, N-H Combined, N-O Symmetric Stretching, N-O Asymmetric Stretching, N-H Bending Vibrations, C-Cl Stretching และ Mg-O Stretching เนื่องจากเปลือกหามากยังมีองค์ประกอบอินทรีย์คงเหลืออยู่ แต่เมื่อถูกทำให้กลายเป็นถ่านกัมมันต์จากกระบวนการคาร์บอนเซชันที่ใช้อุณหภูมิสูง และกระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมด้วย ทำให้ธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหยต่างๆ ได้แก่ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน น้ำ และหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่อยู่ภายในโครงสร้างของรูพรุนจะถูกกำจัดออก ทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มสูงขึ้น สังเกตได้จากพีคของ O-H, N-H, N-O, N-O และ N-H ของกลุ่ม Organic functional groups ที่พีค 3,363.85, 1,524.83, 1,363.67 และ 813.96 cm^{-1} หายไปเมื่อถูกแปรสภาพเปลือกหามากไปเป็นถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ในถ่านกัมมันต์ยังพบพันธะการแตกตัวของสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) สังเกตได้จากพีคของ C-Cl และ Mg-O ที่พีค 611.43 และ 418.55 cm^{-1} ที่นำมากระตุ้นร่วมด้วยอยู่ภายในโครงสร้าง เพื่อทำหน้าที่ในการดูดซับของหมู่ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ขนิษฐา และคณะ (2562)



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



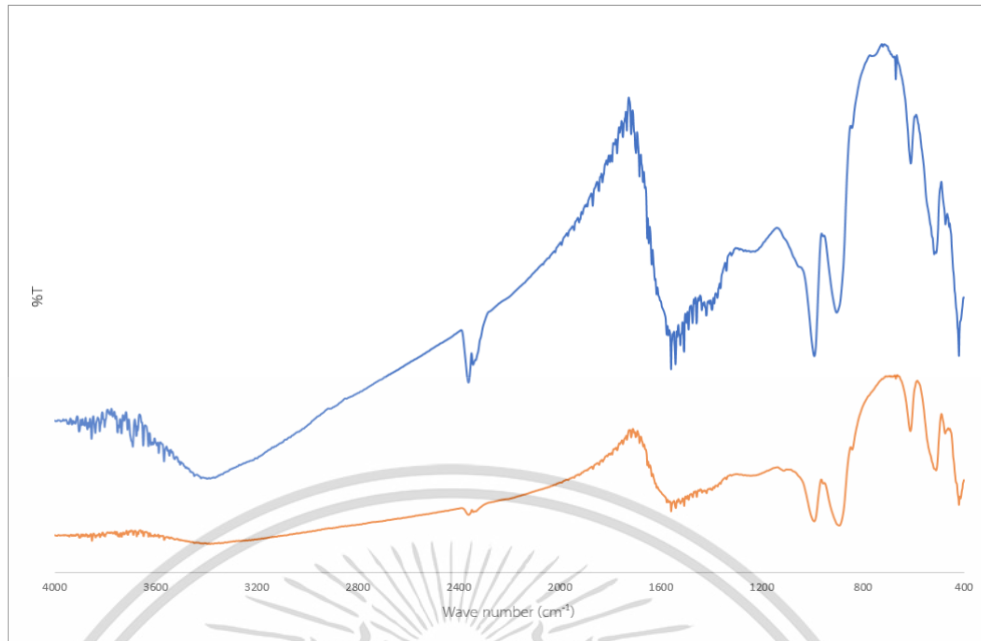
(ข)

รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางเคมีของเปลือกหอย (ก) และถ่านกัมมันต์ (ข)

เลขคลื่นที่ $4,000-400\text{ cm}^{-1}$

รูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 แสดงโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์จากเปลือกหอยก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่ามีพีคของหมู่ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ที่เลขคลื่นช่วง 457.12 cm^{-1} , P-O stretching ที่เลขคลื่นช่วง 1053.13 cm^{-1} และ O-P-O Bending ที่เลขคลื่นช่วง 516.92 ปรากฏบนกราฟ และจากสเปกตรัม IR พบว่าแถบการสั่นของหมู่ (PO_4^{3-}), P-O, O-P-O เพิ่มขึ้นจากถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับ จึงอธิบายได้ว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกหอยเกิดการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ตามที่ปรากฏในรูปที่ 4.2 โครงสร้างเคมีของถ่านกัมมันต์หลังการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ (ข) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Albuquerque, *et al.* (2021)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์ก่อน-หลังการดูดซับ
 (— ถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับ — ถ่านกัมมันต์หลังการดูดซับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของเปลือกหมาก และถ่านกัมมันต์

Bond Functional Group	Betel Nut Bark (cm ⁻¹)	Activated Carbon Before Adsorption (cm ⁻¹)	Activated Carbon After Adsorption (cm ⁻¹)
O-H Stretching	~3,400.00	~3,400.00	~3,400.00
C-H Stretching	2,925.40	~2,800.00	~2,800.00
O-H, N-H Combined	3,363.85	-	-
C≡C Stretching	2,362.79	2,358.94	2,360.87
C=O Stretching	1,743.60, 1,718.57	1,716.64	1,716.64
C=C Aromatic Stretching	1,647.20, 1,448.54	1,558.48	1,558.48
N-O Symmetric Stretching	1,524.83	-	-
N-O Asymmetric Stretching	1,363.67	-	-
C-O Stretching	1,110.99	1,109.06	991.41
C-H Bending	-	891.11	900.75
N-H Bending Vibrations	813.96	-	-
P-O Stretching	-	-	1,053.13
C-Cl Stretching	-	611.43	609.51
O-P-O Bending	-	-	516.92
PO ₄ ³⁻	-	-	457.12
Mg-O Stretching	-	418.55	418.55

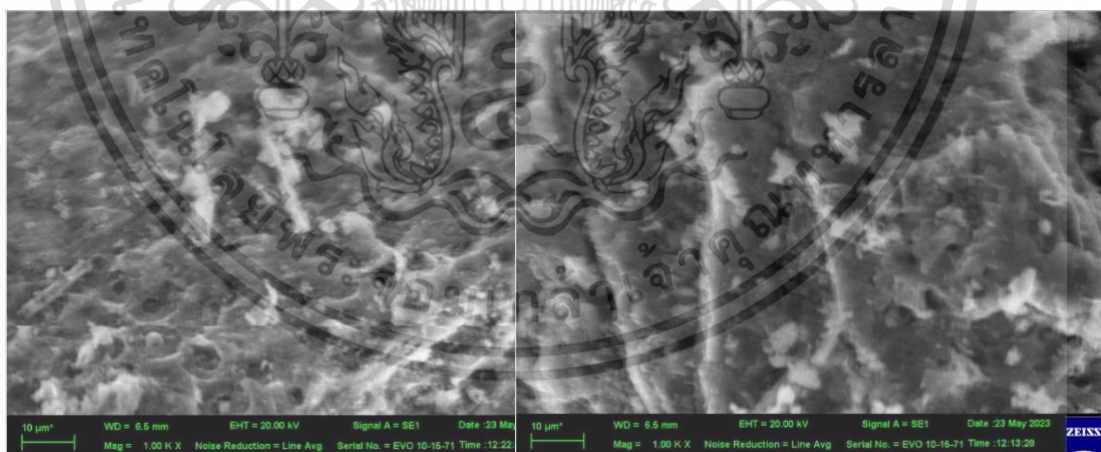
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากก่อนการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟตด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 100, 500 และ 1,000 เท่า พบว่าลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์พบว่ามีความรูพรุนมาก (รูปที่ 4.3) และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก ด้วย Energy-Dispersive Spectroscopy (EDS) พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่ถูกการกระตุ้นด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) อัตราส่วน (1:5) มีองค์ประกอบของธาตุ C, Mg และ K เป็นองค์ประกอบหลัก โดย C, Mg และ K มี % Weight อยู่ที่ 85.41, 12.72 และ 1.87 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และ % Atomic อยู่ที่ 92.57, 6.81 และ 0.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3-4.4

