

การผลิตถ่านชีวภาพดัดแปรจากฟางข้าว  
เพื่อใช้ในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ

PRODUCTION OF MODIFIED BIOCHAR FROM  
RICE STRAW FOR REMOVAL OF  
PHOSPHATE FROM WATER



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปีการศึกษา 2561

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRODUCTION OF MODIFIED BIOCHAR FROM  
RICE STRAW FOR REMOVAL OF  
PHOSPHATE FROM WATER



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
(ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตถ่านชีวภาพดัดแปรจากฟางข้าวเพื่อใช้ในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกรรวรรณ	ตอนนอก	รหัสนักศึกษา 58050583
	นายณัชภัทร	สำเภาน้อย	รหัสนักศึกษา 58050645
	นางสาวพิมพ์วิมล	พลศิลป์	รหัสนักศึกษา 58050662
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2561		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพดัดแปรจากฟางข้าวเพื่อใช้ในการกำจัดฟอสเฟต โดยนำฟางข้าวมาผ่านการบดและร่อนที่ตะแกรงขนาด 70 เมช มาศึกษาผลของอุณหภูมิขณะไพโรไลซิสต่อการผลิตถ่านชีวภาพและองค์ประกอบของถ่านชีวภาพ จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิเหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านชีวภาพคือ 400 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเตรียมถ่านชีวภาพดัดแปรด้วยไอออนของเหล็กและแมกนีเซียมเพื่อผลิตถ่านชีวภาพดัดแปรที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ ซึ่งชนิดของไอออนเหล็กและแมกนีเซียมที่ทำการศึกษา คือ  $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  และ  $Mg^{2+}$  ผลการศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพที่ดัดแปรมีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $Fe^{3+}$  มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ดีที่สุด คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดได้ถึง 84.00 เปอร์เซ็นต์ รองลงไปคือถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  ที่มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้เท่ากับ 71.47 เปอร์เซ็นต์ และถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $Mg^{2+}$  มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตเท่ากับ 62.93 เปอร์เซ็นต์

**คำสำคัญ :** การกำจัดฟอสเฟต, การดัดแปร, ถ่านชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	PRODUCTION OF MODIFIED BIOCHAR FROM RICE STRAW FOR REMOVAL OF PHOSPHATE FROM WATER		
Students	Miss. Korawan	Donnok	Student ID 58050583
	Mr. Natchaphat	Samphoanoi	Student ID 58050645
	Miss. Pimwimon	Pholsil	Student ID 58050662
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2018		
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Usarat Thawornchaisit		

### Abstract

This research studied the production of biochar from rice straw for phosphate removal. The rice straw was crushed and sieved at a 70 mesh. The effect of pyrolysis temperature on production of biochar and components of biochar was investigated. Results showed that the optimum temperature for biochar production was at 400 °C. Then Fe-modified biochar and Mg-modified biochar were prepared in order to produce the modified biochar that can efficiently remove phosphate from water. Types of cations that were selected as model cations in this study. Results showed that modification of biochar with Fe and Mg enhanced its phosphate removal capacity. Highest phosphate removal efficiency at 84% occurred when the Fe<sup>3+</sup>- modified biochar was used as adsorbent, followed by the Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>- modified biochar and the Mg<sup>2+</sup>- modified biochar with phosphate removal efficiency of 71.47% and 62.93%, respectively.

**Keywords :** Phosphate removal, Modification, Biochar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่อง การผลิตถ่านชีวภาพตัดแปรงจากฟางข้าวเพื่อใช้ในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากตลอดระยะเวลาในการจัดทำโครงการพิเศษนี้ ผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์ คำแนะนำและคำติชมที่เป็นประโยชน์ รวมไปถึงการให้ความร่วมมือและให้ความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายๆ ท่าน

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องของโครงการพิเศษนี้ ตลอดจนให้คำแนะนำและช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำนิพนธ์อีกด้วย

ขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการและกรรมการสอบโครงการพิเศษ รศ.ดร.บรรจง บุญชม และผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน ที่ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการปรับปรุงพัฒนาให้โครงการพิเศษฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นายสันติสุข มหัทธัญญาวาณิชย์ เจ้าของกิจการ Kaset Lover FARM ที่เอื้อเฟื้อฟางข้าว ซึ่งเป็นวัสดุหลักของโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือจัดหาสารเคมี และสอนการใช้เครื่องมือปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการจัดทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ บิตา-มารดา และครอบครัวซึ่งสนับสนุนให้โอกาสได้รับการศึกษา ให้การอบรมสั่งสอน และให้กำลังใจซึ่งเป็นแรงผลักดันในการจัดทำโครงการพิเศษนี้เสมอมา

ขอขอบพระคุณมิตรภาพจากเพื่อน พี่ และน้อง รวมถึงทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวมานี้ หากโครงการพิเศษฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำกราบขออภัยทุกท่านมา ณ ที่นี้ด้วย

กรวรรณ ดอนนอก  
ณัชภัทร สำเภาน้อย  
พิมพ์วิมล พลศิลป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ฟางข้าว (Rice Straw).....	4
2.1.1 องค์ประกอบของฟางข้าว.....	5
2.2 ถ่านชีวภาพ (Biochar).....	9
2.2.1 ประโยชน์ของถ่านชีวภาพ.....	9
2.2.2 ความแตกต่างระหว่างถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์.....	10
2.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process).....	11
2.4 ฟอสเฟตในน้ำ.....	12
2.4.1 แหล่งที่มาของฟอสเฟตในน้ำ.....	12
2.4.2 ผลกระทบของฟอสเฟตต่อคุณภาพน้ำ.....	12
2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	13
2.5.1 ประเภทของการดูดซับ.....	13
2.5.2 ประเภทของตัวดูดซับ.....	14
2.5.3 ปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	15
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>19</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 อุปกรณ์.....	19
3.1.2 สารเคมี.....	20
3.2 การเตรียมฟางข้าวที่ใช้ในการศึกษา.....	21
3.3 การผลิตถ่านชีวภาพจากฟางข้าวและการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบ ของถ่านชีวภาพ .....	21
3.4 ศึกษาผลของการดัดแปรพื้นผิวของถ่านชีวภาพด้วยไอออนของโลหะ .....	22
3.4.1 การดัดแปรพื้นผิวด้วยสารละลายผสมระหว่างเฟอร์ริกกับเฟอร์ริก ( $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ ).....	22
3.4.2 การดัดแปรพื้นผิวด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) .....	23
3.4.3 การดัดแปรพื้นผิวด้วยสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2$ ) .....	23
3.5 การทดสอบความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของถ่านชีวภาพดัดแปร .....	24
3.5.1 การเตรียมสารละลายออร์โธฟอสเฟต.....	24
3.5.2 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส .....	24
3.5.3 ศึกษาผลของปริมาณวัสดุ.....	25
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	26
4.1 ผลของอุณหภูมิขณะไพโรไลซิสต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของถ่านชีวภาพ .....	26
4.1.1 ปริมาณผลผลิตและองค์ประกอบถ่านชีวภาพ.....	27
4.1.2 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number; M.B.N).....	28
4.2 ผลของการดัดแปรพื้นผิวของถ่านชีวภาพด้วยไอออนของโลหะ .....	29
4.2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพโดยกล้อง (SEM) .....	30
4.2.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)..	31
4.2.3 ธาตุองค์ประกอบ (X-ray Fluorescence Spectrometry; XRF) .....	33
4.2.4 วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลาย (Atomic Absorption Spectrophotometer; AAS).....	34
4.2.5 วิเคราะห์หาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge; pHpzc) .....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การทดสอบความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของถ่านชีวภาพดัดแปร .....	36
4.3.1 ผลของชนิดวัสดุ.....	36
4.3.2 ผลของระยะเวลา.....	37
4.3.3 ผลของปริมาณวัสดุ.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	40
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	40
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	41
เอกสารอ้างอิง .....	42
ภาคผนวก.....	48
ภาคผนวก ก.....	49
ภาคผนวก ข.....	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงปริมาณต่อซังและฟางข้าวในแต่ละภาคของประเทศไทย (ล้านตันต่อปี) .....	4
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าว .....	6
2.3 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของฟางข้าว .....	6
2.4 เปรียบเทียบลักษณะต่างๆ ของถ่านแต่ละชนิด.....	10
2.5 แสดงรูปแบบกระบวนการไพโรไลซิส .....	11
2.6 การดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	14
3.1 สมบัติของถ่านชีวภาพที่ทำการศึกษา.....	21
3.2 สมบัติของวัสดุ .....	24
4.1 ผลของอุณหภูมิขณะไพโรไลซิสต่อการผลิตถ่านชีวภาพและองค์ประกอบของถ่านชีวภาพ....	27
4.2 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านชีวภาพจากฟางข้าวที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิต่างๆ .....	28
4.3 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของถ่านชีวภาพก่อนการตัดแปรและหลังการตัดแปร .....	31
4.4 ปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุ .....	33
4.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นคงเหลือของเหล็กและแมกนีเซียมในสารละลาย .....	34
ก 1 การเตรียมกราฟมาตรฐานฟอสเฟต .....	51
ข 1 การวิเคราะห์ค่า Methylene Blue Number ของผลผลิตถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆ ....	56
ข 2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู (M.B.N) .....	61
ข 3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุเฟอร์รัส (Fe <sup>2+</sup> ), เฟอร์ริก (Fe <sup>3+</sup> ) และแมกนีเซียม (Mg <sup>2+</sup> ) ในการตัดแปรถ่านชีวภาพ .....	62
ข 4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานเหล็ก .....	63
ข 5 ค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานแมกนีเซียม .....	64
ข 6 ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ .....	65
ข 7 ผลการทดสอบการแปรผันปริมาณถ่านชีวภาพตัดแปรในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ ....	67
ข 8 ค่า pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ใส่วัสดุดูดซับซึ่งผ่านการตัดแปร พื้นผิวด้วย Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup> ของการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์.....	69
ข 9 ค่า pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ใส่วัสดุดูดซับซึ่งผ่านการตัดแปร พื้นผิวด้วย FeCl <sub>3</sub> ของการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์.....	69
ข 10 ค่า pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ใส่วัสดุดูดซับซึ่งผ่านการตัดแปร พื้นผิวด้วย MgCl <sub>2</sub> ของการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ .....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ฟางข้าว .....	5
2.2 โครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลส.....	7
2.3 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส .....	7
2.4 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส .....	8
2.5 โครงสร้างลิกนิน.....	9
4.1 ลักษณะของถ่านชีวภาพจากฟางข้าวที่ผลิตได้ตามอุณหภูมิ .....	26
4.2 ลักษณะของถ่านชีวภาพก่อนการดัดแปรและถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยไอออนของโลหะ.....	29
4.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (ก) ถ่านชีวภาพที่ไม่ดัดแปร กับ (ข-ง) ถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า.....	30
4.4 สเปกตรัม FT-IR ของวัสดุดูดซับที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอออนของโลหะต่างชนิดกัน .....	31
4.5 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ , $Fe^{3+}$ และ $Mg^{2+}$ .....	35
4.6 ความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของวัสดุต่างกัน.....	37
4.7 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำของวัสดุทั้ง 4 ชนิด .....	37
4.8 ความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำของวัสดุทั้ง 4 ชนิดที่มีปริมาณวัสดุต่างกัน.....	38
ข 1 กราฟเส้นตรง Methylene Blue Number ของถ่านชีวภาพที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	58
ข 2 กราฟเส้นตรง Methylene Blue Number ของถ่านชีวภาพที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส .....	59
ข 3 กราฟเส้นตรง Methylene Blue Number ของถ่านชีวภาพที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส .....	59
ข 4 กราฟเส้นตรง Methylene Blue Number ของถ่านชีวภาพที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส .....	60
ข 5 กราฟมาตรฐานเมทิลีนบลู (MBN) .....	61
ข 6 กราฟมาตรฐานเฟอร์รัส/เฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ ) .....	63
ข 7 กราฟมาตรฐานแมกนีเซียมไอออน ( $Mg^{2+}$ ).....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำ อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณของฟอสฟอรัสที่มีมากเกินไปในน้ำจะไปกระตุ้นให้พืชน้ำ โดยเฉพาะสาหร่าย และแพลงก์ตอนพืช (วสันต์, 2556) เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในแหล่งน้ำ จนอาจนำไปสู่ปัญหามลพิษทางน้ำที่สำคัญ ได้แก่ การเกิดยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่แหล่งน้ำมีปริมาณธาตุอาหารสูงเกินไป ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ เช่น ทำให้น้ำมีความขุ่น มีสี และกลิ่นที่เปลี่ยนแปลงไป ตลอดจนสามารถทำให้ออกซิเจนในน้ำลดลงจนถึงระดับที่เป็นอันตรายต่อสัตว์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในน้ำ (กฤษณา, 2541) น้ำเสียชุมชนจัดเป็นแหล่งที่มาของฟอสฟอรัสในน้ำ การใช้สารซักล้างในครัวเรือน จัดเป็นกิจกรรมที่ทำให้น้ำเสียชุมชนมีฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบ โดยพบว่าการใช้สารซักล้างจากการซักเสื้อผ้ามีปริมาณฟอสเฟตสูงถึง 24 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อลิตร (ธงชัย, 2530) ทำให้สามารถพบฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชนในปริมาณระหว่าง 2-10 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร (มันสิน, 2545) เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวจึงมีการกำหนดความเข้มข้นสูงสุดของฟอสฟอรัสที่อนุญาตให้ระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ไว้ที่ค่าไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2553) ด้วยเหตุนี้การบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดมลพิษซึ่งทราบต้นตอที่มาเช่น โรงงานบำบัดน้ำเสียชุมชน หรือระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม ให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จึงเป็นแนวปฏิบัติที่สำคัญในการบรรเทาและแก้ไขปัญหาการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำธรรมชาติ

การดูดซับจัดเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้บำบัดฟอสฟอรัสในน้ำได้ เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและสามารถติดตั้งเพื่อใช้งานได้ในพื้นที่ชุมชนทั่วไป (รัตนกรและคณะ, 2554) ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ วัสดุลิกโนเซลลูโลสซึ่งเป็นชีวมวลเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและหาได้ง่าย จัดเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่สามารถกำจัดฟอสเฟตในน้ำได้ แต่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดได้ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการดัดแปรหรือปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุด้วยแร่ธาตุหรือโลหะที่สามารถทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตได้ดี เช่น แมกนีเซียม เหล็ก อะลูมิเนียม หรือแลนทานัม (Kim, 2008; อ่างถึงใน กันตพัฒน์, 2558) ทำให้การปรับปรุงความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของวัสดุลิกโนเซลลูโลสก่อนนำไปใช้ในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำจึงเป็นขั้นตอนสำคัญ วิธีการโหลดหรือตรึงแร่ธาตุที่เติมลงไปบนพื้นผิวของวัสดุลิกโนเซลลูโลส จัดเป็นขั้นตอนหนึ่งที่น่าสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตให้กับวัสดุลิกโนเซลลูโลส เนื่องจากความจุของแร่ธาตุบนวัสดุลิกโนเซลลูโลสขึ้นอยู่กับพื้นผิวโครงสร้างของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่นำมาใช้ ทำให้การปรับปรุงสภาพเบื้องต้นของวัสดุคลิกโนเซลลูโลส เพื่อเพิ่มพื้นผิวจำเพาะให้กับวัสดุ จัดเป็นการดำเนินการสำคัญในการเตรียมและพัฒนาตัวดูดซับจากวัสดุคลิกโนเซลลูโลส

กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ด้วยการเผาอินทรีย์วัตถุหรือชีวมวลที่อุณหภูมิระหว่าง 300-600 องศาเซลเซียส ในสภาพที่มีออกซิเจนต่ำหรือไม่มีออกซิเจน จัดเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเพิ่มพื้นผิวให้กับวัสดุจำพวกชีวมวลได้ (Bruun, 2011) ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว คือ ถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์ (biochar) ที่มีพื้นผิวและความพรุนสูงมาก (Yuan et al, 2011) ซึ่งเมื่อนำกระบวนการดังกล่าวมาใช้ร่วมกับวิธีการโหลดหรือเติมแร่ธาตุที่ทำปฏิกิริยาได้ดี จะได้ถ่านชีวภาพที่สามารถกำจัดฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากสมบัติของถ่านชีวภาพขึ้นกับขนาดและชนิดของวัสดุคลิกโนเซลลูโลสที่ใช้ในการผลิต ตลอดจนอุณหภูมิขณะไพโรไลซิส ประกอบกับการพัฒนาถ่านชีวภาพตัดแปรจากฟางข้าวเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับฟอสเฟตในน้ำยังมีค่อนข้างจำกัด นอกจากนี้ ฟางข้าวยังจัดเป็นชีวมวลที่มีปริมาณคงเหลือของชีวมวลมากเป็นลำดับต้นๆ ของประเทศไทย (กระทรวงพลังงาน, 2556) โครงการพิเศษนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพตัดแปรจากฟางข้าวที่มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อผลิตถ่านชีวภาพจากฟางข้าวและศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ได้
2. เพื่อศึกษาผลของชนิดโลหะที่เติมลงบนถ่านชีวภาพต่อสมบัติของถ่านชีวภาพตัดแปรที่ได้ด้วยแร่ธาตุ
3. เพื่อศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพตัดแปรในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วัสดุชีวมวลที่ใช้ในการผลิตวัสดุดูดซับเป็นฟางข้าวบดและร่อนขนาด 70 เมช
2. การศึกษาผลของอุณหภูมิขณะไพโรไลซิสต่อสมบัติของถ่านชีวภาพจากฟางข้าว
  - ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ (300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส)
  - สมบัติของถ่านชีวภาพที่วิเคราะห์ ได้แก่ วิเคราะห์ร้อยละของผลผลิต (% yield), วิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ถูกออกซิไดส์ (Oxidizing organic content; OC), วิเคราะห์ปริมาณการสูญเสียหลังเผา (Loss on ignition; LOI), ปริมาณอินทรีย์วัตถุคงตัว (Stable Organic Matters; SOM), วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR), วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope; SEM), วิเคราะห์หา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบธาตุด้วยเครื่อง (X-ray Fluorescence Spectrometer; XRF) และการทดสอบความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number; M.B.N.)

