ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์
จากเปลือกหมาก

ADSORPTION EFFICIENCY OF METHYLENE BLUE USING ACTIVATED CARBON FROM BETEL NUT BARK

ณภัทรพิชชา ใจแกล้ว

ภัณฑิลาพร สุโนภักดิ์

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADSORPTION EFFICIENCY OF METHYLENE BLUE USING ACTIVATED CARBON FROM BETEL NUT BARK

NAPATPITCHA JAIKLAW
PHANTILAPORN SUNOPHAK

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
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก Adsorption Efficiency of Methylene Blue using Activated Carbon from Betel Nut Bark
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณภัทรพิชชา ใจแกล้ว รหัสนักศึกษา 62050384 นางสาวภัณฑิลาพร สุโนภักดิ์ รหัสนักศึกษา 62050424
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณี จรรยาพูน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
รศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณภัทรพิชชา ใจแกล้ว รหัสนักศึกษา 62050384
	นางสาวภัณทิลาพร สุโนภักดิ์ รหัสนักศึกษา 62050424
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณี จรรยาพูน

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก โดยเตรียมถ่านไบโอชาร์จากการเผาเปลือกหมากด้วยเตาเผาถ่านในสภาวะอากาศปิด จากนั้น นำถ่านไบโอชาร์ไปแช่ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปเผาในเตาเผาสภาวะอากาศปิดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ ได้แก่ วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (FT-IR), ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และศึกษาวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET) จากนั้น ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลีนบลูแบบแบทช์ โดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัส ความเร็วรอบในการปั่นกวน ปริมาณตัวดูดซับ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความเข้มข้นเมทิลีนบลูในการดูดซับ ศึกษาไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู จากผลการศึกษาคุณลักษณะสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าเปลือกหมากมีลักษณะผิวขรุขระ ส่วนไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กกว่า จากผลการศึกษาด้วย BET พบว่าเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 63.822, 49.976, 74.016 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลีนบลู คือ ระยะเวลาที่ 45 นาที ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ปริมาณตัวดูดซับที่ 0.20 กรัม pH 5 และความเข้มข้นเมทิลีนบลู 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้ 97.22±0.14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าเปลือกหมากและไบโอชาร์ที่สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้ 84.34±0.12 และ 83.70±0.28 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (R^2 = 0.9709) และฟรุนดิช (R^2 = 0.9347) จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับสมการความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับสอง (q_e = 4.7371, k_2 = 1.0461, R^2 = 0.9998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

คำสำคัญ : การดูดซับ, เมทิลีนบลู, ถ่านกัมมันต์, ไบโอชาร์, เปลือกหมาก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Adsorption Efficiency of Methylene Blue using Activated Carbon from Betel Nut Bark
Students	Miss Napatpitcha Jaiklaw Student ID 62050384
	Miss Phantilaporn Sunophak Student ID 62050424
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 methylene blue using betel nut bark, biochar and activated carbon prepared from betel bark as adsorbent. Biochar was prepared from pyrolyzing betel bark at 400 °C for 2 hr. Activated carbon was prepared by soaking biochar with 2M KOH for 24 hr and then pyrolyzing at 600 °C for 2 hr. Physical and chemical properties of the adsorbents were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) for chemical structures, Spectroscopy electron microscope (SEM) for morphology and BET surface area analyzer for surface area and porosity. Various factors affecting on adsorption efficiencies were investigated such as contact time, agitation speed, amount of adsorbent, pH, concentration of methylene blue. Adsorption isotherms and kinetics of methylene blue were also studied. The results showed that betel bark had a rough surface but biochar and activated carbon contained smaller pore sizes. The surface area of betel nut bark , biochar and activated carbon was 63.822, 49.976 and 74.016 m^2/g, respectively. The optimum conditions for methylene blue adsorption were contact time 45 min, agitation speed 150 rpm, amount of adsorbent 0.20 g. pH 5 and methylene blue concentration 20 mg/l. Under these optimum conditions, the adsorption efficiency of activated carbon was 97.22±0.14 %, which is higher than that of betel bark (84.34±0.12 %) and biochar (83.70±0.28 %). The adsorption isotherm of activated carbon was best fit to the Langmuir isotherm (R^2 = 0.9709) and Freundlich isotherm (R^2 = 0.9347). The adsorption kinetics of activated carbon were in good agreement with the quasi-second-order kinetic model (q_e = 4.7371, k_2 = 1.0461, R^2 = 0.9998).

Keywords: adsorption, methylene blue, activated carbon, biochar, betel nut bark

เอกสารนี้ ... ม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษที่ได้ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆ ในการทำโครงงานพิเศษ

ขอขอบพระคุณ ดร. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ประจำวิชาภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรรมการโครงงานพิเศษ ที่ได้ช่วยตรวจทานและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงงานพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทดลองและเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ การเบิกจ่ายสารเคมี และได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดระยะเวลาในการดำเนินงานโครงงานพิเศษ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการตรวจสอบองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscope, FTIR) การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วิษณุ เพชรภา อาจารย์ประจำวิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมวัสดุ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer, BET)

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา รุ่นพี่และเพื่อนๆ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำปรึกษาและกำลังใจในการทำโครงงานพิเศษตลอดระยะเวลาการดำเนินการ

ณภัทรพิชชา ใจแกล้ว
ภัณฑิลาพร สุโนภักดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญรูป ..... ญ

คำย่อ/สัญลักษณ์ ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 1

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 สีย้อม 4

2.1.1 ประเภทของสีย้อม 4

2.1.2 กระบวนการกำจัดสีย้อม 7

2.2 เมทิลีนบลู 7

2.3 หมาก 8

2.4 ไบโอชาร์ 10

2.5 ถ่านกัมมันต์ 12

2.5.1 การกระตุ้นถ่าน 12

2.5.2 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ 13

2.6 กระบวนการดูดซับ 14

2.6.1 ประเภทของการดูดซับ 14

2.6.2 กลไกการดูดซับ 14

2.6.3 วัสดุดูดซับ 15

2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ 15

2.6.5 ไอโซเทอมการดูดซับ 16

2.6.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ 18

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 23
3.1 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 23
3.1.1 เครื่องมอที่ใช้ในการทดลอง 23
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 23
3.1.3 วัสดุดูดซับ 24
3.1.4 การเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกหมาก 24
3.1.5 การเตรียมตัวดูดซับไบโอชาร์จากเปลือกหมาก 24
3.1.6 การเตรียมตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ 25
3.1.7 การเตรียมเมทิลีนบลูเพื่อหาความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) 25
3.1.8 ศึกษาวิเคราะห์หาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ 25
3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก 26
3.2.1 ศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม 26
3.2.2 ศึกษาผลของความเร็วรอบในการดูดซับที่เหมะสม 27
3.2.3 ศึกษาผลของปริมาณเปลือกหมากในการดูดซับที่เหมาะสม 27
3.2.4 ศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม 28
3.2.5 ศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในการดูดซับที่เหมาะสม... 28
3.2.6 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลีนบลู (เปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์) 29
3.2.7 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู (เปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์) 30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล 32
4.1 ผลวิเคราะห์คุณลักษณะของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ 32
4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของวัสดุดูดซับ 32
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด 33
4.1.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวดูดซับและปริมาตรของรูพรุน 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู 36
4.2.1 ผลของระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม.. 36
4.2.2 ผลของความเร็วรอบในการดูดซับที่เหมะสม.. 37
4.2.3 ผลของปริมาณเปลือกหมากในการดูดซับที่เหมาะสม.................................. 38
4.2.4 ผลของความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม.. 39
4.2.5 ผลของปริมาณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในการดูดซับที่เหมาะสม 40
4.2.6 เปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่าน
การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ 41
4.2.7 ผลของการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลีนบลู 42
4.2.8 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู 43
4.2.9 ผลการเปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก
ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์.. 45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.. 47
5.1 สรุปผลการวิจัย 47
5.2 ข้อเสนอแนะ... 47
เอกสารอ้างอิง.. 48
ภาคผนวก 53
ภาคผนวก ก 54
ภาคผนวก ข... 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 สภาวะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 25
3.2 สภาวะของเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน 26
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของเปลือกหมาก ไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์.......... 33
4.2 ค่าคงที่จากสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมแบบฟรุนดิช.......... 43
4.3 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและอันดับสอง.......... 45
ก-2 มาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูกับค่าดูดกลืนแสง 54
ก-3 ผลการทดลองระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม.......... 55
ก-4 ผลการทดลองความเร็วรอบในการดูดซับที่เหมาะสม.......... 55
ก-5 ผลการทดลองปริมาณเปลือกหมากในการดูดซับที่เหมาะสม.......... 55
ก-6 ผลการทดลองความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม.......... 56
ก-7 ผลการทดลองปริมาณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในการดูดซับที่เหมาะสม.......... 56
ก-8 ผลการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ 56
ก-9.1.1 ผลการทดลองแสดงความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก.......... 57
ก-9.1.2 ผลการทดลองแสดงความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์ 57
ก-9.1.3 ผลการทดลองแสดงความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์ 57
ก-9.2.1 ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก 58
ก-9.2.2 ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์ 58
ก-9.2.3 ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์ 58
ก-10.1.1 ผลการทดลองแสดงความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก 59
ก-10.1.2 ผลการทดลองแสดงความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์.......... 59
ก-10.1.3 ผลการทดลองแสดงความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์.......... 59
ก-10.2.1 ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก.......... 60
ก-10.2.2 ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์ 60
ก-10.2.3 ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์.......... 61
ก-11 ผลการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์...... 61
ข-1.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab.......... 62
ข-1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้ระยะเวลาที่สัมผัสที่
0, 5, 15, 30, 45, 60, 90 และ120 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ข-1.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ระยะเวลาที่สัมผัสที่ 0, 5, 15, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที........ 63
ข-2.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab........ 63
ข-2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ความเร็วรอบที่ 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์........ 64
ข-2.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ความเร็วรอบที่ 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที........ 64
ข-3.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab........ 65
ข-3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปริมาณเปลือกหมากที่ 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 กรัม ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์........ 65
ข-3.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปริมาณเปลือกหมากที่ 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 กรัม........ 65
ข-4.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab........ 66
ข-4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ความเป็นกรด-ด่างที่ 3, 5, 7, 9 และ 11 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์........ 66
ข-4.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ความเป็นกรด-ด่างที่ 3, 5, 7, 9 และ 11........ 66
ข-5.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab........ 67
ข-5.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์........ 67
ข-5.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ที่ปริมาณความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร........ 68
ข-6.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab........ 68
ข-6.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้อัตราส่วนไบโอชาร์ต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์........ 69
ข-6.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้อัตราส่วนไบโอชาร์ต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก........ 69
ข-7.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab........ 69
ข-7.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยวัสดุดูดซับทั้งสามชนิดคือเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์........ 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ข-7.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยวัสดุดูดซับทั้งสามชนิด คือ เปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสีเมทิลีนบลู.. 7
2.2 เปลือกหมากที่ผ่านการบดแล้ว 9
2.3 แสดงผลผลิตที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนของชีวมวล 11
2.4 แสดงโครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านไบโอชาร์ 11
2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช.. 17
2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ 18
2.7 ขั้นตอนการดูดซับของตัวดูดซับ 18
4.1 โครงสร้างทางเคมีของเปลือกหมาก (ก) และไบโอชาร์ (ข) ถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วน
ไบโอชาร์ : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:1 (ค), 1:2 (ง) และ 1:3 (จ) โดยน้ำหนัก....... 32
4.2 ลักษณะพื้นผิวของเปลือกหมากวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า
(ก่อนการดูดซับ).. 34
4.3 ลักษณะพื้นผิวของเปลือกหมากวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า
(ก) ก่อนการดูดซับ (ข) หลังการดูดซับ 34
4.4 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ที่ผ่านการ
กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:1 (ก) ก่อนการดูดซับ, ในอัตราส่วน 1:2 (ข)
ก่อนการดูดซับ (ค) หลังการดูดซับ, ในอัตราส่วน 1:3 (ง) ก่อนการดูดซับ.............................. 35
4.5 กราฟแสดงพื้นที่ผิวดูดซับและปริมาตรรูพรุนของ (ก) และ (ข) เปลือกหมาก , (ค) และ (ง)
ไบโอชาร์ , (จ) และ (ฉ) ถ่านกัมมันต์.. 36
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู 37
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู 38
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกหมากกับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู 39
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู........................ 39
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู
(ก) เปลือกหมาก (ข) ไบโอชาร์ (ค) ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อัตราส่วนไบโอชาร์:โพแทสเซียม
ไฮดรอกไซด์ 1:2.. 40
4.11 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ.................. 41
4.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ (ก) เปลือกหมากแบบแลงเมียร์ (ข)
เปลือกหมากแบบฟลุนดิช (ค) ถ่านไบโอชาร์แบบแลงเมียร์ (ง) ถ่านไบโอชาร์แบบฟลุนดิช (จ)
ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วน 1:2 แบบแลงเมียร์ (ฉ) ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นใน
อัตราส่วน 1:2 แบบฟลุนดิช 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ก) และปฏิกิริยาอันดับสอง (ข) ของเปลือกหมาก, ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ค) และปฏิกิริยาอันดับสอง (ง) ของไบโอชาร์, ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (จ) และปฏิกิริยาอันดับสอง (ฉ) ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วน 1:2.................................. 44

4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยไบโอชาร์ : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วน 1:2.... 46

ก-2 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู กับค่าการดูดกลืนแสง.. 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
BET	Brunauer–Emmett–Teller Analysis
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscope
SEM	Scanning Electron Microscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการฟอกย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นกระบวนการที่ใช้น้ำปริมาณมาก เนื่องจากมีการใช้สารเคมีและสีย้อมในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเส้นใย ทำให้เกิดน้ำทิ้งที่มีสีย้อมและสารเคมีปนเปื้อนปริมาณมาก สีย้อมที่ใช้ส่วนใหญ่ มักเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสูตรโครงสร้างซับซ้อน อาจเป็นสารที่มีพิษ และสลายตัวทางชีวภาพได้ยาก ถ้าทิ้งน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่ผ่านการบำบัด จะส่งผลกระทบทำให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่ชวนมอง บดบังการกระจายของแสงลงสู่แหล่งน้ำ รวมทั้งส่งผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำนั้น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งให้เป็นไปตามมาตรฐานก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

การบำบัดสีย้อมในกระบวนการฟอกย้อมมีหลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) การออกซิเดชัน (oxidation) การใช้โอโซน (ozonation) เทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical technique) การดูดซับ (adsorption) เป็นต้น

เปลือกหมาก เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการทำหมากแห้ง จัดเป็นมูลฝอยอินทรีย์ที่สะสมไว้รอบพื้นที่ทางการเกษตร หรือรอบๆโรงงานแปรรูปหมาก เปลือกหมากประกอบไปด้วยลิกนิน เซลลูโลส ฟีนอล จึงสามารถนำมาผลิตเป็นไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียได้ ซึ่งนอกจากจะช่วยกำจัดของเหลือทิ้งจากเกษตรกรรมแล้ว ยังสามารถนำมาใช้บำบัดน้ำเสียได้

โครงงานพิเศษนี้จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกเปรียบเทียบกับเปลือกหมาก และไบโอชาร์จากเปลือกหมาก โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นที่อัตราส่วนต่างๆ จากนั้น ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเร็วรอบในการปั่นกวน ปริมาณตัวดูดซับ ความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากเพื่อใช้ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมตัวดูดซับจากเปลือกหมาก โดยนำเปลือกหมากไปตากให้แห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วไปบดให้ละเอียด นำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 35 เมช ให้ได้ขนาด 0.5-1.0 มิลลิเมตร และไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บตัวดูดซับที่อบแล้วในเดซิเคเตอร์

2. เตรียมตัวดูดซับไบโอชาร์จากเปลือกหมาก โดยนำเปลือกหมากไปตากให้แห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไบโอชาร์ที่ได้ไปบดให้ละเอียด แล้วไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 35 เมช ให้ได้ขนาด 0.5-1.0 มิลลิเมตร และไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บตัวดูดซับที่อบแล้วในเดซิเคเตอร์

3. เตรียมตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ นำไบโอชาร์บางส่วนที่ได้จากข้อที่ 2) มากระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 2 โมลาร์ ในอัตราส่วน ไบโอชาร์:โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:1, 1:2, 1:3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารที่ผ่านการเผาแล้วไปล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ แล้วล้างต่อด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งค่าพีเอชของน้ำล้างเท่ากับค่าพีเอชของน้ำกลั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เก็บตัวดูดซับที่อบแล้วในเดซิเคเตอร์

4. ศึกษาคุณลักษณะของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ศึกษาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscope, FTIR) ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และศึกษาวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer, BET)

5. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก ได้แก่ ศึกษาระยะเวลาสัมผัส โดยแปรค่าที่เวลา 0, 5, 15, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที ศึกษาความเร็วรอบในการปั่นกวน โดยแปรค่าที่ 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที ศึกษาปริมาณตัวดูดซับโดยแปรค่าที่ 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 กรัม ศึกษาความเป็นกรด-ด่าง โดยแปรค่าที่ pH 3, 5, 7, 9 และ 11 และศึกษาความเข้มข้นของเมทิลีนบลู โดยแปรค่าที่ 10, 20, 30, 40 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

6. นำสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 5 ไปศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก

7. ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ โดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับ ความเร็วรอบในการดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง โดยแปรค่าความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

8. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเร็วรอบในการดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง โดยแปรค่าเวลาที่ 0, 5, 15, 30, 45 60, 90 และ 120 นาที

9. วิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม
2. เป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
3. สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม
4. สามารถลดปัญหามลพิษทางน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หมาก เป็นพืชที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก มียอดส่งออกหมากของไทยเพียง 4 เดือนในปี 2564 คิดเป็นมูลค่า 1,835 ล้านบาท โดยส่งออกไปประเทศเมียนมา มากกว่า 91% เนื่องจากคนในประเทศนิยมเคี้ยวหมากเป็นจำนวนมาก (Longtunman, 2021) นอกจากนี้ ประเทศจีนและอินเดียมีการนำหมากมาแปรรูปและใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ โดยประเทศจีนจะนำหมากไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร ช็อกโกแลต ขนมขบเคี้ยว ส่วนประเทศอินเดียนำไปแปรรูปเป็นเครื่องฟอกย้อมเสื้อผ้าส่าหรีหลากหลายสี และนำไปสกัดเป็นยารักษาโรค (Prachachat, 2021) ดังนั้น จึงมีเปลือกหมากซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก จากการที่เปลือกหมากมีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นองค์ประกอบ จึงสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีย้อมได้

2.1 สีย้อม

สีย้อมแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ สีธรรมชาติ (Natural dyes) และสีสังเคราะห์ (Synthetic dyes) โดยสีย้อมธรรมชาติที่มาจากธรรมชาติ ได้จากส่วนประกอบของพืชและสัตว์ เช่น สีดำจากลูกมะเกลือ และสีม่วงได้จากหอยสังข์หนาม เป็นต้น สีย้อมธรรมชาติมีอันตรายน้อยกว่าสีย้อมสังเคราะห์ แต่มีข้อด้อย คือต้องใช้ปริมาณมากเพื่อให้ได้สีเข้ม จึงอาจได้รับความนิยมน้อยลง ส่วนสีย้อมสังเคราะห์ได้มาจากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเคมี ซึ่งในระดับความเข้มของสีที่เท่ากันจะใช้ปริมาณสีน้อยกว่าสีธรรมชาติ จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (ขนิษฐา, 2547)