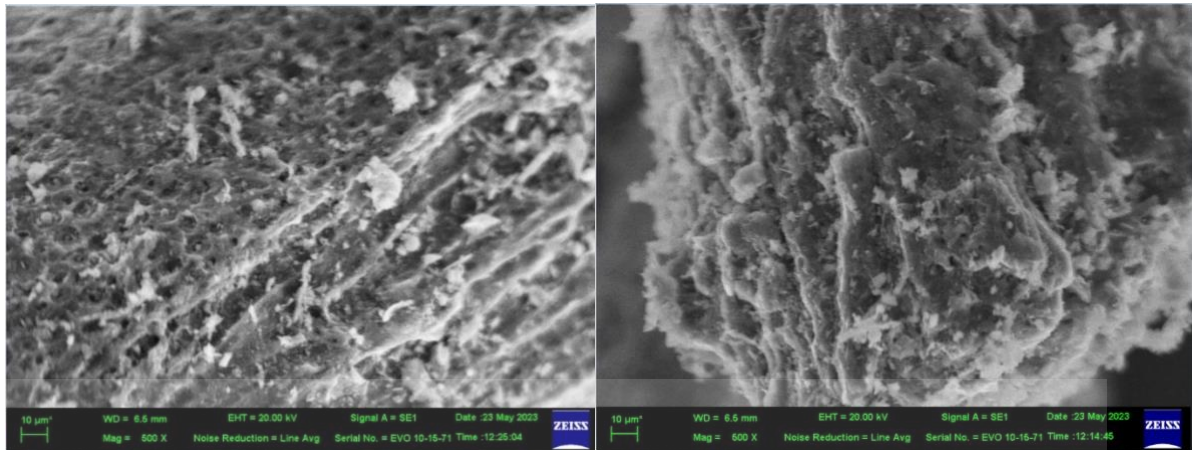
ตารางที่ 4.3 วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุของถ่านกัมมันต์

Element	Weight%	Atomic%
C K	85.41	92.57
Mg K	12.72	6.81
K K	1.87	0.62
Totals	100.00	

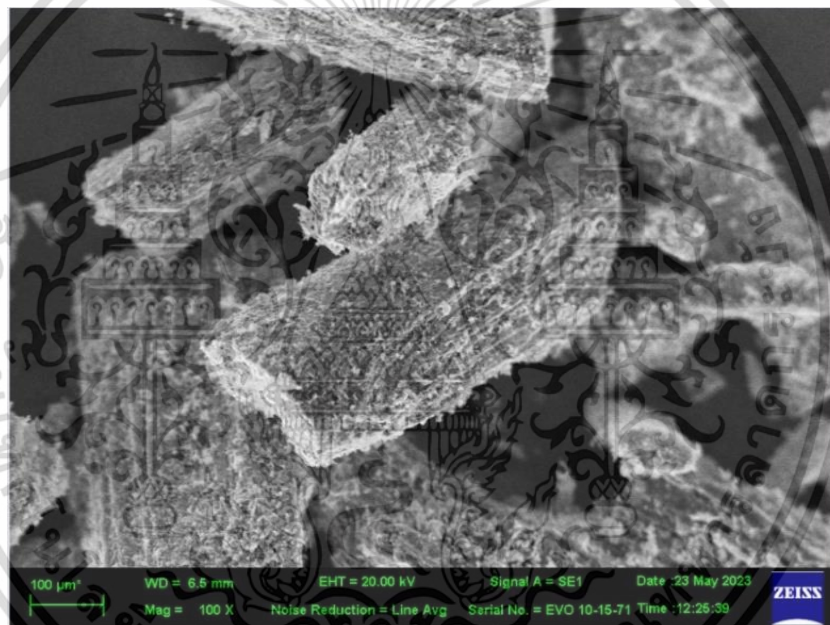


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



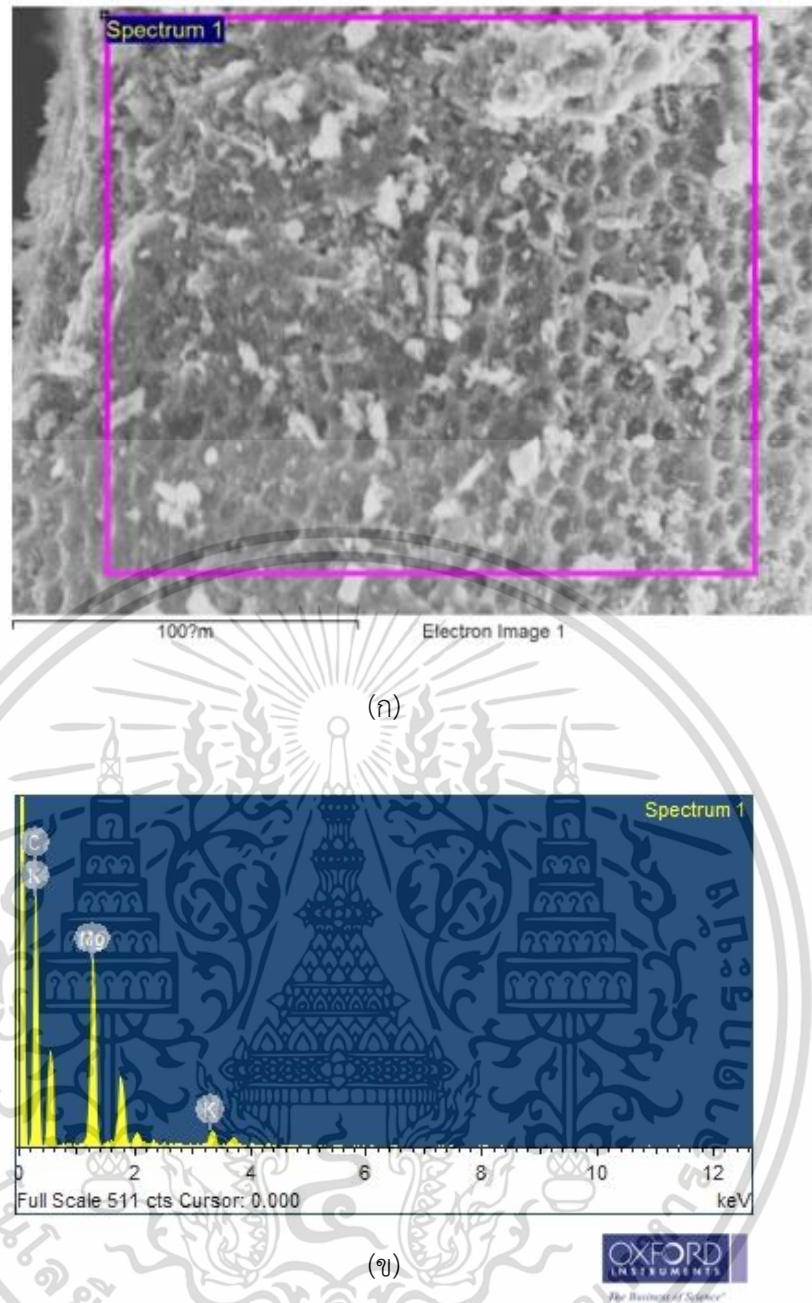
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกหอยหิโรคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 500 เท่า (ค) กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