3. ศึกษาผลของการดัดแปรพื้นผิวของถ่านชีวภาพด้วยโลหะทรานซิชันและโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท

- *ตัวแปรที่ศึกษา* ได้แก่ เหล็ก (Fe) และแมกนีเซียม (Mg)

- *ตัวแปรตาม* ได้แก่ วิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือในสารละลาย และวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซ็องฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR), ลักษณะลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope; SEM), องค์ประกอบธาตุด้วยเครื่อง (X-ray Fluorescence Spectrometer; XRF) และค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge;  $pH_{pzc}$ )

4. ศึกษาความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของถ่านชีวภาพดัดแปร

- *ตัวแปรที่ศึกษา* ได้แก่ ชนิดของวัสดุ (ฟางข้าว, ถ่านชีวภาพ, ถ่านชีวภาพดัดแปรด้วยเฟอร์รัสและเฟอร์ริก ( $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ ), ถ่านชีวภาพดัดแปรด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) และถ่านชีวภาพดัดแปรด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2$ ), ระยะเวลา (1, 2, 4, 6, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง) และปริมาณของวัสดุ (0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 2.0 กรัม)

- *ตัวแปรตาม* ได้แก่ ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เหลือในน้ำ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการพัฒนาตัวดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ
2. เป็นแนวทางในการจัดการและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่สามารถบำบัดมลพิษในน้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ฟางข้าว (Rice Straw)

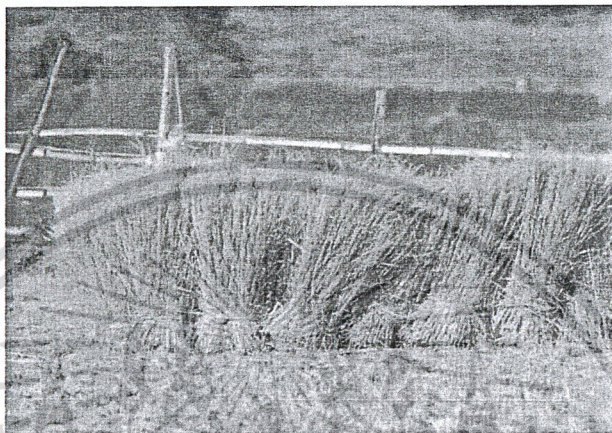
ข้าว (Rice) จัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญกับประเทศไทยเป็นอย่างมาก ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับ 1 ของโลก (MINOZ : ZEKUN, 2557) ซึ่งตัวเลขการส่งออกข้าวไทยออกสู่ตลาดโลกในช่วงเดือน มกราคม - มีนาคม 2561 มีปริมาณ 2,777,559 ตัน มูลค่า 44,099 ล้านบาท (Money2Know, 2560) โดยมีประเทศผู้นำเข้าข้าวไทยที่สำคัญระหว่างปี 2557 - 2560 ได้แก่ เบนิน, จีน, แอฟริกาใต้, แคนาดา, บังกลาเทศ, สหรัฐอเมริกา, ไต้หวัน, โมซัมบิก, แองโกลา และญี่ปุ่น ตามลำดับ (กระทรวงพาณิชย์, 2560) ในปัจจุบันประเทศไทยจึงมีที่ดินปลูกข้าวมากที่สุดเป็นอันดับที่ 5 ของโลก มีพื้นที่ปลูกข้าวประมาณ 65 ล้านไร่ หรือประมาณร้อยละ 20 ของพื้นที่ทั้งประเทศ ได้ผลผลิตข้าว 24 ล้านตัน มีฟางข้าวเฉลี่ยประมาณปีละ 25.45 ล้านตัน และมีปริมาณตอซังข้าวที่ตกค้างอยู่ในนาข้าว 16.9 ล้านตันต่อปี ดังนั้นจึงนับได้ว่ามีปริมาณฟางข้าวและตอซังข้าวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตอซังพืชชนิดอื่นๆ โดยมีปริมาณฟางข้าวและตอซังมากที่สุดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คือจำนวน 13.8 และ 9.1 ล้านตันต่อปี รองลงมาคือภาคกลางและภาคตะวันออกมีจำนวนฟางข้าวและตอซัง 4.1 และ 6.2 ล้านตันต่อปี และในพื้นที่ปลูกข้าว 1 ไร่ มีปริมาณฟางข้าวและตอซัง โดยเฉลี่ยปีละ 650 กิโลกรัม ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณตอซังและฟางข้าวในแต่ละภาคของประเทศไทย (ล้านตันต่อปี)

ภาค	ข้าวนาปี		ข้าวนาปี้ง		รวม
	ฟางข้าว	ตอซัง	ฟางข้าว	ตอซัง	
เหนือ	2.80	4.24	0.12	0.19	7.35
ตะวันออกเฉียงเหนือ	9.03	13.61	0.11	0.18	22.93
กลางและตะวันออก	3.32	5.01	0.79	1.20	10.32
ใต้	0.63	0.95	0.04	0.07	1.69
<b>ปริมาณรวม</b>	<b>15.78</b>	<b>23.81</b>	<b>1.06</b>	<b>1.64</b>	<b>42.29</b>

ที่มา: มูลนิธิเกษตรกรรักษ์สิ่งแวดล้อม (2553)

จากปริมาณการเกิดฟางข้าวต่อปีประมาณ 19 ล้านตัน ได้มีการนำเอาฟางข้าวไปประยุกต์ใช้ประโยชน์อื่นๆ เช่น นำไปทำเป็นอาหารสัตว์ ทำปุ๋ยหมัก ใช้ผลิตเป็นเยื่อกระดาษหรือเชื้อเพลิงทางชีวภาพ ฯลฯ ซึ่งคิดเป็นปริมาณที่นำฟางข้าวไปใช้ประโยชน์แล้วประมาณ 8 ล้านตัน แต่จะมีปริมาณคงเหลือของฟางข้าวประมาณ 10 ล้านตัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนปริมาณคงเหลือของชีวมวลอื่นๆ ทั้งหมดในประเทศ ฟางข้าวจะจัดอยู่ในลำดับที่ 3 (Money2Know, 2560)



รูปที่ 2.1 ฟางข้าว

ที่มา: <https://www.svgroup.co.th>

### 2.1.1 องค์ประกอบของฟางข้าว

ฟางข้าวที่มีลักษณะทั่วไปด้วยรูปที่ 2.1 จัดเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่สำคัญ ชนิดหนึ่งของประเทศ ประกอบด้วยสารเคมีอินทรีย์และสารเคมีอนินทรีย์อยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ลิกนิน สารประกอบฟีนอล กรดอะมิโน ฟอสเฟต ซัลเฟต ไนเตรทและแมกนีเซียม เป็นต้น จากองค์ประกอบพืชที่กล่าวมาส่วนใหญ่เป็นสารเคมีอินทรีย์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ ลิกนิน (Lignin) และคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) สำหรับคาร์โบไฮเดรตถ้าแยกตามปริมาณที่เป็นองค์ประกอบในพืช จะพบว่าที่สำคัญได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) (จตุพรและคณะ, 2545) ทั้งนี้ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและอื่นๆ ที่พบเป็นองค์ประกอบในฟางข้าว มีสัดส่วนคิดเป็นร้อยละ 33, 26, 7 และ 34 ตามลำดับ พบอยู่บริเวณผนังเซลล์ 79 เปอร์เซ็นต์ และ 29 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงตาราง 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าว

องค์ประกอบ	ร้อยละ
เซลลูโลส	33
เฮมิเซลลูโลส	26
ลิกนิน	7
ซิลิกา	13
อื่นๆ	21

ที่มา: <https://puechkaset.com>

นอกจากฟางข้าวจะมีองค์ประกอบทางเคมีดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว ฟางข้าวยังมีองค์ประกอบเป็นแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N), กำมะถัน (S) และคลอรีน (Cl) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ดังที่แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของฟางข้าว

ธาตุ	หน่วย	ปริมาณเฉลี่ย	ปริมาณต่ำสุด	ปริมาณสูงสุด
C	wt% daf	48.70	43.30	60.00
H	wt% daf	5.92	4.94	7.01
O	wt% daf	44.20	30.80	50.40
N	wt% daf	1.05	0.57	2.11
S	wt% daf	0.14	0.07	0.23
Cl	wt% daf	0.49	0.01	0.91

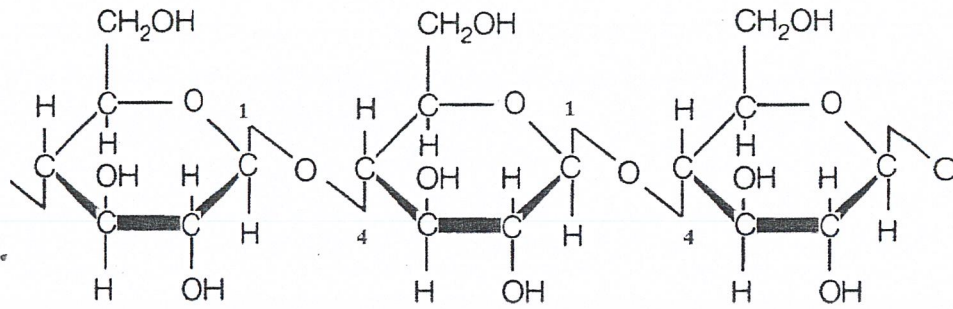
ที่มา: ดัดแปลงมาจาก [www.ecn.nl/phyllis](http://www.ecn.nl/phyllis)

### 1. เซลลูโลส (Cellulose)

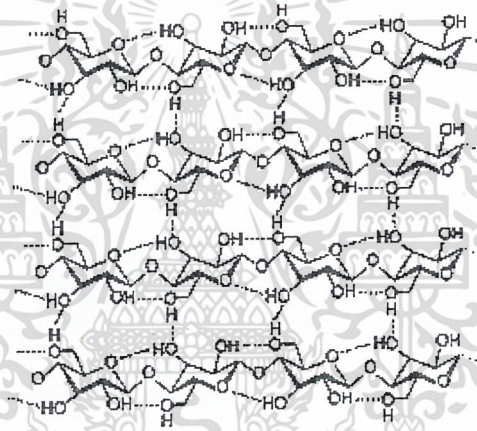
เซลลูโลส ซึ่งมีสูตรเคมีทั่วไป คือ  $[C_6H_{10}O_5]_n$  สามารถเขียนเป็นโครงสร้างโมเลกุลได้ดังรูปที่ 2.2 เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์ (cell wall) ในพืชทำหน้าที่ช่วยเสริมโครงสร้างความแข็งแรงให้แก่พืช เกิดจากกลูโคสประมาณ 50,000 โมเลกุลมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวแต่ละสายของสายของเซลลูโลสเรียงขนานกันไป ดังรูปที่ 2.3 มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายทำให้มีลักษณะเป็นเส้นใยสะสมไว้ในพืชจะไม่พบในเซลล์สัตว์ โดยธรรมชาติจะไม่พบเซลลูโลสในรูปอิสระแต่มักจะพบรวมกับลิกนิน (Lignin) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เพนโตแซน (Pentosan) กัม (Gum) แทนนิน (Tannin)

ไขมัน (Lipid) และสารเกิดสี (Colouring matter) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลส  
ที่มา: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose>



รูปที่ 2.3 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส  
ที่มา: <https://th.wikipedia.org/wiki>

เซลลูโลสมีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำ ไม่ละลายในสารอินทรีย์ใดๆ และสารละลายเบสอ่อนหรือกรดอ่อน แต่สามารถละลายได้ดีในกรดแก่หรือเบสแก่ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งชนิดเซลลูโลสตามลักษณะการละลายได้ดีในกรดแก่หรือด่างแก่ออกได้เป็น 3 ชนิด (กระทรวงพลังงาน, 2555) คือ

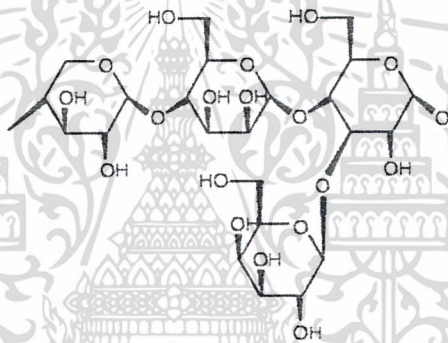
1. แอลฟา-เซลลูโลส ( $\alpha$ -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่แท้จริง ไม่สามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 17.5% ที่อุณหภูมิห้อง
2. เบต้า-เซลลูโลส ( $\beta$ -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 17.5% ที่อุณหภูมิห้องแต่สามารถตกตะกอนได้ง่ายในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แกมมา-เซลลูโลส ( $\gamma$ -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 17.5% ที่อุณหภูมิห้องและละลายได้ในสารละลายกรดแต่สามารถตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์

## 2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของผนังเซลล์พืช โดยรวมอยู่ กับลิกนินและเซลลูโลส มีสมบัติไม่ละลายน้ำแต่ละลายในสารละลายต่าง (ฉวีพร, 2559) เป็นอินทรีย์ สารในเนื้อเยื่อของพืช ที่พบมากเป็นอันดับสองรองมาจากเซลลูโลส มีสูตรทางเคมีทั่วไป คือ  $[C_5(H_2O)_4]_n$  หรือ  $[C_6(H_2O)_5]_n$  โดยสายโพลีเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะเป็นสายโพลีแซ็กคาไรด์ ที่มีความซับซ้อน โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) จะเหมือนกับเซลลูโลส (Cellulose) แต่มีระดับการเกิดโพลีเมอร์ต่ำกว่าเซลลูโลส ประมาณ 50-300 หน่วยกลูโคส เฮมิเซลลูโลสสามารถ เขียนเป็นโครงสร้างโมเลกุลได้ดังรูปที่ 2.4



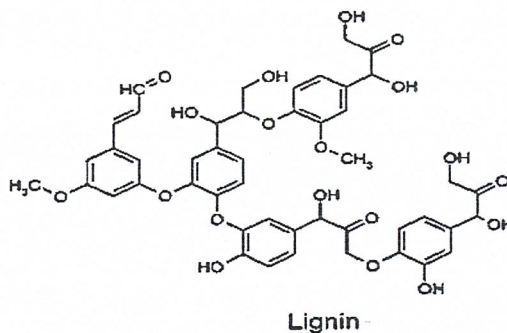
รูปที่ 2.4 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hemicellulose>

## 3. ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบที่มีอยู่ในพืชรองลงมาจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส มีสูตร โมเลกุลเป็น  $C_9H_{8.83}O_{2.37}(CH_3)$  ซึ่งสามารถเขียนโครงสร้างโมเลกุลของลิกนินได้ดังรูปที่ 2.5 สามารถ พบได้ในส่วนผนังเซลล์ชั้นที่สองและ middle lamella ของพืชชั้นสูง โดยโมเลกุลของลิกนินจะแทรก อยู่ในช่องว่างระหว่าง cellulose fibrils และสายของเฮมิเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด ซึ่งเป็นสารอะโรมาติกลิกนินไม่ ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น ในพืชที่อ่อนอยู่จะมีลิกนินเพียงเล็กน้อยและจะเพิ่มมากขึ้น เรื่อยๆ เมื่อพืชแก่ขึ้น เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน (ริกาญจน์, 2541)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างลิกนิน

ที่มา: <http://www.namrata.co/wp-content/uploads/2012/04/D3.bmp>

## 2.2 ถ่านชีวภาพ (Biochar)

ถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์ (Biochar) คือวัสดุที่อุดมไปด้วยคาร์บอน มีลักษณะเป็นผงสีดำละเอียด ผลิตจากชีวมวล (Biomass) หรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชิงข้าวโพด และขานอ้อย เป็นต้น นำมากระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) หรือการให้ความร้อนกับมวลชีวภาพ หรืออินทรีย์วัตถุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในปริมาณที่จำกัด ความร้อนในระหว่างการเผาจะไปทำลายพันธะทางเคมีในอินทรีย์วัตถุในส่วนต่างๆ ของชีวมวล ทำให้ความชื้นและอินทรีย์สารเปลี่ยนรูปกลายเป็นก๊าซกระจายออกไปเหลือไว้เฉพาะส่วนคาร์บอนเข้มข้นที่พืชเก็บสะสมไว้ เกิดรูปพูนจำนวนมากบนพื้นที่ผิววัสดุ รวมถึงมีประจุลบเพิ่มขึ้นบนวัสดุ (ทิวา, 2559) การแยกสลายมวลชีวภาพด้วยความร้อนจะได้คาร์บอนถึง 50% ของคาร์บอนที่มีอยู่ในมวลชีวภาพ ปริมาณของคาร์บอนที่ได้จะขึ้นกับชนิดของมวลชีวภาพ กระบวนการผลิตตลอดจนวัตถุประสงค์การใช้งาน สำหรับบอญทภูมิจะมีผลน้อยมากถ้าอยู่ระหว่าง 350-500 องศาเซลเซียส (Lehmann et al., 2011)

### 2.2.1 ประโยชน์ของถ่านชีวภาพ

1. เนื่องจากถ่านชีวภาพมีความสามารถในการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศได้ในระยะยาวด้วยการกักเก็บคาร์บอนไว้ในดิน จึงส่งผลให้ช่วยในการชะลอการเปลี่ยนแปลงทางภูมิอากาศ
2. สามารถปรับปรุงคุณภาพดินและผลผลิตทางการเกษตรให้ดีขึ้นได้ เนื่องจากการนำถ่านชีวภาพไว้ในดิน ความเป็นรูปพูนของถ่านชีวภาพจะช่วยกักเก็บน้ำและธาตุอาหารในดินไว้ได้ ซึ่งยังสามารถเป็นที่อยู่ให้กับจุลินทรีย์เพื่อสร้างอาหารให้ดินอีกด้วย และเมื่อดินมีความอุดมสมบูรณ์จะส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เป็นพลังงานทดแทนได้ เนื่องจากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลต่างๆ โดยแยกสลายด้วยความร้อนจะให้พลังงานชีวมวลที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อการขนส่งและระบบอุตสาหกรรม

4. ช่วยในการกำจัดของเสียประเภทอินทรีย์วัตถุได้ เนื่องจากเทคโนโลยีของถ่านชีวภาพมีศักยภาพในการกำจัดของเสียให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (ศิริลักษณ์, 2556)

### 2.2.2 ความแตกต่างระหว่างถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์

ถ่านชีวภาพ (Biochar) และถ่านกัมมันต์ (Activated Charcoal or Activated Carbon) คือ ถ่านหรือคาร์บอนทั้งคู่ มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยที่กระบวนการผลิต คุณสมบัติและวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 คือ การใช้ประโยชน์จาก Porous Property ในการกักเก็บน้ำในดินกักเก็บคาร์บอนลงดิน เป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ในการสร้างอาหารในดิน อุณหภูมิในการผลิตต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ประมาณ 350 – 500 องศาเซลเซียส สำหรับถ่านกัมมันต์ อุณหภูมิในการผลิตสูงกว่าถ่านชีวภาพถึง 1,000 องศาเซลเซียส จะมีรูพรุนและพื้นผิวสำหรับให้เกาะมากกว่า โดยทั่วไปจะใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ เช่น ใช้เป็นยาในการรับประทาน เพื่อดูดสารพิษในร่างกาย หรือในทางอุตสาหกรรมเพื่อกรองสารพิษออกไปจากสารประกอบ เป็นต้น สำหรับ Charcoal หรือถ่านทั่วไป วัตถุประสงค์นำไปทำเป็นเชื้อเพลิง ใช้ระยะเวลาในการผลิตนานกว่าวัสดุที่ใช้ในการผลิตมีความชื้นมากกว่า เพราะผู้ผลิตหวังจะได้น้ำส้มควันไม้ (Wood Vinegar) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการทำปุ๋ยให้กับพืช (ศิริลักษณ์, 2556)

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบลักษณะต่างๆ ของถ่านแต่ละชนิด

	Biochar	Activated carbon
วัตถุดิบ	- การทำป่าไม้ & สารอินทรีย์อื่นๆ /ของเสีย	- เปลือกมะพร้าว - Peat - ถ่านหิน - Petroleum Pitch
การใช้งาน	- การปรับปรุง - การฟื้นฟู - การกรอง - binding agents (ปลูสต์ัว)	- การกรอง - การควบคุมกลิ่น - การฟื้นฟู - binding agents
คุณภาพ	- การดูดซับ/ความพรุน - ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC; Cation Exchange Capacity)	- การดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

	Biochar	Activated carbon
การผลิต	- ไพโรไลซิสแบบช้า - แก๊สซิฟิเคชัน	- เผาที่อุณหภูมิ 600-900 °C + ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 250 °C หรือ Chemically impregnated & Cooked @ 450-900 °C
คาร์บอนที่ได้	- คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Negative)	- Carbon Positive

ที่มา: สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2559)

### 2.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process)

ไพโรไลซิส (Pyrolysis) มาจากรากศัพท์คำว่า Pyro ที่แปลว่า “ความร้อน” และ lysis ที่แปลว่า “แยกสลาย” ดังนั้น กระบวนการไพโรไลซิส คือ การแยกสลายด้วยความร้อนในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน หรือกระบวนการทางเคมีที่สามารถเปลี่ยนรูปของชีวมวล พลาสติก รวมถึงยางที่ใช้แล้วไปเป็นเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงที่ได้ในกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ ถ่าน (charcoal) น้ำมัน (bio-oil) และก๊าซไม่กลั่นตัว (non-condensable gas) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สภาวะในการทำปฏิกิริยา ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น (กุลนันท์, 2558) โดยที่ของรูปแบบกระบวนการไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบเร็วและไพโรไลซิสแบบช้า ซึ่งจะมีความแตกต่างกันที่สภาวะของกระบวนการ รวมถึงอัตราส่วนร้อยละของผลผลิตที่ได้ก็จะแตกต่างกันออกไป ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงรูปแบบกระบวนการไพโรไลซิส

รูปแบบ กระบวนการ	สภาวะของกระบวนการ	ของเหลว (%)	ของแข็ง (%)	ก๊าซ (%)
ไพโรไลซิสแบบเร็ว	~500°C, เวลาคงอยู่ของไอร้อน ~1 วินาที	75	12	13
ไพโรไลซิสแบบช้า	~400°C, เวลาคงอยู่ของ นานเป็นชั่วโมง/วัน	30	35	35

ที่มา: กุลนันท์ (2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ฟอสเฟตในน้ำ

ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำธรรมชาติและที่พบในน้ำเสียมักพบอยู่ในรูปโมเลกุลของฟอสเฟต ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิด (ยาโก๊ะ, 2553) ได้แก่

1. ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี ซึ่งแพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต ได้แก่  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  และ  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  เป็นต้น

2. โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) เป็นอนุพันธ์ของฟอสเฟตที่ประกอบด้วยโมเลกุลของฟอสเฟตมากกว่าหนึ่งหมู่ เช่น  $\text{Na}_3(\text{PO}_4)_6$ ,  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  และ  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  จัดเป็นสารประกอบที่พบได้มากในน้ำทั้งจากบ้านเรือน หรือน้ำที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นส่วนผสมของน้ำยาทำความสะอาด เมื่อเกิดการสลายตัวจะกลายเป็นออร์โธฟอสเฟต

3. สารอินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphate) สารฟอสฟอรัสประเภทนี้จะพบได้ในสารละลาย สารแขวนลอย หรืออินทรีย์วัตถุที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ เช่น Nucleic acid, Phospholipids และ Sugar phosphate

### 2.4.1 แหล่งที่มาของฟอสเฟตในน้ำ

ฟอสเฟตที่พบในน้ำส่วนใหญ่จะมาจาก 2 แหล่งคือ กระบวนการธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์

1. กระบวนการธรรมชาติ เช่น การละลายของหินฟอสเฟต ผงฝุ่นฟอสฟอรัสในอากาศ ซึ่งถูกพัดพาและตกกลับลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ รวมทั้งฝนที่ตกลงมาสู่พื้นดินพัดพาเศษดินและหินที่มีฟอสเฟตลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังอาจมาจากมูลสัตว์ เศษซากพืชซากสัตว์ที่ตายทับถมกันบริเวณแหล่งน้ำ

2. กิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่

- โรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ย การผลิตสารกำจัดศัตรูพืช และการผลิตสารซักล้างและผงซักฟอก ซึ่งโรงงานเหล่านี้จะมีน้ำทิ้งที่มีฟอสเฟตในปริมาณที่สูง

- การเกษตรกรรม เนื่องจากเกษตรกรใช้ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และยาปราบศัตรูพืชมากขึ้นตามลำดับ ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และยาปราบศัตรูพืช รวมทั้งมูลสัตว์ จะถูกชะไหลลงสู่แหล่งน้ำ จึงเกิดการสะสมสารดังกล่าวในแหล่งน้ำมากขึ้น

- แหล่งชุมชน ได้แก่ บ้านเรือน อาคารพาณิชย์ โรงแรม โรงพยาบาล โรงเรียน สำนักงาน ซึ่งน้ำทิ้งจากสถานที่ดังกล่าวจะมีการปนเปื้อนของฟอสเฟตที่เกิดจากกิจกรรมการซักล้างทำความสะอาด ซึ่งกิจกรรมต่างๆ เหล่านี้เป็นสาเหตุหลักในการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (ยาโก๊ะ, 2553)

### 2.4.2 ผลกระทบของฟอสเฟตต่อคุณภาพน้ำ

ฟอสฟอรัสจัดเป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อการเติบโตของพืช ในแหล่งน้ำทั่วไปจะมีฟอสฟอรัสในปริมาณต่ำ เพื่อเป็นกลไกทางธรรมชาติในการควบคุมการเจริญเติบโตของพืชน้ำ รวมถึงแพลงก์ตอนพืช ไฮยาโนแบคทีเรียและสาหร่าย ดังนั้นการระบายน้ำทิ้งที่มีสารประกอบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ผลที่ตามมาคือ ออกซิเจนในน้ำมีปริมาณลดลง ส่งผลต่อการดำรงชีพของสัตว์น้ำ คุณภาพน้ำที่เปลี่ยนไป สามารถก่อให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจแก่กิจกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ชายฝั่ง รวมไปถึงอาจมีอันตรายต่อสุขภาพและชีวิตของมนุษย์และสัตว์ที่บริโภคสารพิษที่มีอยู่ในสาหร่ายบางชนิด เพื่อป้องกันปัญหาของภาวะยูโทรฟิเคชัน องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) จึงได้กำหนดระดับความเข้มข้นสูงสุดของฟอสฟอรัสทั้งหมดในแหล่งน้ำธรรมชาติให้มีค่าต่ำกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (Hart et al., 2004)

## 2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) (วรวิทย์, 2558)

### 2.5.1 ประเภทของการดูดซับ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล (Pradthana, 2551) และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วยสารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมี ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล (Pradthana, 2551) หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น (อุดมศรี, 2554) ทั้งนี้ความแตกต่างของการดูดซับทั้ง 2 ประเภท สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 การดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ผันกลับไม่ได้
การดูดซับบนแก๊สของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

ที่มา: Pradthana, (2551)

### 2.5.2 ประเภทของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับเป็นสารซึ่งมีความสามารถในการดูดซับ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

1. สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ อะลูมิเนียมแกมมันต์ ถ่านกระดูก สินแร่จำพวกอลูมิเนียมซิลิเกต เช่น Kaolinite เป็นต้น ตัวดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารได้เพียงไม่กี่ชนิดทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับสารอนินทรีย์มีข้อจำกัด (Singhand and Kaushal, 2013)
2. ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500 - 1,400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์สามารถนำไปทำการฟื้นฟู (regeneration) และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ขั้นตอนการฟื้นฟูคาร์บอน ต้องเผาที่อุณหภูมิสูงมาก ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย (วีรียา, 2550)
3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 - 500 ตารางเมตรต่อกรัม
4. วัสดุชีวภาพ ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชี้อัลไค โคโคซาน กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง ฟางข้าว เปลือกไม้ และเถาเถาวัลย์ เป็นต้น
5. สารดูดซับชีวภาพ ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 ปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1. ธรรมชาติของตัวดูดซับ ทั้งนี้สมบัติของตัวดูดซับที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับได้แก่

1. พื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น เนื่องจากปริมาณพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ได้มาจากช่องว่างหรือรูพรุนภายในตัวดูดซับ ซึ่งมีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น

2. ขนาดของตัวดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็ก ทำให้อัตราการดูดซับเกิดได้เร็วขึ้นกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่

3. เคมีที่ผิวหน้าของตัวดูดซับ หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่หากมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิลความสามารถดูดซับจะเพิ่มขึ้น (นิสาพร, 2559)

2. ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ดังนี้

1. ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับ เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำและไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับ สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออน ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของน้ำได้อย่างเหนียวแน่น สภาพการละลายน้ำที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ตัวถูกดูดซับที่ละลายได้ดี ย่อมมีการดูดซับลดลงเพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้น ต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

2. ขนาดของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุนของตัวดูดซับ พบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของตัวดูดซับ โดยโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในรูพรุนก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงถูกดูดเข้าไป ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลง

3. ค่าความเป็นกรด - เบส (pH) ถ้าค่าความเป็นกรดของตัวถูกดูดซับลดลง อัตราการดูดซับจะเกิดได้เร็วมาก เพราะค่าความเป็นกรด มีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่เพิ่มมากขึ้นจากการแตกตัวเป็นไอออนในน้ำของตัวถูกดูดซับยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอน (เช่น ถ่านกัมมันต์หรือถ่านชีวภาพ) ได้ดีทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอเนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้วของตัวถูกดูดซับในน้ำ มาเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดียิ่งขึ้นและทำให้เกิดการดูดซับดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of Adsorption) เท่ากับ อัตราการคาย (Rate of Desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่ เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น (นิสาพร, 2559)

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เกศศิริ (2551) งานศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากฟางข้าว แกลบ และชานอ้อย โดยกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริกในสภาวะที่เหมาะสมเดียวกัน ได้แก่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างกรดฟอสฟอริกต่อวัตถุดิบ คือ 1:1 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไปวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ และทดสอบความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมรทิลีนบลู และยังศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับปริมาณไอโอดีนและเมรทิลีนบลู โดยอาศัยสมการของ Freundlich ผลการวิจัยพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากฟางข้าวสามารถดูดซับประมาณไอโอดีนได้สูงสุดคือ 998 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากแกลบสามารถดูดซับปริมาณเมรทิลีนบลูได้สูงถึง 305 มิลลิกรัมต่อกรัม นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากฟางข้าวไปเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับไอโอดีนกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า 2 ชนิด พบว่ามีความสามารถที่ใกล้เคียง ส่วนการเปรียบถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นทั้ง 3 ชนิดกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าพบว่าความสามารถในการดูดซับเมรทิลีนบลูที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามยังถือว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากฟางข้าว แกลบ และชานอ้อยมีคุณสมบัติที่ดี เนื่องจากมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์มากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าความชื้นน้อยกว่า 8% ตามมาตรฐานของ มอก. 900 - 2547

กัญตพัฒน์ (2558) ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุดูดซับจากเปลือกสับปรดัดแปรด้วยเหล็ก เพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยนำเปลือกสับปรดมาปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.2% (w/v) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เปลือกสับปรดที่ผ่านการปรับสภาพจะมีค่าความสามารถดูดซับไอโอดีน และเมรทิลีนบลูได้มากที่สุดแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวของวัสดุ ผลของการเติมเฟอร์ริกลงในเปลือกสับปรดที่แช่ต่าง พบว่าสามารถดูดซับฟอสเฟตได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับเปลือกสับปรดที่แช่ต่างและเปลือกสับปรดที่ไม่ปรับสภาพ

ภุชงค์ (2558) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิว เพื่อใช้ในการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ไฮโดรเจน และมีเทน จากการศึกษาพบว่า การเติมหมู่โลหะนิกเกิลส่งผลให้เกิดการดูดซับได้ดีขึ้นในช่วงที่มีความดันต่ำ ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณนิกเกิลบนพื้นผิว เมื่อนำข้อมูลการกระจายขนาดของรูพรุนมาสร้างไอโซเทอมการดูดซับของมีเทน จะพบว่า ตัวอย่างที่มีปริมาณนิกเกิล 1% จะมีปริมาณการดูดซับมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวถึง 27% ในส่วนของผลของอุณหภูมิที่ทำการดูดซับจะพบว่าปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**เสาวภา (2558)** ศึกษาคุณสมบัติการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตด้วย  $\text{CaCO}_3$  จากเปลือกไข่และ  $\text{CaO}$  จากเปลือกไข่เผา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟอสเฟต เมื่อใช้  $\text{CaCO}_3$  จากเปลือกไข่ คือ เมื่อพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1 เวลาในการดูดซับ 180 นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.2 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าร้อยละ 80 ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการใช้  $\text{CaO}$  จากเปลือกไข่เผาเป็นตัวดูดซับฟอสเฟต คือ พีเอชเริ่มต้นอยู่ที่ช่วง 4 - 11 เวลาในการดูดซับ 30 นาที และปริมาณตัวดูดซับคือ 0.1 และ 0.5 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าร้อยละ 97 จากนั้นศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสามารถวิเคราะห์และทำนายได้ว่า การใช้  $\text{CaCO}_3$  ดูดซับได้สอดคล้องกับไอโซเทอมของฟรุนดิช และ  $\text{CaO}$  สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ซึ่งการศึกษาความสามารถในการดูดซับนี้ สามารถดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร และโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กได้ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

**อุสารัตน์ (2558)** ศึกษาการเตรียมวัสดุดูดซับจากเปลือกสับประรดเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟต โดยการนำเปลือกสับประรดที่ผ่านการปั่นและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช ปรับสภาพด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดลองพบว่าปริมาณของ  $\text{NaOH}$  อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อค่าความจุในการดูดซับไอโอดีนและค่าการดูดซับเมทิลีนบลู เมื่อนำวัสดุที่ปรับสภาพด้วยต่างมาแช่ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เข้มข้น 0.10 โมลาร์ พบว่าเปลือกสับประรดสามารถดูดซับเฟอร์ริกไอออนได้สูงสุด 14 มิลลิกรัมต่อกรัม การแช่เปลือกสับประรดที่เคลือบผิวด้วยเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลาร์ นาน 10 นาที เพิ่มการดูดซับของ  $\text{Fe}^{3+}$  ไอโซเทอมการดูดซับฟอสเฟตของเปลือกสับประรดที่ปรับสภาพด้วยต่างและเพิ่มการดูดซับของเฟอร์ริกไอออนด้วยการแช่ใน  $\text{NH}_4\text{OH}$  สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงก์เมียร์ โดยมีค่าความจุในการดูดซับฟอสเฟตสูงสุดเท่ากับ 35.33 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อกรัม

**ศิริกาญจนา และคณะ (2559)** ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย โดยใช้วิธีกระตุ้นทางกายภาพและอัดแท่ง โดยการนำชานอ้อยอัดแท่งมาทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (400 - 600 องศาเซลเซียส) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านมากระตุ้นภายใต้บรรยากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง นำถ่านที่ได้มาศึกษาโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมี ศึกษาการดูดซับโลหะโครเมียมจากสารละลายโครเมียมออกไซด์ โดยศึกษาหาค่าพีเอช เวลาที่ใช้ดูดซับ และความเข้มข้นของโครเมียมที่เหมาะสม ผลจากการทดลองพบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะโครเมียมมีค่าเท่ากับ 2 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโครเมียมได้สูงสุด และค่าพื้นที่ผิวที่ดีที่สุดของถ่านกัมมันต์มีค่าเท่ากับ  $589.73 \text{ m}^2/\text{g}$

**Laleh et al. (2016)** ศึกษาการพัฒนาถ่านชีวภาพที่พัฒนาจากชานอ้อยเพื่อกำจัดไนเตรตในน้ำ โดยการทดลองได้วิเคราะห์ผลจากค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ค่าพีเอชของสารละลาย ปริมาณการดูดซับ เวลาในการสัมผัส ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไนเตรต และอุณหภูมิ การทดลองใช้แบบจำลองการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกัน และแบบจำลองการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซเทอม (Langmuir, Freundlich, Sips and Dubinin-Raduskovich models) พบว่าไอออนของคาร์บอเนตและคลอไรด์มีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรตสูงสุดและต่ำสุด และแบบจำลองความร่อน Langmuir แสดงให้เห็นถึงการดูดซับได้ดีที่สุด โดยมีค่าความจุในการดูดซับสูงสุดของถ่านชีวภาพสำหรับการกำจัดไนเตรตเท่ากับ 28.21 มิลลิกรัมต่อกรัม

Qi Yang et al. (2017) ศึกษาการดัดแปรคุณภาพของถ่านชีวภาพ โดยใช้การตกตะกอนร่วมทางเคมีของ  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  หรือ  $FeCl_3$  ในสถานะที่แตกต่างกัน เพื่อปรับปรุงการดูดซับฟอสเฟตในน้ำ ผลการศึกษาพบว่า ถ่านชีวภาพที่ผ่านการบำบัดโดย  $FeCl_3$  มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตที่ดีกว่า 111.0 mg/g นอกจากนี้ยังพบว่า ถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงด้วย  $Fe^{3+}$  มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ดีในช่วงความเข้มข้นที่มากขึ้น

Zhanghong Wang et al. (2016) ศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตของถ่านชีวภาพด้วยการดัดแปรถ่านชีวภาพโดยเพิ่มแลนทานัมเข้าไปที่พื้นผิว โดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน/กระจายพลังงานสเปกโตรมิเตอร์ (SEM-EDS), X-ray การเลี้ยวเบน (XRD), X-ray โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (XPS), ฟูเรียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) และวิเคราะห์พื้นผิวและความพรุนของวัสดุ (BET) ส่งผลให้ค่าการประจุลบและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพลดลง มีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตสูง เมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพเดิม ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าเป็นแบบไอโซเทอม Langmuir ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่คำนวณได้สูงถึง  $46.37 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นเองและเกิด endothermic การวิเคราะห์ SEM, XRD, XPS และ FT-IR พบว่ากลไกการดูดซับหลายชนิดรวมถึงการตกตะกอนการแลกเปลี่ยนลิแกนด์และปฏิสัมพันธ์ของสารประกอบเชิงซ้อนสามารถพิสูจน์ได้ในระหว่างกระบวนการดูดซับฟอสเฟต

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) รุ่น IRTracer-100 บริษัท SHIMADZU ประเทศญี่ปุ่น
2. เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray Fluorescenc Spectro meter; XRF) รุ่น SRS 3400 บริษัท Bruker Optic ประเทศเยอรมนี
3. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) รุ่น Genesys 10S บริษัท Thermo Scientific UV-Vis ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) รุ่น FEI บริษัท ซายน์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Electric muffle furnace) รุ่น Nabertherm GmbH บริษัทBahnhostr ประเทศเยอรมนี
6. ตู้อบลมร้อน (Oven) รุ่น UF Series บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum Oven) รุ่น Hotpack บริษัท Spectralab Scientific ประเทศแคนาดา
8. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Digital balance) รุ่น MS-TS บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
9. เครื่องปั่นเหวี่ยงพร้อมหลอด (Centrifuge) รุ่น B 1601085.QB บริษัท โปรวิชั่น โซแอนติฟิค จำกัด ประเทศไทย
10. เครื่องเขย่าสารควบคุมอุณหภูมิ (Compact Shacking Incubator) รุ่น JSSI-100C บริษัทกิตติสิทธิ์ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ประเทศไทย
11. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น Five easy plus บริษัท Mettler Toledoประเทศสวิตเซอร์แลนด์
12. เครื่องกวนมอเตอร์ (Magnetic Stirrer) รุ่น HTS-1003 บริษัท Laboratory & Medical Supplies ประเทศญี่ปุ่น
13. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Filtration Apparafurus) รุ่น VE-11 บริษัท Jeitech ประเทศเกาหลี
14. เครื่องบดหยาบ (Coarse grinding) รุ่น B65 บริษัท Bosco ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. เครื่องบดละเอียดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) รุ่น VLFJ-OD  
บริษัท ย.ยง ฮะ เสง ประเทศไทย
16. ไมโครปิเปต ขนาด 10-100 และ 100-1000 ไมโครลิตร รุ่น Pipet – Lite XLS  
บริษัท Metter Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา
17. โถดูดความชื้น (Desiccator)
18. เครื่องเขย่าตะแกรง (Sieve Shaker) รุ่น 01409023  
บริษัท Retsch จำกัด ประเทศไทยเยอรมนี
19. ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 70 เมช มาตรฐาน ASTM E11 ประเทศอังกฤษ
20. ถ้วยเซรามิก (Ceramic)
21. กระดาษวัดพีเอช (pH paper)
22. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 40 และ 41
23. บริษัทเครื่องแก้วและอุปกรณ์พลาสติกสำหรับห้องปฏิบัติการ

### 3.1.2 สารเคมี

1. กรดแอสคอร์บิก ( $C_6H_8O_6$ ) AR Grade, Carlo Erba
2. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc.  $H_2SO_4$ ) AR Grade, Carlo Erba
3. กรดไนตริกเข้มข้น (Conc.  $HNO_3$ ) AR Grade, Carlo Erba
4. กรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) AR Grade, Fisher Scientific
5. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาทาเทรต [ $K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot 0.5H_2O$ ] AR Grade, Carlo Erba
6. แอมโมเนียมโมลิบเดตเตตระไฮเดรต [ $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ ] AR Grade, Carlo Erba
7. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $KH_2PO_4$ ) AR Grade, Fisher Scientific
8. โพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) AR Grade, Carlo Erba
9. เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) AR Grade, Fisher Scientific
10. เฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ) AR Grade, Fisher Scientific
11. เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) AR Grade, Carlo Erba
12. แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2$ ) AR Grade, Gammaco
13. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) AR Grade, Fisher Scientific
14. โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) AR Grade, Fisher Scientific
15. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein Indicator) AR Grade, Fisher Scientific
16. เอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) 95% AR Grade, Loughborough Leies
17. เมทิลีนบลู ( $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ) AR Grade, Fisher Scientific
18. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า.  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การเตรียมฟางข้าวที่ใช้ในการศึกษา

นำฟางข้าวมาอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่ ที่ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบและเครื่องบดละเอียดตามลำดับ จากนั้นนำมา ผ่านตะแกรงร่อนเพื่อคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 70 เมช นำไปอบแห้งอีกครั้งก่อนนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป

### 3.3 การผลิตถ่านชีวภาพจากฟางข้าวและการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของถ่านชีวภาพ

1. ชั่งน้ำหนักฟางข้าวที่เตรียมได้ในข้อ 3.2 ใส่ลงในถ้วยเซรามิกที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน โดยให้มีพื้นที่ว่างประมาณ 20% ของความจุถ้วย
2. นำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง (ทิ้งให้เย็นจนอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิกายนอก) จากนั้นนำถ่านชีวภาพที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณร้อยละของผลผลิตตามสมการ (3.1) และวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชีวภาพที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1

$$\text{ร้อยละของผลผลิต (\% yield)} = \frac{\text{ผลผลิตที่แท้จริง}}{\text{ผลผลิตตามทฤษฎี}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ \%yield} &= \text{ร้อยละของผลผลิต} \\ \text{ผลผลิตที่แท้จริง} &= \text{น้ำหนักฟางข้าวก่อนเผา (g)} \\ \text{ผลผลิตตามทฤษฎี} &= \text{น้ำหนักฟางข้าวหลังเผา (g)} \end{aligned}$$

3. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาจาก 300 องศาเซลเซียส เป็น 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 สมบัติของถ่านชีวภาพที่ทำการศึกษา

พารามิเตอร์	วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์
1. ร้อยละของผลผลิต (%yield)	การคำนวณตามสมการ (3.1)
2. ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ถูกออกซิไดส์ (Oxidizing organic content; OC)	Wet oxidation (Walkley&Black (1947). อ้างถึงใน กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
3. ค่าการสูญเสียหลังเผา (Loss on ignition; LOI)	เผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง (ASTM method, D-1762-84)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า-  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์
4. ปริมาณอินทรีย์วัตถุคงตัว (Stable Organic Matters; SOM)	การคำนวณตามสมการ (3.2) (Hafshejani et al., 2016)
5. พื้นผิวของตัวดูดซับ	การหาค่าความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลู (Methylene Blue Number, M.B.N) (Nunes และ Guerriero, 2011)

## วิธีการคำนวณปริมาณอินทรีย์วัตถุคงตัว (Stable Organic Matters; SOM)

ปริมาณอินทรีย์วัตถุคงตัว คำนวณอ้างอิงวิธีการตาม Hafshejani et al., (2016)

$$\text{SOM} = \text{LOI} - (\text{OC} \times 1.724) \quad (3.2)$$

- เมื่อ SOM = ปริมาณอินทรีย์วัตถุคงตัว  
 LOI = ค่าการสูญเสียหลังเผา  
 OC = ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ถูกออกซิไดส์  
 1.724 = ค่าคงที่ในการเปลี่ยนปริมาณอินทรีย์คาร์บอนไปเป็นอินทรีย์วัตถุ

## 3.4 ศึกษาผลของการดัดแปรพื้นผิวของถ่านชีวภาพด้วยไอออนของโลหะ

3.4.1 การดัดแปรพื้นผิวด้วยสารละลายผสมระหว่างเฟอร์รัสกับเฟอร์ริก ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ )

## 1. วิธีการเตรียมสารเคมี

ละลาย  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  จำนวน 18.17 กรัม และ  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  จำนวน 19.5 กรัม ในน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัด

## 2. วิธีการทดลอง

1. ชั่งถ่านชีวภาพที่เตรียมได้ในข้อ 3.3 มาแช่ในสารละลายผสมของ  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  กำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านต่อปริมาตรของสารละลายที่ใช้เป็น 1:30
2. ทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อวินาที จากนั้นหยุดสารละลาย NaOH เข้มข้น 10 M ลงไปที่ละหยดจนพีเอชของของผสมมีค่าเท่ากับ 11.0
3. ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42 ก่อนนำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิค AAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI) หลายๆ ครั้ง จนพีเอชของน้ำมีค่าเท่ากับพีเอชของน้ำ DI นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
5. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุที่เตรียมได้ดังตารางที่ 3.2

### 3.4.2 การตัดแปรพื้นผิวด้วยสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ )

#### 1. วิธีการเตรียมสารเคมี

ละลาย  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  จำนวน 36.33 กรัม ในน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัด

#### 2. วิธีการทดลอง

1. ชั่งถ่านชีวภาพที่เตรียมได้ในข้อ 3.3 มาแช่ในสารละลาย  $\text{FeCl}_3$  กำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านต่อปริมาตรของสารละลายที่ใช้เป็น 1:30
2. ทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อวินาที จากนั้นหยดสารละลาย  $\text{NaOH}$  เข้มข้น 10 M ลงไปที่ละหยดจนพีเอชของของผสมมีค่าเท่ากับ 11.0
3. ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42 ก่อนนำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิค AAS
4. ล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI) หลายๆ ครั้ง จนพีเอชของน้ำมีค่าเท่ากับพีเอชของน้ำ DI นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
5. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุที่เตรียมได้ดังตารางที่ 3.2

### 3.4.3 การตัดแปรพื้นผิวด้วยสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ )

#### 1. วิธีการเตรียมสารเคมี

ละลาย  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  จำนวน 12.79 กรัม ในน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อยใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัด

#### 2. วิธีการทดลอง

1. ชั่งถ่านชีวภาพที่เตรียมได้ในข้อ 3.3 มาแช่ในสารละลาย  $\text{MgCl}_2$  กำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านต่อปริมาตรของสารละลายที่ใช้เป็น 1:30
2. ทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อวินาที จากนั้นหยดสารละลาย  $\text{NaOH}$  เข้มข้น 10 M ลงไปที่ละหยดจนพีเอชของของผสมมีค่าเท่ากับ 11.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42 ก่อนนำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิค AAS
4. ล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI) หลายๆ ครั้ง จนพีเอชของน้ำมีค่าเท่ากับพีเอชของน้ำ DI นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
5. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุที่เตรียมได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของวัสดุ

พารามิเตอร์	วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์
1. ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	Scanning Electron microscope (SEM)
2. หมู่ฟังก์ชันทางเคมี	Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)
3. องค์ประกอบธาตุ	X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF)
4. วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลาย	Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
5. วิเคราะห์หาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ( $\text{pH}_{\text{pzc}}$ )	pH drift method

### 3.5 การทดสอบความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของถ่านชีวภาพดัดแปร

#### 3.5.1 การเตรียมสารละลายออร์โธฟอสเฟต

1. ละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  จำนวน 219.5 มิลลิกรัม (หรือ 0.2195 กรัม) ในน้ำกลั่นจำนวนพอเหมาะแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร (สารละลายนี้ 1 มิลลิลิตร จะมีปริมาณฟอสฟอรัส  $50.0 \mu\text{g-PO}_4^{3-}\text{-P}$ )
2. บีบอัดสารละลายจากข้อ 1 มาปริมาตร 50 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร (สารละลายนี้ 1 มิลลิลิตร จะมีปริมาณฟอสฟอรัส  $2.50 \mu\text{g-PO}_4^{3-}\text{-P}$ )

#### 3.5.2 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส

1. ชั่งถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยเฟอร์รัสกับเฟอร์ริก ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ) มาประมาณ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมสารละลายออร์โธฟอสเฟตลงไป 50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำไปกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42
4. ทำการวิเคราะห์ปริมาณออร์โทฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีโดยวิธี Ascorbic acid (APHA, AWWA and WEF, 1995)
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสจาก 1 ชั่วโมง เป็น 2, 4, 6, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยเฟอร์ริสกับเฟอร์ริก ( $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ ) เป็นถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2$ ) ตามลำดับรวมถึงถ่านชีวภาพก่อนการดัดแปร

### 3.5.3 ศึกษาผลของปริมาณวัสดุ

1. ชั่งถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยเฟอร์ริสกับเฟอร์ริก ( $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ ) มาประมาณ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมสารละลายออร์โทฟอสเฟตลงไป 50 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำไปกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42
4. ทำการวิเคราะห์ปริมาณออร์โทฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีโดยวิธี Ascorbic acid (APHA, AWWA and WEF, 1995)
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนปริมาณของถ่านชีวภาพจาก 0.1 กรัม เป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 และ 2 กรัมตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนชนิดของถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยเฟอร์ริสกับเฟอร์ริก ( $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ ) เป็นถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2$ ) ตามลำดับรวมถึงถ่านชีวภาพก่อนการดัดแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

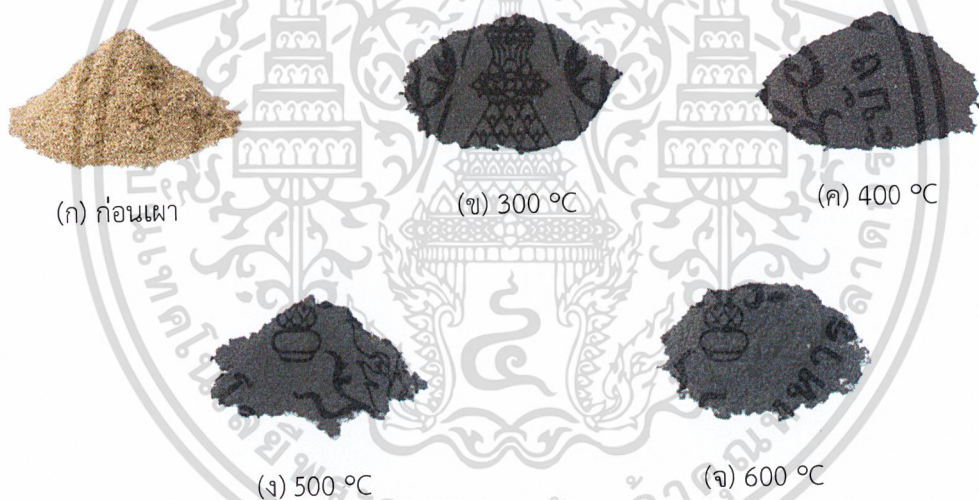
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ทำการผลิตถ่านชีวภาพดัดแปรด้วยไอออนของโลหะจากฟางข้าวสำหรับใช้เป็นวัสดุดูดซับฟอสเฟตในน้ำ โดยมีขั้นตอนการศึกษา 2 ขั้นตอนได้แก่ การศึกษาผลของอุณหภูมิขณะไพโรไลซิสต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ได้ และการศึกษาผลของการดัดแปรพื้นผิวของถ่านชีวภาพด้วยไอออนของโลหะ 2 ประเภท ได้แก่ เหล็กและแมกนีเซียม ผลที่ได้เป็นดังนี้

#### 4.1 ผลของอุณหภูมิขณะไพโรไลซิสต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชีวภาพ

เมื่อนำฟางข้าวไปเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพในช่วงอุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านชีวภาพที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของถ่านชีวภาพจากฟางข้าวที่ผลิตได้ตามอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ฟางข้าวก่อนเผามีลักษณะสีเหลืองอ่อน ดังรูปที่ 4.1(ก) เมื่อนำฟางข้าวไปเผาที่แต่ละอุณหภูมิพบว่าถ่านที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำและมีสีเทาของเถ้า ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะเห็นผงละเอียดสีดำของถ่านและสีเทาของเถ้าที่ได้หลังการเผาดังรูปที่ 4.1(ข) โดยจะมีผงละเอียดสีดำของถ่านลดลงและสีเทาของเถ้าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 400 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.1(ค) และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเป็น 500 และ 600 องศาเซลเซียส ปริมาณผงละเอียดสีดำของถ่านจะลดลงและผงละเอียดสีเทาของเถ้าจะเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.1(ง,จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 ปริมาณผลผลิตและองค์ประกอบถ่านชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณผลผลิต และองค์ประกอบของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ในแต่ละอุณหภูมิ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิขณะไพโรไลซิสต่อการผลิตถ่านชีวภาพและองค์ประกอบของถ่านชีวภาพ

อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละ ผลผลิต (%)	Oxidizing organic content (%)	Loss on ignition (%)	Stable organic matter (%)
300	27.04	36.84	64.60	1.08
400	22.68	19.59	58.38	24.61
500	18.61	18.04	47.19	16.09
600	14.83	12.42	33.63	12.22

จากตารางที่ 4.1 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิขณะไพโรไลซิส ทำให้ร้อยละของผลผลิตของถ่านชีวภาพที่ได้มีแนวโน้มลดลง โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 300 องศาเซลเซียส เป็น 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละผลผลิตมีค่าลดลงจาก 27.04 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 22.68, 18.61 และ 14.83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สอดรับกับผลการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ถูกออกซิไดซ์ได้ (Oxidizing Organic Content, OC) ที่พบว่า มีค่าลดลงจาก 36.84 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำฟางข้าวไปเผาที่ 300 องศาเซลเซียส เหลือ 19.59, 18.04 และ 12.42 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นเป็น 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียสตามลำดับ เช่นเดียวกับค่าการสูญเสียหลังการเผา (Loss On Ignition, LOI) ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณสารอินทรีย์ระเหยได้ (Volatile Organic Matter) พบว่ามีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิขณะไพโรไลซิส สอดคล้องกับงานวิจัยของกันยาพรและสิทธิบุรณ์ (2559) ที่พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิขณะไพโรไลซิส จะทำให้องค์ประกอบของถ่านชีวภาพในกลุ่ม Volatile Matter, Organic Matter และ Organic Carbon มีปริมาณลดลง เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิขณะไพโรไลซิสต่อปริมาณอินทรีย์วัตถุคงตัว (Stable Organic Matter, SOM) อ้างอิงการคำนวณตามงานวิจัยของ Hafshejan et al. (2016) พบว่า ปริมาณ SOM มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาจาก 300 เป็น 400 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณอินทรีย์วัตถุคงตัวมากที่สุดเท่ากับ 24.61 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิขณะไพโรไลซิสเป็น 500 และ 600 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ SOM มีค่าลดลง อาจเป็นผลเกี่ยวเนื่องกับปริมาณเถ้าที่มีมากขึ้น ดังแสดงไว้ในงานวิจัยของกันยาพรและสิทธิบุรณ์ (2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number; M.B.N)

ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (M.B.N) บอถึงความสามารถในการดูดซับสีเมทิลีนบลูของวัสดุ ดูดซับที่นำมาทดสอบ สะท้อนให้เห็นถึงค่าความสามารถของวัสดุนั้น ๆ ในการดูดซับโมเลกุลที่มีขนาด กลาง (1.0 – 25 นาโนเมตร) ถึงขนาดใหญ่ (> 25 นาโนเมตร) ในสารละลาย (Henning and Schafer, 2007) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพื้นผิวจำเพาะของวัสดุที่ทดสอบ (Hegyesei, 2017) ผลการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านชีวภาพจากฟางข้าวที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิขณะไพโรไลซิส (°C)	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)
300	20.92
400	89.29
500	20.97
600	3.33

จากตารางที่ 4.2 การเพิ่มอุณหภูมิขณะไพโรไลซิสจาก 300 องศาเซลเซียส เป็น 400 องศาเซลเซียส ทำให้ค่า M.B.N ของถ่านชีวภาพที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 20.92 mg/g เป็น 89.29 mg/g แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวจำเพาะของถ่านที่มีมากขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิขณะไพโรไลซิส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rafiq et al. (2016) ที่พบว่า พื้นผิวจำเพาะของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตถ่าน ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนในระหว่างเผาไปทำลายพันธะทางเคมีของอินทรีย์วัตถุในส่วนต่างๆ ของชีวมวล ทำให้เกิดการระเหยความชื้น และการสลายตัวของอินทรีย์สารบางส่วนออกไป เกิดรูพรุนขึ้นบนพื้นผิวของถ่านที่ได้ (Rafiq et al. ; 2016) อย่างไรก็ตามพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิเป็น 500 และ 600 องศาเซลเซียส ทำให้ค่า M.B.N ของถ่านชีวภาพที่ได้มีค่าลดลงเหลือ 20.97 และ 3.33 mg/g ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอุณหภูมิที่สูงเกินไปสามารถลดความเป็นผลึกของถ่านชีวภาพ โดยไปทำให้เกิดการสลายตัวของเซลล์ลูโลสและลิกนิน ดังระบุไว้ในงานวิจัยของ Aziz (2015)

## 4.2 ผลของการตัดแปรพื้นผิวของถ่านชีวภาพด้วยไอออนของโลหะ

ผลการนำถ่านชีวภาพจากฟางข้าว มาเติมโลหะจำพวกแคทไอออน 2 ชนิด ได้แก่ ไอออนของเหล็ก (เฟอร์รัสและเฟอร์ริก) และไอออนของแมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ ) โดยมีวิธีการตัดแปรดังนี้คือ 1) การตัดแปรด้วยสารผสมของเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) กับเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) 2) การตัดแปรด้วยสารละลายของเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) 3) การตัดแปรด้วยสารละลายของแมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ ) จะได้ถ่านชีวภาพตัดแปรที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นดังรูปที่ 4.2

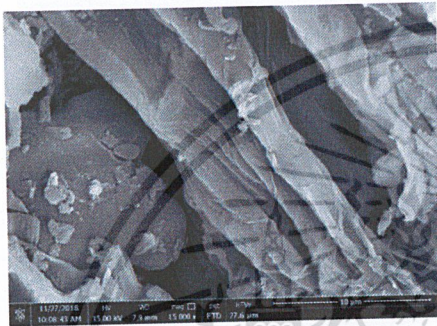


รูปที่ 4.2 ลักษณะของถ่านชีวภาพก่อนการตัดแปรและถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยไอออนของโลหะ

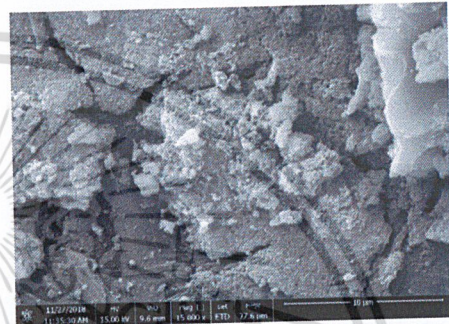
จากรูปที่ 4.2 พบว่า ถ่านชีวภาพก่อนการตัดแปร ซึ่งผลิตด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำ (รูปที่ 4.2ก) เมื่อนำมาเติมโลหะผสมระหว่าง  $Fe^{2+}$  กับ  $Fe^{3+}$  พบว่า ถ่านชีวภาพตัดแปรที่ได้จะมีสีส้มอิฐ (รูปที่ 4.2ข) ส่วนถ่านชีวภาพตัดแปรด้วย  $Fe^{3+}$  มีสีส้มอิฐเช่นเดียวกันแต่ลักษณะสีจะจางกว่า (รูปที่ 4.2ค) เมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพตัดแปรด้วย  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  ซึ่งสีส้มอิฐที่เห็นแสดงให้เห็นว่าเหล็กที่เติมได้ไปติดติดกับผิวของถ่านชีวภาพ ในขณะที่สีของถ่านชีวภาพตัดแปรด้วย  $Mg^{2+}$  มีลักษณะคล้ายคลึงกับสีของถ่านชีวภาพก่อนการตัดแปร (รูปที่ 4.2ง) เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ที่ใช้แช่ถ่านชีวภาพเป็นสารละลายไม่มีสี จึงทำให้ถ่านชีวภาพที่เตรียมได้มีสีใกล้เคียงกับถ่านชีวภาพก่อนการตัดแปร

#### 4.2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพโดยกล้อง (SEM)

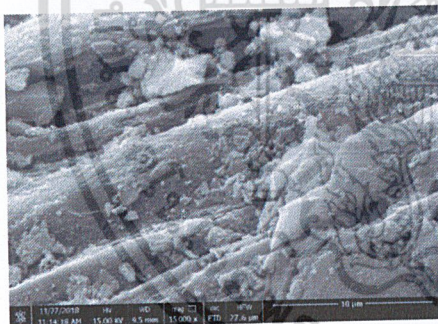
จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพตัดแปรด้วยโลหะเทียบกับถ่านชีวภาพก่อนการตัดแปรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) พบว่า พื้นผิวของถ่านชีวภาพมีพื้นผิวเรียบ (รูปที่ 4.3ก) แต่เมื่อนำไปทำการตัดแปรพบว่า พื้นผิวของถ่านชีวภาพที่เติมเหล็กหรือแมกนีเซียมบนพื้นผิวมีลักษณะขรุขระเป็นผลึกเล็กๆ ที่ผิวมากขึ้น สันนิษฐานว่าก่อนผลึกเล็กๆที่พบมากขึ้นแสดงให้เห็นถึงการตกตะกอนและการดูดติดของเหล็กและแมกนีเซียมที่ผิวของวัสดุดังแสดงในรูปที่ 4.3



