

ศึกษาการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินที่มีตะกั่วและแมงกานีสปนเปื้อน
โดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

STUDY OF THE TRANSPORT RETARDATION OF CADMIUM IN SOIL
CONTAINING LEAD AND MANGANESE USING SODIUM DODECYL
SULFATE MODIFIED MAGNETIC BIOCHAR.



พนิตตา บำรุงบุญ
พัชรนันท์ ปรีเถื่อน
สาริณี ชันแก้ว

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2561
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY TRANSPORT RETARDATION OF CADMIUM SOIL
CONTAINING LEAD AND MANGANESE. USING SODIUM DODECYL
SULFATE MODIFIED MAGNETIC BIOCHAR.



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2018

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินที่มีตะกั่ว และแมงกานีสปนเปื้อน โดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

STUDY OF THE TRANSPORT RETARDATION OF CADMIUM IN SOIL CONTAINING LEAD AND MANGANESE USING SODIUM DODECYL SULFATE MODIFIED MAGNETIC BIOCHAR.

ชื่อนักศึกษา

นางสาวพนิตดา บำรุงบุญ รหัสนักศึกษา 58050655
นางสาวพัทธนันท์ ปรีเถื่อน รหัสนักศึกษา 58050659
นางสาวสาริณี ชันแก้ว รหัสนักศึกษา 58050689

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี

สาขาวิชา

เคมีสิ่งแวดล้อม

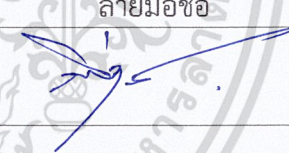
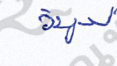
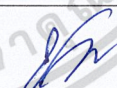
ปีการศึกษา

2561

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กสินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาประสิทธิภาพการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินที่มีตะกั่วและแมงกานีส โดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพนิตดา บำรุงบุญ	รหัสนักศึกษา 58050655
	นางสาวพัทธนันท์ ปรีเถื่อน	รหัสนักศึกษา 58050659
	นางสาวสารินี ชันแก้ว	รหัสนักศึกษา 58050689
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
ภาควิชา	เคมี	
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม	
ปีการศึกษา	2561	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการศึกษาความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนตะกั่วและแมงกานีส โดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์จากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SDS (SDS-Biochar /Fe₂O₃) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ SDS-Biochar/Fe₂O₃ ข้อมูลจาก SEM บ่งบอกว่าพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพ จะมีรูพรุนและผิวขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ ข้อมูลจาก FTIR ซึ่งว่ามีพีคปรากฏที่ตำแหน่ง 550 – 440 cm⁻¹ ซึ่งแสดงว่ามี Fe-O เกิดขึ้นจากการเติม FeCl₃ และที่ตำแหน่ง 1,750 – 1,350 cm⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันซัลโฟเนต เกิดจากการเติมโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์และ ANC ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพ มีค่าเท่ากับ 3.18 และ 7,481.30 meq/kg ตามลำดับ การเติมปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพในดินในอัตรา 5% มีความสามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักดีที่สุดในวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธี sequential extraction ผลการทดลองชี้ว่า ตะกั่วอยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงอยู่กับกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์มากกว่าโลหะชนิดอื่น ถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟตสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม

คำสำคัญ: แคดเมียม, ถ่านชีวภาพ, การดูดซับ, โซเดียมโอดีซิลซัลเฟต, ผักตบชวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	STUDY OF THE TRANSPORT RETARDATION OF CADMIUM IN SOIL CONTAINING LEAD AND MANGANESE USING SODIUM DODECYL SULFATE MODIFIED MAGNETIC BIOCHAR.
Students	Ms. Panitta Bamrungbun Student ID 58050655 Ms. Pattanan Preethuean Student ID 58050659 Ms. Sarinee Kankaew Student ID 58050689
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)
Department of	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2561
Advisor	Assist. Prof. Dr.Chompoonut Chaiyaraksa

Abstracts

This research aimed to study the ability to reduce the movement of cadmium in soil contaminated with lead and manganese using SDS modified magnetic biochar from water hyacinth (SDS-Biochar/Fe₂O₃). Studying was on the physical and chemical properties of SDS-Biochar/Fe₂O₃. Data from SEM indicated that there were more porosity and rougher on the surface of SDS-Biochar /Fe₂O₃ than the unmodified biochar. Data from FTIR, the peak appearing at the position 550 – 440 cm⁻¹ showed the occurrence of Fe-O from the addition of FeCl₃. The peaks at position 1,750 - 1,350 cm⁻¹ represented the sulfonate from the addition of sodium dodecyl sulfate. The value of pH and ANC of SDS-Biochar / Fe₂O₃ were 3.18 and 7,481.30 meq/kg, respectively. The addition of SDS-Biochar/Fe₂O₃ into the soil at a rate of 5% could be the best to reduce metal movement. Based on the sequential extraction method, the results indicated that lead was in the form of iron oxide and manganese oxide rather than other metals. SDS-Biochar/Fe₂O₃ could absorb lead better than cadmium.

Keywords: cadmium, bio-charcoal, adsorption, sodium dodecyl sulfate, water hyacinth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินที่มีตะกั่วและแมงกานีส โดยใช้ ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซิลเฟด ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากตลอดระยะเวลาที่จัดทำโครงการพิเศษนี้ ผู้จัดทำได้รับคำแนะนำและความอนุเคราะห์ รวมไปถึงการได้รับความร่วมมือและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดี ทางผู้จัดทำจึง ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือคำปรึกษาและแนะนำแนวทางแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน ตลอดจนการตรวจสอบและตีพิมพ์การปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องของโครงการพิเศษนี้เพื่อให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบโครงการพิเศษที่ช่วยชี้แนะข้อบกพร่อง อันเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงพัฒนาให้โครงการพิเศษเล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ในการทดลองต่าง ๆ สอนใช้เครื่องมือ รวมถึงการจัดหาสารเคมีต่าง ๆ ส่งผลให้การจัดทำโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา บุคคลในครอบครัว ที่ให้การอบรม เลี้ยงดู สั่งสอน และให้กำลังใจซึ่งเป็นแรงผลักดันในการจัดทำโครงการพิเศษเล่มนี้เสมอมา ตลอดจนเพื่อนๆ ชั้นปีที่ 4 สาขาเคมีสิ่งแวดล้อมที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำ และเป็นที่ปรึกษาที่ดีตลอดจนการทำโครงการพิเศษฉบับนี้ออกมาเสร็จสมบูรณ์