ประสิทธิภาพของสีย้อมที่ใช้ในกระบวนการผลิตขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น สมบัติของสีย้อม โครงสร้างทางเคมี วิธีการใช้ อีกทั้งเมื่อพิจารณาจากการมีหรือไม่มีประจุของสีเมื่อละลายน้ำสามารถแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ สีย้อมที่มีประจุบวก สีย้อมที่มีประจุลบ และสีย้อมที่ไม่มีประจุ

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัด จะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซิน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอีน แนพทาลีน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมามีหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป การที่นำสีย้อมใดๆ มาย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับการจับตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าน้ำ ซึ่งสามารถทำให้เกิดสภาวะนี้ได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมที่ถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง (Substantivity) แล้วเกิดพันธะ (bond) ยึดติดกันแน่น สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโคเวเลนต์ การเกิดสีของสีย้อม ปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้ เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า “โครโมฟอร์” ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือ กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

group) กลุ่มไนโตร (Nitro group) กลุ่มอะโซ (Azo group) กลุ่มเอ็ททิลลีน (Ethylene group) กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl group) กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-nitrogen group) กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur group) กลุ่มอะตอมต่างๆเหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติกโดยดูดกลืนแถบสีขาวไว้บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป

ความเป็นพิษของสีย้อมและมลพิษของสีย้อมโดยทั่วไป สีย้อมเป็นสารที่จัดได้ว่ามีความเป็นพิษต่ำ โดยไม่พบว่ามีอันตรายการตาย หรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมสูงกว่าบุคคลอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทาง คือทางจมูกโดยการสูดดม ทางผิวหนังโดยการสัมผัส และทางระบบทางเดินอาหารโดยปนเข้าไปกับอาหารการกิน อย่างไรก็ตาม วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อมมีจำนวนไม่น้อยที่มีความเป็นพิษสูงมาก และมีหลายชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น 2-naphthylamine และ benzidine ผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม หรือสมบัติด้านมลพิษของสีย้อมนั้น พบว่าสีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่ความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้ง ปัจจุบันไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้ง เนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้น แม้มีสีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อยก็สามารถส่งผลต่อทัศนียภาพแก่ผู้พบเห็นได้ จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม

2.1.1 ประเภทของสีย้อม

การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุด คือ การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้ เพราะจะต้องมีความคงทนต่อการซัก มีความคงทนต่อแสง และต้องมีความคงทนต่อความร้อน โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างมากในการย้อมสี เพราะวัตถุที่ต้องการย้อมอาจสามารถย้อมด้วยสีย้อมเพียงชนิดเดียวหรือย้อมด้วยสีย้อมหลายชนิดที่ต่างชนิดกันได้ ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท (ขนิษฐา, 2547) คือ

1. สีแอซิด (Acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีแอซิดบางตัวสามารถนำไปย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอป่าน ไนลอน ใยขน แกะ ไหมและอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง ซึ่งสีแอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

2. สีไดเร็กท์ (Direct dye) หรืออาจเรียกว่า สีย้อมฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่หรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ดี มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งสีไม่ทนต่อการซักน้ำ สีตกง่าย ทนแสง

3. สีเบสิก (Basic cationic dye) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า cationic dye เนื่องจากเป็นสีที่ให้ประจุบวกเมื่อแตกตัวในน้ำ และส่วนที่เป็นประจุบวกของสีเป็นส่วนที่เกิดพันธะกับเส้นใย สีย้อมชนิดนี้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเด่นคือมีความสดใส แต่คงทนต่อแสงต่ำ ละลายได้ดีที่สุดในแอลกอฮอล์ ถ้าต้องการละลายสีในน้ำจะต้องเลือกใช้น้ำที่มีภาวะเป็นกลาง ไม่ควรใช้น้ำที่มีภาวะเป็นด่างละลายสีเบสิก เพราะสีจะสลายตัวและตกตะกอนได้

4. สีดิสเพอร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเทอร์ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพาเพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดีแต่สีจะซีด ถ้าถูกควันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งออกเป็นได้ 2 กลุ่ม โดยพิจารณากลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo dyes) และสีย้อมแอมมิโนแอนตราคิวโนน (Amino antraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทาโนลามีน (Ethanolamine; $NH_2CH_2CH_2CH$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5. สีรีแอ็คทีฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดอุณหภูมิสูง 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิปติ ซึ่งสีรีแอคทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

6. สีอะโซอิค (Azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพแนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิคใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท ซึ่งสีอะโซอิคเป็นสีที่ทนต่อการซัก ไม่ทนต่อการขัดถู

7. สีแว็ต (Vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวส์ให้หายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศ สีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว็ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (Antraquinoid)

8. สีมอร์แดนท์ หรือโครม (Modant or Chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้ คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์ เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลีเอไมด์ได้ดี

9. สีอินเกรน (Ingrain dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมฝ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. สีออกซิเดชัน (Oxidation dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมฝ้ายและขนสัตว์

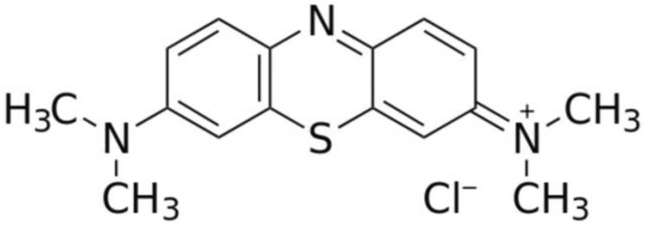
11. สีซัลเฟอร์ (Sulfur dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้าย สีจะติดทนและยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

2.1.2 กระบวนการกำจัดสีย้อม

สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อม ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีที่เหลือตกค้างจากกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ดังนั้นน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงานต้องผ่านระบบบำบัดก่อน ซึ่งมีหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การกรองผ่านเยื่อกรอง เป็นต้น) กระบวนการบำบัดทางเคมี (เช่น การตกตะกอนเคมี กระบวนการเฟนตัน การใช้โอโซน และการใช้ไฟฟ้าเคมี เป็นต้น) และกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา เช่น ระบบบำบัดแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน Tanaka *et al*. (2000) ซึ่งการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียที่กล่าวมาบางกระบวนการมีต้นทุนที่สูง มีกระบวนการซับซ้อน และต้องการบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญมาควบคุมดูแล แต่กระบวนการดูดซับเป็นการกำจัดสีในน้ำเสียที่ค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อนและนิยมนำมาใช้บำบัด เนื่องจากต้นทุนในการดำเนินการไม่สูงมากนัก และยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำสี ส่วนวัสดุที่ใช้ในการดูดซับหาง่ายและมีปริมาณมาก เช่น แอคติเวเต็ดคาร์บอน แร่ธาตุ สารอินทรีย์ ซีโอไลต์ และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เป็นต้น

2.2 เมทิลีนบลู

เมทิลีนบลู หรือ เมทิลไทโอนิเนียมคลอไรด์ (Methylthioninium chloride) มีสูตรเคมี คือ $C_{16}H_{18}ClN_3S$ (รูปที่ 2.1) มีมวลโมเลกุล 319.85 กรัมต่อโมล เป็นสีเบสิก (basic dyes) เป็นของแข็งเมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้อง มีค่าพีเอช 6 ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดที่ 100 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวที่ 190 องศาเซลเซียส ไม่มีกลิ่น เป็นผงสีเขียวเข้ม เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีฟ้า ส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นสีในกระบวนการย้อมผม ย้อมฝ้าย-ขนสัตว์ กระดาษ เครื่องสำอาง ดังนั้นจึงพบในอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น อุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมฟอกหนัง อุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นต้น และเป็นสีที่ย้อมแล้วติดทนนาน (Hamdaoui, 2006)



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสีเมทิลีนบลู

ที่มา: หญิง และโกวิทย์ (2561)

2.3 หมาก

ปัจจุบันภาคใต้ของไทยมีการเติบโตในเรื่องของธุรกิจเกี่ยวกับหมากเป็นอย่างมาก เนื่องจากยอดส่งออกหมากไทยสูงถึง 5 พันล้านบาท โดยเฉพาะตลาดหลักคือ ประเทศเมียนมา อีกทั้งประเทศจีน และอินเดียต้องการผลผลิตหมากของไทยจำนวนมาก รวมไปถึงนายทุนจากประเทศจีนเช่าที่ดินในไทยตั้งโรงงานผลิตช็อกโกแลต ขนมขบเคี้ยวจากหมาก ซึ่งนักลงทุนจีนสามารถซื้อหมากได้ประมาณ 15 ตันต่อวัน หรือประมาณ 400 กว่าตันต่อเดือนจากพื้นที่ทางภาคใต้ ได้แก่ พัทลุง นครศรีธรรมราช และ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ ได้แก่ สงขลา สตูล ปัตตานี ยะลา และ นราธิวาส แต่ยังไม่เพียงพอกับความต้องการของตลาดในประเทศจีน ทั้งนี้ การเข้ามาลงทุนตั้งโรงงานแปรรูปหมากอ่อนของนักลงทุนจีน ส่งผลให้ราคาหมากในพื้นที่ดีขึ้น โดยจีนรับซื้อหมากอ่อนอยู่ที่ 25 บาทต่อกิโลกรัม จากค่าส่งหมากตามพื้นที่ต่างๆ ประเมินเบื้องต้น คาดว่าเงินหมุนเวียนประมาณ 370,000 บาทต่อวัน จากหมากอ่อนที่รับซื้อจำนวน 15 ตันต่อวัน หรือประมาณ 15,000 กิโลกรัม และยังไม่รวมหมากแก่ หมากสุก อีก 600 ตันต่อเดือน ที่เป็นเงินประมาณ 15 ล้านบาทต่อเดือน จะส่งผลให้ในพื้นที่เกิดการจ้างงาน สร้างเศรษฐกิจที่ดี ส่วนอินเดียต้องการหมากแก่ หมากสุก ประมาณ 600 ตันต่อเดือนเพื่อนำไปแปรรูปเป็นเครื่องฟอกย้อมเสื้อผ้าสำหรับปริมาณมากหลากหลายสี และนำไปสกัดเป็นยารักษาโรค ซึ่งข้อมูลจากสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ กรุงนิวเดลี ระบุว่า แรงงานอินเดียยังนิยมบริโภคหมากอีกด้วย (Prachachat, 2021)

หมาก เป็นพืชยืนต้นตระกูลเดียวกับปาล์ม ขึ้นได้ทั่วไปทั้งในเขตอบอุ่นและเขตร้อน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Areaca catechism Linn.* มีชื่อภาษาอังกฤษว่า Betal nut, Arecanut หรือ Arecanut palm ถิ่นกำเนิดไม่ทราบแน่นอน คาดว่าอยู่บริเวณแหลมมลายูและหมู่เกาะฟิลิปปินส์ ปัจจุบันมีกระจายอยู่ทั่วไป มีส่วนประกอบสำคัญ ดังนี้

ราก หมากมีระบบรากฝอยไม่มีรากแก้ว จำนวนรากขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของต้นและสภาพแวดล้อม ไม่สามารถเจริญเติบโตในน้ำขังได้นาน

ลำต้น เป็นพืชลำต้นเดี่ยว ไม่แตกกอ ไม่แตกแขนง เนื้อไม้ไม่มีแก่น เจริญเติบโตทางเรือนยอเท่านั้น เปลือกลำต้นเมื่ออ่อนจะมีสีเขียว และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมเทาเมื่ออายุมากขึ้น ลำต้นมีปล้องปรากฏจากช่วงภายใน แต่ละปีต้นหมากจะเจริญเติบโตประมาณ 5 ปล้อง เมื่อโตเต็มที่ ลำต้นจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6 นิ้ว และสูงหรือยาวตั้งแต่ 30-100 ฟุต เนื้อของต้นจะเป็นเสี้ยนยาวๆ จับตัวกันแน่นทำให้มีความแข็งมาก

ใบ ใบหมากเกิดบริเวณเรือนยอด ลักษณะใบเป็นใบประกอบเช่นเดียวกับพืชตระกูลปาล์มทั่วไป มีความยาวประมาณ 4 ฟุต และแต่ละใบประกอบมีความยาว 1-2 ฟุต ซึ่งเป็นใบย่อยเรียงเป็นแถวทั้ง 2 ข้างของก้านใบ

ดอก ดอกหมากหรือจั่นหมากจะเกิดบริเวณซอกโคนก้านใบที่ติดกับลำต้น โดยมีแกนกลางหรือโคนคั่นกับลำต้น ดอกจะเป็นก้านยาวประมาณ 5 นิ้ว ดอกจะออกรวมกันเป็นช่อใหญ่ มีดอกตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมียอยู่บริเวณโคนต้น มีขนาดประมาณ 0.3 นิ้ว และดอกตัวผู้อยู่ส่วนปลายของก้านมีขนาดประมาณ 0.2 นิ้ว จำนวนดอกจะมกหือน้อยขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อม

ผล มีลักษณะกลมรี มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1-2.5 นิ้ว ยาวประมาณ 1.5-2.5 นิ้ว เมื่อยังอ่อนจะมีสีเขียว เรียกว่าหมากดิบหรือหมากสด เมื่อแก่จัดจะมีสีเหลืองส้ม เรียกว่า หมากสุกหรือหมากสง ผลรวมกันอยู่เป็นทะลาย แต่ละทะลายมีผลหมากประมาณ 100-500 ผล ซึ่งเนื้อหมาก เมื่ออ่อนจะนิ่ม เนื้อส่วนผิวจะมีลายเส้นสีเหลืองถึงสีน้ำตาล ส่วนเนื้อจะเป็นสีเหลืองอ่อน ๆ ถึงสีเหลืองเข้มอมแดง ภายในผลมีเมล็ดเดียว สารประกอบสำคัญที่พบในผลหมาก คือ arecoline, guvacoline, arecolidine, guvacine, tannic acid, gallic acid และ gum (Anon, 2006; Geoge and Rober, 2006)

กาบหมาก มีลักษณะเป็นแผ่นยาว มีความโค้ง ไม่เรียบ พื้นผิวมี 2 ด้าน คือ ด้านหน้าหรือด้านในมีผิวมัน และด้านหลังหรือด้านนอกมีผิวด้าน สีและพื้นผิวคล้ายเปลือกไม้ โดยแต่ละแผ่นจะมีสีและพื้นผิวแตกต่างกัน

เปลือกหมาก (รูปที่ 2.2) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ เปลือกชั้นนอก (ส่วนของเปลือกที่เป็นเยื่อบาง ๆ สีเขียวอมเหลือง เนื้อเปลือกมีเส้นใยละเอียดเหนียว), เปลือกชั้นกลาง (เป็นเส้นใยหนามากมองเห็นชัด), เปลือกชั้นใน (เป็นเยื่อบาง ๆ ละเอียดติดอยู่กับเนื้อหมาก) ซึ่งสารประกอบสำคัญที่พบในเปลือกหมาก คือ lignin, cellulose และphenol (Bhargavi, 2006)

รูปที่ 2.2 เปลือกหมาก

ที่มา: Matichon Online (2559)

สรรพคุณของหมาก แบ่งออกได้เป็น 4 คุณประโยชน์หลักๆ ดังนี้

1) ใช้ในพิธีทางศาสนาและขนบธรรมเนียมประเพณี ยกตัวอย่างเช่นในพิธีกรานกฐินต้องมีการจัดพานหมาก และในพิธีแต่งงานก็ต้องมีการแห่ขันหมาก ซึ่งต้องจัดพานหมากด้วยเช่นกัน

2) ใช้บริโภคเป็นของขบเคี้ยว ในแต่เดิมคนไทยทั้งชายและหญิงเคี้ยวหมากกันแทบทุกคน แต่ปัจจุบันเหลือเพียงแค่คนแก่ที่ยังนิยมเคี้ยวหมากกันอยู่ นอกจากประเทศไทยที่นิยมเคี้ยวหมากแล้วก็ยังมีประเทศพม่า อินเดีย ศรีลังกา อินโดนีเซีย ก็นิยมเคี้ยวหมากเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ใช้เป็นยาสมุนไพร ผล(เมล็ด) ใช้เป็นยากำจัดหนอนในเวลาที่วัว ควายเป็นแผลและมีหนอน ก็ใช้เมล็ดหมากปิดที่แผลหนอนก็จะตายหมด, ใช้เป็นยาสมานแผล, ใช้เป็นยาถ่ายพยาธิในสัตว์ เช่น พยาธิตัวแบน ตัวกลม และตัวตืด, ใช้รักษาอาการท้องเดิน ท้องเสีย, ใช้เป็นส่วนผสมของยาสีฟัน ในส่วนของราก นำมาต้มกินแก้ปากเปื่อย, ขับปัสสาวะ และโรคบิด อีกทั้งใบนั้นก็สามารถนำมาต้มกินเป็นยาขับพิษ หรือนำมาทานแก้อาการคัน

4) ใช้ในทางอุตสาหกรรม หมากเมื่อนำมาสกัดจะได้ไขมัน เมือก ยาง และสารอัลคาลอยด์ ชื่อ Arecoline มีแทนนินสูง จึงสามารถใช้ในทางอุตสาหกรรมได้หลายชนิด เช่น ใช้ทำสีต่างๆ, ใช้ย้อมแห อวน ทำให้แห นิ่มและอ่อนตัว ยืดอายุการใช้งานได้นาน เส้นด้ายไม่เปื่อยเร็ว, ใช้สกัดเป็นน้ำยาฟอกหนังจะทำให้หนังนิ่ม และใช้ประโยชน์อื่นๆ เช่น กาบหมากใช้ทำปลอกมีด ทำพัด, ลำต้นใช้ทำเสา ทำสะพาน เฟอร์นิเจอร์ต่างๆ, ที่นิยมกันอยู่ในปัจจุบันคือนำมาทำเป็นช็อกโกแลต สแน็ก, จั่นหรือดอกหมาก เมื่อยังอ่อนอยู่ใช้เป็นอาหารรับประทานกับน้ำพริกได้ (ธีรวัฒน์, 2533)

2.4 ไบโอชาร์

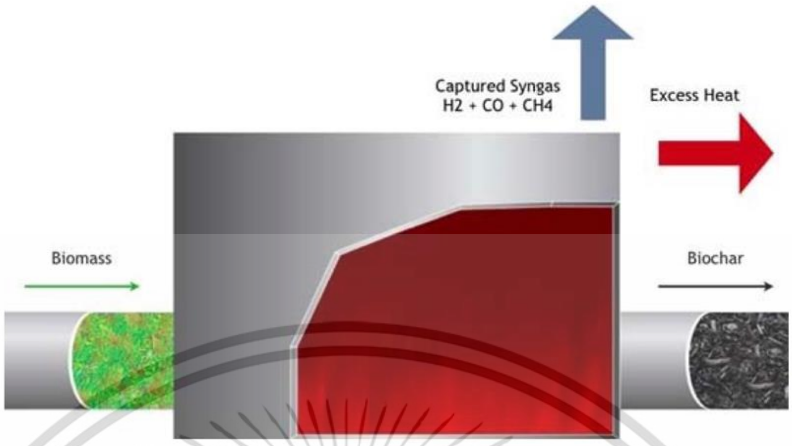
ถ่านชีวภาพ หรือไบโอชาร์ (Biochar) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการปรับปรุงดินที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนของชีวมวล หรือสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสารประกอบของสิ่งมีชีวิตที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (เช่น ต้นไม้ เศษใบไม้ กิ่งไม้ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ฟางข้าว ตอซัง ซังข้าวโพด เปลือกถั่ว เปลือกผลไม้ เปลือกหมาก เหง้ามันสำปะหลัง เศษอาหารในครัวเรือน หรือมูลสัตว์ เป็นต้น) กระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนนี้ เรียกว่า “ไพโรไลซิส (pyrolysis)” (พินิจภณ, 2557, ศิริลักษณ์, 2556, อรสา, 2561)