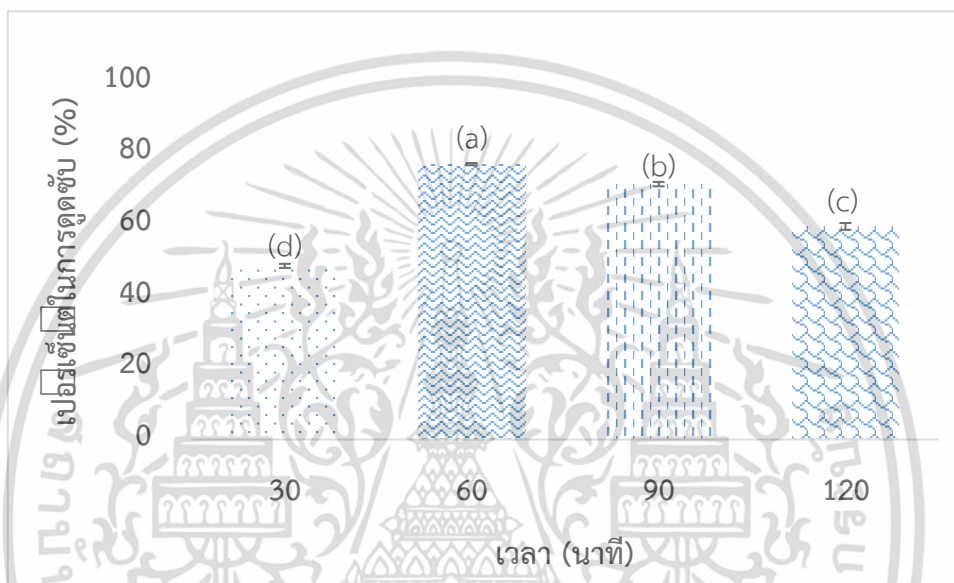
รูปที่ 4.4 ลักษณะสัณฐานของพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (ก) และองค์ประกอบธาตุของถ่านกัมมันต์ (ข) วิเคราะห์ด้วย SEM-EDS

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

4.2.1 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสม

ผลของระยะเวลาในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากปริมาณ 1 กรัม ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่ 250 รอบต่อนาที ที่ค่า pH ไม่ได้ปรับค่า (pH = 5.6) เมื่อแปรค่าระยะเวลาในการดูดซับที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ 48.57 ± 0.58 , 77.02 ± 0.31 , ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

71.44±0.62 และ 59.60±0.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-3.1 ภาคผนวก ก) นั่นคือประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงที่เวลา 90 นาที เป็นต้นไป เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรม Minitab Statistical Software พบว่าที่เวลา 60 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสม โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1.1 ถึง 1.3 ภาคผนวก ข)

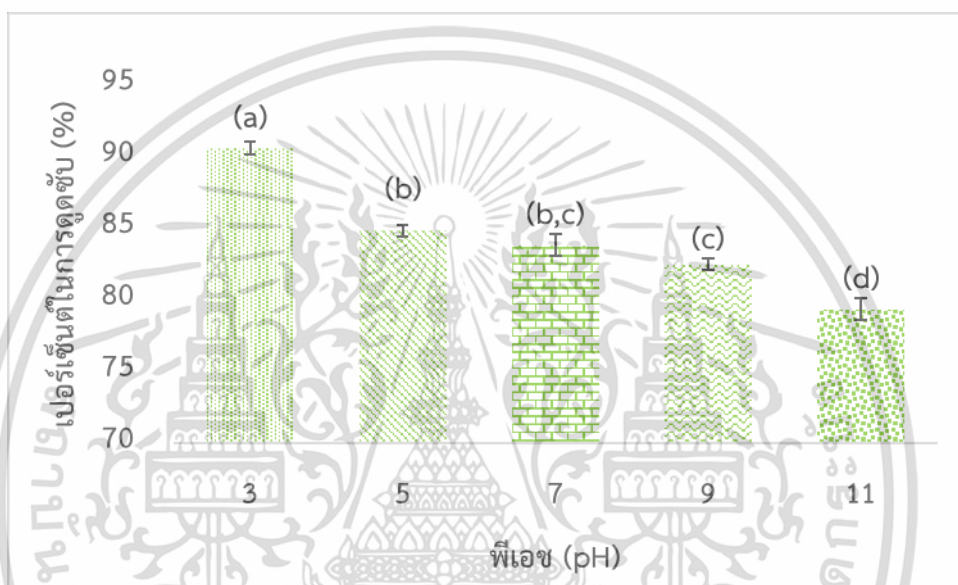


รูปที่ 4.5 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

4.2.2 ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสม

ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากปริมาณ 1 กรัม ความเร็วรอบในการปั่นกวานที่ 250 รอบต่อนาที ระยะเวลา 60 นาที แปรค่าพีเอช (pH) ที่ 3, 5, 7, 9 และ 11 พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ 90.55±0.46, 84.82±0.42, 83.80±0.73, 82.45±0.39 และ 79.32±0.73 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-3.2 ภาคผนวก ก) เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรม Minitab Statistical Software พบว่าค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 3 เป็นค่าพีเอชที่เหมาะสม โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2.1 ถึง 2.3 ภาคผนวก ข) ทั้งนี้ อาจเนื่องจากในช่วงพีเอชเป็นกรดจะพบฟอสเฟตส่วนใหญ่ในรูป H_2PO_4^- ส่วนในรูปพีเอชเป็นด่างจะพบฟอสเฟตส่วนใหญ่ในรูป HPO_4^{2-} ซึ่ง H_2PO_4^- จะจับตัวกับพื้นผิวตัวดูดซับได้ง่ายกว่า HPO_4^{2-} เพราะมีค่าพลังงานอิสระในการดูดซับ (adsorption free energy) ต่ำกว่า (Haridas & Krishnan, 2008)

จากค่า Zero point charge (pHzpc) ของฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ 8 (Abdennouri *et al.* 2020) ถ้า pH ในน้ำเสียมีค่าต่ำกว่าค่า pHzpc จะทำให้มีประจุบวกบนพื้นผิวตัวดูดซับมาก ส่งผลให้สามารถจับกับประจุลบของฟอสเฟตได้ดี ในขณะที่ที่ pH สูงกว่า ค่า pHzpc จะเกิดประจุลบบนพื้นผิวตัวดูดซับมาก ส่งผลให้เกิดการผลักกันกับประจุลบของฟอสเฟต นอกจากนี้ OH⁻ ในสภาวะต่าง ยังทำให้การดูดซับของฟอสเฟตซึ่งเป็นประจุลบลดลง (Abdennouri *et al.* 2020) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ประสบโชค และคณะ (2561)



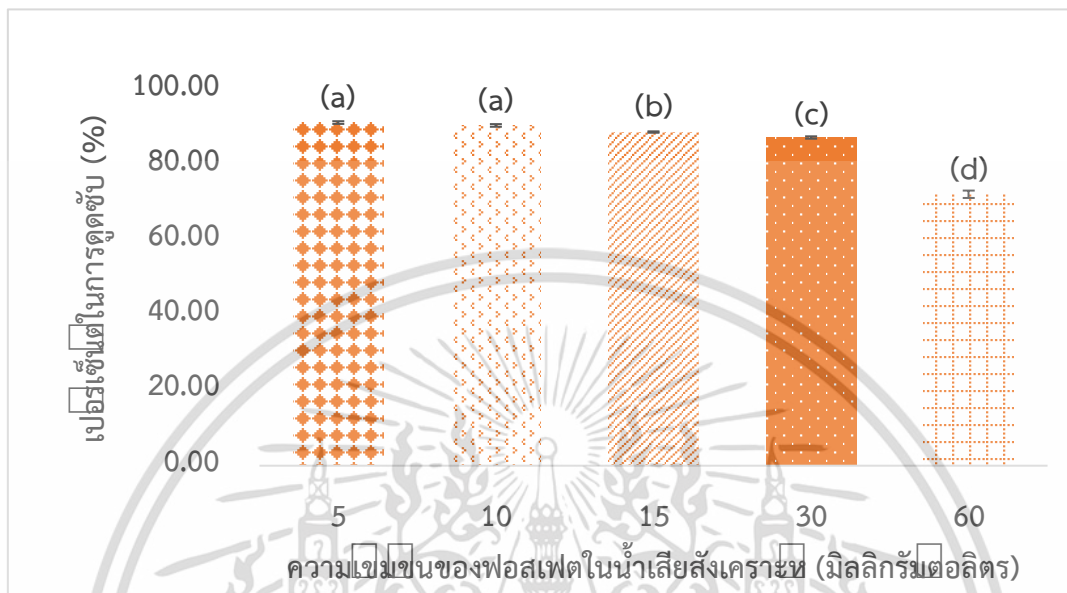
รูปที่ 4.6 ค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