พนิตดา	บำรุงบุญ
พัทธนันท์	ปรีเถื่อน
สาริณี	ชนแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.3.1. ขอบเขตด้านเนื้อหา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี สมมติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	4
2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับผักตบชวา.....	4
2.1.1 ผักตบชวา.....	4
2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....	5
2.1.3 ประโยชน์.....	6
2.1.4 ปัญหาที่เกิดจากผักตบชวา.....	6
2.1.5 บทบาทในการกำจัดน้ำเสีย.....	6
2.2 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับถ่านชีวภาพ.....	7
2.2.1 ถ่านชีวภาพ.....	7
2.2.2 ประโยชน์ของถ่านชีวภาพ.....	7
2.3 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสารที่ใช้ในตัวดูดซับ.....	7
2.3.1 Sodium dodecyl sulphate (SDS).....	7
2.3.2 Ferric chloride (FeCl ₃).....	8
2.4 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการดูดซับ.....	8
2.4.1 ทฤษฎีการดูดซับ.....	8
2.4.2 ประเภทของการดูดซับ.....	9
2.4.3 กลไกการดูดซับ.....	10
2.4.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	10
2.5 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการไฟโรไลซิส.....	11
2.5.1 กระบวนการไฟโรไลซิส.....	11
2.5.2 ประเภทของกระบวนการไฟโรไลซิส.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแคดเมียม.....	12
2.6.1 ความเป็นพิษของแคดเมียม.....	13
2.7 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับตะกั่ว.....	13
2.8 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแมงกานีส.....	14
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	16
3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี.....	16
3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	16
3.1.2 สารเคมี.....	17
3.2 วิธีการเตรียมตัวดูดซับ และดินสังเคราะห์.....	17
3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ.....	17
3.2.2 การเตรียมตัวอย่างดินสังเคราะห์.....	18
3.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับและดิน.....	18
3.3 วิธีการทดลอง.....	20
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดินปรับสภาพสำหรับวิเคราะห์.....	20
3.3.2 ศึกษาประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก.....	20
3.3.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน.....	20
3.3.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก.....	21
3.3.5 การศึกษาความสามารถการสะเทิน.....	22
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	25
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ.....	25
4.1.1 วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวของตัวดูดซับ (SEM).....	25
4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR.....	26
4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างและธาตุองค์ประกอบด้วย XRD.....	27
4.1.4 การวิเคราะห์ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge; PPZC) ของตัวดูดซับ.....	29
4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี.....	30
4.3 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะทั้งหมด.....	31
4.4 วิเคราะห์ความสามารถของการสะเทิน.....	32
4.5 การศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก.....	32
4.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน.....	34
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	36
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	36
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	37
ภาคผนวก.....	41
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินและตัวดูดซับ.....	42
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินตัวอย่างและตัวดูดซับ.....	52
ภาคผนวก ค ตารางแสดงผลการวิจัย.....	60
ภาคผนวก ง เกณฑ์มาตรฐานในดิน.....	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 วิธีการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ทางเคมี.....	19
4.1 ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วย โดเดซิลซัลเฟต.....	26
4.2 คุณสมบัติทางเคมีของดิน ถ่านชีวภาพ และถ่านชีวภาพแม่เหล็ก.....	30
4.3 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักทั้งหมดหลังจากทำการสังเคราะห์ดิน.....	31
ก.1 ความเข้มข้นของสารมาตรฐานไนเตรท.....	48
ก.2 ความเข้มข้นของสารมาตรฐานซัลเฟต.....	50
ข.1 Soil texture (เฉพาะดิน).....	52
ข.2 Moisture.....	52
ข.3 pH.....	52
ข.4 electrical conductivity.....	52
ข.5 Cation exchange capacity.....	53
ข.6 วิเคราะห์หาการสูญเสียน้ำหนักหลังเผา ; LOI.....	53
ข.7 Organic matter.....	54
ข.8 Total nitrogen.....	54
ข.9 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายไนเตรท ในการวิเคราะห์ ปริมาณไนเตรทของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC.....	55
ข.10 ค่าการดูดกลืนแสงในการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทใน soil, Biochar และ SDS/Fe-BC...	55
ข.11 ค่าการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตทั้งหมด (Total phosphate) ของ soil, Biochar และ SDS/Fe - BC.....	56
ข.12 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายซัลเฟต ในการวิเคราะห์ ปริมาณซัลเฟตของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC.....	57
ข.13 ค่าการดูดกลืนแสงในการวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟตของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC	57
ข.14 การวิเคราะห์หา Aluminium ion ของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC.....	57
ข.15 Major Element Cd ²⁺	58
ข.16 Major Element K ⁺	58
ข.17 Major Element Ca ²⁺	58
ข.18 Major Element Mg ²⁺	58
ข.19 Major Element.....	59
ค.1 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียมที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละ ค่าคงอยู่ของแคดเมียมในดิน ที่สกัดโดย EDTA.....	60
ค.2 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียมที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละ ค่าคงอยู่ของแคดเมียมในดิน ที่สกัดโดย DTPA.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.3 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียมที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละ ค่าคงอยู่ของแคดเมียมในดิน ที่สกัดโดย CaCl_2	60
ค.4 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียมที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละ ค่าคงอยู่ของแคดเมียมในดิน ที่สกัดโดย NH_3OAc	61
ค.5 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแมงกานีสที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละ ค่าคงอยู่ของแมงกานีสในดิน ที่สกัดโดย EDTA.....	61
ค.6 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแมงกานีสที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละ ค่าคงอยู่ของแมงกานีสในดิน ที่สกัดโดย DTPA.....	61
ค.7 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแมงกานีสที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละ ค่าคงอยู่ของแมงกานีสในดิน ที่สกัดโดย CaCl_2	62
ค.8 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแมงกานีสที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละ ค่าคงอยู่ของแมงกานีสในดิน ที่สกัดโดย NH_3OAc	62
ค.9 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคง อยู่ของตะกั่วในดิน ที่สกัดโดย EDTA.....	62
ค.10 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคง อยู่ของตะกั่วในดิน ที่สกัดโดย DTPA.....	63
ค.11 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่า คงอยู่ของตะกั่วในดิน ที่สกัดโดย CaCl_2	63
ค.12 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่า คงอยู่ของตะกั่วในดิน ที่สกัดโดย NH_3OAc	63
ค.13 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมในดิน.....	64
ค.14 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่วในดิน.....	65
ค.15 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีสในดิน.....	66
ง.1 ค่า pH แสดงความเป็นกรดต่างของดิน.....	67
ง.2 จำแนกระดับความเค็มที่มีผลกระทบต่อพืช.....	67
ง.3 ระดับปริมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน.....	67
ง.4 ระดับอินทรีย์วัตถุ.....	68
ง.5 มาตรฐานโลหะหนักในดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและการเกษตร.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
4.1 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพก่อนปรับปรุงคุณภาพจากกล้อง SEM กำลังขยาย 9000 เท่า.....	25
4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ (FT-IR) ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต.....	26
4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ (XRD) ของตัวดูดซับ.....	27
4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge ; PPZC) ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต.....	29
4.5 ผลการวิเคราะห์ความสามารถการสะเทินของถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต.....	32
4.6 ร้อยละการดูดซับแคดเมียมที่คงเหลือในดิน อัตราดินสังเคราะห์ผสมกับตัวดูดซับ โดยให้มีปริมาณตัวดูดซับ 0%, 0.5%, 1%, 2%, 5% ตามลำดับ.....	33
4.7 ร้อยละการดูดซับตะกั่วที่คงเหลือในดิน อัตราดินสังเคราะห์ผสมกับตัวดูดซับโดยให้มีปริมาณตัวดูดซับ 0%, 0.5%, 1%, 2%, 5% ตามลำดับ.....	33
4.8 ร้อยละการดูดซับแมงกานีสที่คงเหลือในดิน อัตราดินสังเคราะห์ผสมกับตัวดูดซับโดยให้มีปริมาณตัวดูดซับ 0%, 0.5%, 1%, 2%, 5% ตามลำดับ.....	34
4.9 ร้อยละรูปฟอร์มต่าง ๆ ของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสจากการสกัดลำดับส่วน.....	35
ข.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายไนเตรทในการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC.....	55
ข.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายซัลเฟตในการวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟตของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยพบปัญหาดินปนเปื้อนโลหะหนักซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ และทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากดินเป็นแหล่งรองรับสิ่งปฏิภูลที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กิจกรรมด้านการเกษตร ด้านอุตสาหกรรม ด้านการทำเหมืองแร่ และน้ำทิ้งจากชุมชน ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสารพิษที่ทำให้เกิดการสะสมตกค้างของโลหะหนักในดิน เช่น กรณีการปนเปื้อนสารตะกั่วในห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี การปนเปื้อนสารหนูในอำเภอร้อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช และการปนเปื้อนของสารแคดเมียมของชุมชนลุ่มน้ำแม่ตาว ในตำบลพระธาตุผาแดง ตำบลแม่ตาว และตำบลแม่กุ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ที่มีการปนเปื้อนของสารแคดเมียมในปริมาณที่สูง อยู่ระดับที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนได้ (มูลนิธินิติธรรมสิ่งแวดล้อม, 2555) ซึ่งแมงกานีส (Mn) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) เป็นโลหะหนักที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมมากที่สุด และยังมีการตรวจพบว่าตกค้างในดินเป็นเวลานาน (เบญจมาศ, 2558) เนื่องจากโลหะทั้ง 3 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นสารคงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ตามกระบวนการธรรมชาติ ทำให้เกิดการตกค้างในดินเป็นเวลายาวนาน เมื่อเกิดการสะสมในสิ่งแวดล้อมจะถูกถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารและสะสมในสิ่งมีชีวิต ส่งผลให้ดินเป็นพิษและเมื่อพืชมีการดูดซึมเอาโลหะหนักเข้าไป อาจทำให้ไปหยุดการเจริญเติบโตได้ อีกทั้งโลหะหนักในดินยังเป็นสารก่อมะเร็ง ทำลายระบบของกระดูกสันหลัง มีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักสู่พืชโดยเติมสารปรับปรุงดินหลายชนิด เช่น การศึกษาผลของปุ๋ยอินทรีย์ที่เป็นปุ๋ยคอกในฟาร์ม (FYM) ร่วมกับอินทรีย์ไนโตรเจนในการปรับปรุงดินเพื่อลดการดูดซึมโลหะหนักในพืช (Kumar, 2010) ที่นิยมนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงดินมากที่สุดคือปูนขาว เนื่องจากมีราคาค่อนข้างต่ำ เช่น การศึกษาอิทธิพลของการใช้ปูนขาวต่อการดูดซับและการสะสมของตะกั่ว (Pb) ในเมล็ดข้าวสามสายพันธุ์ (Xie, 2019) ซึ่งแต่ละชนิดให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันไปตามสภาพของดินและสารปรับปรุงดินที่ใช้ โดยสารปรับปรุงดินพวกนี้จะช่วยในเรื่องการลดความคล่องตัวในการดูดซึมโลหะหนักต่าง ๆ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2561) นอกจากปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในดินแล้วก็ยังมี การปนเปื้อนในแหล่งน้ำด้วย โดยวิธีช่วยในการบำบัดการปนเปื้อนโลหะหนักในแหล่งน้ำเสียนั้นมีหลายวิธีทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพโดยได้มีการนำวัสดุจากธรรมชาติมาสังเคราะห์เป็นตัวดูดซับที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ผักตบชวา ซึ่งเป็นวัชพืชที่สามารถช่วยในการบำบัดน้ำเสียได้โดยมีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักในน้ำได้ดี และเนื่องจากผักตบชวามีอัตราการเจริญเติบโตสูง ทนทานต่อสภาพแวดล้อม เป็นพืชที่อยู่ได้ทั้งในน้ำนิ่งและน้ำไหล มีการขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงทำให้มีการแพร่ระบาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างรุนแรง หากมีมากจนเกินไปก็จะก่อให้เกิดปัญหาต่อแหล่งน้ำต่าง ๆ และสิ่งแวดล้อม (นัยนันท์, 2561)