ไพโรไลซิส เป็นกระบวนการให้ความร้อนโดยจำกัดอากาศหรือปราศจากอากาศ ที่มีการดำเนินการอยู่ 2 วิธี คือ การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (slow pyrolysis) คือ การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมงและใช้อุณหภูมิระหว่าง 350-600 องศาเซลเซียสในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน และการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว (fast pyrolysis) ที่ ใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เป็นวินาที ใช้อุณหภูมิในการเผาตั้งแต่ 500-1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งทั้ง 2 วิธีการนี้ จะได้ผลผลิตที่แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ น้ำมัน (bio-oil) ก๊าซ (bio-gas) และ ถ่านชีวภาพ (bio-char) ตามวัตถุประสงค์ของการผลิต (พินิจภณ, 2557)

ผลพลอยได้จากกระบวนการนี้นอกจากได้ถ่านชีวภาพแล้ว ยังประกอบด้วยก๊าซสังเคราะห์ (syngas หรือ synthesis gas) ซึ่งเป็นก๊าซเชื้อเพลิงผสม ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซมีเทน (CH_4) นอกจากนั้นยังมีสารทาร์ (tars) กรดอินทรีย์

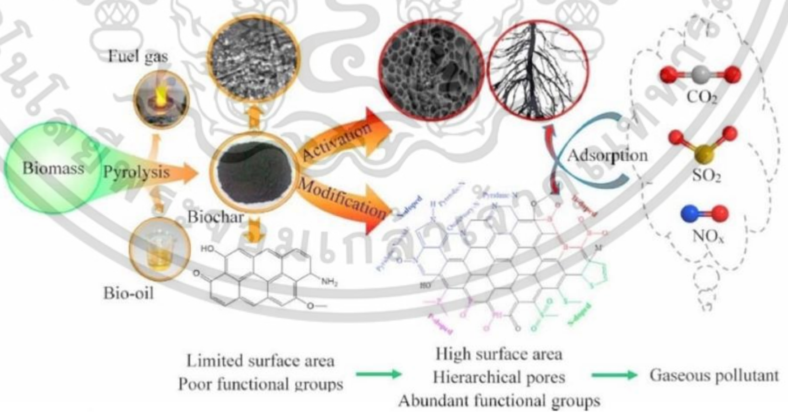
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(organic acids) กรดไพโรลิกเนียส (pyroligneous acid) หรือน้ำส้มควันไม้ และความร้อนส่วนเกิน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนของชีวมวล
ที่มา: ดวงใจ และเกษร (2562)

คุณสมบัติและองค์ประกอบพื้นฐานของถ่านชีวภาพมีลักษณะแตกต่างจากถ่านไม้ที่ผ่านการเผาไหม้โดยทั่วไป ได้แก่ ถ่านชีวภาพมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยน้ำหนักสูงกว่าธาตุชนิดอื่น ๆ และไม่เกิดการแปรสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากไม่ได้ผ่านการสัมผัสกับออกซิเจนขณะให้ความร้อน อีกทั้งคาร์บอนเป็นสารอะโรมาติกที่มีลักษณะเป็นวงแหวนคาร์บอน 6 อะตอม ที่เชื่อมต่อด้วยพันธะโคเวเลนส์โดยไม่มีออกซิเจนและไฮโดรเจน (Chen และคณะ, 2017) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านไบโอชาร์
ที่มา: ดวงใจ และเกษร (2562)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็นรูพรุน มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และขี้เถ้า แต่องค์ประกอบจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของชีวมวลและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการไพโรไลซิสในการผลิตถ่านชีวภาพ เช่น อุปกรณ์ อุณหภูมิ และระยะเวลา เป็นต้น (พินิจภณ, 2557, ศิริลักษณ์, 2556, อรสา, 2561)

2.5 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนสัณฐาน (Amorphous carbon) เมื่อผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activation) ทำให้พื้นที่ผิวภายใน (Internal Surface area) เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมากและมีความสามารถในการดูดซับสูงอันเนื่องมาจากพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง ผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากและมีความสามารถในการดูดซับสูง

2.5.1 การกระตุ้นถ่าน

การกระตุ้น (Activation) เป็นการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้พื้นที่ผิวมีความว่องไวมากขึ้น เพื่อเพิ่มคุณภาพด้วยเทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์มาผ่านกระบวนการกระตุ้นให้กลายเป็นถ่านกัมมันต์ วัตถุประสงค์ของการกระตุ้น ได้แก่

1) เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไปและเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน

2) เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่

3) เป็นการกำจัดอินทรียวัตถุหรืออนินทรีย์ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ

4) การเผาสารทาร์ที่เหลืออยู่ในถ่านและการขยายขนาดของรูพรุนที่เกิดอยู่ในถ่าน

การกระตุ้นถ่าน แบ่งได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

1) การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้สารเคมี เช่น สังกะสีคลอไรด์ กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสามารถแทรกซึมได้ทั่วถึงทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้อุณหภูมิเผาประมาณ 600 – 700 องศาเซลเซียส และล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นที่ติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมด เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ ได้แก่ อัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ อุณหภูมิการกระตุ้น และระยะเวลาการกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมกับสารละลายที่มีไอออน ของโพแทสเซียมไอออนของธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัตถุดิบเมื่อให้ความร้อนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง มีปฏิกิริยาแสดงดังนี้

$$2KOH \longrightarrow K_2O + H_2O \quad (2.1)$$

$$C + H_2O \longrightarrow H_2 + CO \quad (2.2)$$

สมการที่ 2.1 และ 2.2 เป็นการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และน้ำซึ่งเป็นสารทำให้คาร์บอนในถ่านเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันจากนั้นโพแทสเซียมออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

$$K_2O + H_2 \longrightarrow 2K + H_2O \quad (2.3)$$

$$K_2O + C \longrightarrow 2K + CO \quad (2.4)$$

ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวจึงทำให้แทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น

2) การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำอิ่มตัวยวดยิ่ง (Steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สออกซิเจน (O_2) เป็นต้น ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูงประมาณ 800 – 1,000 องศาเซลเซียส เพราะไอน้ำที่ใช้จะต้องเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เพื่อทำให้สารอินทรีย์ต่าง ๆ สลายไปทำให้โครงสร้างภายในมีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก

2.5.2 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

1) ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ ทั้งนี้ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแก๊สพิษและ ไอของสารอินทรีย์ได้

2) ใช้แยกแก๊สโซลีนออกจากแก๊สธรรมชาติ

3) ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่โดยถ่านกัมมันต์จะถูกดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่ำ

4) ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลเพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น

5) ใช้ทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดรส สีและกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสียใช้ในเครื่องกรองน้ำดื่มเพื่อกรองสี กลิ่นและสารอินทรีย์ในน้ำให้บริสุทธิ์

6) ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอร์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการ เช่น เอสเตอร์ทำให้ได้เครื่องดื่มที่มีรสชาติที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายมวลสารของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) หมายถึง สารที่เคลื่อนย้ายจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมหรือเกาะยังตัวดูดซับ และตัวดูดซับเป็นบริเวณที่มีตัวถูกดูดซับมาเกาะสะสมบนผิวตัวดูดซับอาจเป็นชนิดของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ (มัลลิกา, 2556) ดังนั้น การดูดซับจึงเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ เช่น เกาะบนพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง ของแข็งกับก๊าซ ของแข็งกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว การดูดซับสามารถเกิดได้ทั้งโดยกระบวนการทางกายภาพ และทางเคมี การดูดซับเป็นแนวทางหนึ่งที่อาจเลือกใช้ในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งกระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น การดูดซับสารอินทรีย์และโลหะหนักใน ดินหรือตะกอนดินในแหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น ทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ ส่วนกระบวนการดูดซับที่เกิด จากการกระทำของมนุษย์ เช่น การดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำและอากาศด้วยถ่านกัมมันต์ (อรพิน, 2550)

2.6.1 ประเภทของการดูดซับ

เมื่อพิจารณาจากแรงและพันธะที่เกิดขึ้นในการดูดซับ สามารถแบ่งการดูดซับออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้ (ปรินทร, 2551)

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรง van der Waals ซึ่งเกิดจาก การรวมกันของแรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) ทำให้การดูดซับประเภทนี้มีการคายพลังงานความร้อนน้อย คือ <20 กิโลจูลต่อโมล ส่งผลให้กระบวนการเกิดการผันกลับได้ จึงง่ายต่อการฟื้นฟูประสิทธิภาพของตัวดูดซับ การดูดซับประเภทนี้ เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) หรือหลายชั้น (multilayer)

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมเดิม และมีการจัดเรียงอะตอมใหม่ พันธะเคมีนี้มีความแข็งแรง ส่งผลให้ พลังงานความร้อนในการดูดซับมีค่าสูง คือ 50–400 กิโลจูล/โมล การกำจัดตัวถูกดูดซับที่เกาะสะสมบนผิวตัวดูดซับให้หลุดออกจึงทำได้ยาก เนื่องจากปฏิกิริยาไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น

2.6.2 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งเป็น 3 ขันตอน ดังนี้ (อรพิน, 2550)

1) การแพร่ภายนอก (External Diffusion)

การแพร่ภายนอกเป็นขั้นตอนการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับไปถึงตัวดูดซับ โดยบนตัวดูดซับจะมีของเหลวห่อหุ้มพื้นผิว ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นของของเหลวเข้าไปเกาะสะสม บนพื้นผิวของตัวดูดซับ

เอกสารนี้...
...ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การแพร่ภายใน (Internal or Pore Diffusion)

การแพร่ภายในเป็นขั้นตอนของตัวถูกดูดซับที่เคลื่อนที่เข้าภายในตัวดูดซับ

3) ปฏิกิริยาที่พื้นที่ผิว (Surface Reaction)

ปฏิกิริยาที่พื้นผิวเป็นขั้นตอนการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดอย่างรวดเร็วมากกว่าขั้นตอนการแพร่

2.6.3 วัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับ คือ สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้ (สราวุธ, 2550)

1) สารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียวต่างๆ ซิลิกา กัมมันต์ ถ่านกระดูก หรือสินแร่จากพวกอลูมิเนียม ตัวดูดซับสารอินทรีย์มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิดทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับจากสารอินทรีย์มีขีดจำกัด

2) ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี กำจัดกลิ่น กำจัดตะกอนในโรงเบียร์

3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม

4) วัสดุชีวภาพ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นของเหลือใช้ทางด้านการเกษตร เช่น ขี้เลื่อย ไคโตซาน กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง เถ้าแกลบดำ ฟางข้าว เปลือกไม้ เปลือกหมาก

5) สารดูดซับชีวภาพ ได้แก่ เอนไซม์ต่างๆ เซลล์แบคทีเรีย ยีสต์

2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ตัวอย่างปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ (มัลลิกา, 2556; อรพิน, 2550) เช่น

1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลตัวดูดซับมากขึ้น และ เมื่อพื้นผิวตัวดูดซับมีโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น

2) ขนาดอนุภาคของตัวถูกดูดซับ ขนาดอนุภาคของตัวถูกดูดซับที่มีขนาดเล็กจะถูกดูดซับได้เร็วกว่าตัวถูกดูดซับที่มีขนาดใหญ่

3) ลักษณะทางเคมีของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ หมู่ฟังก์ชันเฉพาะบนผิวของโมเลกุลตัวดูดซับเป็นสมบัติที่มีผลต่อการดูดซับ ซึ่งก่อนกระตุ้นตัวดูดซับจะไม่มีขั้ว เมื่อกระตุ้นด้วยสารเคมี บางส่วนจะเปลี่ยนเป็นมีขั้วและดูดได้ทั้งสารที่มีขั้วและไม่มีขั้ว

4) ความสามารถในการละลาย ตัวถูกดูดซับที่สามารถละลายได้ดี จะทำให้ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับได้น้อยลง

5) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และโมเลกุลของตัวดูดซับที่มีโครงสร้างสายยาวหรือมวลสูง ๆ จะดูดซับได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ความมีขั้ว (Polarity) ของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อมีขั้วเพิ่มขึ้นหรือละลายน้ำได้ดี เพราะตัวถูกดูดซับที่มีขั้วหรือละลายน้ำได้ดี จะมีแรงยึดเหนี่ยวสูงระหว่างตัวถูกดูดซับกับน้ำ ทำให้ถูกดูดซับได้ยาก

7) ค่า pH มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของตัวถูกดูดซับเป็นไอออน หรือมีอิทธิพลต่อการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ ทำให้ความสามารถในดูดซับของตัวดูดซับแตกต่างกัน

8) อุณหภูมิ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านเข้าไปในยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น

2.6.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับ คือ สมการที่อธิบายลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของตัวถูกดูดซับที่เกาะบนผิวตัวดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ โดยไอโซเทอมการดูดซับที่นิยมใช้ในการอธิบายซึ่งอาศัยรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น Freundlich adsorption isotherm และ Langmuir adsorption isotherm ซึ่งมีความสำคัญสำหรับในการทำนายความสามารถในการดูดซับ (Amel *et al*. 2012; Hazzaa and Hussien, 2015; Moubarak *et al*., 2014)

(1) Freundlich Adsorption Isotherm

ภายใต้สมมติฐานการดูดซับว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด เนื่องจากมีความแตกต่างกันของตำแหน่งกระบวนการดูดซับ โดยมีสมการดังสมการที่ 2.5

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \tag{2.5}$$

โดยสมการที่ 2.5 สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรง ได้ดังสมการที่ 2.6

$$\log q_e = \log K_F + [\left(\frac{1}{n}\right) \log C_e] \tag{2.6}$$

เมื่อ q_e = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_F = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น

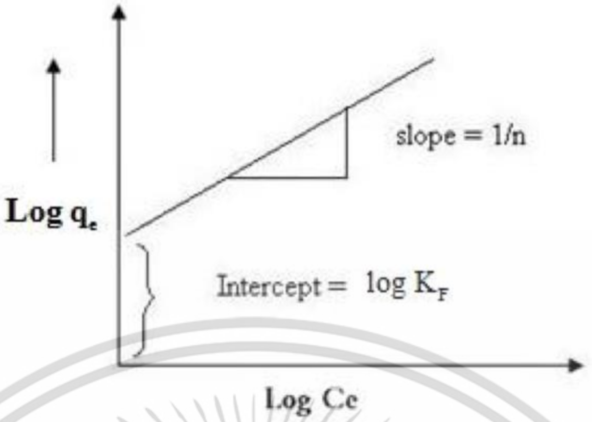
C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

n = ความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity)

1/n = ปัจจัยที่เกี่ยวกับความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง **log q_e** กับ **log C_e** จะได้กราฟเส้นตรง (รูปที่ 2.5) ที่มีความชัน (slope) เป็น 1/n และมี intercept เป็น **log K_F**



รูปที่ 2.5 Freundlich adsorption isotherm

ที่มา: ดัดแปลงจาก Xamplified (2009)

ถ้า 1/n = 1 แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า 1/n < 1 แสดงว่าตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยในทุกความเข้มข้น หรือมีพื้นที่ผิวจำกัดในการดูดซับ

ถ้า 1/n > 1 แสดงว่าตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากในทุกความเข้มข้น หรือมีพื้นที่ผิวมากในการดูดซับ

(2) Langmuir Adsorption Isotherm

Langmuir adsorption isotherm เป็นสมการที่ใช้อธิบายเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด จึงทำให้มีกลไกการดูดซับที่เหมือนกัน คือ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน ดังนั้นตัวดูดซับจึงมีพื้นที่ผิวจำกัด เมื่อเกิดการดูดซับแล้วจะเกาะติดบนพื้นผิวตัวดูดซับ ไม่เคลื่อนย้ายไปตำแหน่งอื่น Langmuir adsorption isotherm อธิบายด้วยสมการ ดังสมการที่ 2.7

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \qquad (2.7)$$

โดยสมการที่ (2.7) สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ ดังสมการที่ 2.8

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m}(C_e) \qquad (2.8)$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

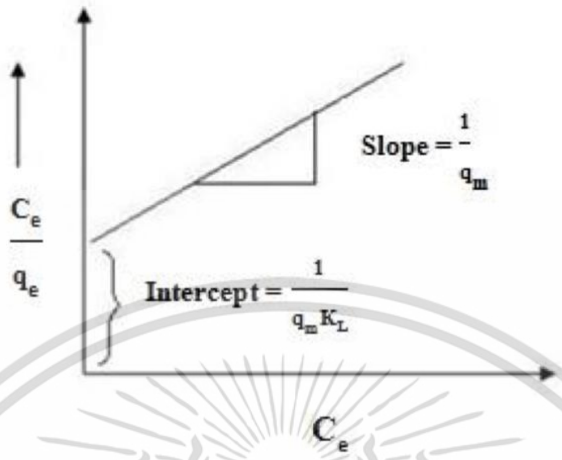
q_e = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m = ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L = ค่าคงที่การดูดซับที่สมดุลของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

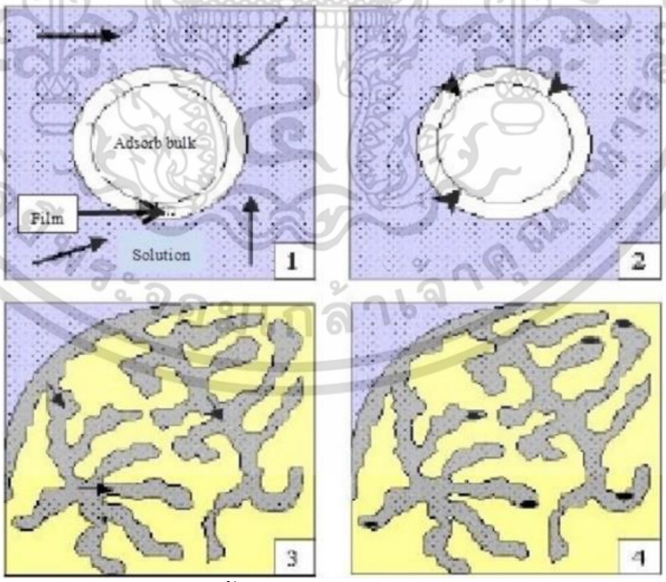
เมื่อ plot ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง (รูปที่ 2.6) ที่มีความชัน เป็น $\frac{1}{q_m}$ และมีค่า intercept เป็น $\frac{1}{q_m K_L}$



รูปที่ 2.6 Langmuir adsorption isotherm
ที่มา: ดัดแปลงจาก Xamplified (2009)

2.6.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นกระบวนการดูดซับสารต่าง ๆ จากสารละลาย ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (สราวุธ, 2550)



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการดูดซับของตัวดูดซับ
ที่มา: สราวุธ ศรีคุณ (2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion) ซึ่งปกติจะเกิดอย่างรวดเร็ว โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายจะเคลื่อนย้ายเข้าสู่บริเวณตัวดูดซับ (boundary layer) และการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับแบบนี เรียกว่า bulk solution transport