4.2.3 ผลของความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

ผลของความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากปริมาณ 1 กรัม ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่ 250 รอบต่อนาที ที่ค่า pH 3 ระยะเวลา 60 นาที เมื่อแปรค่าความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10, 15, 30 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ 91.29 ± 0.36 , 90.53 ± 0.35 , 88.77 ± 0.18 , 87.32 ± 0.32 และ 72.21 ± 0.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-3.3 ภาคผนวก ก) พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้นของฟอสเฟตที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของฟอสเฟตเพิ่มขึ้น เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติด้วย

One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรม Minitab Statistical Software พบว่าค่าความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมี

ความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.1 ถึง 3.3 ภาคผนวก ข)

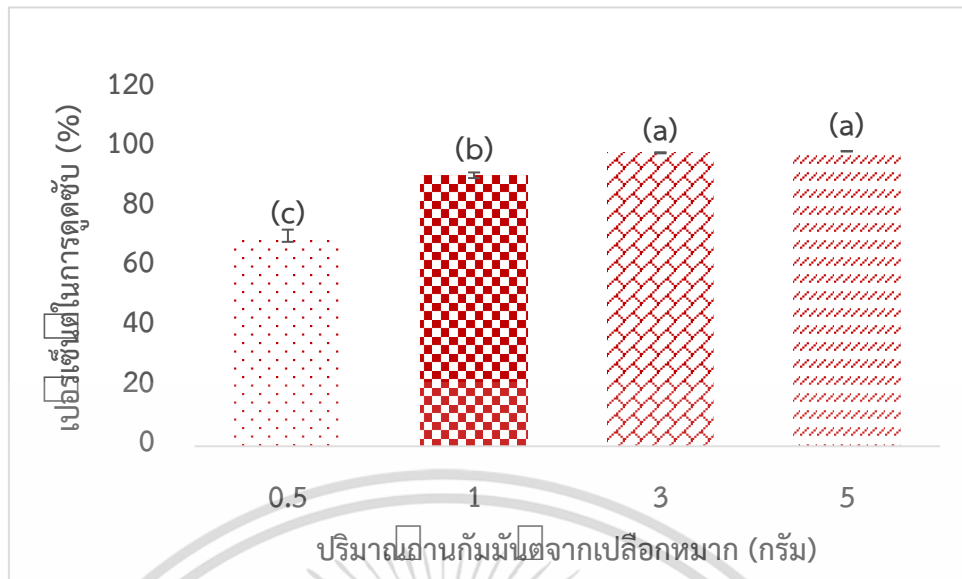


รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตที่เหมาะสมในการดูดซับ

4.2.4 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่เหมาะสม

ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการปั่นกวานที่ 250 รอบต่อนาที ระยะเวลา 60 นาที ที่ค่า pH 3 เมื่อแปรค่าปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่ 0.5, 1, 3 และ 5 กรัม พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ 70.67 ± 1.15 , 90.97 ± 0.53 , 98.50 ± 0.10 และ 99.02 ± 0.05 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-3.4 ภาคผนวก ก) เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรม Minitab Statistical Software พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์มีแนวโน้มในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณของถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก และเริ่มคงที่ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 3 และ 5 กรัม โดยมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์อยู่ที่ 3 กรัม (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.1 ถึง 4.3 ภาคผนวก ข)

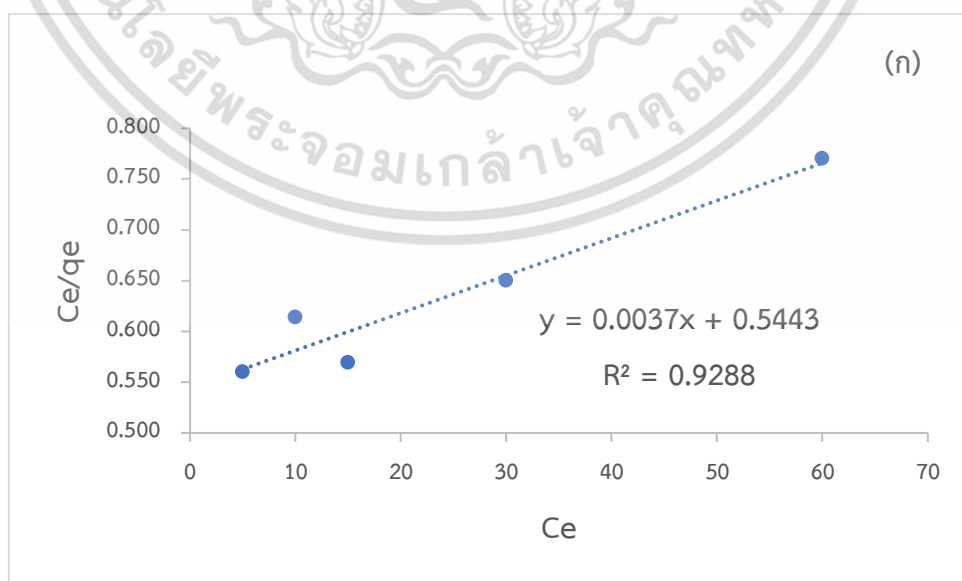
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



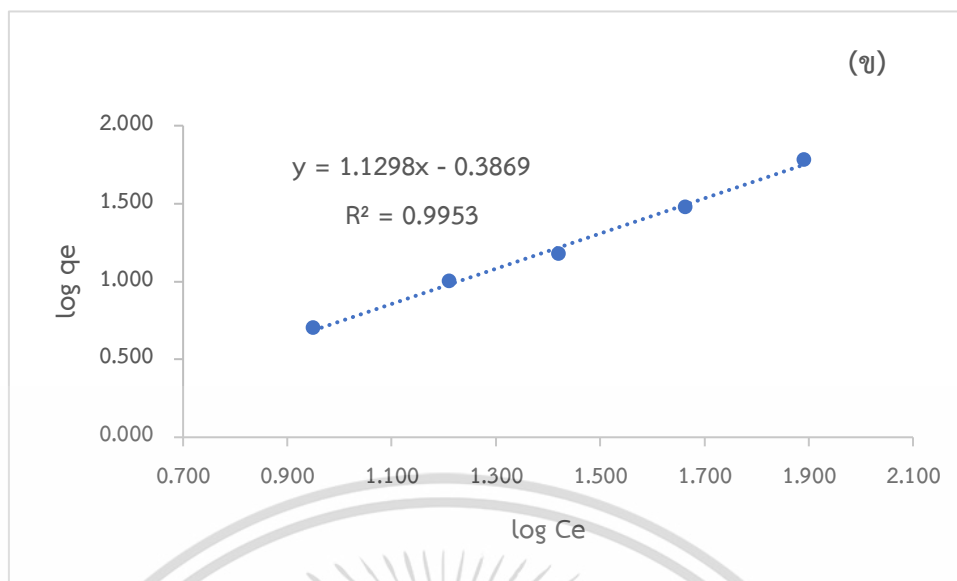
รูปที่ 4.8 ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

4.2.5 ผลของการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ โดยนำผลข้อมูลที่ได้มาหาความสัมพันธ์ตามแบบจำลองของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และแบบจำลองของไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) และ 4.9 (ข) ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตด้วยถ่านกัมมันต์ (ก) แบบแลงเมียร์ (ข) แบบฟรุนดิช