ผู้วิจัยส่วนหนึ่งได้นำถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์ (Biochar) ซึ่งเป็นวัสดุที่ทำจากธรรมชาติ มาตรึงโลหะหนักในดินที่มีการปนเปื้อน (Chen *et al*, 2018) ถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์ (Biochar) คือวัสดุที่มีคาร์บอนสูงผลิตจากการให้ความร้อนมวลชีวภาพ โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือที่เรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิส โดยที่ถ่านชีวภาพจะมีรูพรุนตามธรรมชาติที่มีคุณสมบัติช่วยเรื่องระบาย อากาศ การซึมน้ำ การอุ้มน้ำ ดูดซับธาตุอาหาร กักเก็บคาร์บอนลงดิน และใช้ปรับปรุงดิน ทั้งนี้ยังสามารถดักจับไอออนโลหะหนักที่เป็นพิษได้ (Liu *et al*, 2018) และยังมีผู้วิจัยบางส่วน ทำการศึกษาถ่านชีวภาพ ว่าสามารถนำมาเปลี่ยนให้มีสภาพเป็นแม่เหล็ก และไปปรับปรุงคุณภาพดิน ทำให้มีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำ ถ่านชีวภาพที่ใช้ผักตบชวาเป็นวัตถุดิบแล้วมาปรับให้อยู่ในสภาพแม่เหล็กโดยใช้โซเดียมโอดีเตซิล ซัลเฟตมาเป็นสารลดแรงตึงผิว แล้วมาผสมในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม เพื่อลดการเคลื่อนที่ของ แคดเมียมเข้าสู่พืชที่ปลูกในดินปนเปื้อน โดยที่มีสังกะสีและตะกั่วเป็นตัวรบกวน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินที่มีตะกั่วและแมงกานีสปนเปื้อน โดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต
2. เพื่อศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟตที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา

1. เตรียมถ่านชีวภาพจากผักตบชวาโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุง SDS-Biochar/ Fe_2O_3 composite
2. นำถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงแล้วมาศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้น โดยใช้เครื่อง SEM, FTIR, XRD, และค่า Zero point charge เป็นต้น
3. เตรียมตัวอย่างดินโดยไปเก็บดินที่จังหวัดระยองด้วยวิธี Equal interval on diagonal lines ร่อนดินด้วยตะแกรงขนาด 2 mm (Mesh no.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สังเคราะห์ดินตัวอย่างที่ทำให้มีการปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส ที่ความเข้มข้น 50, 550, 2000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ ทำการผสมตัวดูดซับกับดินด้วยอัตราส่วนที่ต่างกัน พักไว้ 2 อาทิตย์ นำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

5. ทดสอบประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียม โดยการสกัดดินด้วยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) ด้วย 0.005 M Diethylene triamine penta acetic acid (DTPA), 0.01 M Calcium chloride (CaCl_2), 0.05 M Ethylene diamine tetra acetic acid (EDTA), และ 1 M Ammonium acetate (NH_4OAc) และศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมในตัวอย่างดินหลังจากทำการปรับเสถียรด้วยถ่านชีวภาพที่ทำการปรับปรุงคุณภาพ โดยการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction)

6. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนัก โดยการวิเคราะห์ด้วย Acid digestion และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อนำผักตบชวาที่เป็นวัชพืชมาทำให้เกิดประโยชน์โดยนำมาแก้ปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมทางดิน
2. เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ
3. ช่วยลดการดูดซับแคดเมียมของพืชที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อน ซึ่งจะช่วยลดความเป็นพิษที่จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของผู้บริโภคพืชที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎี สมมติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับผักตบชวา

2.1.1 ผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นพืชน้ำล้มลุก สามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ มีถิ่นกำเนิดในแถบลุ่มน้ำอเมซอน ประเทศบราซิลในทวีปอเมริกาใต้ มีดอกสีม่วงอ่อน คล้ายช่อดอกกล้วยไม้ และแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็วจนกลายเป็นวัชพืชที่ร้ายแรงในแหล่งน้ำ มีชื่อเรียกในแต่ละท้องถิ่นดังนี้ : ผักปอด, สวะ, ผักโรค, ผักตบชวา, ผักยะวา, ผักอีโยก, ผักปอง

ผักตบชวาถูกนำเข้ามาในประเทศไทยในปีพ.ศ. 2444 ในสมัยรัชกาลที่ 5 โดยนำเข้ามาจากเกาะชวาในฐานะเป็นไม้ประดับสวยงาม โดยขณะเสด็จประพาสประเทศอินโดนีเซีย พร้อมด้วยสมเด็จพระนางเจ้าเสาวภาผ่องศรี พระบรมราชินีนาถเมื่อปีพ.ศ. 2439 โดยขณะนั้นผักตบชวาก็เพิ่งถูกนำไปในเกาะชวาจากเจ้าอาณานิคมฮอลันดา โดยแรกเริ่มใส่อ่างดินเลี้ยงไว้หน้าสนามวังสระปทุม ผักตบชวาก็เจริญเติบโตงอกงามอย่างมากมายจนออกดอกเพียงระยะเวลาแค่ 1 เดือน และได้ทรงพระราชทานหน่อให้เจ้านายพระองค์อื่นและบรรดาข้าราชการนำไปปลูกด้วย เพียงแค่ 6 เดือน ผักตบชวาก็แพร่กระจายพันธุ์จนเต็มวังสระปทุม ต้องนำไปปล่อยทิ้งไว้ที่คลองสามเสนหลังวัง พร้อมกับคลองอื่น ๆ เช่น คลองเปรมประชากร, คลองผดุงกรุงเกษม ในระยะแรกประชาชนชาวไทยก็ได้ใช้ดอกของผักตบชวามาตัดหูเพื่อความสวยงามบ้าง แต่หลังจากนั้นไม่นานก็เสื่อมความนิยมลง เหตุเพราะการแพร่กระจายพันธุ์อย่างรวดเร็วนั่นเอง (กิเลน, 2559)

ผักตบชวาจัดเป็นชนิดพันธุ์ต่างถิ่นที่เข้ามาแพร่ระบาดรุกรานจนก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศน์ในประเทศไทย มีการแพร่ขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว ใน 1 เดือนผักตบชวาเพียง 1 ต้น อาจขยายพันธุ์ได้มากถึง 1,000 ต้น ถึงแม้ว่าจะแห้งจนต้นตายแต่เมล็ดของมันก็มีชีวิตต่อไปได้นานถึง 15 ปี และพื้นที่ที่เมล็ดได้รับน้ำที่เพียงพอมันก็จะแตกหน่อเป็นต้นใหม่ต่อไปจนกลายเป็นปัญหาทางน้ำและทวีความรุนแรงจนเป็นปัญหาระดับประเทศ ทำให้รัฐบาลต้องเสียงบประมาณในการกำจัดผักตบชวาจำนวนมาก ซึ่งไม่เพียงแต่ประเทศไทยเท่านั้น อีกกว่า 50 ประเทศทั่วโลกก็เจอปัญหาเช่นเดียวกัน เว้นแต่ประเทศในแถบยุโรปเท่านั้นที่ปลอดการรบกวน และบริเวณที่ถูกผักตบชวาคุกคามมากที่สุดคือทะเลสาบวิกตอเรีย