2) ขั้นตอนการแพร่ผ่านฟิล์มบาง (Film Diffusion) เป็นการแพร่ของโมเลกุล ซึ่งเวลาและระยะทางสำหรับการเคลื่อนที่ขึ้นกับชนิดของสารละลายที่ไหลผ่านตัวดูดซับ หรือ ขึ้นกับการปั่นป่วน และชั้นฟิล์มจะมีความหนาหรือบาง ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและความปั่นป่วน โดยชันฟิล์มจะมีความหนาลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น และมีการปั่นป่วนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านชันฟิล์มได้ดีขึ้น

3) ขั้นตอนการแพร่ผ่านช่องว่างภายในตัวดูดซับ (Pore Diffusion) หลังจากผ่านขั้นตอนการแพร่ผ่านฟิล์มบางแล้ว ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนผ่านรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (intraparticle transport) ซึ่งอาจเกิดจากการแพร่ผ่านภายในรูพรุนหรือการแพร่ผ่านพื้นผิวตัวดูดซับ

4) ขั้นตอนการดูดซับ (Adsorption) หลังจากผ่านขั้นตอนทั้งหมด กระบวนการดูดซับจะสร้างพันธะขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งหากเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) ขั้นตอนนี้จะเกิดอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นช้ากว่า ดังนันขั้นตอนนี้จึงเป็นขั้นตอนที่กำหนดกระบวนการดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่นิยมใช้ในการศึกษามี 2 สมการดังนี้ (Ho and McKay, 2000; Qiu *et al.*, 2009; สราวุธ, 2550)

(1) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo First Order) Lagergren แสดงถึงสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่งซึ่งอธิบายถึง กระบวนการจลนพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับ (ของแข็ง) และสารละลาย (ของเหลว) โดยสามารถคำนวณจากสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง ดังสมการที่ 2.9

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1\left(q_e - q_t\right) \qquad (2.9)$$

เมื่อ k_1 = ค่าคงที่สำหรับอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (ต่อนาที)

q_t = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อ integrate สมการ (2.9) โดยกำหนดขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ ได้สมการที่ 2.10

$$\ln\frac{q_e}{q_e - q_t} = k_1 t \qquad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2.10) สามารถจัดรูปเป็นสมการเชิงเส้นได้ ดังสมการที่ 2.11

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

เมื่อ plot ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้กราฟที่ความชันเป็น $-\frac{k_1}{2.303}$ และ intercept เป็น $\log q_e$

(2) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo Second Order)

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง Ho (2004) ได้กล่าวว่า จลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่เกิดจากกระบวนการดูดซับทางเคมีเกี่ยวกับแรงที่แบ่งปันหรือแรงเปลี่ยนกันของอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สองคำนวณจากสมการที่ 2.12

$$\frac{dq_t}{d_t} = k_2\left(q_e - q_t\right)^2 \qquad (2.12)$$

เมื่อ k_2 = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

q_t = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อ integrate สมการที่ 2.12 โดยกำหนดขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ ได้สมการดังสมการที่ 2.13

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

สมการที่ 2.13 สามารถจัดรูปเป็นสมการเชิงเส้นได้ ดังสมการที่ 2.14

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

เมื่อ plot ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{q_t}$ กับ t จะได้กราฟที่มีความชันเป็น $\frac{1}{q_e}$ และ intercept เป็น $\frac{1}{k_2 q_e^2}$

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mane and Bhusari (2012) ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยกระบวนการดูดซับด้วยเปลือกกล้วยที่เตรียมโดยการอบที่ 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง และบดให้เป็นผงขนาด 600 ไมโครเมตร และ 300 ไมโครเมตร จากนั้นนำไปกระตุ้นด้วยไฮโดรคลอริก 1 นอร์มอล นาน 5 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ากลั่น อบแล้วนำไปใช้ในการทดลอง โดยทดสอบแบบ batch experiment ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ (0.01–0.08 กรัมต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร) เวลาในการสัมผัส (5-240 นาที) และ pH (4-10) นอกจากนี้ยังทำการศึกษา adsorption

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

isotherm พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับที่ทำให้มีประสิทธิภาพดีสุด คือ 87 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.05 กรัมต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร เวลาสมดุล 45 นาที ที่ pH 7 อีกทั้งพบว่าผลการศึกษาสอดคล้องกับสมการ Freundlich adsorption isotherm

Moubarak *et al*. (2014) ศึกษาการกำจัดสี methylene blue (MB) ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงเปลือกกล้วย โดยทดสอบแบบ batch experiment ปัจจัยที่ทดสอบการดูดซับ ได้แก่ เวลาในการสัมผัส (0-100 นาที) ขนาดตัวดูดซับ (<80 ไมโครเมตร และ 80 ไมโครเมตร-2 มิลลิเมตร) ปริมาณตัวดูดซับ (1–3 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี (5-15 มิลลิกรัมต่อลิตร) และอุณหภูมิ (22 องศาเซลเซียส–55 องศาเซลเซียส) พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับได้สูงสุด 90 เปอร์เซ็นต์ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ เวลาสัมผัส 40 นาที ขนาดตัวดูดซับ <80 ไมโครเมตร ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม คือ 1 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี คือ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส อีกทั้งพบว่า ผลการศึกษาสอดคล้องกับ Langmuir adsorption isotherm

นำพล (2555) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามเปรี้ยวโดยกระตุ้นดวยสารละลายกรดฟอสฟอริก สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และไอน้ำ ในสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านต่อปริมาตรของสารละลายตัวกระตุ้นเท่ากับ 1:3 ทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการเผา จากนั้นจึงวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ได้แก่ ค่าการดูดซับไอโอดีนนัมเบอร์ ค่าการดูดซับฟีนอล การดูดซับเมทิลีนบลู เปอร์เซ็นต์เถ้า และความชื้น จากผลการทลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ คือ การเผาให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ในสภาวะอับอากาศ และการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการทดลอง พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียนโดยใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้นมีค่ามากกว่าถ่านที่เผาอุณหภูมิที่ 400, 500 และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาอุณหภูมิที่ 600 องศาเซลเซียส มาทำการทดลองดูดซับฟีนอล พบว่าถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำแสดงค่าร้อยละการดูดซับฟีนอลที่ใกล้เคียงกับการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และด่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ยังมีค่าการดูดซับฟีนอลที่น้อยกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้าประมาณ 4-5 เท่า จากการศึกษาการดูดซับเมทิลีบลูของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แล้วมีค่าการดูดซับของเมทิลีนบลูสูงกว่าการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และการระตุ้นด้วยไอน้ำ เมื่อเอามาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้าที่มีการดูดซับเมทิลีนบลูที่ได้นั้นดีมาก

วนิดา (2555) เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพเคมีและชีวภาพ ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงแต่มีข้อจำกัดคือ การนำกลับมาใช้ใหม่จะต้องฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาที่ความร้อนสูงซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่นก็จะต้องควบคุมระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันน้ำ อัตราการไหลของน้ำ ค่าความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิ การสร้างตะกอนและการรวมตะกอนโดยใช้สารส้ม ปูนขาว และสารประกอบเหล็กก็เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงแต่จะมีกากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมาก ซึ่งยุ่งยากในการนำไปกำจัด กระบวนการเฟนตันก็ต้องควบคุมความเข้มข้นของเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดด่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา การใช้โอโซนก็ต้องควบคุมอุณหภูมิความดัน ความเป็นกรดด่าง และความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เนื่องจากโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารบางชนิด ทำให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง ในการใช้เทคโนโลยีทางกายภาพและเคมีมีข้อจำกัด เนื่องจากมีการใช้สารเคมีในการกำจัด นอกจากจะสิ้นเปลืองแล้วตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก และเป็นการเพิ่มสารเคมีในสิ่งแวดล้อมด้วย การใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพ ได้แก่ การดูดซับสีด้วยสาหร่าย การย่อยสลายสีโดยใช้เชื้อราบางชนิดมีข้อจำกัดในเรื่องความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษา การขนส่ง รวมถึงการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและการย่อยสลาย การเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับน้ำเสียของอุตสาหกรรมแต่ละประเภทต้องคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสีย ประสิทธิภาพ ค่าใช้จ่าย ฯลฯ ในทางปฏิบัติควรมีการนำน้ำเสียมาทดสอบก่อน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม

อรพิน (2550) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีและ ทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการแปรผันค่า pH ที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ระยะเวลาการปั่นกวนที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ระยะเวลาในการสัมผัสที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ปริมาณกากชาที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 กรัม และความเข้มข้นของโลหะหนักที่ 25, 50, 75, 100, 150, 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีคือที่ pH 5 ระยะเวลาในการปั่นกวน 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 120 นาที สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดของทองแดงคือที่ pH 6 ระยะเวลาในการปั่นกวน 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที เมื่อปริมาณของกากชาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้นและถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับโลหะหนักทั้งสองโดยใช้กากชาสอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรุนดิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของวัสดุ (Surface Area Pore Size and Pore Volume Distribution Analyzer, BET) รุ่น iQ-C-XR-XR-XR บริษัท QUANTA CHROME ประเทศสหรัฐอเมริกา

2) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscope, FTIR) รุ่น IRTracer-100 บริษัท SHIMADZU ประเทศญี่ปุ่น

3) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่น QUANTA 250 บริษัท FEI COMPANY ประเทศสหรัฐอเมริกา

4) เครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) รุ่น LABTECH บริษัท โปรวิชั่น ไซแอนติฟิค จำกัด ประเทศไทย

5) เครื่องเขย่าแบบแนวราบ รุ่น SHO-1D บริษัท WISD LABORATORY INSTRUMENTS ประเทศเกาหลี

6) เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter) รุ่น FIVEEASY PLUS FEP 20 บริษัท METTLER TOLEDO ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

7) ชุดกรองลดความดัน รุ่น A-3S บริษัท TOKYO RIKAKIKAI CO., LTD ประเทศญี่ปุ่น

8) เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง รุ่น MS3002TS/00 บริษัท METTLER TOLEDO ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

9) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น ML204/01 บริษัท METTLER TOLEDO ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

10) ตู้อบ (Oven) รุ่น MEMMERT บริษัท ITS (THAILAND) CO., LTD ประเทศไทย

11) เครื่องเผา รุ่น L9/12P บริษัท CHAVACHOTE CO., LTD ประเทศไทย

12) เครื่องบด

13) กระดาษกรองใยแก้ว (Whatman) เบอร์ 42

14) เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) Complete range of Analytical reagent grade (RPE) บริษัท CARLO ERBA Reagent S.A.S ประเทศฝรั่งเศส

3) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) Complete range of Analytical reagent grade (RPE) บริษัท CARLO ERBA Reagent S.A.S ประเทศฝรั่งเศส

4) เมทิลีนบลู ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) High quality and functional special reagent (RS) บริษัท CARLO ERBA Reagent S.A.S ประเทศฝรั่งเศส

5) เปลือกหมาก ได้จาก ตำบลเสาเภา อำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช

3.1.3 การเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกหมาก

1) นำเปลือกหมากไปตากให้แห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2) จากนั้นนำไปบดให้ละเอียด
3) นำไปร่อนด้วยตะแกรง 35 เมช ซึ่งจะได้อนุภาคขนาดประมาณ 0.5 มิลลิเมตร
4) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5) เก็บตัวดูดซับที่อบแล้วในเดซิเคเตอร์

3.1.4 การเตรียมตัวดูดซับไบโอชาร์จากเปลือกหมาก

1) นำเปลือกหมากไปตากให้แห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2) จากนั้นไปเผาที่อุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส จนกลายเป็นถ่านชีวภาพ
3) นำถ่านที่ได้ไปบดให้ละเอียด
4) นำไปร่อนด้วยตะแกรง 35 เมช ซึ่งจะได้อนุภาคขนาดประมาณ 0.5 มิลลิเมตร
5) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6) เก็บตัวดูดซับที่อบแล้วในเดซิเคเตอร์

3.1.5 การเตรียมตัวดูดซับถ่านกัมมันต์

1) นำถ่านไบโอชาร์บางส่วนที่ได้มาผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 2 โมลาร์ ในอัตราส่วน ไบโอชาร์:โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก
2) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในสภาวะอับอากาศ
3) จากนั้นนำสารที่ผ่านการเผาแล้วไปล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จนน้ำล้างไม่มีสี
4) แล้วล้างต่อด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชของน้ำล้างเท่ากับค่าพีเอชของน้ำกลั่น
5) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
6) เก็บตัวดูดซับที่อบแล้วในเดซิเคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 การเตรียมเมทิลีนบลูเพื่อหาความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max})

1) เตรียมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
2) นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ตั้งแต่ความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร เพื่อหาค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของเมทิลีนบลู คือ 654 นาโนเมตร

3.1.7 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู

1) เตรียมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
2) นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 654 นาโนเมตร
3) นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูกับค่าการดูดกลืนแสง

3.1.8 ศึกษาวิเคราะห์หาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

1) ศึกษาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscope, FTIR)

2) ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและรูปร่างลักษณะของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) โดยใช้สภาวะของเครื่องมือดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

Mode	Hi-vacuum
Detector	SED
HV (kv)	10.00
WD (mm)	6.5, 6.6, 6.7, 7.2, 6.8, 8.2 and 8.3
Mag	3,000x
det	ETD
HFW	138

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ศึกษาลักษณะทางกายภาพ พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของวัสดุ (Surface Area Pore Size and Pore Volume Distribution Analyzer, BET) โดยใช้สภาวะการวิเคราะห์ของเครื่องมือดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะของเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน (BET)

Analysis gas	Nitrogen
Adsbate (DRP)	Nitrogen
Outgas Temp ($^{\circ}$C)	200
P/Po tolerance	2
Station #	2
Sample weight (g)	0.0193
Bath Temp.	77.35 K
Outgas Time (hrs)	2.5
Non-ideality	6.58e-05 1/Torr
Analysis Time (hr:min)	77.05

3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก

3.2.1 ศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม

1) ชั่งเปลือกหมาก 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) ปิเปตเมทิลีนบูลเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่า pH 5 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3) นำไปเขย่าที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที
4) แปรค่าระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับได้แก่ 0, 5, 15, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที
5) นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับ
6) นำสารละลายที่ได้จากข้อ 5 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 654 นาโนเมตร
7) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8) ชุดควบคุม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับ
9) คำนวณ % ของการดูดซับเมทิลีนบลู ดังสมการที่ 3.1

$$\text{Adsorption Percentage (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \qquad (3.1)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e = ความเข้มข้นที่เหลืออยู่หลังการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10) คำนวณความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{W} \times V \quad (3.2)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e = ความเข้มข้นที่เหลืออยู่หลังการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาณของสีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิลิตร)

W = ปริมาณของเปลือกหมาก (กรัม)

3.2.2 ศึกษาผลของความเร็วรอบในการดูดซับที่เหมะสม

1) ชั่งเปลือกหมาก 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) ปิเปตเมทิลีนบูลเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่า pH 5 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3) แปรค่าความเร็วรอบที่ใช้ในการดูดซับ ได้แก่ 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที
4) นำไปเขย่าตามระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.1
5) นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับ
6) นำสารละลายที่ได้จากข้อ 5 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 654 นาโนเมตร
7) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8) ชุดควบคุม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับ
9) คำนวณ % ของการดูดซับเมทิลีนบลู ดังสมการที่ 3.1
10) คำนวณความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2

3.2.3 ศึกษาผลของปริมาณเปลือกหมากในการดูดซับที่เหมาะสม

1) ชั่งเปลือกหมาก 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) ปิเปตเมทิลีนบูลเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่า pH 5 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3) นำไปเขย่าตามความเร็วรอบที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.2
4) เขย่าตามระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.1
5) นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) นำสารละลายที่ได้จากข้อ 5 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 654 นาโนเมตร
7) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8) ชุดควบคุม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับ
9) คำนวณ % ของการดูดซับเมทิลีนบลู ดังสมการที่ 3.1
10) คำนวณความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2

3.2.4 ศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม

1) ชั่งเปลือกหมากปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.3 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) ปิเปตเมทิลีนบูลเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แปรค่า pH ที่ 3, 5, 7, 9 และ 11 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
3) นำไปเขย่าตามความเร็วรอบที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.2
4) เขย่าตามระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.1
5) นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับ
6) นำสารละลายที่ได้จากข้อ 5 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 654 นาโนเมตร
7) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8) ชุดควบคุม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับ
9) คำนวณ % ของการดูดซับเมทิลีนบลู ดังสมการที่ 3.1
10) คำนวณความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2

3.2.5 ศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในการดูดซับที่เหมาะสม

1) ชั่งเปลือกหมากปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.3 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) ปิเปตเมทิลีนบูลที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ค่า pH ที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4
3) นำไปเขย่าตามความเร็วรอบที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.2
4) เขย่าตามระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับ
6) นำสารละลายที่ได้จากข้อ 5 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 654 นาโนเมตร
7) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8) ชุดควบคุม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับ
9) คำนวณ % ของการดูดซับเมทิลีนบลู ดังสมการที่ 3.1
10) คำนวณความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2

3.2.6 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับเมทิลีนบลู (เปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์)

1) ชั่งเปลือกหมากปริมาณที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.3 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) ปิเปตเมทิลีนบูลที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่า pH ที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3) นำไปเขย่าตามความเร็วรอบที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.2
4) เขย่าตามระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.1
5) นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับ
6) นำสารละลายที่ได้จากข้อ 5 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 654 นาโนเมตร
7) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8) ชุดควบคุม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับ
9) คำนวณ % ของการดูดซับเมทิลีนบลู ดังสมการที่ 3.1
10) คำนวณความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2
11) คำนวณหาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลีนบลู โดยนำค่าการดูดซับของเมทิลีนบลูเมื่อเข้าสู่สมดุลเมื่อใช้ความเข้มข้นต่างๆ ที่ได้จากข้อที่ 10) มาพล็อตแบบจำลองไอโซเทอร์มของการดูดซับแลงเมียร์ ดังสมการที่ 3.3 และแบบจำลองไอโซเทอร์มของการดูดซับฟรุนดิช ดังสมการที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_{mK_L}} \quad (3.3)$$

$$\log q_e = \log K_F + [\left(\frac{1}{n}\right) \log C_e] \quad (3.4)$$

เมื่อ q_e = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_F = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

n = ความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity)

1/n = ปัจจัยที่เกี่ยวกับความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneity)

q_m = ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L = ค่าคงที่การดูดซับที่สมดุลของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

3.2.7 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมทิลีนบลูของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์

1) ชั่งเปลือกหมากปริมาณที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.3 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) ปิเปตความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.6 ที่ค่า pH ที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.4 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3) นำไปเขย่าตามความเร็วรอบที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.2
4) แปรค่าระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับได้แก่ 0, 5, 15, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที
5) นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เพื่อแยกสารละลายออกจากตัวดูดซับ
6) นำสารละลายที่ได้จากข้อ 5 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 654 นาโนเมตร
7) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8) ชุดควบคุม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่ตัวดูดซับ
9) คำนวณ % ของการดูดซับเมทิลีนบลู ดังสมการที่ 3.1
10) คำนวณความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2
11) คำนวณจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู จากสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง ดังสมการที่ 3.5 และสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง ดังสมการที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\log\left(q_e - q_t\right) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3.5)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3.6)$$