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช

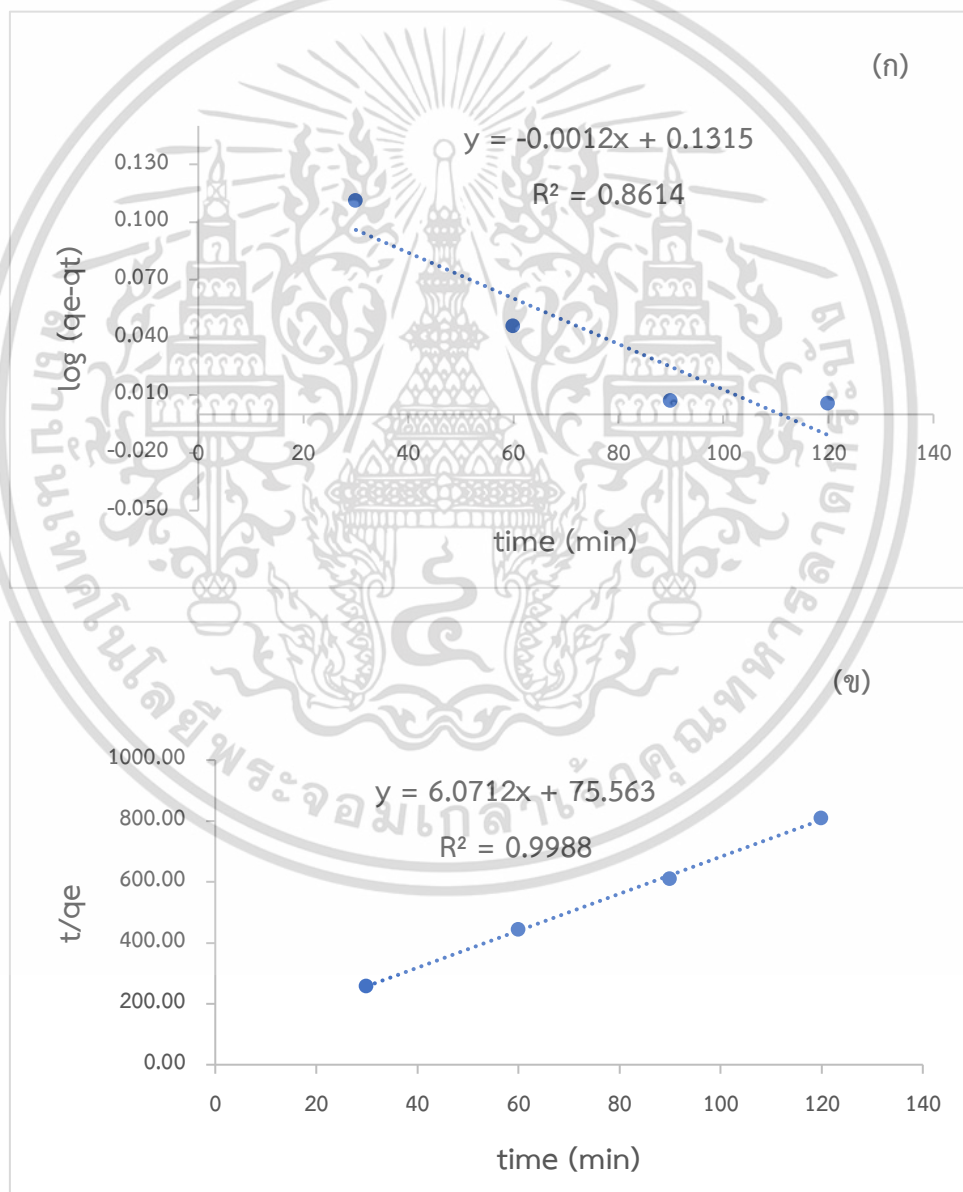
วัสดุดูดซับ	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir)			ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich)		
	q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_F (mg/g)(L/mg) ^{1/n}	$\frac{1}{n}$	R^2
ถ่านกัมมันต์	270.27	0.0068	0.9288	0.4103	1.1298	0.9953

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากจากกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และกราฟไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich) พบว่ามีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9953 เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น ทั้งบริเวณพื้นที่ผิว (Surface area) และข้างในรูพรุนของตัวถ่านกัมมันต์ และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9288 ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว คือ การดูดซับเพียงบริเวณพื้นที่ผิว (Surface area) เมื่อทำการดูดซับจนเต็มพื้นที่ผิวแล้วนั้นทำให้การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟตลดลงตามลำดับ จากกราฟความสัมพันธ์ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์แบบฟรุนดิช อธิบายได้ว่า ค่าคงที่ $\frac{1}{n}$ และ K_F มีค่าเท่ากับ 1.1298 และ 0.4103 ตามลำดับ แปรผลจากค่าคงที่ที่ได้จากการดูดซับแบบฟรุนดิช $\frac{1}{n}$ มีค่ามากกว่า 1 บ่งบอกได้ว่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มากหรือมีบริเวณพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ และไม่วัฏกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์แบบแลงเมียร์ อธิบายได้ว่า ค่า q_m หรือปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟตที่ถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากดูดซับได้ สูงสุดอยู่ มีค่าเท่ากับ 270.27 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าคงที่ K_L เท่า 0.0068 ลิตรต่อมิลลิกรัม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Addie *et al.* (2022)

4.2.6 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

รูปที่ 4.10 แสดงจลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ จากผลการศึกษาพบว่า การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก สอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข)



รูปที่ 4.10 จลนพลศาสตร์การดูดซับทางเคมี
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... (ก) Pseudo-first order reaction (ข) Pseudo-second order reaction
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่ มิมีเห็นแต่แบบสงวนเนื้อหา และที่ยังอยู่ของเงาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

วัสดุดูดซับ	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)			สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order)		
	q_e (mg/g)	k_1 (min ⁻¹)	R^2	q_e (mg/g)	k_2 (g/mg-min)	R^2
ถ่านกัมมันต์	1.35	-0.0012	0.8614	0.1647	6.0712	0.9988

ตารางที่ 4.5 แสดงผลที่ได้จากกราฟจลนพลศาสตร์ พบว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.9988 มากกว่าสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) มีค่าเท่ากับ 0.8614 จากกราฟความสัมพันธ์สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่าสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีค่าคงที่ k_2 และ q_e เท่ากับ 6.0712 และ 0.1647 ตามลำดับ ซึ่งแปรผลจากค่าคงที่ได้จากอัตราเร็วในการดูดซับแบบสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ค่า k_1 และ k_2 โดยเมื่อยิ่งค่าคงที่ k มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นจะมีอัตราเร็วในการดูดซับตามค่าคงที่ k ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Addie *et al.* (2022)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาค้นคว้าการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก สรุปได้ดังนี้

1. ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากก่อนและหลังการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR พบว่าปรากฏพีคของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลคีน แอลคีน อะโรมาติก ฮาโลเจน คาร์บอนิล เอสเทอร์ และสารประกอบอินทรีย์ โดยพบพีคของหมู่ฟอสเฟต (PO_4^{3-}), P-O และ O-P-O บนถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์เท่านั้น
2. ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่ถูกกระตุ้นด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในอัตราส่วน 1:5 วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000, 500 และ 100 เท่า พบว่ามีขนาดรูพรุนค่อนข้างมาก และมีองค์ประกอบของธาตุ C, Mg, K เป็นองค์ประกอบหลัก
3. สภาพที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ 60 นาที ค่าพีเอช (pH) ที่ 3 ความเข้มข้นฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ 3 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ 98.50 เปอร์เซ็นต์
4. ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich) ที่ $R^2 = 0.9953$ และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) ที่ $R^2 = 0.9288$
5. จลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก สอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order reaction) ที่ $R^2 = 0.9988$ และค่า $q_e = 0.1647$

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาค้นคว้าการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียจริง
2. ศึกษาการคายซับฟอสเฟตออกจากถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก
3. ศึกษาสารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กุลธิดา สะอาด. (2557). ประสิทธิภาพการดูดติดผิวโอออนทองแดงของถ่านชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

กุลธิดา สะอาด. (2564). ถ่านชีวภาพ. สาขาการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

เกษร จำปา และดวงใจ วยเจริญ. (2562). ไบโอบีชาร์ (Biochar) ถ่านชีวภาพ ตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน. ศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขานหินซ้อนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดฉะเชิงเทรา.