ประเทศไทยเริ่มมีการกำจัดผักตบชวามาตั้งแต่สมัยรัชกาลที่ 6 มีการออกพระราชบัญญัติสำหรับกำจัดผักตบชวาพ.ศ. 2456 ปัจจุบันมีหน่วยงานและองค์กรต่าง ๆ ได้เข้ามาช่วยเหลือในการกำจัด เช่น นำไปผลิตเป็นของใช้ อาหารสัตว์ ทำปุ๋ย ฯลฯ และมีการนำแมลงมวนผักตบชวาจากแหล่งกำเนิดที่ทวีปอเมริกาใต้ เข้ามาทดลองปล่อยในประเทศไทย เพื่อควบคุมจำนวนประชากรของผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นพืชที่ขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็วโดยเฉพาะช่วงฤดูฝนจึงมีปริมาณมากในช่วงนั้นเกิดจากสารเคมีที่เราใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวัน เช่น ผงซักฟอก ปุ๋ย ซึ่งเป็นธาตุอาหารของพืชน้ำ โดยเฉพาะกับผักตบชวาเป็นอย่างดี ทำให้เกิดขวางการเดินทางของน้ำ อัตราการไหลของน้ำจึงลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกีดขวางการระบายน้ำของประตูน้ำ อีกทั้งยังทำให้ระบบนิเวศเสียหายซึ่งผักตบชวาสามารถดูดซึมธาตุอาหารที่เป็นตัวการทำให้น้ำเสียแต่เมื่อมีปริมาณมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตใต้น้ำ กล่าวคือ สัตว์ใต้น้ำจะขาดออกซิเจนและตายลง รวมถึงการบดบังแสงแดดที่เป็นส่วนหนึ่งของการสังเคราะห์แสงของพืชใต้น้ำจะทำให้พืชเหล่านั้นเน่าและตายไป ดังนั้นจึงเกิดน้ำเน่าเสียอย่างง่ายตายรวมทั้งทำลายระบบนิเวศ (วิกิพีเดีย, 2561)

2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ (วิทย์, 2542)

ต้นผักตบชวา มีลำต้นสั้นแตกใบเป็นกอลอยไปตามน้ำ มีไหล ซึ่งเกิดตามซอกใบแล้วเจริญเป็นต้นอ่อนที่ปลายไหล ลำต้นมีลักษณะอวบน้ำ ผิวลำต้นเรียบเป็นสีเขียวอ่อนและเข้ม ลำต้นจะมีขนาดสั้นหรือยาวจะขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของแม่น้ำ ก้านใบจะพองออกตรงช่องกลาง ภายในมีลักษณะเป็นรูพรุน จึงช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้ ลำต้นสั้น มีความสูงได้ประมาณ 3 - 90 เซนติเมตร รากจะแตกออกจากลำต้น บริเวณข้อรากมักมีสีม่วงดำ ซึ่งลำต้นลอยอยู่บนผิวน้ำบางต้นอาจจะขึ้นอยู่กับโคลนในที่น้ำตื้น สามารถขึ้นบนบกก็ได้ มีความทนทานต่อความแห้งแล้งได้ดี แต่จะไม่ทนน้ำเค็ม

ใบผักตบชวา ใบเป็นใบเดี่ยว แตกจากลำต้นเป็นกอ โคนก้านใบแผ่เป็นกาบหุ้มประกกันไว้ ใบจะป่องออก เพื่อช่วยให้ลอยตัวอยู่ในน้ำได้ ใบเป็นรูปไข่หรือเกือบกลม ก้านใบอวบน้ำตรงกลางพองออก ภายในเป็นช่องอากาศคล้ายกับฟองน้ำ จึงช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้ ลักษณะของใบจะคล้ายกับใบโพธิ์ แต่ขนาดของใบจะกว้างกว่าและปลายใบจะป้านเล็กน้อย ใบมีขนาดกว้างใหญ่ รูปร่างค่อนข้างกลม ปลายใบมน โคนใบเว้าเข้าหาก้านใบ มีหูใบ ขนาดของใบและความยาวของก้านจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม แผ่นใบเป็นสีเขียวสด มีลายเส้นโค้งทั้งใบ ใบสดจะประกอบไปด้วยสารแคโรทีนในปริมาณที่ค่อนข้างสูง

ดอกผักตบชวา ออกดอกเป็นช่ออยู่กลางกอ ไม่มีก้านดอก ในช่อหนึ่งจะประกอบไปด้วยดอกขนาดเล็กหลายดอก มีดอกประมาณ 3 - 25 ดอก ดอกย่อยเป็นสีชมพูอมฟ้าหรือสีม่วง มีกลีบดอก 6 กลีบ กลีบบนสุดจะมีขนาดใหญ่กว่ากลีบอื่น ๆ และจะมีจุดหรือแต้มสีเหลืองที่กลางกลีบ กลีบดอกจะมีลักษณะบาง เมื่อช่อดอกเจริญขึ้น ก้านช่อดอกจะค่อย ๆ ยาว พองใหญ่ขึ้น ทำให้ภายในที่หุ้มก้านช่อดอกกับก้านใบขาดออก เมื่อก้านช่อดอกเจริญมากขึ้นจะดันกาบใบก้านใบขาด ก้านช่อดอกจะแทงช่อดอกเจริญโผล่ขึ้นมา โดยมีใบเล็ก ๆ ที่ปลายก้านใบและภายในทำหน้าที่เป็นใบประดับรองรับช่อดอกอีกหนึ่ง เมื่อเจริญเต็มที่แล้วดอกมักจะบานพร้อมกันหมดทั้งช่อ โดยจะเริ่มบานตั้งแต่แสงอาทิตย์เริ่มส่อง และจะบานเต็มที่เมื่อแสงแดดส่องจ้า โดยดอกจะบานแค่เพียง 1 วัน มีความสวยเด่นสะดุดตา และดึงดูดสายตาได้ดีมาก โดยจะออกดอกช่วงปลายฤดูหนาวถึงต้นฤดูร้อน และเนื่องจากช่อดอกของผักตบชวามีลักษณะคล้ายคลึงกับดอกไฮยาซินธ์ จึงเป็นที่มาของชื่อสามัญว่า Water Hyacinth

ผลผักตบชวา ผลเป็นแบบแคปซูลแห้งและแตกได้ ลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก แบ่งเป็นพู 3 พู เมื่อแก่จะแตกกลางพู ภายในมีเมล็ดจำนวนมาก ลักษณะของเมล็ดเป็นรูปกลมขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ประโยชน์

- ยอดอ่อน ใบอ่อน และดอกอ่อน สามารถนำมาลวกจิ้มกับน้ำพริกรับประทาน หรือนำมาทำแกงส้ม ในได้ห้วนจะนำผักชนิดนี้มาปรุงเป็นอาหารจำพวกผัก
- ผักตบชวาสามารถนำมาเลี้ยงสุกร เลี้ยงไก่ได้ เนื่องจากมีคุณค่าทางอาหาร
- ผักตบชวาสามารถนำมาแปรรูปทำเป็นผลิตภัณฑ์จักสาน
- ด้านสมุนไพร ใช้แก้พิษภายในร่างกาย และขับลม ใช้ทาหรือพอกแก้แผลอักเสบ