เมื่อ q_t = ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e = ค่าการดูดซับของเมทิลีนบลูเมื่อเข้าสู่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

k_1 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อนาที)

k_2 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

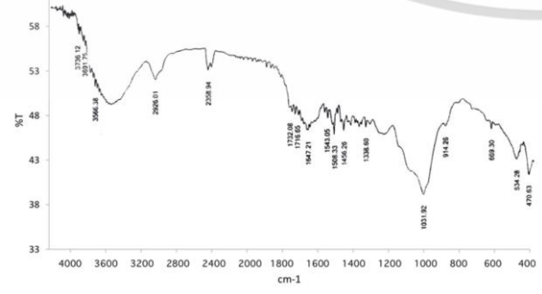
การศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมากที่อัตราส่วนเปลือกหมาก : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ และศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ได้แก่ ระยะเวลาที่สัมผัส, ความเร็วรอบในการปั่นกวน, ปริมาณตัวดูดซับ, ความเป็นกรด-ด่าง, ความเข้มข้นของสีเมทิลีนบลูในการดูดซับ ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลีนบลู และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู ได้ผลการศึกษา ดังนี้

4.1 ผลวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์

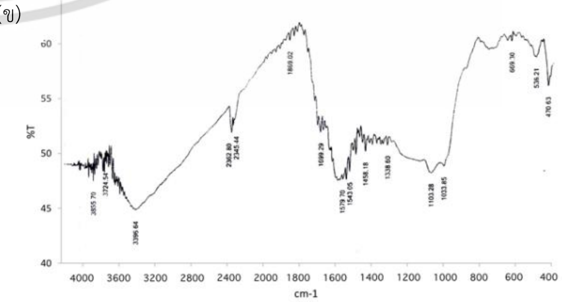
4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของวัสดุดูดซับ (Fourier Transform Infrared Spectroscope, FTIR)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของวัสดุดูดซับทั้ง 5 ชนิดด้วย FT-IR ปรากฏพีค O-H Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ 3,300-3,400 cm^{-1} ซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) แต่ลักษณะพีคของไบโอชาร์จะแตกต่างจากเปลือกหมากเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการใช้อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการสูญเสียโมเลกุลน้ำ พีค C-H Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ 2,800-3,000 cm^{-1} เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนหรือแอลคีน (Alkane or Alkene) พีค C≡C Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ 2,100-2,400 cm^{-1} เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลไคน์ (Alkyne) พีค C=O Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ 1,600-1,700 cm^{-1} เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทคาร์บอนิล (Carbonyl compounds) พีค C-O Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ 1,100-1,200 cm^{-1} เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทเอสเทอร์ (Ester compounds) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของเซลลูโลส และลิกนิน ที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกหมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

(ก)



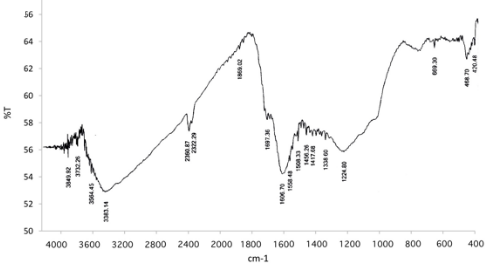
(ข)



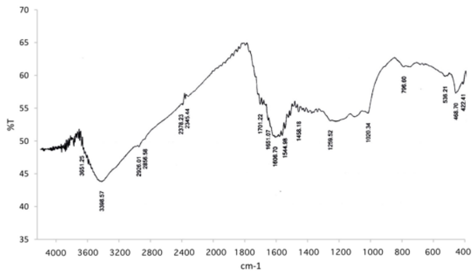
รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางเคมี (ก) เปลือกหมาก (ข) ไบโอชาร์ (ค) โครงสร้างทางเคมีขอถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วน ไบโอชาร์:โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:1, (ง) 1:2 และ (จ) 1:3 โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็น... การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

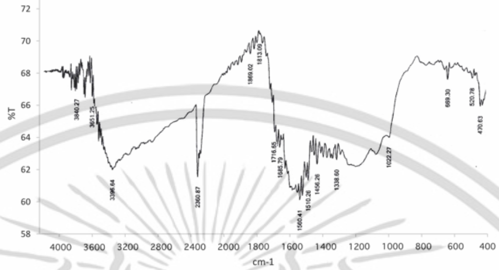
(ค)



(ง)



(จ)



รูปที่ 4.1 (ต่อ) โครงสร้างทางเคมี (ก) เปลือกหมาก (ข) ไบโอชาร์ (ค) โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วน ไบโอชาร์:โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:1, (ง) 1:2 และ (จ) 1:3 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์

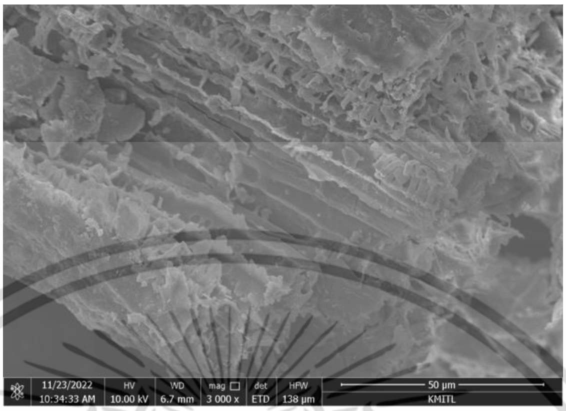
Bond Functional Group	Betel Nut Bark (cm^{-1})	Biochar (cm^{-1})	Activated Carbon (1:1) (cm^{-1})	Activated Carbon (1:2) (cm^{-1})	Activated Carbon (1:3) (cm^{-1})
O-H Stretching	~3,400	3,396.64	3,383.14	3,398.57	3,396.64
C-H Stretching	2,926.01	-	-	-	-
C≡C Stretching	2,358.94	2,362.80	2,360.87	2,345.44	2,360.87
C=C Stretching	1,647.21	1,579.70	1,606.70	1,606.70	1,560.41
C-O Stretching	1,032.92	1,103.28	1,103.28	1,224.80	1,022.27

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

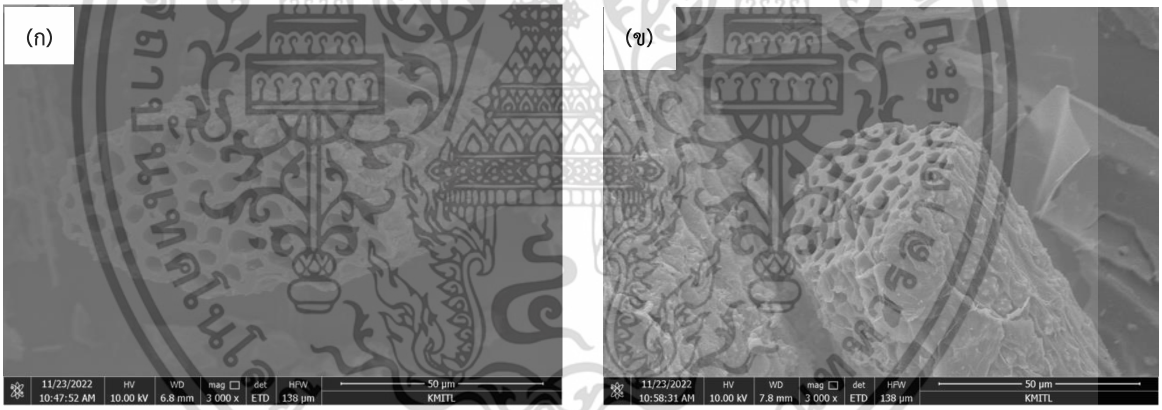
ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า พบว่าเปลือกหมาก (รูปที่ 4.2 ก) มีลักษณะผิวขรุขระแต่รูพรุนไม่ชัดเจนเหมือนไบโอชาร์ ซึ่งไบโอชาร์จะมีพวกซิลิกอนเกาะอยู่ (รูปที่ 4.3 ก) และเห็นรูพรุนชัดเจนอาจเนื่องมาจากการเผาแล้วเกิดการแตกหักเป็นท่อนสั้น ส่วนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ (รูปที่ 4.4) พบว่าซิลิกอนบนพื้นผิวเส้นใยได้หลุดออกไปอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งบนพื้นผิวเส้นใยของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วน 1:3 ซิลิกอนหลุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไปมากกว่าไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ในส่วนของลักษณะสัณฐานวิทยาของไบโอชาร์ที่ผ่านการดูดซับ (รูปที่ 4.3 ข) และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:2 ที่ผ่านการดูดซับแล้วนั้น (4.4 ค) รูพรุนมีขนาดเล็กลง อาจเป็นเพราะโมเลกุลของสีย้อมได้เข้าไปอยู่ในรูพรุนของวัสดุดูดซับจึงทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง

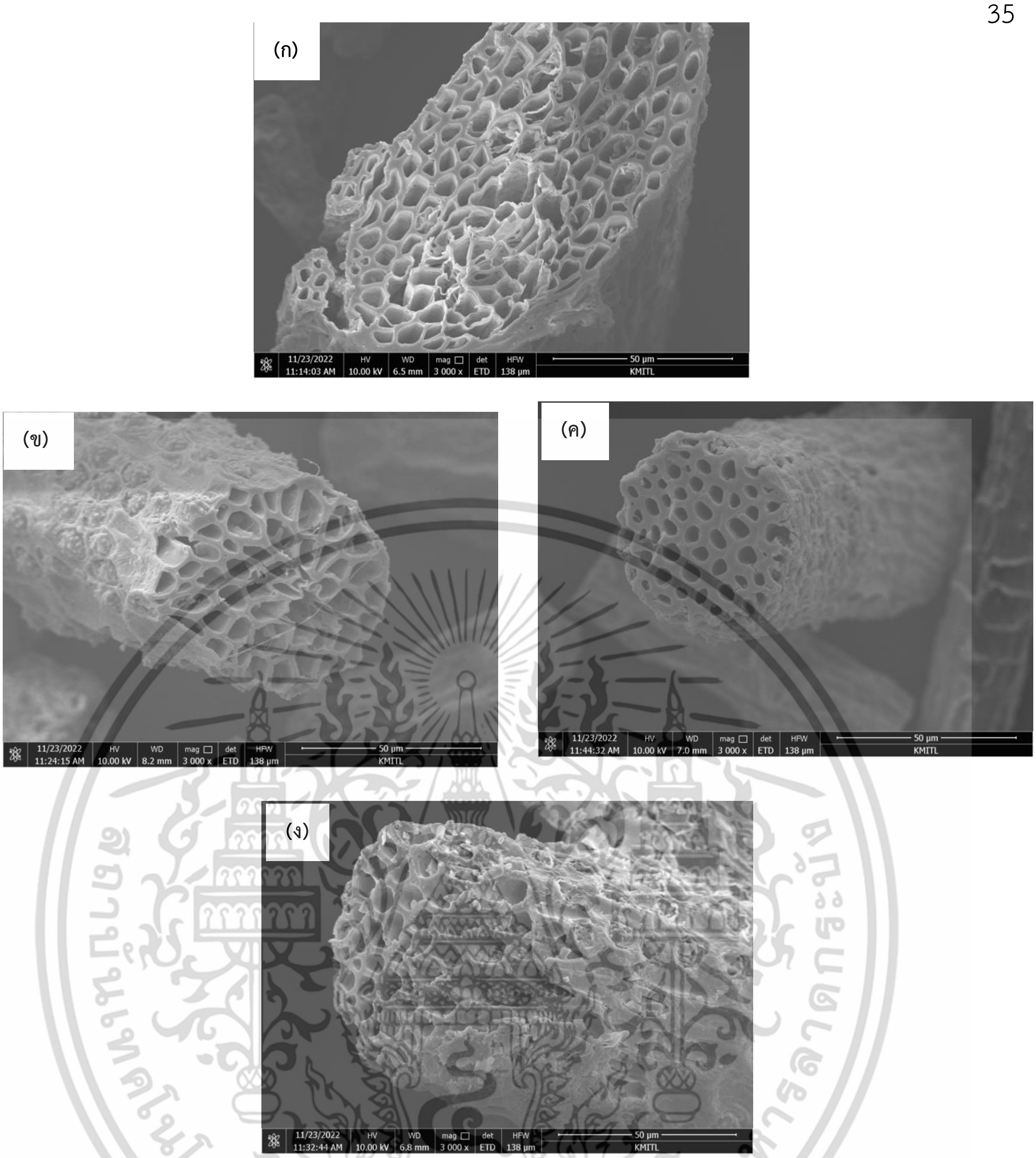


รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของเปลือกหมากวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า (ก่อนการดูดซับ)



รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของไบโอชาร์จากเปลือกหมากวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า (ก) ก่อนการดูดซับ (ข) หลังการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

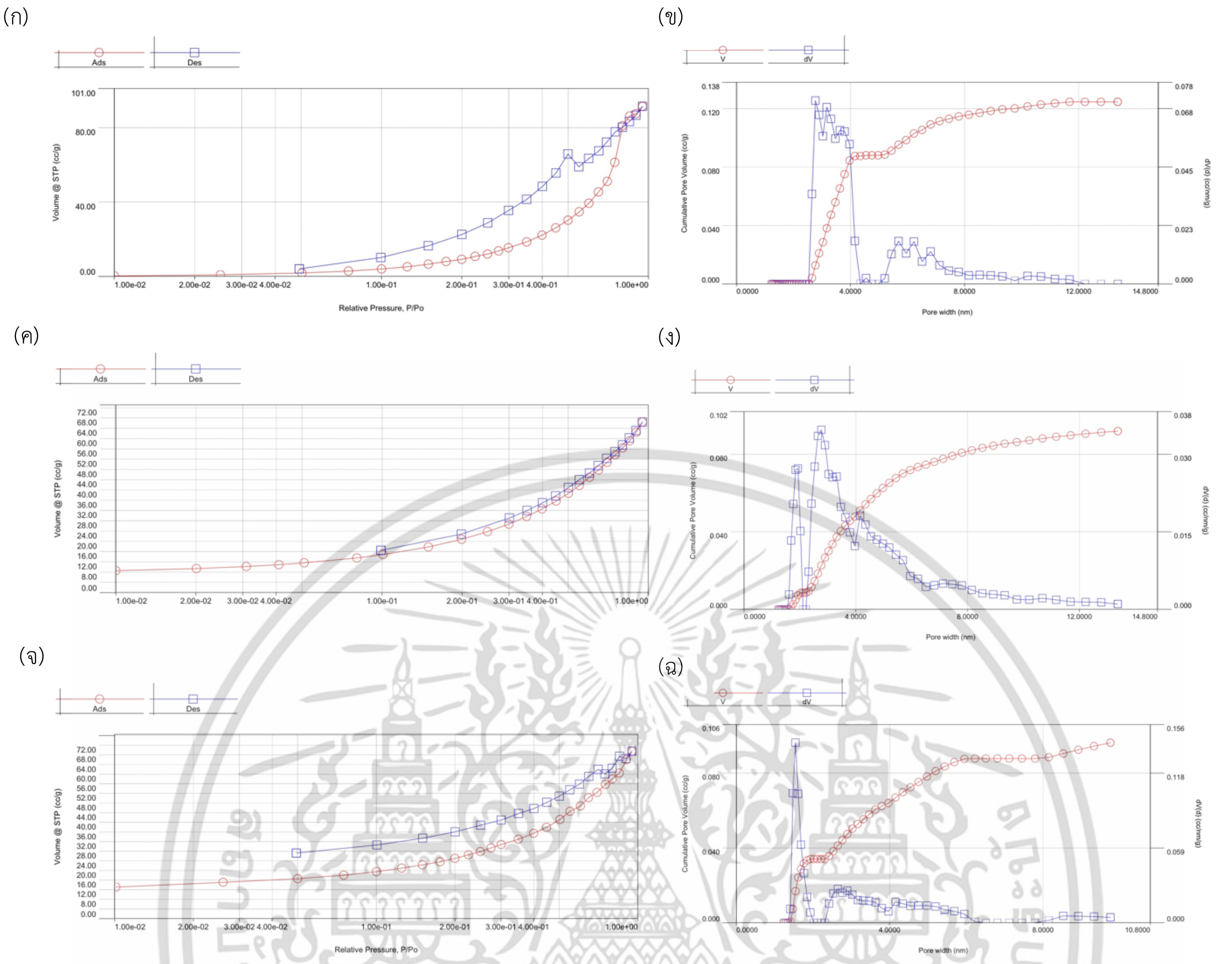


รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:1 (ก) ก่อนการดูดซับ, ในอัตราส่วน 1:2 (ข) ก่อนการดูดซับ (ค) หลังการดูดซับ, ในอัตราส่วน 1:3 (ง) ก่อนการดูดซับ

4.1.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวดูดซับและปริมาตรของรูพรุน (Surface area and porosity analyzer, BET)

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ มีค่าพื้นที่ผิวดูดซับ เท่ากับ 63.822, 49.976, 74.016 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าปริมาตรรูพรุน เท่ากับ 0.125, 0.092, 0.096 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงพื้นที่ผิวดูดซับและปริมาตรรูพรุน (ก) และ (ข) เปลือกหมาก , (ค) และ (ง) ไบโอชาร์ , (จ) และ (ฉ) ถ่านกัมมันต์

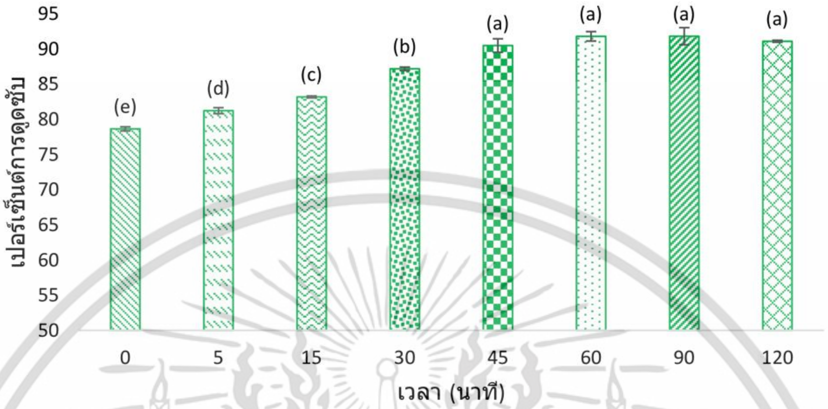
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก

4.2.1 ผลของระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม

ผลระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เปลือกหมากปริมาณ 0.10 กรัม ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 300 รอบต่อนาที ที่พีเอช 5 โดยแปรค่าที่เวลา 0, 5, 15, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที พบว่าเปลือกหมากมีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 78.64±0.29, 81.23±0.42, 83.18±0.14, 87.18±0.24, 90.49±0.96, 91.79±0.67, 91.81±1.22 และ 91.09±0.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-3 ภาคผนวก ก) ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาที่สัมผัสเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ ที่ระยะเวลา 45 นาที เป็นต้นไป ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับ ส่งผลให้เพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างโมเลกุลของสีเมทิลีนบลู และผิวของตัวดูดซับ เมื่อนำผลไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่าที่ระยะเวลา 45, 60,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

90 และ 120 นาที มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตาราง ข-1.3 ภาคผนวก ข) จึงเลือกระยะเวลาที่เหมาะสม คือ 45 นาที ในการทดลองต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srimoon *et al.* (2016) ที่พบว่า ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับจนกระทั่งสู่เข้าสู่สมดุลการดูดซับ