ชนิษฐา คำวิสัยศักดิ์, ขวัญตรี แสงประชานารักษ์, , พรนภา เกษมศิริ และสุธาทิพย์ ศิริปาณี. (2562). ถ่านกัมมันต์ประสิทธิภาพสูงจากน้ำยางดำ. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

คมสัน นันทสุนทร, พรศิลป์ สีเผือก. (2550). การใช้เปลือกหมากแห้งเป็นวัสดุเพาะเห็ดฟาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.

คณิดา ตังคณานุรักษ์, ฐิติมา รุ่งรัตนอุบล, วัชรพงษ์ วาระรัมย์ และศรัยพงษ์ กรินทร์ไตรทิพย์. (2565). ศึกษาการดูดซับและปลดปล่อยแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตด้วยฟางข้าวและแกลบข้าวเพื่อใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณิดา ตังคณานุรักษ์,ชาลิสสา วิสมหมาย, นพวรรณ เสมวิมล และภัทราพร พนมชัยสว่าง . (2565). ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตของกากกาแฟ และถ่านกากกาแฟ. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อมคณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จันทร์เพ็ญ ชุมแสง. (2564). การใช้องค์ความรู้ผลงานวิจัยและนวัตกรรมการผลิตถ่านดูดกลิ่น 3 In 1 จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อการส่งเสริมรายได้ในพื้นที่เป้าหมาย. ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย ราชภัฏอุตรดิตถ์.

จันทิมา ชั่งสิริพร, ทศนีย์ น้อยเลิศ. (2559). การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยางพาราเพื่อการดูดซับเหล็กในน้ำ. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ฉวีวรรณ เพ็งพิทักษ์. (2562). ถ่านกัมมันต์. กองเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์อุปโภค กรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- ชนะภัย โอสถ, ฐิติภรณ์ บุญแย้ม, มนัสสุดา นันทสิริพร และสิริลักษณ์. (2561). การบำบัดน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สน 5 ชนิด. สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้กรมป่าไม้.
- ชีระวิทย์ รัตนพันธ์. (2548). การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้ถ่านลอยจากเตาเผาขยะภูเก็ต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ณภัทรพิชชา ใจแก้ว และภณทิลาพร สุโนภักดิ์. (2565). ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหอย. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ทศพล ปราชญ์ปรีชา,สงวน วงษ์ชวลิตกุล และอรอุมา ปราชญ์ปรีชา. (2561). การศึกษาลักษณะเฉพาะของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากกากชา และการใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย. วิทยาลัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอานวย. (2566). การผลิตถ่านชีวภาพและแนวทางการใช้ประโยชน์. คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- นิพนธ์ ตั้งคณารักษ์, วิทยา ปั่นสุวรรณ และสรัญญา ธนสัมฤทธิ์. (2551). ประสิทธิภาพการดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าว. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- นिसافر มุหะมัด. (2559). การดูดซับสี้อมด้วยกากชา. คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.
- นีนมवल มานพ. (2552). การกระจายตัวของสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนระหว่างน้ำใต้ดินและเขม่า : เปรียบเทียบระหว่างเขม่าจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและชีวะมวล. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ประสพโชค รื่นสุข. (2561). ผลของความเป็นกรด-ด่างของดินและปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อประสิทธิภาพของราอาร์บัสคูลารีไมคอร์ไรซา *Glomus intraradices* สำหรับข้าวโพดไร่ลูกผสมที่ปลูกในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการเกษตร) สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น. ยกเว้นหากมีเหตุที่สมควรและต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ปรินทร เต็มญารศิลป์. (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์ จาก ไม้ตองและไม้หมาจู. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปรียาพา พาณิชย์ และพุทธธิดา ภูโอบ. (2556). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากปาล์ม. วิศวกรรม ศาสตร์บัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พจนา เพชรคอน. (2563). ความสัมพันธ์ของระบบนิเวศ. สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.).
- พนิดา กังชุ่น, เพ็ญญา เพ็งแจ่ม และสุภาพร รัตนพันธ์. (2557). การเตรียมและลักษณะจำเพาะของ ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด. นิสิตปริญญาตรี สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- พินิจฉณ ปิตุยะ. (2557). เอกสารองค์ความรู้เรื่อง ถ่านชีวภาพ. ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทราย อัน เนื่องมาจากพระราชดำริ นราธิวาส.
- มัลลิกา ปัญญาคะโป. (2556). การบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี: นครปฐม ภาค วิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- รวินิภา ศรีมูล. (2559). การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ. ว.วิทยาศาสตร์ มข. 44: 419-434.
- รัตนา พัฒนประภาพันธุ์. (2537). การกำจัดฟอสเฟตจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแป้งมัน สำปะหลังโดยระบบแอนแอรอบิก ที่มีตัวกลาง-ออกซิก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บัณฑิต วิทยาลัย.
- รววิทย์ จันทร์สุวรรณ. (2558). ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลาย โดยใช้อิฐมวลเบา เป็นตัวดูดซับ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- วรภรณ์ โตสิงห์. (2565). ปัญหาการดำเนินการตามมาตรการควบคุมมลพิษทางน้ำ ภายใต้กฎ กระทรวงที่ออกตามความในมาตรา 80 แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพ สิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535. คณะบริหารการพัฒนาสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหาร ศาสตร์.

เอกสารนี้คือลิขสิทธิ์ของ สิริลักษณ์ ศิริสิงห์, และอรสา สุขสว่าง. (2556). การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเพื่อ การเกษตร. ว. สังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์. ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ห้ามเผยแพร่ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต. อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

สัมฤทธิ์ ไม้พวง. (2021). ถ่านกัมมันต์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์.

สมสกุล รัตนกฤษกร และสุภาวดี น้อยน้ำใส. (2559). การปรับปรุงตัวดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม.

สุรวิทย์ นาคสุสุข. (2556). พลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเบตนิงด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่บรรจุด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และการวิเคราะห์ผลโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อดิศักดิ์ คีรีรักษ์. (2561). การศึกษาตัวดูดซับราคาถูกจากเส้นใยธรรมชาติเหลือทิ้งเพื่อกำจัดสีคริสตัลไวโอเล็ต. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อรสา สุกสว่าง. (2561). เทคโนโลยีเกษตรอินทรีย์ที่น่าสนใจในประเทศไทย : ประโยชน์และแนวทางการใช้ไบโอชาร์ (ถ่านชีวภาพ) สำหรับเกษตรอินทรีย์ไทย. ในเอกสารประกอบการประชุม BioFach South East Asia.

อรอนงค์ อุทัยหงษ์. (2560). น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดแบบติดกับที่ (Onsite Treatment). กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

Abdennouri, M., Assimedine, M., Barka, N., Elmoubarki, R. & Sadiq, H. (2021).

Natural Phosphates Characterization and Evaluation of their Removal Efficiency of Methylene Blue and Methyl Orange from Aqueous Media. Sultan Moulay Slimane University of Beni Mellal.