2.1.4 ปัญหาที่เกิดจากผักตบชวา

การชลประทาน : ผักตบชวาทำให้การพัฒนาแหล่งน้ำไม่ได้ผลตามเป้าหมายเนื่องจาก ผักตบชวาไปลดการไหลของน้ำลงประมาณ 40% ส่วนต่าง ๆ ของผักตบชวาก่อให้เกิดอุปสรรคกับการระบายน้ำของฝายหรือประตูระบายน้ำ การระเหยของน้ำในพื้นที่ที่มีผักตบชวาจะสูงกว่าในพื้นที่ที่ไม่มี ผักตบชวาประมาณ 3-8 เท่า

การคมนาคมทางน้ำ : ผักตบชวาเป็นอุปสรรคสำคัญที่กีดขวางการสัญจรทางน้ำ ทำให้การสัญจรทางเรือเป็นไปได้ยาก

การกสิกรรม : ผักตบชวาจะไปแย่งน้ำและอากาศจากพืชที่ปลูก แพผักตบชวาที่ไหลมาตามน้ำจะเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของศัตรูพืชนานาชนิด เช่น หนอนและศัตรูอื่น ๆ ที่จะไปทำความเสียหายแก่พืชผลของเกษตรกร และผักตบชวาที่ลอยมากับน้ำจะก่อให้เกิดปัญหาแก่นาข้าว เพราะผักตบชวาจะลอยมาทับต้นข้าวจนก่อให้เกิดความเสียหายแก่ต้นข้าว (สุภาพดี, 2560)

2.1.5 บทบาทในการกำจัดน้ำเสีย

ผักตบชวาสามารถช่วยในการบำบัดน้ำเสีย โดยการทำหน้าที่กรองน้ำที่ไหลผ่านกอผักตบชวาอย่างช้า ๆ ทำให้ของแข็งแขวนลอยต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในน้ำถูกสกัดกั้นกรองออก นอกจากนี้ระบบรากที่มีจำนวนมากจะช่วยกรองสารอินทรีย์ที่ละเอียด และจุลินทรีย์ที่อาศัยเกาะอยู่ที่รากจะช่วยดูดสารอินทรีย์ไว้ด้วยอีกทางหนึ่ง รากผักตบชวาจะดูดสารอาหารที่อยู่ในน้ำ ทำให้ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจึงถูกกำจัดไป อย่างไรก็ตามไนโตรเจนในน้ำเสียนั้น ส่วนมากจะอยู่ในรูปสารประกอบทางเคมี เช่น สารอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจนพบว่า ผักตบชวาสามารถดูดไนโตรเจนได้ทั้ง 3 ชนิด แต่ในปริมาณที่แตกต่างกันคือ ผักตบชวาสามารถดูดอินทรีย์ไนโตรเจนได้สูงกว่าไนโตรเจนในรูปอื่น ๆ สถานที่แรกในประเทศไทยที่ใช้การบำบัดด้วยวิธีนี้คือ "บึงมังกะสัน" ซึ่งเป็นโครงการบึงมังกะสันอันเนื่องมาจากพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว โดยใช้หลักการบำบัดน้ำเสียตามแนวทฤษฎีการพัฒนาโดยการกรองน้ำเสียด้วยผักตบชวา (Filtration) (วิกิพีเดีย, 2561)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับถ่านชีวภาพ

2.2.1 ถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์ (Biochar) คือวัสดุแข็งที่อุดมด้วยคาร์บอน มีสีดำ ไม่มีซีเฝ้า เกิดขึ้นจากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) หรือการให้ความร้อนกับมวลชีวภาพ หรืออินทรีย์วัตถุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยไม่มีออกซิเจนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ โดยความร้อนจะไปทำลายพันธะทางเคมีในอินทรีย์วัตถุในส่วนต่าง ๆ ของพืช ทำให้ความชื้นและอินทรีย์สารเปลี่ยนรูปกลายเป็นก๊าซกระจายออกไปเหลือไว้เฉพาะส่วนคาร์บอนเข้มข้นที่พืชเก็บสะสมไว้ มีรูพรุนจำนวนมาก รวมถึงมีประจุลบสูง

ถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์นั้นได้รับการพิจารณาจากนักวิทยาศาสตร์ทั้งหลายให้เป็นเสมือนทองสีดำของชาวเกษตรกรรม ด้วยคุณสมบัติที่มีสารคาร์บอนสูงและมีรูพรุนตามธรรมชาติช่วยให้ไบโอชาร์สามารถอุ้มน้ำและธาตุต่าง ๆ รวมถึงการป้องกันจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มการย่อยสลายและแยกก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์เอาไว้ในดิน ในขณะที่ไบโอชาร์ทำหน้าที่เสมือนกับอ่างคาร์บอนธรรมชาติ ไบโอชาร์ช่วยในการทำความสะอาดอากาศได้ 2 ทาง คือ การป้องกันการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสารชีวภาพเข้าสู่ชั้นบรรยากาศและการช่วยให้พืชดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างช้า ๆ ในขณะที่พืชสังเคราะห์แสง

2.2.2 ประโยชน์ของถ่านชีวภาพ

- เนื่องจากถ่านชีวภาพช่วยกักเก็บคาร์บอนในดิน ดังนั้นจึงช่วยลดการเกิดคาร์บอนในชั้นบรรยากาศได้
- ช่วยในการปรับปรุงดิน เนื่องจากลักษณะความมีรูพรุนของถ่านชีวภาพจะช่วยอุ้มน้ำและกักเก็บธาตุอาหารต่าง ๆ ในดิน และเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ที่จะช่วยสร้างอาหารในดิน ทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้น
- ช่วยในกระบวนการจัดการของเสียประเภทอินทรีย์วัตถุได้ เนื่องจากเทคโนโลยีถ่านชีวภาพมีศักยภาพในการกำจัดของเสียที่ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้
- สามารถนำกากของเสียทางการเกษตรมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพเพื่อช่วยลดก๊าซมีเทนและก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่น ๆ ได้