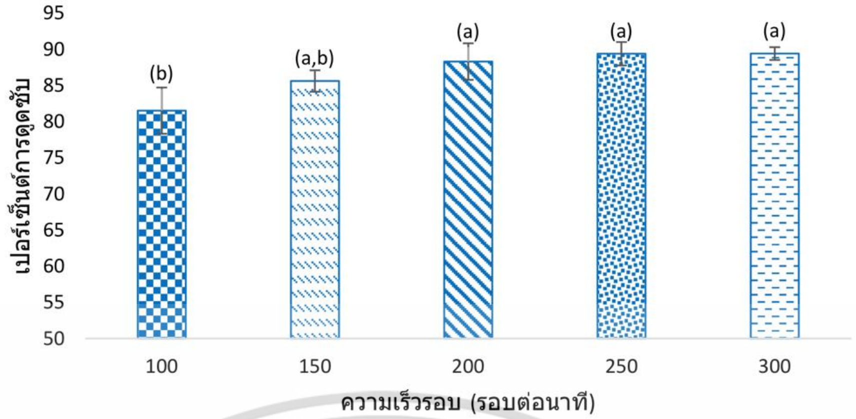


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

4.2.2 ผลของความเร็วรอบในการดูดซับที่เหมาะสม

ผลของความเร็วรอบในการเขย่า โดยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเปลือกหมากปริมาณ 0.10 กรัม เป็นระยะเวลา 45 นาที ที่พีเอช 5 โดยแปรค่าความเร็วรอบในการเขย่าที่ 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที พบว่า เปลือกหมากมีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 81.51±3.20, 85.61±1.48, 88.29±2.53, 89.38±1.62 และ 89.40±0.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-4 ภาคผนวก ก) ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการเขย่าเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นต้นไป ทั้งนี้เนื่องจากเป็นการเพิ่มโอกาสให้สีเมทิลีนบลูสัมผัสกับพื้นผิวของเปลือกหมากและเมื่อเพิ่มความเร็วรอบสูงขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับก็จะสูงขึ้นด้วย เมื่อนำผลไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่าที่ความเร็วรอบ 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2.3 ภาคผนวก ข) จึงเลือกค่าความเร็วรอบที่เหมาะสม คือ 150 รอบต่อนาที ในการทดลองต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srimoon *et al.* (2016) ที่พบว่าประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการดูดซับจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

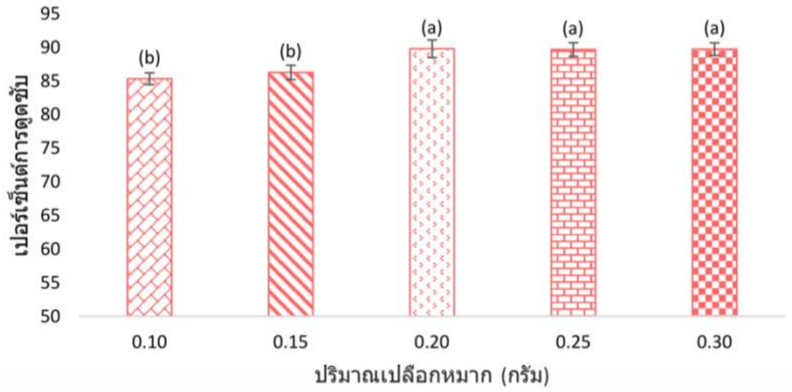


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

4.2.3 ผลของปริมาณเปลือกหมากในการดูดซับที่เหมาะสม

ผลของปริมาณตัวดูดซับ โดยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 45 นาที ที่พีเอช 5 โดยแปรค่าปริมาณตัวดูดซับที่ 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 กรัม พบว่าเปลือกหมากมีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 85.32±0.88, 86.26±1.07, 89.78±1.32, 89.65±1.02 และ 89.71±0.93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-5 ภาคผนวก ก) ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเปลือกหมากในการดูดซับเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ ที่ปริมาณ 0.20 กรัม เป็นต้นไป ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจะแปรผันตามปริมาณของเปลือกหมากที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ปริมาณตัวดูดซับ 0.20 0.25 และ 0.30 กรัม มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตาราง ข-3.3 ภาคผนวก ข) จึงเลือกปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม คือ 0.20 กรัม ในการทดลองต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ozer D. (2007) ที่พบว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีมากขึ้นและบริเวณที่เกิดการดูดซับมีสูงขึ้น โดยพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณตัวดูดซับและเมื่อเข้าสู่สมดุลการดูดซับประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มคงที่

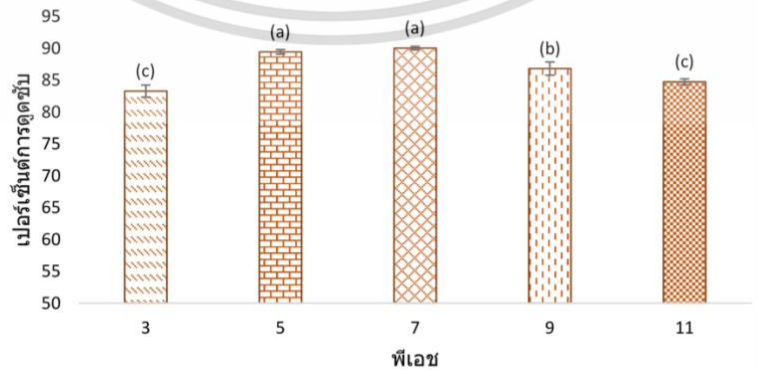
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกหมากกับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

4.2.4 ผลของความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม

ผลของความเป็นกรด-ด่างของสีย้อมเมทิลีนบลู โดยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เปลือกหมากปริมาณ 0.20 กรัม ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 45 นาที โดยแปรค่าพีเอชที่ 3, 5, 7, 9 และ 11 พบว่าเปลือกหมากมีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 83.28±0.95, 89.43±0.36, 90.02±0.27, 86.81±1.04 และ 84.73±0.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-6 ภาคผนวก ก) ทั้งนี้เนื่องจากที่พีเอช 5-9 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูสูง เมื่อนำผลไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีค่าพีเอชที่อยู่ในช่วง 5 และ 7 สูงกว่า พีเอช 9 และ พีเอช 3 และ 11 ตามลำดับ โดยที่พีเอช 5 และ 7 มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตาราง ข-4.3 ภาคผนวก ข) จึงเลือกให้ค่าพีเอชที่เหมาะสม คือ 5 เนื่องจากเป็นพีเอชที่ไม่ต้องปรับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Priyantha *et al.* (2015) ที่พบว่าสภาวะสารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำจะเกิดประจุบวกเกาะที่ผิวตัวดูดซับซึ่งจะชอบดูดซับสารละลายที่เป็นลบ แต่สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูมีประจุเป็นบวก ทำให้ประจุบวกเกิดการผลักกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูใกล้เคียงกัน

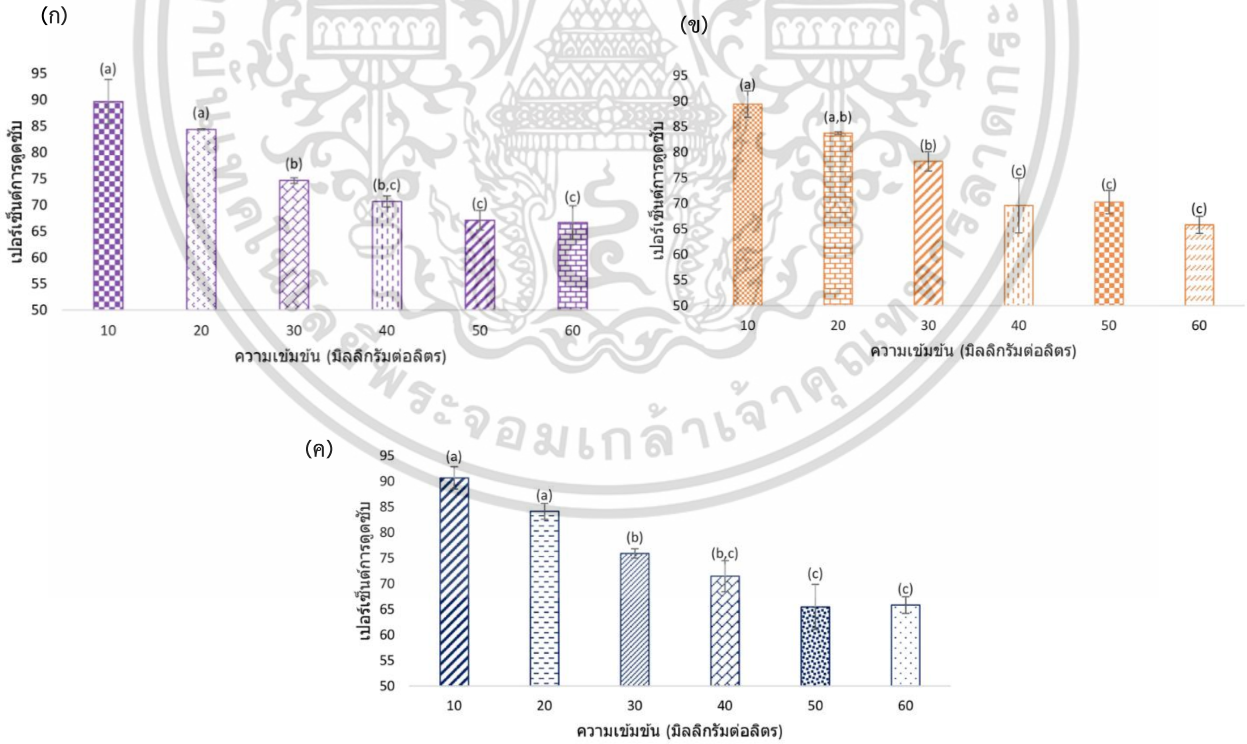


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผลของปริมาณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในการดูดซับที่เหมาะสม

ผลของความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยเปลือกหมากปริมาณ 0.20 กรัม ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 45 นาที ที่พีเอช 5 โดยแปรค่าความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เปลือกหมากมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 89.62±4.20, 84.34±0.12, 74.62±0.53, 70.62±1.07, 67.07±1.88 และ 66.63±3.19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-7 ภาคผนวก ก) ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้นไป ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายกับพื้นผิวของเปลือกหมาก เมื่อนำผลไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่าที่ความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตาราง ข-5.3 ภาคผนวก ข) จึงเลือกให้ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม คือ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Samiyammal *et al.* (2022) ที่พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมก็จะลดลง จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ

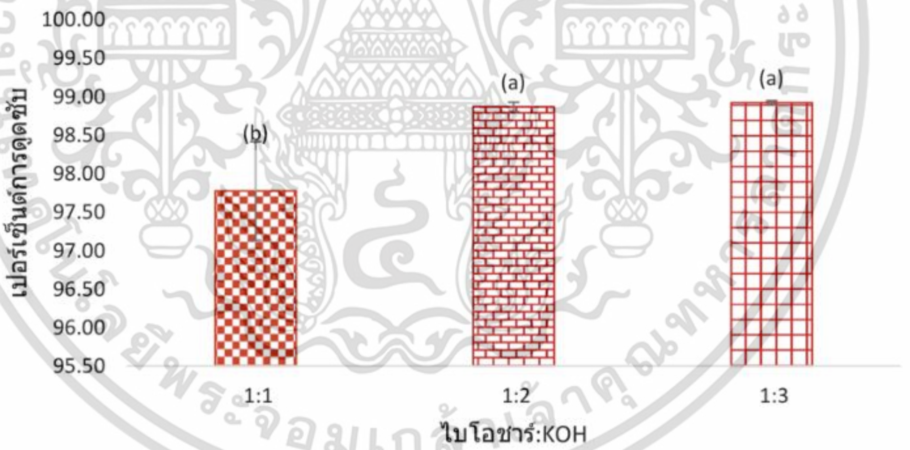


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูกับประสิทธิภาพในการดูดซับ (ก) เปลือกหมาก (ข) ไบโอชาร์ (ค) ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อัตราส่วนไบโอชาร์:โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1:2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 เปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ

ทำการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วน ไบโอชาร์:โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1:1, 1:2 และ 1:3 ปริมาณ 0.20 กรัม ความเร็วรอบในการเขย่าอยู่ที่ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 45 นาที ที่พีเอช 5 พบว่าค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 97.77±0.64, 98.87±0.06 และ 98.92±0.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-11 ภาคผนวก ก) ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้น เมื่อนำผลไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่าที่อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตาราง ข-6.3 ภาคผนวก ข) จึงเลือกใช้อัตราส่วนที่ 1:2 ในการทดลองต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ รวินิภา (2559) ที่พบว่าเบสจะทำการเพิ่มพื้นที่ผิวและเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบนตัวดูดซับ ซึ่งสามารถเพิ่มปริมาณรูพรุนและเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะได้ดี

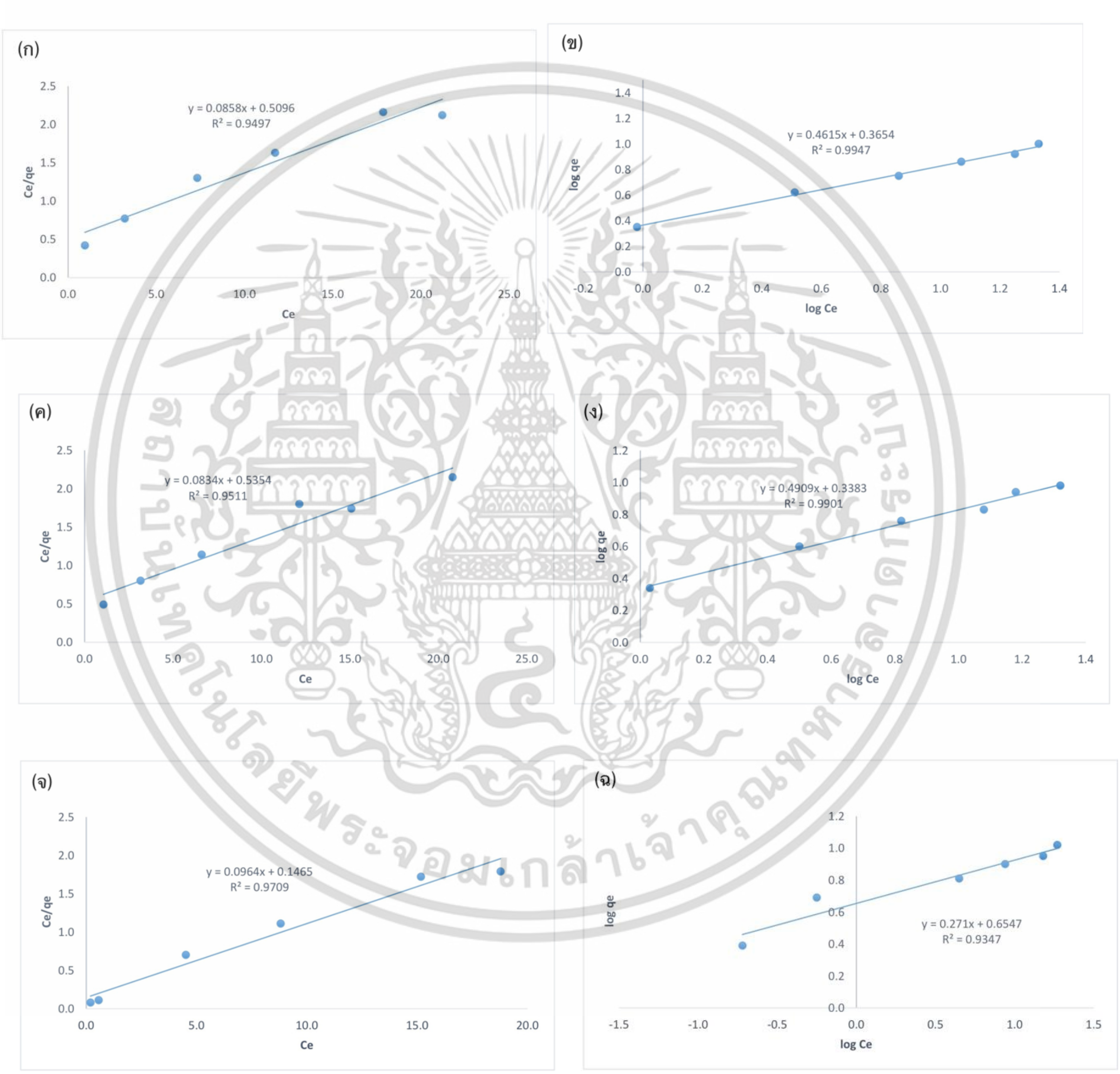


รูปที่ 4.11 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตรส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 ผลของการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลีนบลู

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของเปลือกหมากกับความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิที่คงที่ เพื่อหาไอโซเทอร์มที่เหมาะสม และใช้อธิบายลักษณะการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของเปลือกหมาก โดยนำผลข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ตามแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.12 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-9 ภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ (ก) เปลือกหมากแบบแลงเมียร์ (ข) เปลือกหมากแบบฟลุนดิช (ค) ถ่านไบโอชาร์แบบแลงเมียร์ (ง) ถ่านไบโอชาร์แบบฟลุนดิช (จ) ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วน 1:2 แบบแลงเมียร์ (ฉ) ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วน 1:2 แบบฟลุนดิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช

วัสดุดูดซับ	ไอโซเทอร์มแลงเมียร์			ไอโซเทอร์มฟรุนดิช		
	q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_F (mg/g) $(L/mg)^{1/n}$	1/n	R^2
เปลือกหมาก	11.6550	0.1684	0.9497	2.3195	0.4615	0.9947
ไบโอชาร์	11.9904	0.1558	0.9511	2.1793	0.4909	0.9901
ถ่านกัมมันต์	10.3734	0.6580	0.9709	4.5154	0.2710	0.9347