Amel, K., Hassena, M.A. & Kerroum, D. (2012). Isotherm and Kinetics Study of Biosorption of Cationic Dye onto Banana Peel. Energy Procedia, 19, 286-295.

doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.208>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Albuquerque, A.R.L., Angélica, R.S., Campos, P.V. & Paz, S.P.A. (2021). FTIR spectral signatures of amazon inorganic phosphate: Igneous, weathering, and biogenetic origin. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belé, Brazil & Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturia da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belé, Brazil.
- Ariga, K., Joshi, S., Pradhananga, R.R., Shrestha, L.K. & Shrestha, R.G. (2021). High Surface Area Nanoporous Activated Carbons Materials from Areca catechu Nut with Excellent Iodine and Methylene Blue Adsorption. Department of Advanced Materials Science, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo.
- Atmani, R., Bouamrani, M.L., Elkouali, M.H., Kenz, A., Maghri, I., Moubarak, F. & Talbi, M. (2014). Elimination of Methylene Blue Dye with Natural Adsorbent <Banana Peels Powder>. Global Journal of Science Frontier Research: B Chemistry, 14(1), 39-44.
- Aydin, H. & Bulut, Y. (2006). A kinetics and thermodynamics study of methylene blue adsorption on wheat shells. Desalination 194, 259–267.
- Bardhan, M., Islam, A. & Jawad, A.H. (2020). Adsorption of methylene blue onto betel nut husk based activated carbon prepared by sodium hydroxide activation process. Recreation and Tourism Management Clemson University , Department of Forestry and Wood Technology Khulna University, Chemistry and Environment Universiti Teknologi MARA.
- Chen, H., Chen, W., Chen, Y., Yang, H. & Zhang, X. (2017). The structure evolution of biochar from biomass pyrolysis and its correlation with gas pollutant adsorption performance. Bioresource technology, 246, 101-109.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Dahri, M.K., Lim, L.B.L. & Priyantha, N. (2015), Dragon fruit skin as a potential biosorbent for the removal of methylene blue from aqueous solution, International Food Research Journal University of Peradeniya, Sri Lanka, Pg.2141-2148.
- Ding, E., Fan, X., Gao, C., Jiang, J., Jiang, K., Lan, Y., Qi, X. & Zhang, L. (2023) optimizing Cd²⁺ adsorption performance of KOH modified biochar adopting response surface methodology. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China.
- George, W.S. & Robert, F.B. (2006). Areca catechu (betel nut plant). Species Profiles for Pacific Island Agroforestry.
- Hameed, M., Kadhim, A. & Rasheed, T. (2022). Synthesis and study of magnesium complexes derived from polyacrylate and polyvinyl alcohol and their applications as superabsorbent polymers. Applied Sciences Department, University of Technology-Iraq, Baghdad, Iraq.
- Harides, A. & Krishnan, K.A. (2008). Removal of phosphate from aqueous solutions and sewage using natural and surface modified coir pith. Environmental Technology, Regional Research Laboratory (CSIR), Industrial Estate Post, Thiruvananthapuram, India.
- Hazzaa, R. & Hussien, M. (2015). Adsorption of cationic basic dye from aqueous solution onto activated carbon derived from banana peel. In Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology, CEST2015_00031. Rhodes, Greece, September 3-5, 2015. Rhodes: Global Network of Environmental Science and Technology.
- Hisanaga, T., Padermpole, K. & Tanaka, K. (2000). Photocatalytic degradation of commercial azo dyes. Water Research, 34, 327-333.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Layne, C. (2018). KOH Treated Biochar: An Improved Material for the Removal of Aqueous Contaminants. Mississippi State University.

Matichon Online. (2559). หมากแห้ง. [Online] https://www.matichon.co.th/sme/news_70004 สืบค้นเมื่อวันที่ 25 มีนาคม 2566



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการศึกษา

ภาคผนวก ก-1 การศึกษาการสร้างกราฟมาตรฐานของน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต

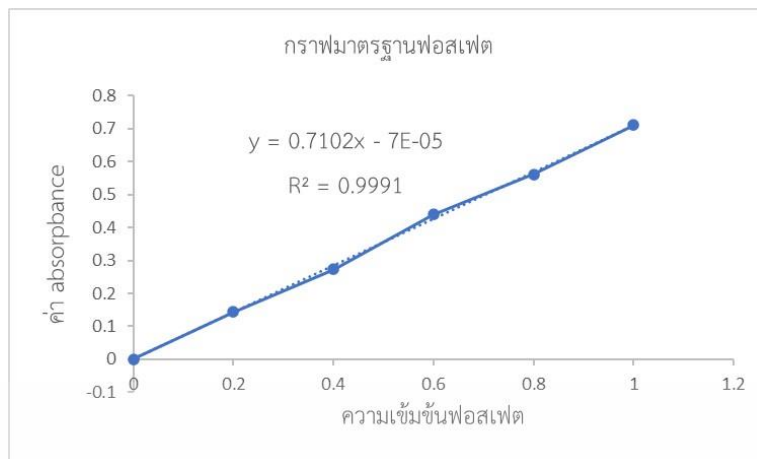
การสร้างกราฟมาตรฐานฟอสเฟต

1. เตรียมสต็อกสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสต็อกสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบปริมาตร
3. ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตในข้อ 2 มา 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
4. เติมน้ำยารวม (Combined Reagent) 8 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
5. วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร
6. นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน

ตารางที่ ก-1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟต	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.00001
0.2	0.14435
0.4	0.27392
0.6	0.43953
0.8	0.56141
1	0.71092

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก-2 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์กับค่าการ

ดูดกลืนแสง

ก-2 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์

ผลเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)

$$\frac{\text{ปริมาณความชื้น}}{\text{(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)}} = \frac{\text{ผลต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบและหลังอบ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)}} \times 100$$

$$\frac{\text{ปริมาณความชื้น}}{\text{(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)}} = \frac{443.81 - 100.75 \text{ (g)}}{443.81 \text{ (g)}} \times 100$$

$$\frac{\text{ปริมาณความชื้น}}{\text{(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)}} = 77.2988$$

ผลเปอร์เซ็นต์การผลิตร้อยละไบโอชาร์ (%yield)

การเผาเปลือกหมากเพื่อทำเป็นไบโอชาร์ ในแต่ละรอบของการเผาจะแบ่งเปลือกหมากที่ผ่านการบดแบบหยาบจากเครื่องบด แบ่งใส่ครุชีเบิล (Crucible) จำนวน 6 ถ้วย รวมน้ำหนักของเปลือกหมากเฉลี่ยที่ใส่ลงไปครุชีเบิล เท่ากับ 100 กรัม โดยประมาณ นำไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 400°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ผลผลิตร้อยละ (%yield) ดังนี้

$$\text{ผลผลิตร้อยละ (%yield)} = \frac{\text{ผลผลิตจริง}}{\text{ผลผลิตทางทฤษฎี}} \times 100$$

$$\text{ผลผลิตร้อยละ (%yield)} = \frac{10.03}{22.7012} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การผลิตร้อยละ (%yield) = 44.1850 โปรดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลเปอร์เซ็นต์การผลิตร้อยละถ่านกัมมันต์ (%yield)

นำไปไอซาร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) อัตราส่วน (1:5) โมลาร์ (M) เรียบร้อยแล้วนำไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ $600^{\circ}C$ เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ผลผลิตร้อยละ (%yield) ดังนี้

$$\text{ผลผลิตร้อยละ (\%yield)} = \frac{\text{ผลผลิตจริง}}{\text{ผลผลิตทางทฤษฎี}} \times 100$$

$$\text{ผลผลิตร้อยละ (\%yield)} = \frac{21.30}{35.40} \times 100$$

$$\text{ผลผลิตร้อยละ (\%yield)} = 60.1694$$

ก-3 ผลของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

ตารางที่ ก-3.1 ผลการทดลองระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม

ระยะเวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
30	48.787	49.003	47.908	48.566	0.58
60	77.184	77.210	76.657	77.017	0.31
90	71.375	70.856	72.089	71.440	0.62
120	58.874	59.226	60.685	59.595	0.96

ตารางที่ ก-3.2 ผลการทดลองความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม

กรด-ด่าง (pH)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
3	91.058	90.437	90.152	90.549	0.46
5	84.949	84.352	85.159	84.820	0.42
7	83.631	84.604	83.169	83.801	0.73
9	82.693	82.662	81.994	82.450	0.39
11	78.478	79.815	79.666	79.320	0.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3.3 ผลการทดลองความเข้มข้นในการดูดซับที่เหมาะสม

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
5	91.347	91.073	90.635		
10	90.705	90.122	90.764	90.530	0.35
15	88.720	88.977	88.619	88.773	0.18
30	82.693	82.662	81.994	82.450	0.39
60	78.478	79.815	79.666	79.320	0.73

ตารางที่ ก-3.4 ผลการทดลองปริมาณในการดูดซับที่เหมาะสม

ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0.5	47.594	49.807	45.713	47.594	2.05
1	83.865	82.705	84.581	83.865	0.95
3	97.326	97.177	97.534	97.326	0.18
5	98.249	98.256	98.410	98.249	0.09

ตารางที่ ก-3.5 ผลการทดลองไอโซเทอร์มในการดูดซับที่เหมาะสม

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
5	88.788	88.255	87.345	88.615	0.73
10	90.705	90.122	90.764	90.530	0.35
15	88.720	88.977	88.619	88.733	0.18
30	87.686	87.139	87.131	88.319	0.32
60	71.501	73.335	71.802	72.214	0.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3.6 ผลการทดลองจลนพลศาสตร์ในการดูดซับที่เหมาะสม

ระยะเวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
30	38.052	35.169	36.635	36.618	1.44
60	55.454	55.093	55.520	55.356	0.23
90	68.393	68.365	66.699	67.819	0.97
120	68.393	66.608	70.202	68.401	1.80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข การคำนวณทางสถิติโดยโปรแกรม Minitab

ภาคผนวก ข-1 ผลของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

ข-1 ผลการศึกษาสภาวะของระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0 : ระยะเวลาที่สัมผัสที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญ

H_1 : ระยะเวลาที่สัมผัสที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญ

ค่าระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

ค่า P-value 0.000 เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 คือ ระยะเวลาที่สัมผัสที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ข-1.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Value	P-Value
C1	3	1446.94	482.313	1109.37	0.000
Error	8	3.48	0.435		
Total	11	1450.42			

ตารางที่ ข-1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ระยะเวลาที่สัมผัสเป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ระยะเวลาที่สัมผัส	N	Mean	StDev	95% CI
30	3	48.566	0.580	(47.688, 49.444)
60	3	77.017	0.312	(76.139, 77.895)
90	3	71.440	0.619	(70.562, 72.318)
120	3	59.595	0.960	(58.717, 60.473)

โดยจากการทดสอบหาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของระยะเวลาที่สัมผัสต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยจากการใช้ Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-1.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ระยะเวลาที่สัมผัสเป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที

C1	N	Mean	Grouping
60	3	77.017	A
90	3	71.440	B
120	3	59.595	C
30	3	48.566	D

ข-2 ผลการศึกษาสถานะของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0 : ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญ

H_1 : ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญ

ค่าระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

ค่า P-value 0.000 เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ข-2.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Value	P-Value
C1	4	203.191	50.7978	156.91	0.000
Error	10	3.237	0.3237		
Total	14	206.428			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ค่าความเป็นกรด-ต่าง (pH) อยู่ในสภาวะที่ 3, 5, 7, 9 และ 11 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

pH	N	Mean	StDev	95% CI
3	3	90.549	0.463	(89.552, 91.546)
5	3	84.820	0.418	(84.088, 85.552)
7	3	83.801	0.733	(82.804, 84.799)
9	3	82.450	0.395	(81.452, 83.447)
11	3	79.320	0.733	(78.323, 80.317)

โดยจากการทดสอบหาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ต่าง (pH) ต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยจากการใช้ Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตาราง ข-2.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ค่าความเป็นกรด-ต่าง (pH) อยู่ในสภาวะที่ 3, 5, 7, 9 และ 11

C1	N	Mean	Grouping
3	3	90.549	A
5	3	84.820	B
7	3	83.801	B C
9	3	82.450	C
11	3	79.320	D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-3 ผลการศึกษาสภาวะของปริมาณความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ในการดูดซับที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0 : ปริมาณความเข้มข้นที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญ

H_1 : ปริมาณความเข้มข้นที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญ

ค่าระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

ค่า P-value 0.000 เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 คือ ปริมาณความเข้มข้นที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ข-3.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Value	P-Value
C1	4	735.666	183.916	676.98	0.000
Error	10	2.717	0.272		
Total	14	738.383			

ตารางที่ ข-3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปริมาณความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 5, 10, 15, 30 และ 60 มิลลิกรัม ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ความเข้มข้น	N	Mean	StDev	95% CI
5	3	91.018	0.359	(90.348, 91.689)
10	3	90.530	0.355	(89.860, 91.039)
15	3	88.772	0.185	(88.102, 89.443)
30	3	87.319	0.321	(86.648, 87.989)
60	3	73.665	0.984	(71.542, 72.883)

โดยจากการทดสอบหาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยจากการใช้ Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-3.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปริมาณความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตที่ 5, 10, 15, 30 และ 60 มิลลิกรัม

C1	N	Mean	Grouping
5	3	91.018	A
10	3	90.530	A
30	3	87.319	B
15	3	76.691	C
60	3	73.665	D

ข-4 ผลการศึกษาสถานะของปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากในการดูดซับที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0 : ปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ อย่างมีนัยสำคัญ

H_1 : ปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ อย่างมีนัยสำคัญ

ค่าระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

ค่า P-value 0.000 เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ข-4.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Value	P-Value
C1	3	1578.87	526.291	1308.77	0.000
Error	8	3.22	0.402		
Total	11	1582.09			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่ 0.5, 1, 3 และ 5 กรัม ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ความเข้มข้น	N	Mean	StDev	95% CI
0.5	3	70.732	1.147	(69.888, 71.577)
1	3	90.887	0.530	(90.043, 91.732)
3	3	98.515	0.100	(97.670, 99.359)
5	3	99.051	0.051	(98.207, 99.896)

โดยจากการทดสอบหาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยจากการใช้ Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตาราง ข-4.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่ 0.5, 1, 3 และ 5 กรัม

C1	N	Mean	Grouping
5	3	99.051	A
3	3	98.515	A
1	3	90.887	B
0.5	3	70.732	C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่...15...เดือน.....มิถุนายน.....พ.ศ....2566....

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว.....ไฉยยิกา เทพวงศ์..... รหัสประจำตัว.....62050382.....

นาย/นาง/นางสาว.....วริศรา ศรีเดช..... รหัสประจำตัว.....62050442.....

นาย/นาง/นางสาว.....ศิริรัตน์ เกาะกลาง..... รหัสประจำตัว.....62050451.....

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา.....เคมีสิ่งแวดล้อม.....ภาควิชา.....เคมี.....

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา เรื่อง

ชื่อภาษาไทย.....การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก.....

ชื่อภาษาอังกฤษ Adsorption Efficiency of Phosphate from Synthetic Wastewater using Activated Carbon from Betel Nut Bark.

ปีการศึกษา.....2565.....

เป็นผลงานวิจัยที่มิได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักษรวินิจฉัย.....5.46.....% หรือโปรแกรม Turnitin.....%

ลงชื่อ.....ไฉยยิกา เทพวงศ์.....

ลงชื่อ.....วริศรา ศรีเดช.....

ลงชื่อ.....ศิริรัตน์ เกาะกลาง.....

(นางสาวไฉยยิกา เทพวงศ์)

(นางสาววริศรา ศรีเดช)

(นางสาวศิริรัตน์ เกาะกลาง)

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ศ. / รศ. / ผศ. / ดร. / อ.....สุวรรณณี จรรยาพูน..... อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลงชื่อ.....

อาจารย์ที่ปรึกษา