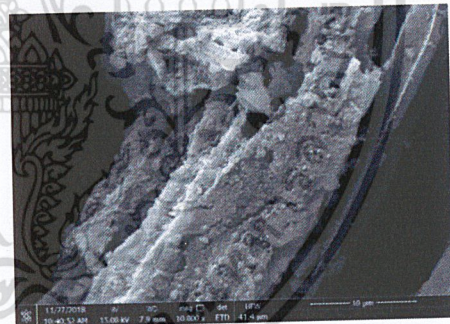
(ก) ถ่านชีวภาพก่อนการตัดแปร



(ข) ถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์



(ค) ถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์



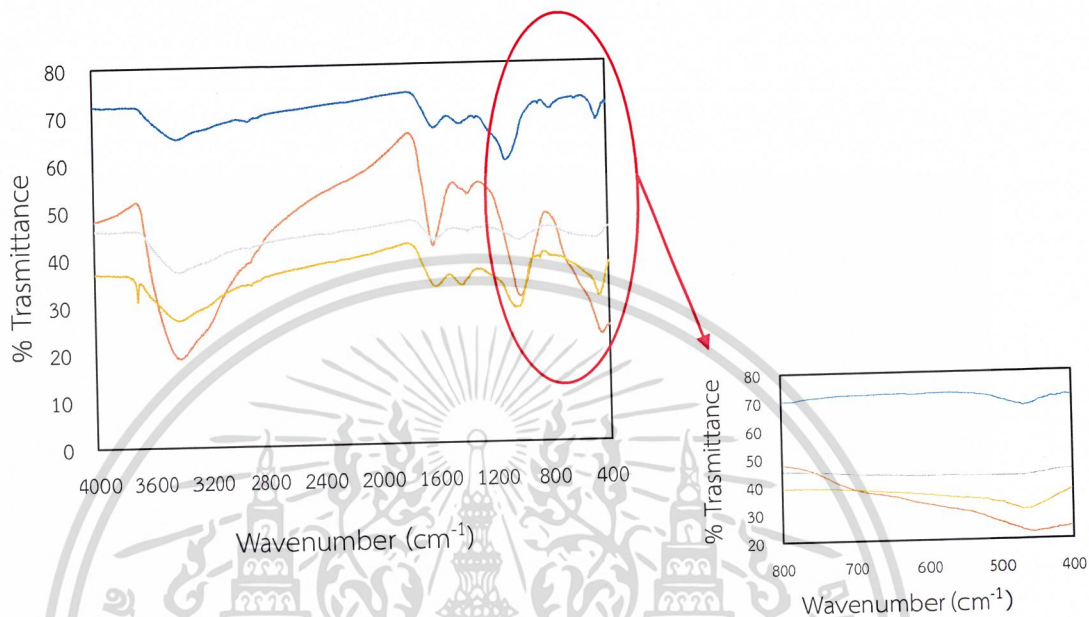
(ง) ถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์

รูปที่ 4.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (ก) ถ่านชีวภาพที่ไม่ตัดแปร กับ (ข-ง) ถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยไอออนของโลหะชนิดต่างๆ ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของถ่านชีวภาพดัดแปรด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.4 สเปกตรัม FT-IR ของวัสดุดูดซับที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอออนของโลหะต่างชนิดกัน เมื่อเส้น (—) คือสเปกตรัมของถ่านชีวภาพก่อนการดัดแปรพื้นผิว, (—) คือสเปกตรัมของถ่านชีวภาพที่ผ่านการดัดแปรด้วย  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ , (—) คือสเปกตรัมของถ่านชีวภาพที่ผ่านการดัดแปรด้วย  $Fe^{3+}$  และ (—) คือสเปกตรัมของถ่านชีวภาพที่ผ่านการดัดแปรด้วย  $Mg^{2+}$

ตารางที่ 4.3 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของถ่านชีวภาพก่อนการดัดแปรและหลังการดัดแปร

ถ่านชีวภาพ	Wavenumber ( $cm^{-1}$ )	พันธะ
ก่อนการดัดแปร	3,200 - 3,500	O-H stretch
	1,600 - 1,650	C=O
	1,000 - 1,150	C-O
	500 - 700	C-H bend
ผ่านการดัดแปรด้วย $Fe^{2+}/Fe^{3+}$	3,200 - 3,500	O-H stretch
	1,600 - 1,650	C=O
	1,000 - 1,150	C-O
	500 - 700	C-H bend
	440 - 550	Fe-O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

ถ่านชีวภาพ	Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )	พันธะ
ผ่านการดัดแปรด้วย Fe <sup>3+</sup>	3,200 - 3,500	O-H stretch
	1,600 - 1,650	C=O
	1,000 - 1,150	C-O
	500 - 700	C-H bend
	440 - 550	Fe-O
ผ่านการดัดแปรด้วย Mg <sup>2+</sup>	3,200 - 3,500	O-H stretch
	1,600 - 1,650	C=O
	1,000 - 1,150	C-O
	500-700	C-H bend
	3,700	Mg-O

จากรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของถ่านชีวภาพก่อนการดัดแปร จะพบความเข้มของพีคในตำแหน่งเลขคลื่น 3,200 - 3,500 cm<sup>-1</sup> แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) จากการสั่นของ OH stretching และที่ตำแหน่งเลขคลื่นระหว่าง 1,600 - 1,650 cm<sup>-1</sup> ที่แสดงหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลจากการสั่นของ C=O stretching ซึ่งยังรวมไปถึงพีคในตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 1,000 cm<sup>-1</sup> ที่แสดงถึงการยึดของพันธะคาร์บอนและออกซิเจน (C-O) ของกลุ่มแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังปรากฏความเข้มของพีคในตำแหน่งเลขคลื่น 500 - 700 cm<sup>-1</sup> ที่แสดงถึงการยึดของพันธะคาร์บอนกับไฮโดรเจนของกลุ่มอัลเคน เมื่อนำถ่านชีวภาพจากฟางข้าวไปผ่านการดัดแปรด้วยเหล็กและแมกนีเซียมพบว่า เกิดการหายไปของความเข้มของพีคในตำแหน่งเลขคลื่น ประมาณ 1,100 - 1,200 cm<sup>-1</sup> และปรากฏพีคที่เลขคลื่นในช่วง 440 - 550 cm<sup>-1</sup> ที่แสดงถึงการยึดของพันธะ Fe-O ในถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> และถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย Fe<sup>3+</sup> เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของถ่านชีวภาพดัดแปรด้วยแมกนีเซียมพบว่า ปรากฏผลในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ไม่ปรากฏความเข้มของพีคในตำแหน่งเลขคลื่น ประมาณ 1,100 - 1,200 cm<sup>-1</sup> และปรากฏที่เลขคลื่นในตำแหน่งเลขคลื่น 3,700 cm<sup>-1</sup> ที่แสดงถึงการยึดของพันธะ Mg-O ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงการดูดติดของ Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup> และ Mg<sup>2+</sup> ที่ผิวของถ่านชีวภาพสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุทั้งสามชนิดด้วย SEM

#### 4.2.3 ธาตุองค์ประกอบ (X-ray Fluorescence Spectrometry; XRF)

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในถ่านชีวภาพด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) โดยจะแสดงผลออกมาในรูปแบบที่เป็นสารประกอบซึ่งเป็นสัดส่วนโดยน้ำหนัก ผลการศึกษาเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุ

ธาตุองค์ประกอบ	ปริมาณองค์ประกอบ (% โดยน้ำหนัก)			
	Biochar	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Na <sub>2</sub> O	1.37	1.63	2.22	1.79
MgO	4.91	1.94	1.98	46.70
SiO <sub>2</sub>	49.2	17.00	22.60	39.0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.15	0.43	0.82	1.96
SO <sub>3</sub>	5.31	0.54	1.11	1.54
Cl	11.2	0.53	0.42	-
CaO	6.58	3.55	3.07	6.66
MnO	0.37	-	-	-
CuO	0.29	0.30	0.28	0.29
K <sub>2</sub> O	20.20	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.79	73.00	66.90	0.65

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ฟางข้าวและถ่านชีวภาพก่อนการตัดแปรจะมีปริมาณร้อยละของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นปริมาณที่มากที่สุดคือ 44.3 และ 49.2 เปอร์เซ็นต์ สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติในรูปแบบของทรายหรือควอตซ์ ร่องลงมาเป็นปริมาณร้อยละของโพแทสเซียมออกไซด์ (K<sub>2</sub>O) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักในปุ๋ยและเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช โดยองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจากฟางข้าวที่ใช้ศึกษาเมื่อมีการเติมน้ำจะทำให้ ออกไซด์ต่างๆ เปลี่ยนไปอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ (OH) จึงทำให้สัดส่วนโดยน้ำหนักของสารประกอบของถ่านชีวภาพที่มีการตัดแปรด้วยไอออนของโลหะจำพวกเฟอร์รัส/เฟอร์ริก (Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>), เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl<sub>3</sub>) และแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl<sub>2</sub>) มีสัดส่วนลดลงตามลำดับ แต่มีการเพิ่มขึ้นของธาตุองค์ประกอบตามชนิดของไอออนของโลหะที่มีการเติมลงไปบนพื้นผิววัสดุแทน ซึ่งถ่านชีวภาพที่มีการ

ตัดแปรด้วยเฟอร์รัส/เฟอร์ริก (Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>) และเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl<sub>3</sub>) จะมีปริมาณของเฟอร์ริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากที่สุด โดยถ่านชีวภาพที่มีการดัดแปรด้วยเฟอร์รัส/เฟอร์ริก ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ) และเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) มีปริมาณร้อยละของเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 66.90 และ 73.00 ตามลำดับ และถ่านชีวภาพที่ผ่านการดัดแปรด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ ) จะมีปริมาณร้อยละของแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) เท่ากับ 46.7 ซึ่งเป็นปริมาณร้อยละที่มากที่สุดเช่นเดียวกัน

#### 4.2.4 วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลาย (Atomic Absorption Spectrophotometer; AAS)

การวิเคราะห์ธาตุแสดงให้เห็นถึงการดัดแปรพื้นผิวของถ่านชีวภาพ สามารถวิเคราะห์ได้จากความเข้มข้นของสารละลายที่ได้ทำการดัดแปรลงไป วัสดุที่ถูกดัดแปรแล้วจะมีความเข้มข้นคงเหลือของสารละลายลดลงจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ซึ่งแสดงว่าแร่ธาตุที่อยู่ในสารละลายเข้าไปเกาะตามพื้นผิวของถ่านชีวภาพ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นคงเหลือของเหล็กและแมกนีเซียมในสารละลาย

ชนิดของแร่ธาตุ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นคงเหลือ (ppm)
เฟอร์รัสกับเฟอร์ริก ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ )	4.06	2.02
เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ )	3.03	1.01
แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ )	0.35	0.01

จากตารางที่ 4.5 พบว่าปริมาณเหล็กและแมกนีเซียมในสารละลายแก่ถ่านชีวภาพมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพที่ถูกนำมาดัดแปรพื้นผิวด้วยไอออนของโลหะทั้ง 2 ประเภท เกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยความเข้มข้นของไอออนที่หายไปเป็นการไปเพิ่มประจุบนพื้นผิวของวัสดุงานวิจัยของ Kim (2008) รายงานว่า ไอออนของโลหะหนัก เช่น  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Al}^{3+}$  สามารถเกิดปฏิกิริยาแบบแทนที่ ณ ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลลูโลส ทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีความเป็นไอออนบวกเพิ่มขึ้นบวกกับสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนลบในน้ำได้มากขึ้น

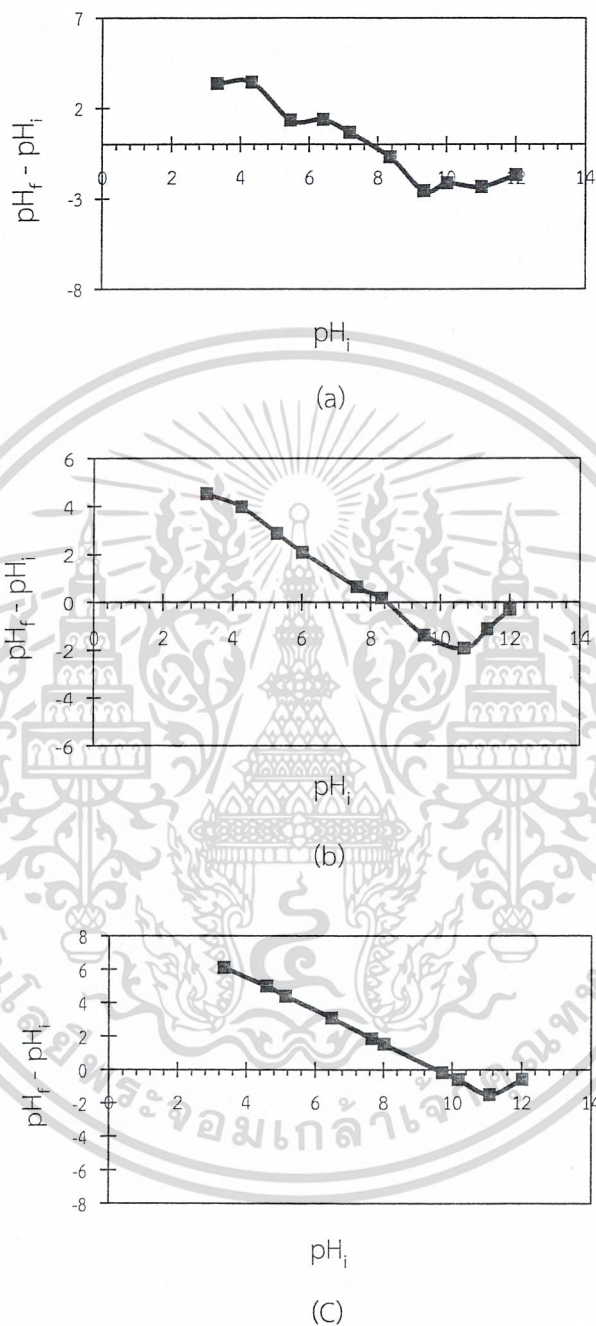
#### 4.2.5 วิเคราะห์หาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge; $\text{pH}_{\text{pzc}}$ )

การศึกษาการหาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ เป็นการศึกษาค่าความเป็นกรด-เบสที่ทำให้ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลาง หรือประจุรวมที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์ โดยเมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่าน้อยกว่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ( $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$ ) ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นประจุบวก แต่ถ้าความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่ามากกว่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ( $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มาเปิดเผยชนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นประจุลบ (Yang et al., 2004) ซึ่งจากหลักการนี้สามารถชี้ค่าความเป็นประจุที่ผิวของวัสดุดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับได้ ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 (a) ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของถ่านชีวภาพตัดแปรด้วย  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$   
 (b) ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของถ่านชีวภาพตัดแปรด้วย  $Fe^{3+}$   
 (c) ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของถ่านชีวภาพตัดแปรด้วย  $Mg^{2+}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

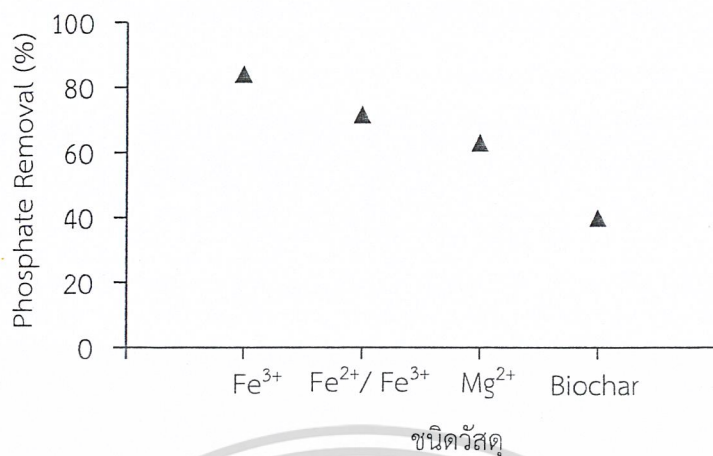
จากรูปที่ 4.5 พบว่า  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  ของถ่านชีวภาพจากฟางข้าวที่ดัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  มีค่าเท่ากับ 8.35 (รูปที่ 4.5 a)  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  ของถ่านชีวภาพจากฟางข้าวที่ดัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{3+}$  มีค่าเท่ากับ 8.31 (รูปที่ 4.5b) และ  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  ของถ่านชีวภาพจากฟางข้าวที่ดัดแปรด้วย  $\text{Mg}^{2+}$  มีค่าเท่ากับ 9.71 (รูปที่ 4.5C) โดยเมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่ามากกว่า 8.35, 8.31 และ 9.71 เมื่อนำถ่านชีวภาพดัดแปรทั้งสามชนิดไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีค่าพีเอชเป็นกลาง พื้นผิวของวัสดุจะมีค่าเป็นบวก ทำให้สามารถกำจัดไอออนลบในน้ำ เช่น ไอออนลบของฟอสเฟตได้

### 4.3 การทดสอบความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของถ่านชีวภาพดัดแปร

การศึกษาความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตของถ่านชีวภาพดัดแปร โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ (1) ชนิดของวัสดุ (2) ระยะเวลาสัมผัส (3) ปริมาณของวัสดุ ได้ผลทดลองดังนี้

#### 4.3.1 ผลของชนิดวัสดุ

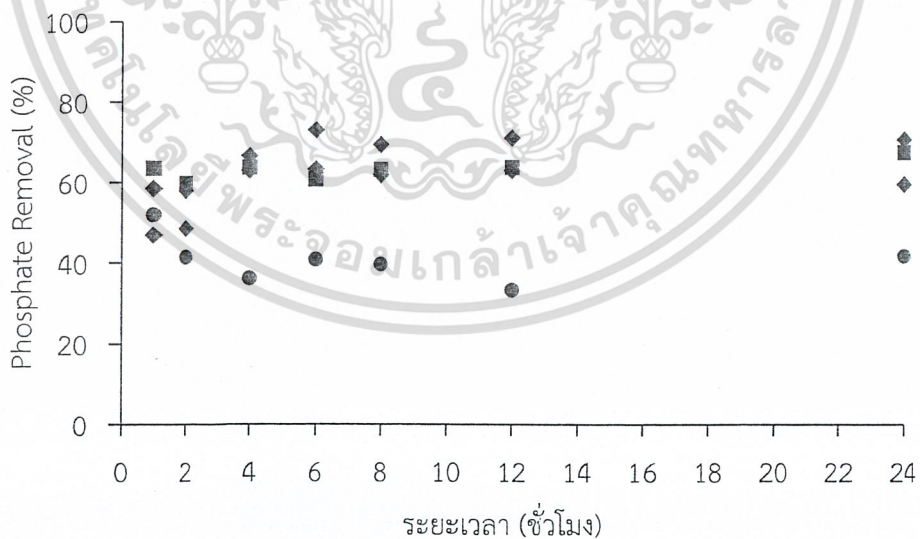
ผลการเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตรของถ่านชีวภาพดัดแปรเทียบกับถ่านชีวภาพก่อนการดัดแปรที่ระยะเวลาสัมผัสนาน 24 ชั่วโมง พบว่า ถ่านชีวภาพจากฟางข้าวมีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพดัดแปรด้วยเหล็กหรือแมกนีเซียม โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดอยู่ที่ 39.87 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.6) เมื่อทำการดัดแปรถ่านชีวภาพจะพบว่า ถ่านชีวภาพดัดแปรด้วยเหล็ก มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้สูงกว่าถ่านชีวภาพดัดแปรด้วยแมกนีเซียม โดยถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{3+}$  และถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ 84.00 เปอร์เซ็นต์ และ 71.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $\text{Mg}^{2+}$  มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ 62.93 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.6) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่สูงกว่าของ  $\text{Fe}^{3+}$  เทียบกับ  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  (รัชชัย, 2551) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{3+}$  เทียบกับถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  พบว่า ถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้น้อยกว่าถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{3+}$  แสดงให้เห็นว่าการลดปริมาณ  $\text{Fe}^{3+}$  ในถ่านชีวภาพมีผลต่อความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของถ่านชีวภาพ ยืนยันให้เห็นถึงจำนวนประจุของไอออนมีผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของวัสดุ



รูปที่ 4.6 ความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของวัสดุต่างกัน

#### 4.3.2 ผลของระยะเวลา

เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำที่มีความเข้มข้นฟอสเฟต 2.5 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อลิตร ของวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด โดยใช้ปริมาณของวัสดุดูดซับเท่ากันคือ 0.1 กรัม ในสารละลาย 50 มิลลิลิตร ทำการผันแปรระยะเวลาสัมผัสที่ทำการศึกษา ได้แก่ 1, 2, 4, 6, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำของวัสดุทั้ง 4 ชนิด

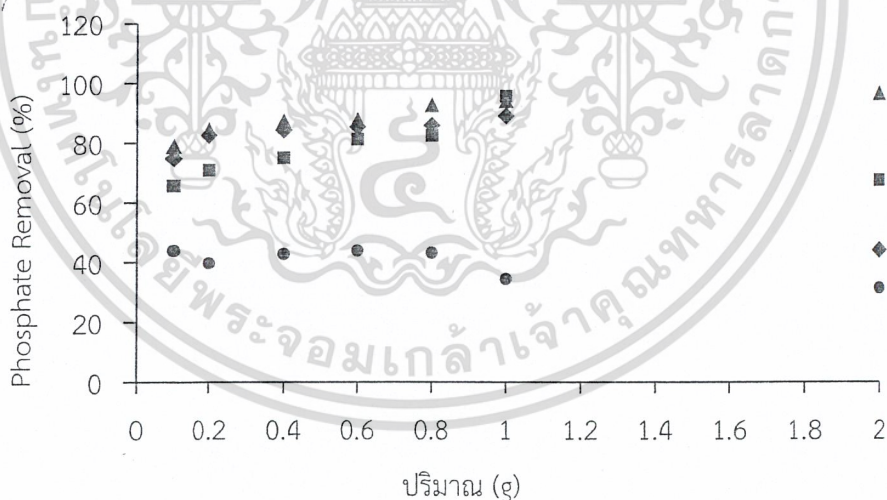
เมื่อจุด (●) คือถ่านชีวภาพก่อนการดัดแปรพื้นผิว, (■) คือถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วย Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>, (▲) คือถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วย Fe<sup>3+</sup> และ (◆) คือถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วย Mg<sup>2+</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 การศึกษาความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด พบว่า วัสดุแต่ละชนิดมีระยะเวลาสัมผัสในการกำจัดฟอสเฟตที่แตกต่างกัน โดยที่เปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสเฟตของถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{3+}$  จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 2 ชั่วโมงแรก และเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนมีแนวโน้มคงที่ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 4.7) ซึ่งเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสเฟตของถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วย  $\text{Mg}^{2+}$  จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 4 ชั่วโมงแรกและมีแนวโน้มคงที่ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์การกำจัดมีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 4.7) เมื่อเปรียบเทียบวัสดุทั้ง 3 ชนิดที่ดัดแปรด้วยไอออนของโลหะเทียบกับถ่านชีวภาพที่ไม่ดัดแปรเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสเฟต จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 1 ชั่วโมงแรกและลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาผ่านไป ซึ่งจากการศึกษาทำให้ได้ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของวัสดุแต่ละชนิดเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป

#### 4.3.3 ผลของปริมาณวัสดุ

เมื่อทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำที่ความเข้มข้นฟอสเฟต 2.5 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตรของวัสดุดูดซับทั้ง 5 ชนิด โดยทำการแปรผันปริมาณที่ใช้เป็น 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 2.0 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส ซึ่งได้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของแต่ละวัสดุ (จากข้อ 4.3.2) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำของวัสดุทั้ง 4 ชนิดที่มีปริมาณวัสดุต่างกัน เมื่อจุด (●) คือถ่านชีวภาพก่อนการดัดแปรพื้นผิว, (■) คือถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ , (▲) คือถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{3+}$  และ (◆) คือถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วย  $\text{Mg}^{2+}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 พบว่า การเพิ่มปริมาณของถ่านชีวภาพตัดแปร มีผลต่อความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำ ดังจะเห็นได้จาก การเพิ่มปริมาณของถ่านชีวภาพตัดแปรด้วย  $Fe^{3+}$  จาก 0.1 กรัม เป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 2.0 กรัม ทำให้ร้อยละการกำจัดฟอสเฟตมีค่าเพิ่มจาก 78.9 เปอร์เซ็นต์ เป็น 84.4, 87.3, 87.7, 92.7, 94.0 และ 96.4 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณของถ่านชีวภาพตัดแปรด้วย  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  จาก 0.1 เป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 2.0 กรัม ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสเฟต มีค่าเพิ่มจาก 52.4 เปอร์เซ็นต์ เป็น 65.6, 70.8, 74.9, 81.2, 82.4 และ 95.6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพตัดแปรด้วย  $Mg^{2+}$  จาก 0.1 กรัม เป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 0.2 กรัม ส่งผลให้ร้อยละการกำจัดฟอสเฟต มีค่าเพิ่มจาก 67.2 กรัม เป็น 74.8, 82.5, 84.3, 85.3, 85.7 และ 88.9 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณวัสดุที่ใช้จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับ ในขณะที่การเพิ่มถ่านชีวภาพ จาก 0.1 กรัม เป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 2.0 กรัม ไม่ทำให้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนกับวัสดุที่ผ่านการตัดแปรทั้ง 3 ชนิด แสดงให้เห็นว่าการตัดแปรพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพด้วยไอออนของโลหะจะช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ ทำการศึกษาการเตรียมถ่านชีวภาพจากฟางข้าวให้เป็นวัสดุดูดซับที่มีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตพร้อมทั้งศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตของถ่านชีวภาพด้วยการเติมโอออนของเหล็กและแมกนีเซียมลงบนพื้นผิวหรือโครงสร้างของวัสดุ

1. ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิขณะไพโรไลซิสต่อสมบัติของถ่านชีวภาพในผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุคงตัว (SOM) และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (M.B.N.) โดยอุณหภูมิที่ทำการศึกษา ได้แก่ 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพ คือ การเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวจะทำให้ถ่านชีวภาพที่ได้มีปริมาณอินทรีย์วัตถุคงตัว (SOM) เท่ากับ 24.61 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิในการเผาอื่นๆ และมีค่า M.B.N ของถ่านเท่ากับ 89.29 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่นๆ เช่นเดียวกัน

2. ผลการศึกษากการเติมเหล็กและแมกนีเซียมลงในถ่านชีวภาพต่อสมบัติของถ่านชีวภาพดัดแปรด้วยวิธีการทำให้ตกตะกอน โดยเปรียบเทียบชนิดของสารเคมีที่ใช้ 3 รูปแบบคือ สารละลายผสม  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ , สารละลาย  $Fe^{3+}$  และสารละลาย  $Mg^{2+}$  พบว่าถ่านชีวภาพดัดแปรที่เตรียมได้มีโอออนของเหล็กและแมกนีเซียมไปยึดที่พื้นผิวจึงจะเห็นได้จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM ของวัสดุมีพื้นผิวขรุขระขึ้น ผลการวิเคราะห์ FT-IR พบความเข้มของพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $440 - 550\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นแถบการยึดของพันธะ Fe-O และความเข้มของพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $3,700\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นแถบการยึดของพันธะ Mg-O นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุด้วยเทคนิค XRF และการวิเคราะห์ความเข้มข้นที่เหลือของ Fe และ Mg ด้วยเทคนิค AAS ยังช่วยยืนยันการดูดติดของเหล็กและแมกนีเซียมที่พื้นผิวของถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $Fe^{3+}$ , ถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  และถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $Mg^{2+}$  ที่เตรียมได้มีค่า  $pH_{pzc}$  เท่ากับ 8.31, 8.35 และ 9.71 วัสดุจึงมีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำที่มีค่าพีเอชน้อยกว่าค่า  $pH_{pzc}$  ได้

3. ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำพบว่า ถ่านชีวภาพดัดแปรด้วยเหล็กและแมกนีเซียมมีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ดีกว่าถ่านชีวภาพก่อนการดัดแปร โดยการกำจัดฟอสเฟตเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว การเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพดัดแปรที่ใช้ช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดฟอสเฟต โดยถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $Fe^{3+}$  สามารถกำจัดฟอสเฟตได้เท่ากับ 84.00 เปอร์เซ็นต์, ถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ 71.47 เปอร์เซ็นต์ และถ่านชีวภาพดัดแปรด้วย  $Mg^{2+}$  สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ 62.93 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ฟอสเฟตปริมาณ 2.5 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นควรทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่บอกถึงสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น
2. การนำถ่านชีวภาพไปทำการตัดแปร करना เข้าที่ผสมกับถ่านชีวภาพออกเพื่อจะได้ไม่ส่งผลถึงความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำ
3. ควรศึกษาการนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วมาใช้ให้เป็นประโยชน์หรือทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับว่าสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือไม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงพลังงาน. 2555. โครงการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเอทานอลจากเซลลูโลสเชิงพาณิชย์. [Online]. Available : <http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/Final%20Report.pdf>.
- กระทรวงพลังงาน. 2556. รายงานสถิติพลังงานประจำปี. [Online]. Available : <http://www.pagemakerth.com/eppostat2018/#p=3>.
- กระทรวงพลังงาน. 2558. โครงการการพัฒนาแนวทางการผลิตและประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากวัสดุการเกษตรเพื่อเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหิน. [Online]. Available : [http://www.erd.cmu.ac.th/download/Pyrolysis\\_ERDI\\_CMU.pdf](http://www.erd.cmu.ac.th/download/Pyrolysis_ERDI_CMU.pdf).
- กระทรวงพาณิชย์. 2560. สรุปสถานการณ์ส่งออกข้าวไทยปี 2660 และแนวโน้มและทิศทางการส่งออกข้าวไทยปี 2561. [Online]. Available : <http://www.thairiceexporters.or.th>.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2547. คู่มือวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วิสดปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. กรุงเทพฯ : สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2553. การจัดการคุณภาพน้ำ. [Online]. Available : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/water.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/water.html).
- กลุ่มระบบงานวิจัย กองแผนงาน กองแผนงานร่วมกับกลุ่มวิจัยและพัฒนาอินทรีย์วัตถุเพื่อการเกษตร สำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน. 2560. การไกล่เกลี่ยข้อขัดแย้งเพื่อปรับปรุงดินและเพิ่มผลผลิตข้าว. [Online]. Available : [http://www.ldd.go.th/menu\\_moc/POSTER/rice/rice.htm](http://www.ldd.go.th/menu_moc/POSTER/rice/rice.htm).
- กัณฑ์พัฒน์ กลีบตุร. 2558. “การเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกกล้วยปรีดเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- กันยาพร ไชยวงศ์ และสิทธิบุรณ์ ศิริพรอัครชัย. 2559. “การวิเคราะห์พารามิเตอร์การผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า.” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 23(1): 85-92.
- กุลนันท์ วีรณรงค์ และอมรชัย อภรณ์วิชานพ. 2558. ไพโรไลซิส (Pyrolysis). [Online]. Available : [http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownload5/tn241\\_p6-64.pdf](http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownload5/tn241_p6-64.pdf).
- เกศศิริ เหล่าวัชรสุวรรณ. 2551. “การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของกัมมันต์ที่เตรียมจากฟางข้าว แกลบ และชานอ้อย โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสเฟอริก.” *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย*. 28(4): 84-98.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จตุพร โทงว่ง, ธิรัตน์ จรัสกุล และสุธาสินี บุญสถิตย์. 2545. “การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผักขวา โสน และบอน.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จุฑามาส เรืองยศจันทนา และรัชฎา บุญเต็ม. 2560. “การสกัดเซลลูโลสและการทำกระดาษจากเปลือกข่อย.” *วารสารสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 3(4): 50-59.

ณัฐพร ชัชวาลชาติ. 2559. “การปรับสภาพฟางข้าวด้วยต่างและไมโครเวฟร่วมกับค้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ทิวา ตันสถิตย์, สุธรรม โรจนเมฆา และธรรมกร เทพวงษ์. 2559. “การผลิตไบโอชาร์จากตอซังและฟางข้าวเพื่อการอุ้มน้ำในดิน.” *วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์*. 1: 401-410.

ธวัชชัย ศรีวิบูลย์. 2551. *เทคนิคการแยก*. [Online]. Available : <https://e-book.ram.edu/ebook/inside/html/dlbook.asp?code=CM334>.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2530. *น้ำเสียชุมชนและปัญหามลภาวะทางน้ำในเขตกรุงเทพมหานคร*. กรุงเทพฯ : สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

นิสาพร มุหะมัด, สมภพ เกาทอง, อุบล ตันสม และปิยศิริ สุนทรนนท์. 2559. “การดูดซับสีด้วยกากขี้.” รายงานวิจัยสาขาวิชาเคมี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและการเกษตร : มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.

ภุชงค์ ศรีหليل. 2558. “การศึกษาการดูดซับมีเทนและไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์ที่มีนิกเกิลพื้นผิวโดยแบบจำลองมอนติคาร์โล.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่. 2560. *คุณค่ามหาศาลของฟางข้าว*. [Online]. Available : <https://www.svgroup.co.th>.

มันสิน ตันตุลเวศม์ และมันรัช ตันตุลเวศม์. 2545. *เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย*. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มูลนิธิเกษตรกรรักษาสีสิ่งแวดล้อม. 2553. *ข้าว*. [Online]. Available : <http://www.aecth.org>

ยาโก๊ะ ขาเริ่มตาเบะ. 2553. “การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยทักษิณ.

รัตนกร ยวงสวัสดิ์, วลัยรัตน์ จันทรอัมพร และดวงกมล ณ ระนอง. 2554. “การเตรียมวัสดุดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารจากเปลือกข่อยเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย.” *วิศวกรรมลาดกระบัง*. 28(4): 31-37. ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ริกาญจน์ ฉัตรสกุลวิไล. 2541. ลิกนิน-แทนนิน. [Online]. Available : [www2.diw.go.th/research/เอกสารเผยแพร่/ลิกนิน.pdf](http://www2.diw.go.th/research/เอกสารเผยแพร่/ลิกนิน.pdf).
- วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2558. “ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ.” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- วสันต์ ธีระพิทยานนท์. 2556. ผลกระทบของฟอสฟอรัสต่อสิ่งแวดล้อม. [Online]. Available : <https://www.dss.go.th/images/st-article/pep-12-2556-impact-envi-pdf>.
- วีรียา วิริยะเชชม. 2550. “การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วุฒิพล พิศปั้น. 2557. ชาวไทย : ความสำคัญต่อเศรษฐกิจ สังคม และการเมือง. [Online]. Available : [http://nukezminoz.blogspot.com/2014/11/blog-post\\_17.html](http://nukezminoz.blogspot.com/2014/11/blog-post_17.html).
- ศิริกาญจนา มี, ตรีนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ และสุพรรณิ จันทร์ภิมย์ 2559. “การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขานอ้อยเพื่อดูดซับโลหะหนัก.” กรุงเทพฯ : คณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- ศิริลักษณ์ ศิริสิงห์ และอรสา สุกสว่าง. 2556. “การประยุกต์ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเพื่อการเกษตร.” *วารสารสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์*. 39(2): 212-225.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2559. ถ่านไม้ไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์. [Online]. Available : <http://stemforlife.ipst.ac.th/2016/02/09/charcoal>.
- สุรีวัลย์ สิทธิจินดา. 2559. โครงสร้างลิกนิน. [Online]. Available : <http://www.namrata.co/wp-content/uploads/2012/04/D3.bmp>
- เสาวภา ไวยสุศรี. 2558. “การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่.” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 26(3): 475-486.
- อุดมศรี ทรัพย์เจริญกุล. 2554. “การเตรียมเซลล์ูโลสฟอสเฟตที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ สูงจากขานอ้อยและศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของวัสดุดังกล่าว.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์. 2558. “การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของเปลือกสับปะรดเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย.” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์คณะวิทยาศาสตร์ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ASTM International ASTM D-1762-84. 2007. *Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal*. ASTM International 1-2, West Conshohocken.
- Aziz, N., Nor, M., Mannaf, S., and Hamzan, F. 2015. "Suitability of Biodhar Produced from Biomass Waste as Soil Amendment." *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 195: 2457-2465.
- Bruun, E.W. 2011. "Application of biochar to soil and N<sub>2</sub>O emissions: potential effects of blending fast-pyrolysis biochar with anaerobically digested slurry." *European Journal of Soil Science*. 62(4): 581-589.
- Hafshejani, L.D., Hooshmand, A., Naseri, A.A., Mohammadi, A.S., Abbasi, F., and Bhatnagar, A. 2016. "Removal of nitrate from aqueous solution by modified sugarcane bagasse biochar." *Ecological Engineering*. 95: 101-111.
- Hart, M.R., Quin, B.F., and Nguyen, M.L. 2004. "Phosphorus Runoff from Agricultural Land and Direct Fertilizer Effects." *Journal of Environmental Quality*. 33: 1954-72.
- Hegyesi, N., Richard, T., and Pukanszky, B. 2017. "Determination of the Specific Surface Area of layered Silicates by Methylene Blue Adsorption: The role of structure, pH and layer charge." *Applied Clay Science*. 146: 50-55.
- Henning, K.D., and Schafer, S. 2007. "Impregnated Activated Carbon for Environmental Protection." *Gas Separation & Purification*. 7(4): 235-240.
- Kim, J. 2008. "Lignocellulose based anion adsorption medium and process for marking and using same for the selective removal of phosphate and arsenic anionic contaminations from aqueous solution." *Patent application publication*. 11: 906-954.
- Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., and Crowley, D. 2011. "Biochar effects on soil biota a review." *Soil Biology & Biochemistry*. 43: 1812-1836.
- Nasuha, N. and Hameed, B.H. 2011. "Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution on to NaOH-modified Rejected Tea." *Chemical engineering Journal*. 166: 783-786.
- Phyllis. 2561. *Element that is a component of rice straw*. [Online]. Available: [www.ecn.nl/phyllis](http://www.ecn.nl/phyllis).