2.3 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสารที่ใช้ในตัวดูดซับ

2.3.1 Sodium dodecyl sulphate (SDS)

สำหรับชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่เลือกใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ Sodium dodecyl sulphate ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีหมู่ซัลเฟตเป็นองค์ประกอบ ทำให้สามารถจับกับโลหะแล้วสนับสนุนการชะโลหะออกจากดินได้ (Mao *et al*, 2015) Sodium dodecyl sulphate เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SO}_4\text{Na}^+$ มักจะเป็นส่วนประกอบในผงซักฟอกและสบู่ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากสารลดแรงตึงผิวจะมีบทบาทในชีวิตประจำวันแล้วสารลดแรงตึงผิวยังมีบทบาทที่สำคัญและนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมาย รวมทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามแล้วแต่การนำสารลดแรงตึงผิวไปใช้ประโยชน์นั้นจะต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ ทั้งนี้เพราะสารลดแรงตึงผิวก็สามารถทำลายสิ่งแวดล้อมได้เช่นกันถ้ามีการใช้ในปริมาณที่ไม่ถูกต้อง ตัวอย่างเช่นในการปล่อยน้ำซักผ้าหรือน้ำยาล้างจานที่เข้มข้นซึ่งมีสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบลงในแม่น้ำลำคลอง จะทำให้เกิดฟองอย่างมาก นอกจากจะทำลายสุนทรียภาพของแม่น้ำลำคลองแล้ว ยังสร้างผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และอาจต้องใช้เวลาอันที่กระบวนการธรรมชาติจะย่อยได้หมด โดยแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ US.EPA. ได้กำหนดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในน้ำดื่มให้ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Kawamura, 2000)

2.3.2 Ferric chloride ($FeCl_3$)

เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่มีความสำคัญต่อกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ การบำบัดน้ำทิ้งจากชุมชน และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยเป็นสารสร้างตะกอนหรือตกตะกอน (coagulant) ที่ดีมากที่สุด กล่าวคือ สามารถกำจัดฟอสเฟตและโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท ฯลฯ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย เฟอร์ริกคลอไรด์ยังสามารถควบคุมกลุ่มของน้ำเสีย โดยการรวมตัวกับอนุภาคซิลิโคไซด์ตกเป็นตะกอนเหล็กซิลิโคไซด์ทำให้กลืนของน้ำเสียตกลง กากตะกอน (sludge) ที่เกิดขึ้นจากการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์สามารถนอนกันได้เร็ว ปริมาณกากตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าสารตกตะกอนตัวอื่น ๆ

เฟอร์ริกคลอไรด์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) เฟอร์ริกคลอไรด์ที่ปราศจากน้ำผลึก มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $FeCl_3$ น้ำหนักโมเลกุล 162.206 กรัม มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) มีสีเกือบดำเมื่อเป็นแผ่นผลึกขนาดเล็กละเอียดจะมีลักษณะมันวาวเหมือนโลหะ ที่อุณหภูมิ 305 องศาเซลเซียสจะระเหิดกลายเป็นไอจุดหลอมเหลวที่ 332 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 2.89 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และผลึกเป็นประเภทไฮโกรสโคปิก (hygroscopic) ที่แรงทำให้สามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ซึ่งจะทำให้เกิดชุดของโครงสร้างของน้ำผลึกหลายแบบ คือ $FeCl_3 \cdot xH_2O$ เมื่อ x เท่ากับ 6, 3.5, 2.5 และ 2

2) เฟอร์ริกคลอไรด์หกน้ำผลึกมีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ น้ำหนักโมเลกุล 270.30 มีจุดหลอมเหลว 37 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก (monoclinic crystal) จะมีสีน้ำตาล เหลืองหรือส้ม โดยมีโครงสร้างทางเคมีคือ $[FeCl_2 (H_2O)_4]^+ Cl^- \cdot 2H_2O$

2.4 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการดูดซับ

2.4.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับ (Adsorption) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ กระบวนการดูดซับ เกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ ปริมาณการดูดซับขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ธรรมชาติของสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ และสภาวะการดูดซับ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับ (อาจเป็นของแข็งของเหลวหรือแก๊ส) กับสารดูดซับ (ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง) ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง การดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสโดยที่มีวัฏภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ และเป็นวัฏภาคคายความร้อน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งของสารดูดซับ ดังนั้นการดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้น เนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็งซึ่งเป็นสารดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของของเหลวนั้น การดูดซับบนผิวของแข็งแบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

2.4.2 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

1) การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย และแรงไฟฟ้าสถิต การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายสารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2) การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกละลายเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50 - 400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกละลายออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

นอกจากการแบ่งประเภทการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีแล้ว ยังอาจแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก คือการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (Exchange adsorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้าม และการดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (Specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุล ตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิวแต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับ พฤติกรรมการดูดซับนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ และเคมี

2.4.3 กลไกการดูดซับ (นิพนธ์, 2550)

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

2.4.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1. สมบัติของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุน หากรูพรุนมีมากทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมีมาก ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็ก หรือรูพรุนมีขนาดใหญ่แต่ปากรูพรุนมีขนาดเล็กก็ไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น (นิสาพร, 2559)

2. สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ สมบัติของสารที่มีผลต่อการดูดซับที่เด่นชัด 2 ประการคือสภาพการละลายได้กับน้ำหนักและขนาดโมเลกุล สารที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อยเนื่องจากก่อนที่เกิดกระบวนการดูดซับ จะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายก่อน ซึ่งถ้าไม่มีการทำลายพันธะก็จะไม่สามารถเกิดการดูดซับได้ น้ำหนักและขนาดของโมเลกุลถ้าน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น และโมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นแบบกิ่งจะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่เป็นเส้นตรง (นิสาพร, 2559)

3. ความปั่นป่วน (Turbulence) อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านตามชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ดังนั้นถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก ทำให้เป็นอุปสรรคต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่จะเข้าไปในตัวดูดซับ ดังนั้น การแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ความปั่นป่วนในถังการดูดซับคือความเร็วของน้ำที่ผ่านถังต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น (ลลิตา, 2554)

4. ผลของความเป็นกรด - เบสต่อประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรดต่ำส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเพิ่มขึ้น และเมื่อสารละลายมีความเป็นกรด - เบสเพิ่มขึ้นมีผลทำให้มี OH^- บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมีความเป็นกรด - เบสมากกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง (นิพนธ์, 2550)

5. อุณหภูมิ ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับเป็นประเภทใด ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้นและเพิ่มโอกาสที่ตัวดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับได้มากขึ้น (ณัฐพร, 2556)

6. ระยะเวลาในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น (กุลลิตา, 2557)