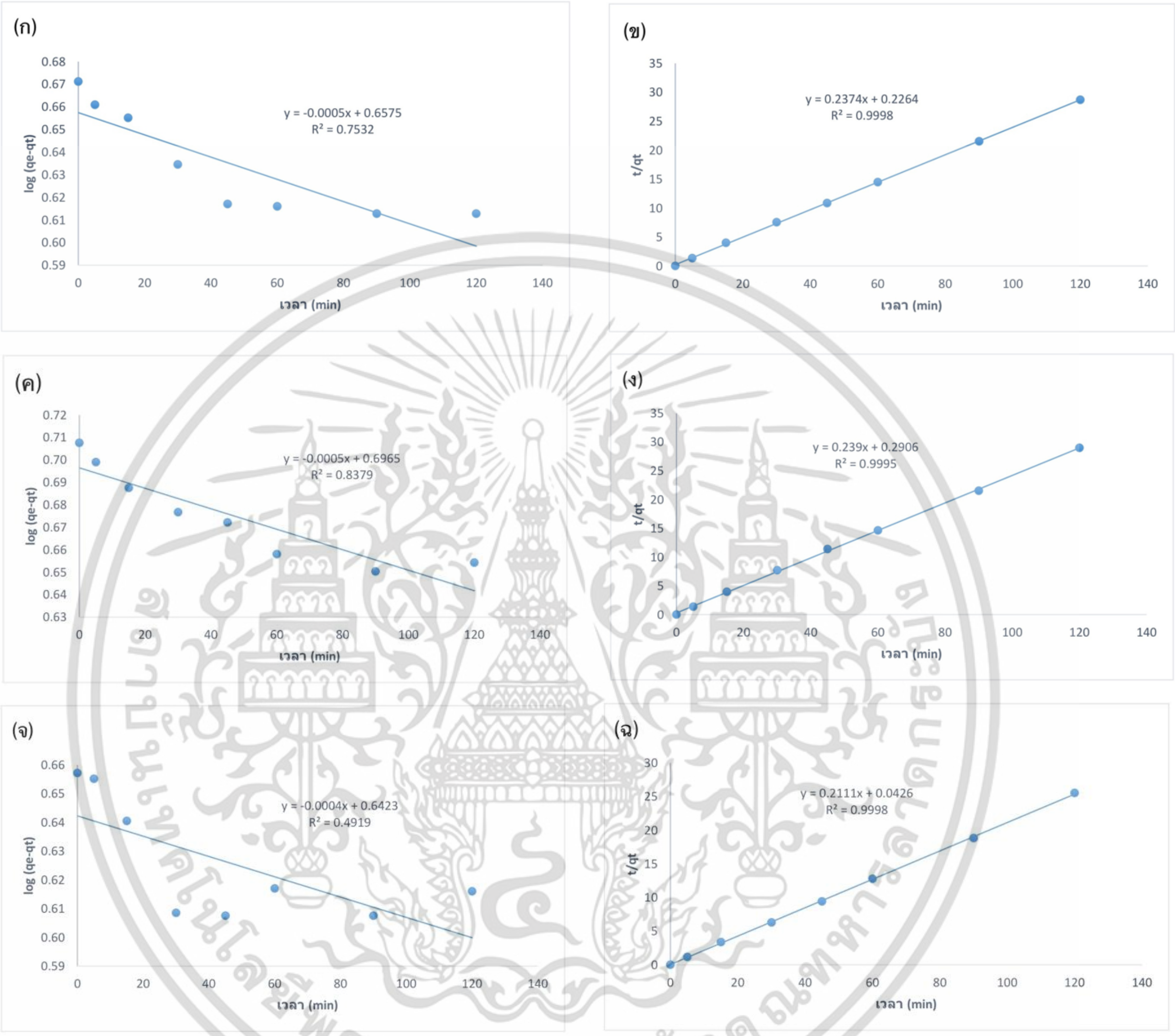
จากตารางที่ 4.1 พบว่าเปลือกหมากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอมแลงเมียร์เท่ากับ 0.9497 และฟรุนดิชเท่ากับ 0.9947 และไบโอชาร์มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอมแลงเมียร์เท่ากับ 0.9511 และฟรุนดิชเท่ากับ 0.9901 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 จึงสอดคล้องกับการดูดซับแบบฟรุนดิชและแบบแลงเมียร์ เปลือกหมากมีค่าคงที่ 1/n และค่า K_F เท่ากับ 0.4615 และ 2.3195 ตามลำดับ และไบโอชาร์มีค่าคงที่ 1/n และค่า K_F เท่ากับ 0.4909 และ 2.1792 ตามลำดับ ซึ่งค่า 1/n มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณตำแหน่งที่ดูดซับมีจำกัด ส่วนถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนไบโอชาร์ : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1: 2 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอร์มแลงเมียร์เท่ากับ 0.9709 และฟรุนดิชเท่ากับ 0.9347 จึงสอดคล้องกับการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดิช มีค่าคงที่ 1/n และค่า K_F เท่ากับ 0.2710 และ 4.5154 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hameed *et al.* (2007) ที่พบว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเข้าไปปกคลุมพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer Sorption) และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกิดขึ้น ซึ่งจะเป็นการดูดซับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปยึดจับกันเป็นชั้นๆบนพื้นผิวของตัวดูดซับ เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Multilayer Sorption) จะเป็นการดูดซับไอโซเทอมแบบฟรุนดิช

4.2.8 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับ ประสทธิภาพการดูดซับจะเพ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายและปริมาณสีย้อมเมทิลีนบลูบนตัวดูดซับมีค่าต่างกันมาก ทำให้การแพร่ของสีย้อมเมทิลีนบลูไปยังตำแหน่งดูดซับเกิดขึ้นได้เร็ว จากนั้นการดูดซับจะเริ่มช้าลงแล้วค่อยๆ เริ่มคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษากลไกการดูดซับของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้น ซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสีย้อมเมทิลีนบลูและวัสดุดูดซับ สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและปฏิกิริยาอันดับสอง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-10 ภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ก) และปฏิกิริยาอันดับสอง (ข) ของเปลือกหมาก, ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ค) และปฏิกิริยาอันดับสอง (ง) ของไบโอชาร์, ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (จ) และปฏิกิริยาอันดับสอง (ฉ) ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วน 1:2

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและอันดับสอง

วัสดุดูดซับ	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง			ปฏิกิริยาอันดับสอง		
	q_e (mg/g)	k_1 (min^{-1})	R^2	q_e (mg/g)	k_2 (g/mg-min)	R^2
เปลือกหมาก	4.5446	0.0012	0.7532	4.2123	0.2489	0.9998
ไบโอชาร์	4.9716	0.0012	0.8379	4.1841	0.1966	0.9995
ถ่านกัมมันต์	4.3883	0.0009	0.4919	4.7371	1.0461	0.9998

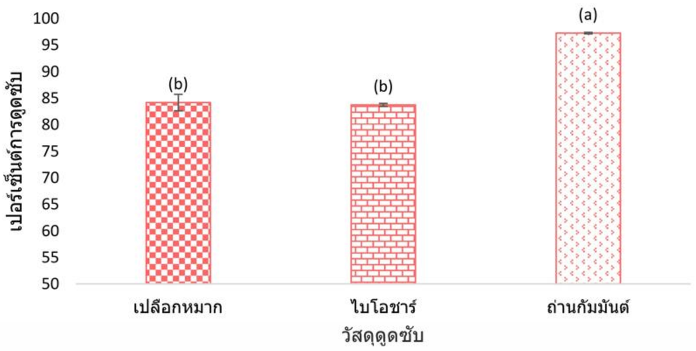
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง **log(q_e-q_t)** กับ **t** และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง **t/q_t** กับ **t** พบว่าทั้งเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ มีความสอดคล้องกับความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับสอง เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9998, 0.9995 และ 0.9998 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าค่า k_2 มีค่าเท่ากับ 0.2489, 0.1966 และ 0.10461 กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสอง อธิบายได้ว่ากระบวนการดูดซับที่มีขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ เป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี โดยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าคงที่อัตรา k_2 จะลดลง เนื่องจากที่สีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้นต่ำๆ จะเกิดการแข่งขันบนพื้นผิวของตัวดูดซับในการดูดซับสีน้อยกว่าที่สีความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang *et al*. (2014) ที่พบว่าที่เวลาเปลี่ยนแปลงไปจนเข้าสู่สมดุล การดูดซับของสีย้อมด้วยวัสดุดูดซับจะเป็นการแพร่บนพื้นผิวภายในอนุภาค

4.2.9 ผลการเปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมากกับไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยไบโอชาร์ : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:2 ความเข้มข้นสีเมทิลีนบลู 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.20 กรัม ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 45 นาที ที่พีเอช 5 พบว่ามีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์เท่ากับ 84.34±0.12, 83.70±0.28 และ 97.22±0.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-11 ภาคผนวก ก) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาตามพื้นที่ผิวในการดูดซับ ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงถึง 74.016 ตารางเมตรต่อกรัม รองลงมาเป็นเปลือกหมากและไบโอชาร์ ซึ่งให้พื้นที่ผิวในการดูดซับเพียงแค่ 63.822 และ 49.976 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อนำผลไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีกว่าเปลือกหมากที่ไม่ผ่านการแปรสภาพ และไบโอชาร์ อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ (ดูรายละเอียดในตาราง ข-7.3 ภาคผนวก ข) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Samiyammal *et al*. (2022) ที่พบว่าตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆที่ยังไม่ผ่านการแปรสภาพให้เป็นถ่านกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยไบโอชาร์ : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 1:2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ ได้ผลดังนี้

1. โครงสร้างทางเคมีของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ด้วย FTIR พบสารประกอบฟีนอล สารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคน แอลคีน แอลไคน์ คาร์บอนิล และเอสเทอร์

2. ลักษณะสัณฐานวิทยาของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าเปลือกหมากมีลักษณะผิวขรุขระแต่รูพรุนไม่ชัดเจน ไบโอชาร์จะมีพวกซิลิกอนเกาะอยู่และเห็นรูพรุนชัดเจน ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆพบว่าซิลิกอนบนพื้นผิวเส้นใยได้หลุดออกไปอย่างเห็นได้ชัด รูพรุนมีขนาดเล็กลง

3. สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก คือ สีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณเปลือกหมาก 0.20 กรัม ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 45 นาที ที่พีเอช 5 มีประสิทธิภาพในการดูดซับ 84.34±0.12 เปอร์เซ็นต์

4. การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์สอดคล้องกับการดูดซับแบบฟรุนดิช และการดูดซับแบบแลงเมียร์ การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์สอดคล้องกับความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับสอง

5. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูสูงสุด ส่วนเปลือกหมากและไบโอชาร์ มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีเมทิลีนบลูของไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์
2. ควรศึกษาสีย้อมชนิดอื่นๆ และน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ขนิษฐา ชัยรัตนาวรรณ. (2547). การดูดซับสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยตะกอนจุลินทรีย์. หมวดวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สำนักวิชาการศึกษาทั่วไป มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ดวงใจ วัยเจริญ และ เกษร จำปา. (2562). ไบโอชาร์ (Biochar) ถ่านชีวภาพ ตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน. ศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. สำนักงานัฒนาที่ดิน 2 กรมพัฒนาที่ดิน.

ธนกฤต พรหมทอง. (2552). การกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพ และเฟนตันรีเอเจนต์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต การจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ธีรวัฒน์ ประหยัดทรัพย์. (ม.ป.ป.). (2533). หมากเพื่อการค้า. กรุงเทพฯ: ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร.

นิรมล ศากยวงศ์ และดุษยา จันทร์เสาร์ (2556). การบำบัดสีรีแอคทีฟโดยแบคทีเรียที่แยกได้จากดิน ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.

นิสาพร มูหะมัด (2559). การดูดซับสีย้อมด้วยกากชา. คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.

นำพล สุขเจริญ (2555). การศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากมะขามเปรี้ยว. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.

ปรินทร เต็มญารศิลป์. (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์ จากไผ่ตงและไผ่หมาจู๋. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปาริชาติ หมื่นสีทา (2547). การกำจัดสีและซีโอดีจากน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดบางส่วนโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปิยนุช เหลืองโสวรรณ (2544). การบำบัดน้ำล้างสีย้อมจากกระบวนการฟอกย้อมโดยใช้เยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชัน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ปัทมา พลอยสว่าง และภคมน จิตประเสริฐ (2551). อิทธิพลของสภาวะแวดล้อมและการกระตุ้นการเจริญต่อการกำจัดสีย้อมผ้าโดย Lentinus polychrous Lev. ที่ผ่านการทำแห้งแบบฟลูอิไดซ์.ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46: สาขาอุตสาหกรรมเกษตร.

พชรวรรณ อึ้งศิริสวัสดิ และ เฉลิม เรืองวิริยะชัย (2559). การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้เปลือกหน่อไม้แห้ง. The national and international Graduate Research Conference.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

พินิจภณ ปิตุยะ. (2557). เอกสารองค์ความรู้เรื่องถ่านชีวภาพ. ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทราย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ.

พรสวรรค์ อัศวแสงรัตน์ วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์ (2553). การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.

พิมพ์ชนก เต็งเจริญ (2546). การกำจัดสีของน้ำทิ้งในการผลิตลิกนินโดยราไวต์รอต. วิทยานิพนธ์ มหาบัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มัลลิกา ปัญญาคะโป. (2556). การบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี: นครปฐม : ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิทย์ ปิยะมังคลา (2554). จลศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลู โดยใช้แกลบดัดแปร. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21(2): 337-348.

รวินิภา ศรีมูล. (2559). การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ. ว.วิทยาศาสตร์ มข. 44: 419-434.

วนิดา ชูอักษร. (2555). เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

วราภรณ์ อภิวัฒนาภิวัต ต่อพงศ์ กรีธาชาติ และพิลาณีไวถนอมสัตย์ (2550). การลดสีน้ำทิ้งจาก โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดยโอโซนออกซิเดชัน. ในการประชุมทางวิชาการ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45:สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

วีรานุช หลาง ธนสิริ มีชัย และ วิชชุพร จันทร์ศรี (2551). ความสามารถในการกำจัดสีย้อมผ้าประเภท รีแอกทีฟของ Burkholderia glumae. Environment and NaturalResources Journal, 6: 66-81.

ศิริลักษณ์ ศิริสิงห์. (2556). การพัฒนาการเรียนรู้ การประยุกต์ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเพื่อ การเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สราวุธ ศรีคุณ (2550). การศึกษาการดูดซับสีย้อมและไอออนโลหะตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ จากเปลือกทุเรียน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

โสภาพรรณ รัตนพันธุ์ (2547). การบำบัดและกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยเส้นใย เห็ด Lentinus spp. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต เทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

หญิง อามาน,มัลลิกา โรจน์คงทรัพย์, โกวิทย์ ปิยะมังคลา. (2561). การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเกล็ดไคโตซาน: สมดุลและการประยุกต์ใช้สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2561;28(4):825-35.

อรพิน โทนเดี่ยว (2550). การบำบัดสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียจากโรงงานผลิตโลหะโดยใช้กากชา. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

อังคณา ปัญญาอ่อง อนวัช พินิจศักดิ์กุล ศศิธร พุทธวงษ์ ศุภเกียรติ ศรีพนมธนากร และสร้อยดาว วินิจ นันทรัตน์ (2550). การกำจัดสีรีแอคทีฟบลูโดยกระบวนการบำบัดทางไฟฟ้าเคมี สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

Ahmad, M.A., Puad, N.A.A. and Bello, O.S. (2014). Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies of synthetic dye removal using pomegranate peel activated carbon prepared by microwave-induced KOH activation. Water Resources and Industry, 6, 18-35. doi:https://doi.org/10.1016/j.wri.2014.06.002

Amel, K., Hassena, M.A. and 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

Annadurai, G., Juang, R.-S. and Lee, D.-J. (2002). Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions. Journal of Hazardous Materials, 92(3), 263-274. doi:https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00017-1

Anon. (2006). Hy-Tech mushroom compost, INC. Available http://www.hytechmushroomcompost. com/index_files/files/Page295.htm. [13/11/ 2021].

Bhargavi, M.V. 2006. Biochemical, enzymatic and humic fraction transformations during compost- ing of urban and agricultural residues. University of Agricultural Sciences, GKVK, Bangalore. India. 65 pp.

Bulut, Y. and Aydın, H., 2006. A kinetics and thermodynamics study of methylene blue adsorption on wheat shells. Desalination 194, 259–267.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Chen, B-Y. (2002). Understanding decolorization charac teristics of reactive azo dyes by Pseudomonas luteola: toxicity and kinetics. Process Biochemistry, 38, 437-446.

Chen, Y., Zhang, X., Chen, W., Yang, H. and Chen, H. (2017). The structure evolution of biochar from biomass pyrolysis and its correlation with gas pollutant adsorption performance. Bioresource technology, 246, 101-109.

Geoge, W. S. and Robert, F. B. 2006. Areca catechu (betel nut palm). Available. http://www.tradi- tionaltree.org [13/11/2021].

Hameed B, Ahmad A, Latiff K. Adsorption of basic dye (methylene blue) onto activated carbon prepared from rattan sawdust. Dyes and Pigments 2007;75(1):143-9.

Hamdaoui. (2006). "Dynamic sorption of methylene blue by cedar sawdust and crushed brick in fixed bed column" Journal of Hazardous Materials, vol. 138, 293-303

Hazzaa, R., and M. Hussien. (2015) "Ads rp ion 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.

Ho, Y. S., and G. McKay. (2000). "The kinetics of Sorption of diva lent metal ions onto sphagnum moss peat." War Resource Journal 34 (3): 735-742.

Huang, Y., Yang, J.K., Keller, A.A. (2014). Removal of Arsenic and Phosphate from Aqueous Solution by Metal (Hydr-)oxide Coated Sand. ACS Sustainable Chem. Eng., 2, 1128-1138.

Longtunman. (2021). หมากไทย. [Online] https://www.longtunman.com/30138 สืบค้นเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม 2565

Matichon Online. (2559). หมากแห้ง.
[Online] https://www.matichon.co.th/sme/news_70004
สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2566

Mane, R.S. and Bhusari, V.N. (2012). Removal of colour dyes from textile effluent by adsorption using orange and banana peel. International Journal of Engineerin Research and Applications, 2(3), 1997-2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Moubarak, F., Atmani, R., Maghri, I., Elkouali, M.H., Talbi, M., Bouamrani, M.L. and Kenz, A. (2014). Elimination of Methylene Blue Dye with Natural Adsorbent <Banana Peels Powder>. Global Journal of Science Frontier Research: B Chemistry, 14(1), 39-44.

Ozer D., Dursum, G., and Ozer, A. methylene blue adsorption from aqueous solution by dehydrated peanut hull. Jurnal of Hazardous Materials 2007; 144: 171-179.

Prachachat. (2021). เศรษฐกิจภูมิภาค.
[Online] https://www.prachachat.net/local-economy/news-933056
สืบค้นเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม 2565

P. Samiyammal, A. Kokila, L. Arul Pragasan, Rajakrishnan Rajagopal, Rengasamy Sathya, S. Ragupathyf, M. Krishnakumarg, Vasudeva Reddy. (2022). Adsorption of brilliant green dye onto activated carbon prepared from cashew nut shell by KOH activation: Studies on equilibrium isotherm. Ind. Eng. Chem. Res. 212.

Priyantha, N., Lim, L. B. L. and Dahri, M. K., (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.

Qiu, Hui, Lu L.V., Bing-cai Pan, Qing-jian Zhang, Wei-ming Zhang, and Quan-xing Zhang. (2009). “ Critical review in adsorption kinetic models.” Journal of Zhejiang University Science A 10 (5): 716-724.

Sarasa, J.R., Ormad, M.P., Gimeno, E., Puig, A. and Ovelleiro, J.L. (1998). Treatment of a wastewater resulting from dyes manufacturing with ozone and chemical coagulation. Water Research, 32 (9), 2721-2727.

Srimoon, R. (2016). Dyes treatment in wastewater using adsorption processes. KKU Sci. J. 44(3) Pg419-434.

Tanaka, K., Padermpole, K., and Hisanaga, T. (2000). Photocalytic degradation of commercial azo dyes. Water Research, 34, 327-333.