Pradthana P. 2551. *กระบวนการในการดูดซับ (Adsorption Process)*. [Online]. Available: --

<https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process> -- โยชนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Rafiq, M., Bachmann, R., Rafiq, M., Shang, Z., Joseph, S., and Long, R. 2016. Influence of Pyrolysis Temperature on Physico-Chemical Properties of Corn Stove (*Zea mays L.*) Biochar and Feasibility for Carbon Capture and Energy Balance. *National Natural Science Foundation of China.*: 1-17.
- Singh, U. and Kaushal, R.K. 2013. "Treatment of wastewater with lost cost adsorbent (review)." *International Journal of Technical and Non-Technical Research.* 4(3): 33-42.
- Vikrant, K., Kim, K., Sik Ok, Y., C.W.Tsang, D., Tsang, Y.F., ShekharGiri, B., Singh, R.S., 2018. "Engineered/designer biochar for the removal of phosphate in water and wastewater." *Science of The Total Environment.* 616–617: 1242-1260.
- Wang, Z., Shen, D., Shen, F., and Li, T. 2016. "Phosphate adsorption on lanthanum loaded Biochar." *Chemosphere.* 150: 1-7.
- Yang, E., Kim, K., Runess, J., and Boo, S. 2004. "Morphology and Molecular Phylogeny of *Phlothallia dentata* (Ceramiaceae, Rhodophyta)." *Algae.* 19(4): 283-292.
- Yang, Q., Wang, X., Luo, W., Sun, J., Xu, Q., Chen, F., Zhao, J., Wang, S., Yao, F., Wang, D., Li, X., and Zeng, G. 2018. "Effectiveness and mechanisms of phosphate adsorption on iron-modified biochars derived from waste activated sludge." *Bioresour. Technol.* 247: 537-544.
- Yuan, C., Rao, R.P., Jesmin, N., Bamba, T., Nagashima, K., Pascual, A., Preat, T., Fukusaki, E., Acharya, U., and Acharya, J.K. 2011. CDase is a pan-ceramidase in *Drosophila*. *Mol. Biol. Cell.* 22(1): 33-43.
- ข้าวกับสถาบันพระมหากษัตริย์. 2560. ข้าว. [Online]. Available : <http://www.aecth.org>.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2551. เซลลูโลส. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org>.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2560. เฮมิเซลลูโลส. [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Hemicellulose>.
- เว็บเพื่อพิชการเกษตร. 2560. ฟางข้าวและประโยชน์จากฟางข้าว. [Online]. Available : <https://puechkaset.com>.
- Food Network Solution. 2551. Cellulose. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose>.
- MINOZ : ZEKUN. 2557. ข้าวไทย:ความสำคัญต่อเศรษฐกิจ สังคม และการเมือง. [Online]. Available : [http://nukezminoz.blogspot.com/2014/11/blog-post\\_17.html](http://nukezminoz.blogspot.com/2014/11/blog-post_17.html).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Money2Know. 2560. ไตรมาสแรกปี 61 ไทยยังคงแชมป์ส่งออกข้าว 'เบนิิน' นำเข้าข้าวไทยมากที่สุด. [Online]. Available : <https://money2know.com/ส่งออกข้าวไทย>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า.  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

#### ก 1 การทดสอบความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number; M.B.N.)

เป็นการทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาความสามารถสูงสุดในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ 1 กรัม ซึ่งปรับใช้ตามวิธีของ Nunes และ Guerrero, (2011) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการโดยสรุปดังนี้

1. ชั่งถ่านชีวภาพมาอย่างละ 0.01 กรัม ใส่ลงในสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 10, 25, 50, 100, 250, และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบแนวอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
3. กรองถ่านชีวภาพออกจากสารละลายเมทิลีนบลูด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรอง whatman เบอร์ 42
4. ทำการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลูที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร
5. คำนวณหาค่าความจุการดูดซับเมทิลีนบลู

การคำนวณ

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{M} \times V$$

เมื่อ  $Q_e$  = ความจุในการดูดซับ (mg/g)

$C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู (mg/L)

$C_e$  = ความเข้มข้นที่เหลือของเมทิลีนบลูที่เวลาสมดุล (mg/L)

$V$  = ปริมาตรสารละลายเมทิลีนบลู (L)

$M$  = จำนวนตัวดูดซับที่ใช้ (g)

#### ก 2 การทดสอบความสามารถในการดูดซับสารละลายออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate)

การวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำด้วยเทคนิคการทำให้เกิดสีโดยวิธี Ascorbic acid

วิเคราะห์ตามวิธีของ APHA, AWWA and WEF, (1995) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการโดยสรุปดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก 2.1 การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟอสเฟตด้วยวิธี Ascorbic acid

### 1. การเตรียมน้ำยารวม (Combined reagent)

ผสมน้ำยาเคมีในสัดส่วนสำหรับ 100 mL โดยผสมสารละลาย ดังนี้

กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 นอร์มัล	ปริมาตร	50	มิลลิลิตร
สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต	ปริมาตร	15	มิลลิลิตร
สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาทเรต	ปริมาตร	5	มิลลิลิตร
กรดแอสคอร์บิก	ปริมาตร	30	มิลลิลิตร

ก่อนผสมให้ทั้งสารละลายแต่ละชนิดไว้จนได้อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำมาผสมกันตามลำดับ โดยต้องผสมให้เข้ากันทุกครั้งเมื่อเติมส่วนผสมแต่ละชนิด หลังจากเติมสารละลายลงไป ถ้าชุ่นให้เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 2-3 นาที จนสารละลายใสจึงนำไปใช้ สารละลายรวมนี้จะคงตัวอยู่ได้ 4 ชั่วโมงและถ้าเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะคงตัวอยู่อย่างน้อย 1 สัปดาห์

### 2. การเตรียมสารละลายสต็อกฟอสเฟต

ละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  จำนวน 219.5 mg (หรือ 0.2195 g) ในน้ำกลั่นจำนวนพอเหมาะแล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรเป็น 1,000 mL หรือ 1 L (สารละลายนี้ 1 mL จะมีปริมาณฟอสฟอรัส 50 ไมโครกรัม)

### 3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

นำสารละลายจากข้อ 2 (สารละลายสต็อกฟอสเฟต) มาจำนวน 50 mL เจือจางด้วยน้ำกลั่นแล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรเป็น 1,000 mL (สารละลายนี้ 1 mL จะมีปริมาณฟอสฟอรัส 2.5 ไมโครกรัม)

## ก 2.2 การวิเคราะห์ฟอสเฟตด้วยวิธี Ascorbic acid

1. เตรียมกราฟมาตรฐานจากสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต (1 มิลลิลิตร = 2.5 ไมโครกรัมฟอสเฟต) ดังตารางที่ ก 1

2. ปิเปตน้ำตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร หยดฟีนอลฟาทาลินอินดิเคเตอร์ 1 หยด (ถ้าเป็นสีแดงให้เติมกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  เข้มข้น 5.0 นอร์มัล ทีละหยดจนสีแดงหายไป)

3. นำน้ำตัวอย่างมา (ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำ) ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำยารวมปริมาตร 8 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปรับปริมาตร

4. เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที (แต่ไม่เกิน 30 นาที) และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณ

$$\text{ฟอสเฟต (mg-P/L)} = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้จากกราฟ (\mu\text{g})}}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (mL)}}$$

ตารางที่ ก 1 การเตรียมกราฟมาตรฐานฟอสเฟต

สารละลาย มาตรฐาน ฟอสเฟต (mL)	น้ำยารวม (mL)	น้ำกลั่น (mL)	ปริมาตรรวม (mL)	ความเข้มข้นของ ฟอสเฟต (mg/mL)
0	8	42	50	0
2	8	40	50	0.1
6	8	36	50	0.3
10	8	32	50	0.5
16	8	26	50	0.8
24	8	18	50	1.2

## ก 3 การวิเคราะห์ปริมาณการสูญเสียหลังเผา (Loss on ignition; LOI)

เป็นการศึกษาการสูญเสียน้ำหนักของสารอินทรีย์ร่วมกับปริมาณน้ำในโครงสร้างที่สลายตัวไปเมื่ออุณหภูมิสูง ตามวิธี ASTM method, (D-1762-84) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการโดยสรุปดังนี้

- นำถ่านชีวภาพที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มาชั่งน้ำหนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ลงในถ้วยเซรามิกที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน
- นำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง (ทิ้งให้เย็นจนอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิภายนอก) จากนั้นนำถ่านชีวภาพที่ได้ไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง
- ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนตัวอย่างถ่านชีวภาพที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็น 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
- นำมาคำนวณหาปริมาณการสูญเสียหลังเผา

## การคำนวณ

$$\text{LOI} = \frac{\text{น้ำหนักถ่านชีวภาพ (g)} - \text{น้ำหนักถ่านชีวภาพหลังเผา (g)}}{\text{น้ำหนักถ่านชีวภาพ (g)}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ก 4 การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของผลผลิต (%yield)

1. ชั่งตัวอย่างฟางข้าวประมาณ 25 กรัม ใส่ในถ้วยเซรามิกที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน
2. นำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง (ทิ้งให้เย็นจนอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิภายนอก) จากนั้นนำถ่านชีวภาพที่ได้ไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง
3. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-2 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิที่ศึกษาจากอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็น 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
4. นำมาคำนวณหาปริมาณร้อยละของผลผลิต

#### การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของผลผลิต (\% yield)} = \frac{\text{ผลผลิตที่แท้จริง}}{\text{ผลผลิตตามทฤษฎี}} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ \%yield} &= \text{ร้อยละของผลผลิต} \\ \text{ผลผลิตที่แท้จริง} &= \text{น้ำหนักฟางข้าวก่อนเผา (g)} \\ \text{ผลผลิตตามทฤษฎี} &= \text{น้ำหนักฟางข้าวหลังเผา (g)} \end{aligned}$$

#### ก 5 การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ถูกออกซิไดส์ (Oxidizing organic content; OC)

เป็นวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนโดยการใช้ออกซิเดชันทำให้เกิดปฏิกิริยา oxidation กับคาร์บอนในอินทรีย์วัตถุ แล้วจึงคำนวณปริมาณคาร์บอนในอินทรีย์วัตถุจากปริมาณของสารเคมีที่ใช้ไปปฏิกิริยา โดยคูณกับ “Van Bemmelen factor” ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.724 โดยปรับใช้ตามวิธี Wet oxidation ของ Walkley+black 1947. อ้างถึงในกรมพัฒนาที่ดิน, 2547 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการโดยสรุปดังนี้

1. ชั่งตัวอย่างถ่านชีวภาพที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ประมาณ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปตสารละลาย  $K_2Cr_2O_7$  เข้มข้น 1.0 นอร์มัล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แล้วแกว่งเบาๆ เพื่อให้สารละลายเข้ากัน
3. เติม conc.  $H_2SO_4$  15 มิลลิลิตร โดยเร็วและแกว่งขวดรูปชมพู่ ประมาณ 1 นาที ตั้งทิ้งไว้อีกประมาณ 30 นาที (ถ้าพบว่าสารละลายตัวอย่างเป็นสีเขียวก่อนไทเทรต แสดงว่ามีสารอินทรีย์อยู่มาก ควรทำการวิเคราะห์ใหม่ โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างให้น้อยกว่าเดิม)
4. เติมน้ำกลั่นลงไป 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นเท่ากับอุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. หยด BDS อินดิเคเตอร์ ประมาณ 3-4 หยด สีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงปนน้ำเงิน ถ้าใช้ O-phenanthroline เป็นอินดิเคเตอร์ สีของสารละลายจะเป็นสีเขียว

6. ไทเทรตสารละลายด้วยเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จนสารละลายเปลี่ยนจากสีแดงอิฐเป็นสีเขียวใส (ใช้ BDS เป็นอินดิเคเตอร์) หรือเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง (ใช้ O-phenanthroline เป็นอินดิเคเตอร์)

7. ทำ blank ซึ่งไม่มีตัวอย่างถ่านชีวภาพที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แต่เติมสารเคมีต่างๆ เหมือนกัน และทำควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ตัวอย่างฟางข้าว ใช้เป็น Method Blank

8. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-7 โดยเปลี่ยนตัวอย่างถ่านชีวภาพที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นถ่านชีวภาพที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส

#### การคำนวณ

$$\% \text{ Organic carbon} = \frac{(B-T)N \times 100 \times 3 \times 100 \times 10}{B \times 77 \times 10^3 \times W}$$

เมื่อ N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมท (นอร์มัล)

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับ blank (mL)

T = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับตัวอย่าง (mL)

W = น้ำหนักตัวอย่าง (g)

#### ก 6 การหาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge; $\text{pH}_{\text{pzc}}$ )

การศึกษาการหาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ นั้นหมายถึงค่าความเป็นกรด-เบสที่ทำให้ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลาง หรือประจุรวมที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์ เพื่อชี้ค่าความเป็นประจุที่ผิวของวัสดุดูดซับ ตามวิธี pH drift method ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการโดยสรุปดังนี้

1. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร

2. ปรับ pH ของสารละลายเป็น 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

3. เมื่อปรับ pH ได้ตามต้องการแล้วจึงใส่ถ่านชีวภาพตัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  ปริมาณ 0.15 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่แล้วปิดฝาขวดให้สนิท

4. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบแนวอนที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัด pH หลังจากการเขย่าอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (pH<sub>i</sub>) และความเป็นกรด-เบสสุดท้าย (pH<sub>f</sub>) โดยประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จากผลต่างของความเป็นกรด-เบสสุดท้ายกับความเป็นกรดเบสเริ่มต้นตัดกับเส้นความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น

6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วย  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  เป็น  $\text{FeCl}_3$  และ  $\text{MgCl}_2$  ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 1 การวิเคราะห์ค่า Methylene Blue Number ของผลผลิตถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (c°)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักตัวอย่าง (g)			ความเข้มข้นเมทิลีนบลูเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่เหลือ (mg/L)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
300	24	0.0104	0.0123	0.0109	1.6739	6.8035	7.6137	15.9827	12.743	15.4428
		0.0106	0.0109	0.0106	15.7127	24.0821	22.4622	9.7732	8.9633	10.3132
		0.0104	0.0118	0.0113	30.2916	36.7711	38.9309	10.8531	9.5032	8.9633
		0.0113	0.0116	0.0102	67.5486	64.0389	62.959	10.5832	10.0432	13.2829
		0.0102	0.0112	0.0100	233.5853	233.5853	224.1361	8.9633	9.5031	8.9633
		0.0107	0.0105	0.0115	446.8668	454.1577	454.4276	15.7127	15.7127	17.8726
400	24	0.0120	0.0106	0.0104	13.2829	18.9525	16.5227	2.7538	0.3240	8.6933
		0.0100	0.0101	0.0103	28.1317	25.7019	25.1620	0.8639	0.5940	7.8834
		0.0114	0.0108	0.0107	57.5594	50.2700	47.0302	8.6933	1.1339	8.4233
		0.0104	0.0115	0.0122	100.4860	105.8855	117.2246	11.3931	7.6134	14.0929
		0.0119	0.0113	0.0112	263.8229	270.0324	273.8121	5.4536	2.7538	15.4428
		0.0100	0.0118	0.0116	514.9028	501.9438	473.5961	5.1836	3.56637	10.5832

ตารางที่ ข 1 (ต่อ)

อุณหภูมิ (c°)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักตัวอย่าง (g)			ความเข้มข้นเมทธิลินบลูเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นเมทธิลินบลูที่เหลือ (mg/L)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
500	24	0.0105	0.0106	0.0125	5.4595	10.3132	11.3931	1.6739	2.4838	2.2138
		0.0113	0.0107	0.0100	11.6631	12.2030	14.0929	5.9935	6.2635	8.9633
		0.0108	0.0122	0.0116	41.6307	39.7408	35.4212	10.3132	8.9633	2.7538
		0.0101	0.0121	0.0101	75.3780	79.6976	74.8380	3.5637	2.7538	1.4039
		0.0108	0.0101	0.0102	195.7883	206.3175	210.6371	5.9935	4.3737	4.3737
		0.0102	0.0108	0.0111	453.6618	463.6069	443.6285	7.3434	5.9935	1.6739
600	24	0.0112	0.0114	0.0107	5.1836	11.3931	15.7127	4.1037	6.5335	7.8834
		0.0112	0.0104	0.0115	14.3629	20.0324	16.5227	7.0734	7.6137	6.2635
		0.0104	0.0111	0.0112	39.7408	38.3909	36.2311	9.5032	7.6134	7.0734
		0.0121	0.0112	0.0123	70.5184	85.6371	82.3974	14.092	7.8834	6.2635
		0.0103	0.0118	0.0100	234.3952	226.2959	235.2052	6.5335	14.0929	15.4428
		0.0105	0.0103	0.0105	496.5443	490.6048	476.2959	9.2333	9.2333	11.6631

## การคำนวณ

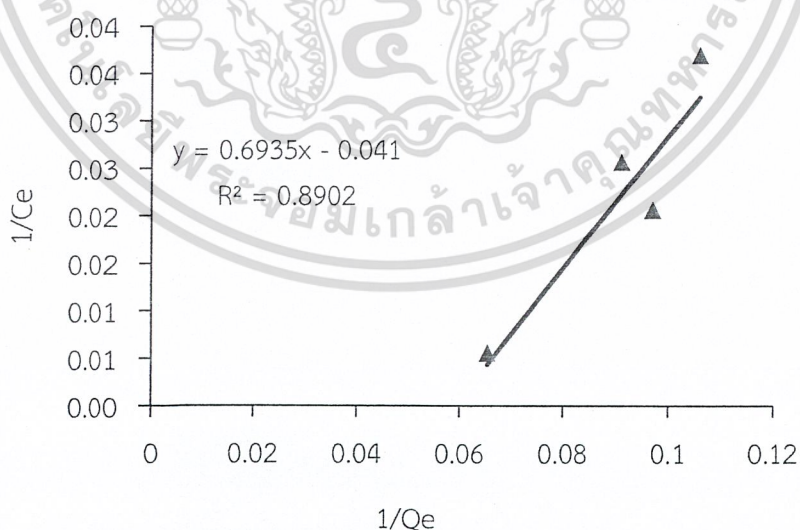
ตัวอย่างการคำนวณค่า Methylene Blue Number ของถ่านชีวภาพที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยซึ่ง 0.0107 g (M) แซ่ในสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C_0$ ) เท่ากับ 20.7523 mg/L ปริมาตร 10 mL (V) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองถ่านชีวภาพออกแล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่คงเหลือ ( $C_e$ ) ได้เท่ากับ 9.3499 mg/L แล้วนำมาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู ( $Q_e$ ) ของถ่านชีวภาพด้วยสมการ

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{M} \times V$$

$$Q_e = \frac{(20.7523 \text{ mg/L} - 9.3499 \text{ mg/L})}{0.0107 \text{ g}} \times 0.01 \text{ L}$$

$$Q_e = 10.66 \text{ mg/g}$$

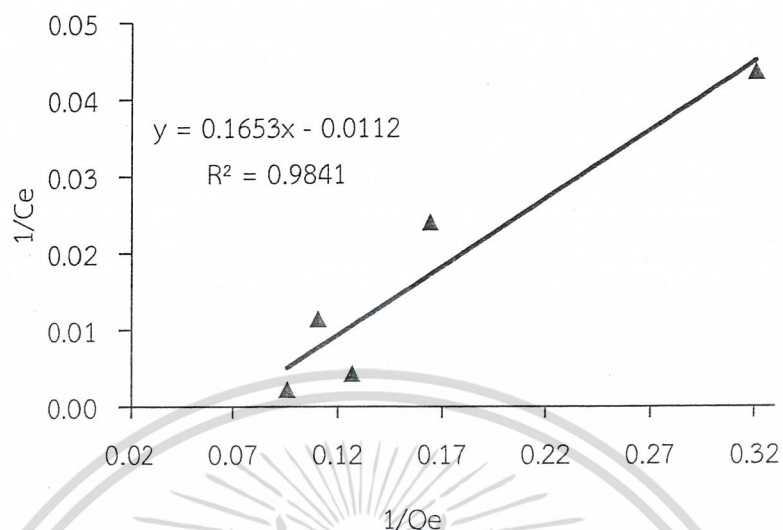
ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูจาก 25 mg/L เป็น 50, 100, 250 และ 500 mg/L จากนั้นพลอตกราฟเส้นตรงระหว่างค่า  $1/C_e$  กับค่า  $1/Q_e$  จะได้กราฟดังรูปที่ 1 โดยส่วนกลับของจุดตัดแกน y ของกราฟจะเป็นค่าความจุสูงสุดในการดูดซับเมทิลีนบลู ( $Q_m$ ) หรือค่า Methylene Blue Number ซึ่งมีค่าเท่ากับ mg/L



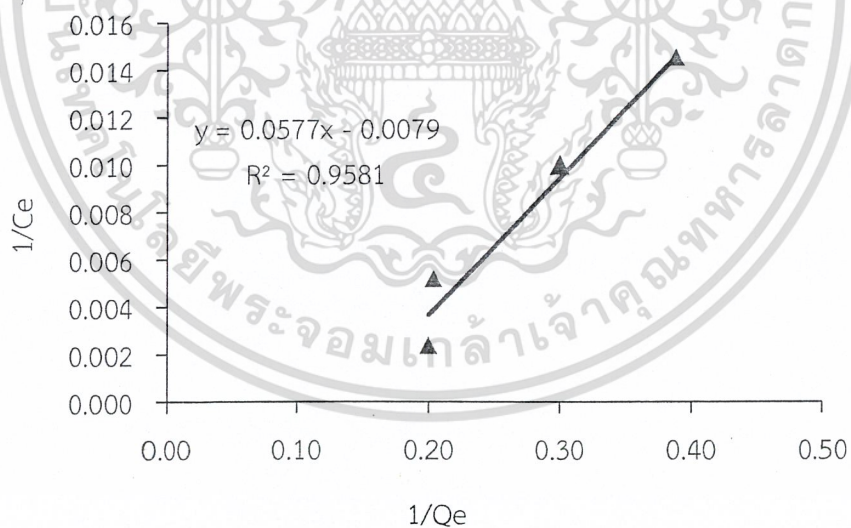
รูปที่ 1 กราฟเส้นตรง Methylene Blue Number ของถ่านชีวภาพ

ที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

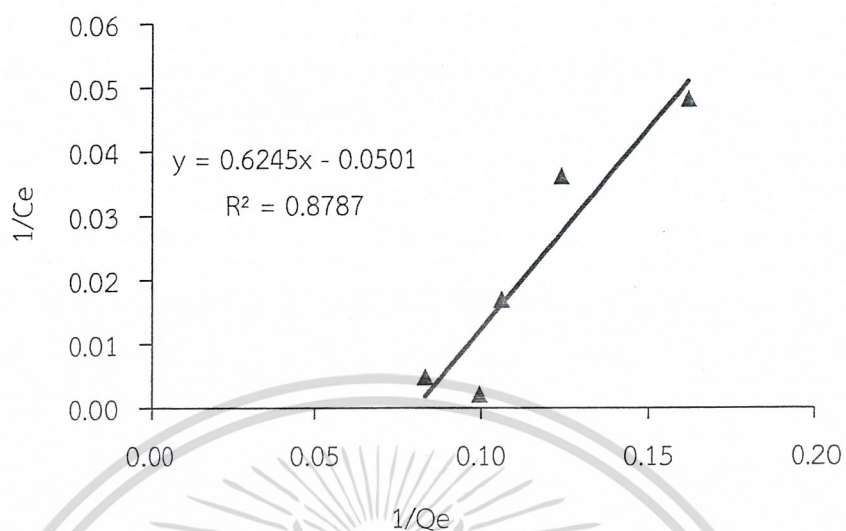


รูปที่ ๒ กราฟเส้นตรง Methylene Blue Number ของถ่านชีวภาพ  
ที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ ๓ กราฟเส้นตรง Methylene Blue Number ของถ่านชีวภาพ  
ที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

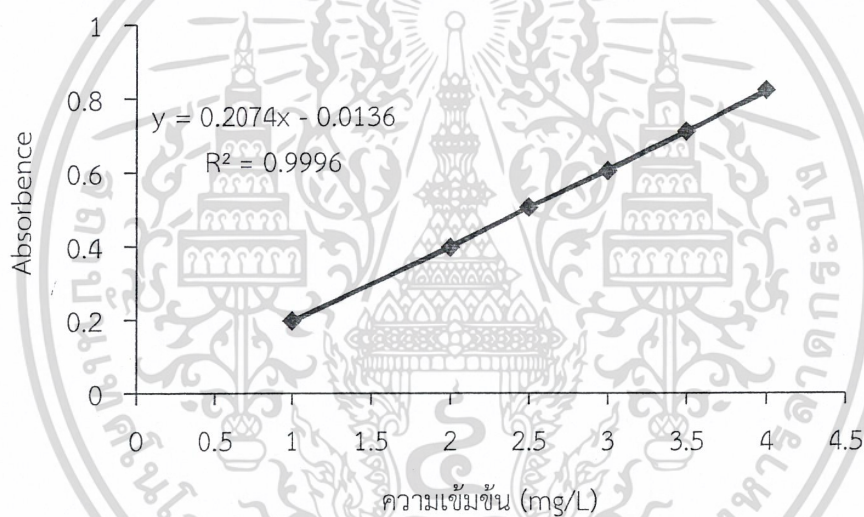


รูปที่ ข 4 กราฟเส้นตรง Methylene Blue Number ของถ่านชีวภาพ  
ที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทธิซีนบลู (M.B.N)

ความเข้มข้น M.B.N (mg/L)	Absorbance
1.0	0.1980
2.0	0.3970
2.5	0.5060
3.0	0.6040
3.5	0.7100
4.0	0.8220



รูปที่ ข 5 กราฟมาตรฐานเมทธิซีนบลู (M.B.N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 3 การวิเคราะห์ปริมาณของธาตุเฟอร์รัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ), เฟอร์ริก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ในการดัดแปรถ่านชีวภาพ

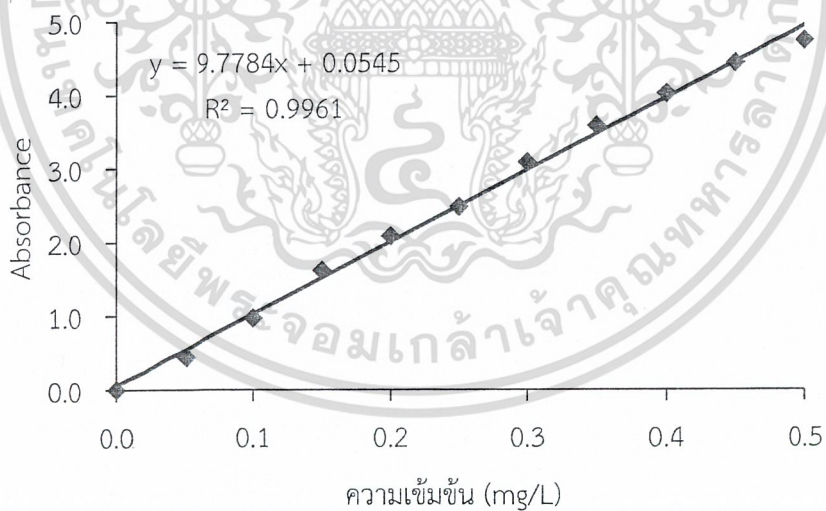
ชนิด ตัวอย่าง	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$	4.0160	4.1000	4.0740	2.1560	1.9680	1.9215
$\text{FeCl}_3$	4.0160	3.0500	3.0180	1.0115	1.0122	1.0108
$\text{MgCl}_2$	0.3380	0.3520	0.3640	0.0080	0.0080	0.0080



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานเหล็ก

ความเข้มข้น (mg/L)	Absorbance
0.00	0.00
0.05	0.44
0.10	0.97
0.15	1.62
0.20	2.09
0.25	2.49
0.30	3.09
0.35	3.59
0.40	4.02
0.45	4.44
0.50	4.74

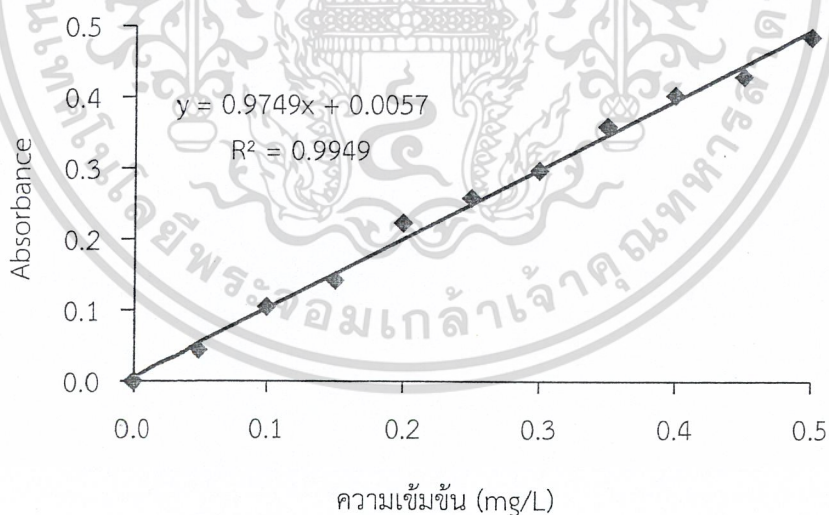


รูปที่ ข 6 กราฟมาตรฐานของเฟอร์รัส/เฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 5 ค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานแมกนีเซียม

ความเข้มข้น (mg/L)	Absorbance
0.00	0.00
0.05	0.04
0.10	0.11
0.15	0.14
0.20	0.22
0.25	0.26
0.30	0.30
0.35	0.36
0.40	0.40
0.45	0.43
0.50	0.48



รูปที่ ข 7 กราฟมาตรฐานของแมกนีเซียมไอออน ( $Mg^{2+}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 6 ผลการทดสอบการแปรผันระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

ชนิดตัวดูดซับ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักตัวอย่าง (g)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ถ่านชีวภาพที่ไม่ผ่านการดัดแปร	1	0.1016	0.1041	0.1013	2.2963	2.2668	2.8414	1.4215	1.4547	1.4250
	2	0.1178	0.1073	0.1090	2.4458	2.4546	2.3988	1.5100	1.4900	1.3900
	4	0.1089	0.1101	0.1054	2.4221	2.4580	2.4615	1.5600	1.5900	1.6300
	6	0.1086	0.1013	0.1041	2.3030	2.3100	2.3928	1.5400	1.4100	1.4800
	8	0.1004	0.1041	0.1122	2.2665	2.4510	2.3705	1.5700	1.4500	1.5000
	12	0.1009	0.1034	0.1013	2.2185	2.2201	2.2380	1.6500	1.6700	1.6800
	24	0.1171	0.1017	0.1068	2.3036	2.2916	2.4223	1.5100	1.4600	1.4000
ถ่านชีวภาพที่ผ่านการดัดแปรด้วย Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup>	1	0.1014	0.1011	0.1001	2.3785	2.3685	2.2674	0.9300	0.8900	0.9200
	2	0.1010	0.1005	0.1013	2.4033	2.4190	2.4532	0.9500	1.0100	1.0600
	4	0.1009	0.1025	0.1002	2.4152	2.4242	2.3991	0.8900	0.9300	0.9000
	6	0.1007	0.1012	0.1007	2.1594	2.1113	2.4020	0.9700	0.9700	1.0100
	8	0.1050	0.1025	0.1008	2.2635	2.2453	2.2310	0.9500	0.8700	0.9400
	12	0.1053	0.1019	0.1011	2.3744	2.4077	2.2960	0.9000	0.8600	0.9600
	24	0.1139	0.1034	0.1015	2.4871	2.4289	2.2180	0.7324	0.7216	0.7163

ตารางที่ ข 6 (ต่อ)

ชนิดตัว ดูดซับ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักตัวอย่าง (g)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ถ่าน ชีวภาพ ที่ผ่าน การตัด แปรด้วย FeCl <sub>3</sub>	1	0.1003	0.1019	0.1014	2.3061	2.2662	2.3000	1.0600	1.0100	0.9100
	2	0.1031	0.1009	0.1100	2.2145	2.2171	2.2218	0.9000	0.9800	0.9800
	4	0.1080	0.1303	0.1015	2.3654	2.4218	2.2220	0.7800	0.8400	0.9400
	6	0.1011	0.1067	0.1007	2.1954	2.1568	2.3025	0.7900	0.8400	0.7200
	8	0.1004	0.1180	0.1053	2.2548	2.3785	2.4333	0.7700	0.7700	0.8000
	12	0.1019	0.1032	0.1053	2.3661	2.4066	2.4454	0.9100	0.7017	0.7412
	24	0.1018	0.1019	0.1026	2.4232	2.4225	2.4531	0.4112	0.3500	0.4823
ถ่าน ชีวภาพ ที่ผ่าน การตัด แปรด้วย MgCl <sub>2</sub>	1	0.1004	0.1008	0.1006	2.2533	2.2357	2.2306	1.0200	1.0700	1.0200
	2	0.1014	0.1015	0.1004	2.4066	2.3998	2.3440	1.0500	1.0400	1.0600
	4	0.1001	0.1002	0.1017	2.4523	2.4467	2.4651	0.9800	0.8000	0.9900
	6	0.1039	0.1013	0.1030	2.2147	2.2325	2.1986	0.9400	0.8300	0.9800
	8	0.1118	0.1010	0.1137	2.4785	2.4185	2.1198	0.9600	0.9600	0.9400
	12	0.1007	0.1004	0.1008	2.3020	2.2321	2.3467	0.9200	0.9100	0.9400
	24	0.1004	0.1011	0.1013	2.3100	2.2998	2.3879	1.0300	0.9900	1.0100

ตารางที่ ข 7 ผลการทดสอบการแปรผันปริมาณถ่านชีวภาพตัดแปรในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำ

ชนิดตัว ดูดซับ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ (g)	น้ำหนักตัวอย่าง (g)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ถ่าน ชีวภาพ ที่ไม่ผ่าน การ ตัดแปร	1	0.1	0.1029	0.1101	0.1030	2.5454	2.4859	2.5102	1.4400	1.2600	1.5000
		0.2	0.2052	0.2102	0.2025	2.4912	2.3396	2.4859	1.3200	1.4500	1.7500
		0.4	0.4168	0.4021	0.4060	2.3978	2.4110	2.4692	1.3700	1.2100	1.7100
		0.6	0.6185	0.8276	0.6056	2.2414	2.5142	2.3013	1.4800	1.2200	1.5000
		0.8	0.8116	0.6710	0.8086	2.5514	2.5008	2.4016	1.3800	1.5200	1.3600
		1.0	1.0179	1.0370	1.0652	2.3969	2.3480	2.4331	1.6200	1.7200	1.5800
		2.0	2.0018	2.0090	2.0046	2.4785	2.2047	2.4760	1.6700	1.6500	1.8300
ถ่าน ชีวภาพ ที่ผ่าน การตัด แปรด้วย Fe <sup>2+</sup> / Fe <sup>3+</sup>	24	0.1	0.2034	0.1021	0.1011	2.5151	2.5100	2.4900	0.8600	0.9000	0.8200
		0.2	0.1081	0.2031	0.2276	2.4385	2.4432	2.4556	1.9400	0.8100	0.8200
		0.4	0.4053	0.4173	0.4162	2.5730	2.4947	2.2960	0.7400	0.7100	0.7400
		0.6	0.6250	0.6010	0.6160	2.5333	2.1781	2.5190	0.6300	0.6200	0.6300
		0.8	0.8039	0.8065	0.8016	2.4329	2.3671	2.5206	0.4900	0.4000	0.5200
		1.0	1.0095	1.0030	1.0054	2.3458	2.3333	2.4468	0.4600	0.4600	0.4000
		2.0	2.0011	2.0003	2.0044	2.3397	2.3120	2.3411	0.1100	0.1100	0.1100

ตารางที่ ข 7 (ต่อ)

ชนิดตัว ดูดซับ	ระยะ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ (g)	น้ำหนักตัวอย่าง (g)			ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)			ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือ (mg/L)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ถ่าน ชีวภาพ ที่ผ่าน การตัด แปรด้วย FeCl <sub>3</sub>	24	0.1	0.1031	0.1061	0.1040	2.5615	2.5012	2.4101	0.6100	0.5300	0.4400
		0.2	0.2169	0.2041	0.2085	2.5112	2.4315	2.4042	0.4100	0.3800	0.3800
		0.4	0.4193	0.4018	0.4088	2.5647	2.3961	2.3393	0.3000	0.4200	0.2300
		0.6	0.6116	0.6307	0.6077	2.4141	2.5011	2.3175	0.3700	0.3700	0.1800
		0.8	0.8151	0.8105	0.8053	2.3548	2.2911	2.5091	0.2600	0.1800	0.1100
		1.0	1.0012	1.0003	1.0010	2.5324	2.4496	2.5003	0.5700	1.1400	0.9800
		2.0	2.0031	2.0064	2.0075	2.5011	2.0493	2.4181	0.0800	0.1100	0.0800
ถ่าน ชีวภาพ ที่ผ่าน การตัด แปรด้วย MgCl <sub>2</sub>	4	0.1	0.1025	0.1024	0.1031	2.5181	2.4102	2.5093	0.8300	0.8100	0.8200
		0.2	0.2084	0.2069	0.2077	2.4014	2.4004	2.4877	0.6400	0.6200	0.6300
		0.4	0.4034	0.4016	0.4025	2.5100	2.3918	2.3953	0.4400	0.4200	0.4500
		0.6	0.6000	0.6013	0.6015	2.3484	2.4500	2.5260	0.3900	0.4100	0.3800
		0.8	0.8037	0.8053	0.8017	2.4500	2.4229	2.4320	0.3600	0.3300	0.3800
		1.0	1.0015	1.0009	1.0012	2.4761	2.2180	2.4222	0.2800	0.2500	0.3000
		2.0	2.0034	2.0048	2.0038	2.4226	2.3965	2.3101	0.3700	0.3400	0.3900

ตารางที่ ข 8 ค่า pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ใส่วัสดุดูดซับซึ่งผ่านการดัดแปรสมบัติพื้นผิวด้วย  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  ของการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge;  $\text{pH}_{\text{pzc}}$ )

Blank	Innitial pH	Final pH	$\text{pH}_f - \text{pH}_i$
3	3.32	6.70	3.38
4	4.33	7.77	3.44
5	5.46	6.80	1.34
6	6.4	7.77	1.37
7	7.18	7.84	0.66
8	8.35	7.66	-0.69
9	9.35	6.79	-2.56
10	10.02	7.88	-2.14
11	11.02	8.68	-2.34
12	12.01	10.33	-1.68

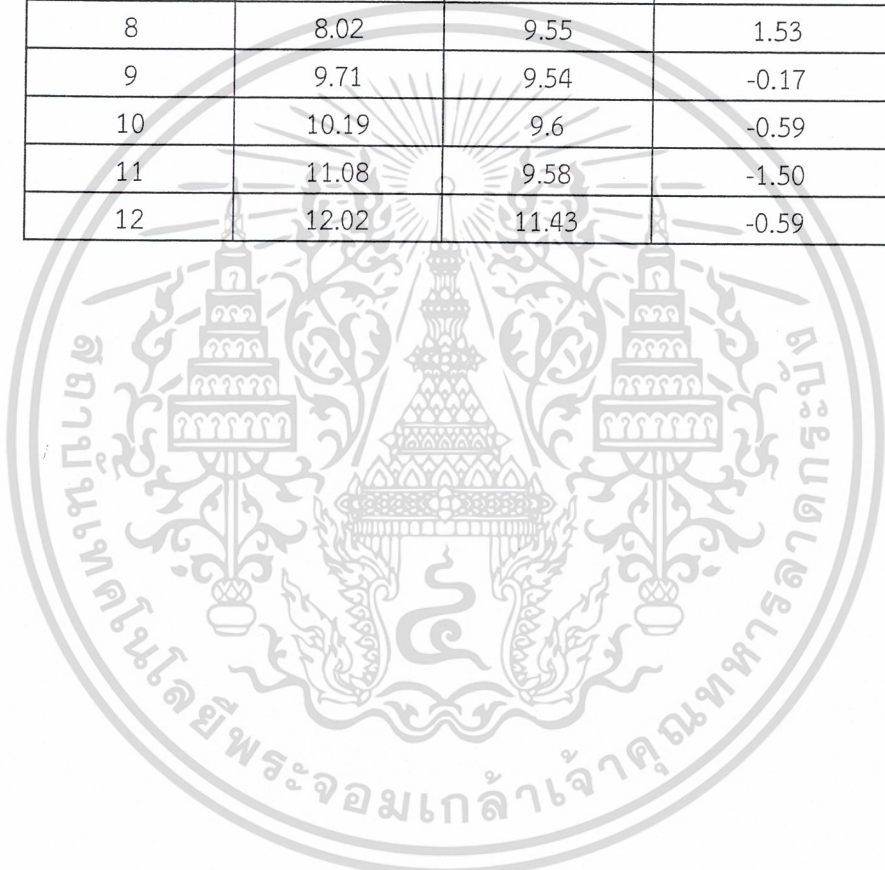
ตารางที่ ข 9 ค่า pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ใส่วัสดุดูดซับซึ่งผ่านการดัดแปรสมบัติพื้นผิวด้วย  $\text{FeCl}_3$  ของการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge;  $\text{pH}_{\text{pzc}}$ )

Blank	Innitial pH	Final pH	$\text{pH}_f - \text{pH}_i$
3	3.24	7.77	4.53
4	4.26	8.24	3.98
5	5.28	8.16	2.88
6	6.02	8.12	2.1
7	7.59	8.24	0.65
8	8.31	8.49	0.18
9	9.55	8.18	-1.37
10	10.69	8.76	-1.93
11	11.36	10.23	-1.13
12	12.00	11.69	-0.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 10 ค่า pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ใส่วัสดุดูดซับซึ่งผ่านการตัดแปรสมบัติพื้นผิวด้วย  $MgCl_2$  ของการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge;  $pH_{pzc}$ )

Blank	Innitial pH	Final pH	$pH_f - pH_i$
3	3.34	9.44	6.10
4	4.59	9.58	4.99
5	5.14	9.54	4.40
6	6.49	9.58	3.09
7	7.67	9.52	1.85
8	8.02	9.55	1.53
9	9.71	9.54	-0.17
10	10.19	9.6	-0.59
11	11.08	9.58	-1.50
12	12.02	11.43	-0.59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้