Xamplified. (2009). Freundlich Adsorption Isotherm. Retrieved from
http://www.chemistrylearning.com/freundlich-adsorption-isotherm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลการศึกษา

ภาคผนวก ก-1 การเตรียมเมทิลีนบลูเพื่อหาความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max})

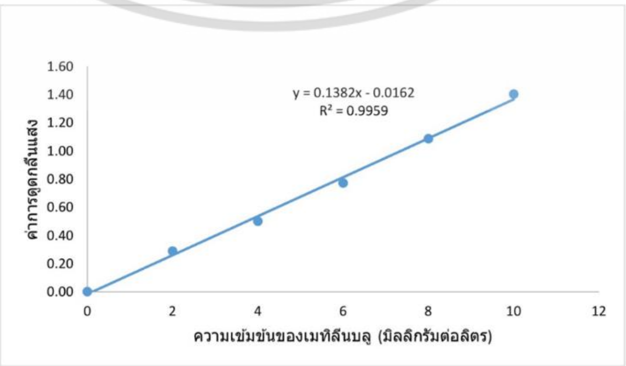
1. เตรียมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ตั้งแต่ความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร เพื่อหาค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของเมทิลีนบลู คือ 654 นาโนเมตร

ภาคผนวก ก-2 ศึกษาการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู

1. เตรียมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 654 นาโนเมตร

ตารางที่ ก-2 มาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูกับค่าการดูดกลืนแสง

ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.0001
2	0.2887
4	0.4998
6	0.7717
8	1.0858
10	1.4017



รูป ก-2 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูกับค่าการดูดกลืนแสง

ภาคผนวก ก-3 ศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม

ระยะเวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	78.97	78.41	78.54	78.64	0.29
5	80.95	81.72	81.03	81.23	0.42
15	83.06	83.33	83.16	83.18	0.14
30	87.39	86.91	87.23	87.18	0.24
45	91.39	90.59	89.48	90.49	0.96
60	91.84	92.44	91.10	91.79	0.67
90	91.06	91.16	93.22	91.81	1.22
120	90.93	91.15	91.20	91.09	0.14

ภาคผนวก ก-4 ศึกษาผลของความเร็วรอบในการดูดซับที่เหมาะสม

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองความเร็วรอบในการดูดซับที่เหมาะสม

ความเร็วรอบ	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
(รอบ/นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
100	77.83	83.11	83.59	81.51	3.20
150	84.10	85.67	87.06	85.61	1.48
200	86.13	87.68	91.07	88.29	2.53
250	87.56	89.91	90.66	89.38	1.62
300	88.38	89.87	89.95	89.40	0.88

ภาคผนวก ก-5 ศึกษาผลของปริมาณเปลือกหมากในการดูดซับที่เหมาะสม

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองปริมาณเปลือกหมากในการดูดซับที่เหมาะสม

ปริมาณเปลือก	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
หมาก (กรัม)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0.10	85.35	86.18	84.43	85.32	0.88
0.15	86.24	87.34	85.20	86.26	1.07
0.20	89.04	91.30	89.00	89.78	1.32
0.25	88.50	90.01	90.45	89.65	1.02
0.30	90.42	90.06	88.66	89.71	0.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก-6 ศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสม

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสม

กรด-ด่าง (pH)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
3	83.77	83.88	82.19	83.28	0.95
5	89.84	89.15	89.30	89.43	0.36
7	90.07	90.26	89.72	90.02	0.27
9	87.51	87.31	85.61	86.81	1.04
11	84.21	85.09	84.90	84.73	0.46

ภาคผนวก ก-7 ศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในการดูดซับที่เหมาะสม

ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองปริมาณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในการดูดซับที่เหมาะสม

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	85.21	93.57	90.09	89.62	4.20
20	84.44	84.38	84.21	84.34	0.12
30	75.02	74.82	74.02	74.62	0.53
40	70.09	71.85	69.93	70.62	1.07
50	68.82	67.29	65.09	67.07	1.88
60	66.38	69.89	63.51	66.63	3.19

ภาคผนวก ก-8 เปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ

ไบโอชาร์:KOH	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1:1	98.50	97.29	97.53	97.77	0.64
1:2	98.92	98.88	98.80	98.87	0.06
1:3	98.89	98.93	98.94	98.92	0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก-9 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับเมทิลีนบลู

ตารางที่ ก-9.1.1 ผลการทดลองแสดงความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	2.31	2.26	2.19	2.25	0.06
20	4.43	3.90	4.12	4.15	0.27
30	5.89	5.46	5.50	5.62	0.24
40	7.62	6.66	7.33	7.20	0.49
50	9.04	7.31	8.49	8.28	0.88
60	10.37	9.58	10.01	9.99	0.40

ตารางที่ ก-9.1.2 ผลการทดลองแสดงความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	2.28	2.18	2.14	2.20	0.07
20	3.94	3.93	3.99	3.95	0.03
30	5.81	5.93	5.65	5.80	0.14
40	6.08	7.29	6.89	6.75	0.62
50	8.26	9.01	8.69	8.65	0.38
60	9.62	10.19	9.16	9.66	0.52

ตารางที่ ก-9.1.3 ผลการทดลองแสดงความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	2.48	2.45	2.47	2.47	0.02
20	4.85	4.86	4.90	4.87	0.03
30	6.33	6.58	6.37	6.43	0.13
40	8.14	7.54	8.05	7.91	0.32
50	8.87	8.75	8.86	8.83	0.07
60	10.44	10.53	10.57	10.51	0.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-9.2.1 ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	89.81	93.15	89.06	90.67	2.18
20	84.21	82.56	85.66	84.14	1.55
30	74.88	76.60	76.23	75.90	0.91
40	73.48	67.99	72.92	71.46	3.02
50	68.70	60.43	67.23	65.45	4.41
60	66.30	64.02	67.15	65.82	1.62

ตารางที่ ก-9.2.2 ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	92.31	88.42	87.43	89.39	2.58
20	83.94	83.77	83.40	83.70	0.28
30	79.66	78.89	76.05	78.20	1.90
40	64.39	75.08	69.22	69.56	5.35
50	67.69	72.06	70.95	70.23	2.27
60	64.34	67.61	65.39	65.78	1.67

ตารางที่ ก-9.2.3 ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	98.16	98.07	98.26	98.16	0.10
20	97.11	97.17	97.38	97.22	0.14
30	84.27	87.68	84.25	85.40	1.97
40	80.55	75.22	80.26	78.68	3.00
50	70.05	70.23	71.20	70.49	0.62
60	69.07	69.82	70.25	69.71	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก-10 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู

ตารางที่ ก-10.1.1 ผลการทดลองแสดงความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก

ระยะเวลา (นาที)	ความสามารถในการดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	3.56	3.69	3.53	3.59	0.09
5	3.73	3.78	3.59	3.70	0.10
15	3.75	3.87	3.65	3.76	0.11
30	4.12	4.11	3.68	3.97	0.25
45	4.13	4.23	4.05	4.14	0.09
60	4.13	4.28	4.05	4.15	0.12
90	4.17	4.32	4.05	4.18	0.14
120	4.19	4.33	4.01	4.18	0.16

ตารางที่ ก-10.1.2 ผลการทดลองแสดงความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์

ระยะเวลา (นาที)	ความสามารถในการดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	3.55	3.63	3.47	3.55	0.08
5	3.81	3.84	3.30	3.65	0.30
15	3.83	3.94	3.58	3.78	0.18
30	4.00	4.02	3.69	3.90	0.19
45	4.08	3.99	3.77	3.95	0.16
60	4.28	4.31	3.72	4.10	0.33
90	4.27	4.39	3.87	4.18	0.27
120	4.28	4.33	3.80	4.14	0.29

ตารางที่ ก-10.1.3 ผลการทดลองแสดงความสามารถในการดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์

ระยะเวลา (นาที)	ความสามารถในการดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	4.29	4.33	4.26	4.29	0.04
5	4.09	4.34	4.49	4.31	0.20
15	4.42	4.44	4.53	4.46	0.06
30	4.54	4.85	4.92	4.77	0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45	4.60	4.93	4.82	4.78	0.17
60	4.46	4.83	4.78	4.69	0.20
90	4.77	4.85	4.71	4.78	0.07
120	4.59	4.87	4.64	4.70	0.15

ตารางที่ ก-10.2.1 ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก

ระยะเวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	73.55	76.43	75.75	75.24	1.51
5	75.31	77.40	76.73	76.48	1.07
15	79.84	79.07	78.13	79.01	0.86
30	81.86	82.46	80.80	81.71	0.84
45	84.46	84.32	82.89	83.89	0.87
60	84.03	85.43	85.69	85.05	0.89
90	85.41	86.20	85.40	85.67	0.46
120	85.96	86.31	84.85	85.71	0.76

ตารางที่ ก-10.2.2 ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์

ระยะเวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	73.39	75.15	73.50	74.01	0.99
5	75.00	75.83	71.10	73.98	2.53
15	78.72	79.47	77.03	78.41	1.25
30	80.46	80.26	78.44	79.72	1.11
45	83.82	82.49	83.48	83.26	0.69
60	85.24	85.92	82.88	84.68	1.60
90	85.83	86.99	86.50	86.44	0.58
120	86.86	86.12	84.91	85.96	0.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-10.2.3 ผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับของเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์

ระยะเวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	86.43	85.97	88.99	87.13	1.63
5	86.91	87.28	90.04	88.08	1.71
15	90.33	88.96	92.05	90.45	1.55
30	97.15	96.21	97.72	97.03	0.76
45	97.09	98.04	97.89	97.67	0.51
60	95.93	96.84	97.02	96.60	0.58
90	97.72	98.29	97.34	97.78	0.48
120	95.74	97.25	96.86	96.62	0.78

ภาคผนวก ก-11 เปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์

ตารางที่ ก-11 ผลการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์

วัสดุดูดซับ	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
เปลือกหมาก	84.44	84.38	84.21	84.34	0.12
ไบโอชาร์	83.94	83.77	83.40	83.70	0.28
ถ่านกัมมันต์	97.11	97.17	97.38	97.22	0.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การคำนวณทางสถิติโดยโปรแกรม Minitab

ภาคผนวก ข-1 ผลของระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0: ระยะเวลาที่สัมผัสที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

H_1: ระยะเวลาที่สัมผัสที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

p-value 0.000

เนื่องจากค่า p-value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ H_0 คือ ระยะเวลาที่สัมผัสที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

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

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
ระยะเวลา	7	578.270	82.6100	205.16	0.000
Error	16	6.442	0.4027		
Total	23	584.712			

ตารางที่ ข-1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ระยะเวลาที่สัมผัสที่ 0, 5, 15, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ระยะเวลาที่สัมผัส	N	Mean	StDev	95% Cl
0	3	78.640	0.293	(77.863, 79.417)
5	3	81.233	0.423	(80.457, 82.010)
15	3	83.1833	0.1365	(82.4067, 83.9600)
30	3	87.177	0.244	(86.400, 87.953)
45	3	90.487	0.959	(89.710, 91.263)
60	3	91.793	0.671	(91.017, 92.570)
90	3	91.813	1.219	(91.037, 92.590)
120	3	91.0933	0.1436	(90.3167, 91.8700)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของระยะเวลาที่สัมผัสต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตาราง ข-1.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ระยะเวลาที่สัมผัสที่ 0, 5, 15, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที

ระยะเวลาที่สัมผัส	N	Mean	Grouping				
90	3	91.813	A				
60	3	91.793	A				
120	3	91.0933	A				
45	3	90.487	A				
30	3	87.177		B			
15	3	83.1833			C		
5	3	81.233				D	
0	3	78.640					E

ภาคผนวก ข-2 ศึกษาผลของความเร็วรอบในการดูดซับที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0: ความเร็วรอบที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

H_1: ความเร็วรอบที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

p-value 0.004

เนื่องจากค่า p-value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ H_0 คือ ความเร็วรอบที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

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

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
ความเร็วรอบ	4	135.07	33.767	7.61	0.004
Error	10	44.38	4.438		
Total	14	179.44			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ความเร็วรอบที่ 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ความเร็วรอบ	N	Mean	StDev	95% Cl
100	3	81.51	3.20	(78.80, 84.22)
150	3	85.610	1.481	(82.900, 88.320)
200	3	88.29	2.53	(85.58, 91.00)
250	3	89.377	1.617	(86.667, 92.087)
300	3	89.400	0.884	(86.690, 92.110)

จากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Turkey Pairwise Comparsions ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตาราง ข-2.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ความเร็วรอบที่ 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที

ความเร็วรอบ	N	Mean	Grouping
300	3	89.400	A
250	3	89.377	A
200	3	88.29	A
150	3	85.610	A B
100	3	81.51	B

ภาคผนวก ข-3 ศึกษาผลของปริมาณเปลือกหมากในการดูดซับที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0: ปริมาณเปลือกหมากที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

H_1: ปริมาณเปลือกหมากที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

p-value 0.001

เนื่องจากค่า p-value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ H_0 คือ ปริมาณเปลือกหมากที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
ปริมาณเปลือกหมาก	4	56.83	14.206	12.79	0.001
Error	10	11.11	1.111		
Total	14	67.94			

ตารางที่ ข-3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปริมาณเปลือกหมากที่ 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 กรัม ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณเปลือกหมาก	N	Mean	StDev	95% Cl
0.10	3	85.320	0.875	(83.964, 86.676)
0.15	3	86.260	1.070	(84.904, 87.616)
0.20	3	89.780	1.317	(88.424, 91.136)
0.25	3	89.653	1.023	(88.279, 91.009)
0.30	3	89.713	0.930	(88.357, 91.069)

จากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของปริมาณเปลือกหมากต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตาราง ข-3.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปริมาณเปลือกหมากที่ 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 กรัม

ปริมาณเปลือกหมาก	N	Mean	Grouping
0.20	3	89.780	A
0.30	3	89.713	A
0.25	3	89.653	A
0.15	3	86.260	B
0.10	3	85.320	B

ภาคผนวก ข-4 ศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0: ความเป็นกรด-ด่างที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

H_1: ความเป็นกรด-ด่างที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

p-value 0.000

เนื่องจากค่า p-value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ H_0 คือ ความเป็นกรด-ด่างที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

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

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
กรด-ด่าง	4	101.733	25.4332	52.87	0.000
Error	10	4.811	0.4811		
Total	14	106.543			

ตารางที่ ข-4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ความเป็นกรด-ด่างที่ 3, 5, 7, 9 และ 11 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

กรด-ด่าง	N	Mean	StDev	95% Cl
3	3	83.280	0.946	(82.388, 84.172)
5	3	89.430	0.363	(88.538, 90.322)
7	3	90.017	0.274	(89.124, 90.909)
9	3	86.810	1.044	(85.918, 87.702)
11	3	84.733	0.463	(83.841, 85.626)

จากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Turkey Pairwise Comparsions ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตาราง ข-4.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ความเป็นกรด-ด่างที่ 3, 5, 7, 9 และ 11

กรด-ด่าง	N	Mean	Grouping
7	3	90.017	A
5	3	89.430	A
9	3	86.810	B
11	3	84.733	C
3	3	83.280	C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข-5 ศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูในการดูดซับที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0: ปริมาณความเข้มข้นที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

H_1: ปริมาณความเข้มข้นที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

p-value 0.000

เนื่องจากค่า p-value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ H_0 คือ ปริมาณความเข้มข้นที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ข-5.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
ปริมาณความเข้มข้น	5	1356.25	271.251	49.66	0.000
Error	12	65.55	5.462		
Total	17	1421.80			

ตารางที่ ข-5.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความเข้มข้น	N	Mean	StDev	95% Cl
10	3	89.62	4.20	(86.68, 92.56)
20	3	84.3433	0.1193	(81.4034, 87.2833)
30	3	74.620	0.529	(71.680, 77.560)
40	3	70.623	1.065	(67.683, 73.563)
50	3	67.07	1.88	(64.13, 70.01)
60	3	66.63	3.19	(63.69,69.57)

จากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของ ปริมาณความเข้มข้นต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Turkey Pairwise Comparsions ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-5.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณความเข้มข้น	N	Mean	Grouping		
10	3	89.62	A		
20	3	84.3433	A		
30	3	74.620		B	
40	3	70.623		B	C
50	3	67.07			C
60	3	66.63			C

ภาคผนวก ข-6 เปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ

สมมติฐานการทดลอง

H_0: อัตราส่วนไบโอชาร์ต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

H_1: อัตราส่วนไบโอชาร์ต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

p-value 0.015

เนื่องจากค่า p-value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ H_0 คือ อัตราส่วนไบโอชาร์ต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ข-6.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
ไบโอชาร์:KOH	2	2.5131	1.2565	9.09	0.015
Error	6	0.8297	0.1383		
Total	8	3.3428			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้อัตราส่วนไบโอชาร์ต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ไบโอชาร์:KOH	N	Mean	StDev	95% Cl
1:1	3	97.773	0.641	(97.248, 98.299)
1:2	3	98.8667	0.0611	(98.3413, 99.3920)
1:3	3	98.9200	0.0265	(98.3946, 99.4454)

จากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของปริมาณความเข้มข้นต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Turkey Pairwise Comparsions ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตาราง ข-6.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้อัตราส่วนไบโอชาร์ต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก

ไบโอชาร์:KOH	N	Mean	Grouping
1:3	3	98.9200	A
1:2	3	98.8667	A
1:1	3	97.773	B

ภาคผนวก ข-7 เปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกหมากกับไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์

สมมติฐานการทดลอง

H_0: วัสดุดูดซับที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

H_1: วัสดุดูดซับที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

p-value 0.000

เนื่องจากค่า p-value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ H_0 คือ วัสดุดูดซับที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ข-7.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
วัสดุดูดซับ	2	353.893	176.947	212.15	0.000
Error	6	5.004	0.834		
Total	8	358.897			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยวัสดุดูดซับทั้งสามชนิดคือ เปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

วัสดุดูดซับ	N	Mean	StDev	95% Cl
เปลือกหมาก	3	84.3433	0.1193	(81.4034, 87.2833)
ไบโอชาร์	3	83.703	0.276	(82.413, 84.994)
ถ่านกัมมันต์	3	98.2200	0.1418	(95.9298, 98.5102)

จากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของปริมาณความเข้มข้นต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Turkey Pairwise Comparsions ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตาราง ข-7.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยวัสดุดูดซับทั้งสามชนิดคือ เปลือกหมาก ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์

วัสดุดูดซับ	N	Mean	Grouping	
ถ่านกัมมันต์	3	97.2200	A	
เปลือกหมาก	3	84.3433		B
ไบโอชาร์	3	83.703		B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงงานพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่....24.....เดือน.........กุมภาพันธ์..........พ.ศ...2566....

ข้าพเจ้า ~~นาย~~/~~นาง~~/นางสาว...............ณภัทรพิชชา ใจแกล้ว.................... รหัสประจำตัว.......62050384.......

~~นาย~~/~~นาง~~/นางสาว................ภัณทิลาพร สุโนภักดิ์..................... รหัสประจำตัว......62050424........

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา...............เคมีสิ่งแวดล้อม...............ภาควิชา...............เคมี................
ขอรับรองว่าโครงงานพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา เรื่อง

ชื่อภาษาไทย.......................ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหมาก.................................

ชื่อภาษาอังกฤษ Adsorption Efficiency of Methylene Blue using Activated Carbon from Betel Nut Bark.
ปีการศึกษา...2565...

เป็นผลงานวิจัยที่มิได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงงานพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์....................9.84.................% หรือโปรแกรม Turnitin...%

ลงชื่อ...ณภัทรพิชชา ใจแกล้ว... ลงชื่อ...ภัณทิลาพร สุโนภักดิ์...

(นางสาวณภัทรพิชชา ใจแกล้ว) (นางสาวภัณทิลาพร สุโนภักดิ์)

นักศึกษา นักศึกษา

ข้าพเจ้า ~~ศ.~~ / รศ. / ~~ผศ.~~ / ดร. / อ....สุวรรณี จรรยาพูน..... อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบโครงงานพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ..

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้