2.5 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิส

2.5.1 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการทางเคมีความร้อนที่เปลี่ยนรูปของชีวมวลพลาสติก รวมถึงยาง เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าทางความร้อนสูงขึ้น ได้แก่ ถ่าน (Charcoal) น้ำมัน (bio-oil) และก๊าซไม่กลั่นตัว (non-condensable gas) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง 500 - 800 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สภาวะในการทำปฏิกิริยา ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น กระบวนการไพโรไลซิสแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้า และไพโรไลซิสแบบเร็ว (Pecha *et al*, 2015)

2.5.2 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส

1) กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

เป็นกระบวนการที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิตั้งแต่ 400-600 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อนาที) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลผลิตจากไพโรไลซิสแบบช้ามีสัดส่วนเป็นของเหลว 30 - 50 เปอร์เซ็นต์ และถ่าน 25 - 35 เปอร์เซ็นต์

ไพโรไลซิสแบบช้ายังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย คือ คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (carbonization pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลานานโดยใช้เวลาประมาณหนึ่งวัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอาหาร ส่วนผลิตภัณฑ์ในสถานะก๊าซจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ และไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (conventional pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ใช้เวลาให้ความร้อนน้อยกว่า คือ 15-30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ครบทั้ง 3 สถานะคือ ถ่าน น้ำมัน และก๊าซไม่กลั่นตัว

2) กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

เป็นกระบวนการที่ได้น้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 400 - 650 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที) เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร มีระยะเวลาของไอที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นมาก (น้อยกว่า 2 วินาที) เมื่อใช้วัตถุดิบประเภทชีวมวลจะได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในสถานะของเหลวเรียกว่า น้ำมันชีวภาพ ประมาณ 60 - 75 เปอร์เซ็นต์ ของแข็ง 15 - 25 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซไม่กลั่นตัว 10 - 15 เปอร์เซ็นต์ และมอดูลประกอบของน้ำในน้ำมันชีวภาพ 10 - 30 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่มีในชีวมวลเริ่มต้น

2.6 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูง ในรูปของแคดเมียมบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นโลหะสีเงินขาวแวววาวมีคุณสมบัติอ่อนเบาสามารถดัดโค้งได้ง่าย โดยทั่วไปมักพบแคดเมียมในรูปสารประกอบของออกไซด์ คลอไรด์ ซัลเฟต และซัลไฟต์ หรือในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบของโลหะหนักอื่น ๆ พบว่า สารประกอบแคดเมียมละลายน้ำได้ดี ดังนั้นจึงสามารถแพร่กระจายไปในสิ่งแวดล้อมได้ง่าย เช่น ในน้ำหรือในดินเป็นต้น โดย 10 เปอร์เซ็นต์ของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมมาจากแหล่งธรรมชาติ พบมากในถ้ำของภูเขาไฟ พืชผักที่เน่าเปื่อย อนุภาคของดินที่ลอยในอากาศ และควันจากไฟไหม้ป่า ส่วนอีก 90 เปอร์เซ็นต์มาจากกิจกรรมของมนุษย์ทางด้านการเกษตร มีการใช้สารประกอบแคดเมียมเป็นสารกำจัดเชื้อรา แมลง และหนอน รวมทั้งพบเป็นสารปนเปื้อนในปุ๋ยฟอสเฟต ทำให้ปริมาณแคดเมียมบนผิวน้ำตมามีปริมาณสูงขึ้น นอกจากนี้ มีการนำแคดเมียมไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากแคดเมียมมีความทนทานต่อการสึกกร่อนได้เป็นอย่างดีจึงมีการนำแคดเมียมไปฉาบผิวโลหะต่าง ๆ เช่น เหล็ก เป็นต้น หรือใช้ผสมกับโลหะอื่นเพื่อเพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการกัดกร่อน หรือเพิ่มให้มีคุณสมบัติเป็นตัวนำในภาคอุตสาหกรรมเคมีมีการใช้สารประกอบแคดเมียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทางเคมีต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีการใช้แคดเมียมเป็นขั้วแคโทดของแบตเตอรี่ Nickel - Cadmium ชนิดที่เดิมประจุใหม่ได้ (Nordic Council of Ministers, 2003; Levit 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 ความเป็นพิษของแคดเมียม

เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมในระบบทางเดินอาหารแล้วลำเลียงไปตามกระแสเลือดและสะสมตามอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกาย โดยสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของโปรตีนส่วนใหญ่แคดเมียมจะถูกสะสมอยู่ที่ตับและไต โดยแคดเมียมมีค่าครึ่งชีวิต 10 - 30 ปี หมายความว่า เมื่อร่างกายได้รับแคดเมียมแล้วต้องใช้เวลานานถึง 10 - 30 ปี ถึงจะขับครึ่งหนึ่งของปริมาณแคดเมียมที่ได้รับออกจากร่างกายได้

การหายใจเอาแคดเมียมในปริมาณที่เกินกว่ามาตรฐานกำหนดจะทำให้เกิดพิษอย่างเฉียบพลัน เกิดการไอ หายใจมีเสียงติดขัด ปวดศีรษะ มีไข้ เยื่อปอดถูกทำลาย ปอดอักเสบ และปอดบวมในร่างกายใน 12 - 24 ชั่วโมง การสัมผัสกับแคดเมียมโดยตรง ทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อผิวหนังและดวงตา ส่วนการกลืนกินแคดเมียมจะทำให้เกิดพิษแบบเฉียบพลัน เกิดอาการวิงเวียนศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้องรุนแรง มีอาการถ่ายเหลว และอาจมีภาวะเลือดปนออกมา เนื่องจากเกิดการระคายเคืองและอักเสบของอวัยวะภายในระบบทางเดินอาหาร หากมีอาการรุนแรงอาจเกิดอาการช็อกเนื่องจากขาดน้ำและไตวายเฉียบพลัน (Nordic Council of Ministers, 2003; Levit 2010)

เมื่อมีการสะสมแคดเมียมในร่างกายที่เล็กน้อยในระยะเวลานาน จะทำให้เกิดการสะสมแคดเมียมในกระดูก เกิดเป็นโรคอิตไต (Itai-itai) ทำให้กระดูกเปราะ หักง่าย มีอาการเจ็บปวดกระดูกทั่วทั้งร่างกาย และเกิดโรคไตเสื่อม

นอกจากนี้ยังพบว่ามีการสะสมแคดเมียมในร่างกายยังเป็นสาเหตุหนึ่งทำให้เกิดโรคมะเร็งหลายชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งมะเร็งปอด รวมทั้งการสัมผัสกับแคดเมียมยังมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดมะเร็งต่อมลูกหมากและไต แต่ไม่ส่งผลรุนแรงเท่ากับมะเร็งปอด ส่วนผลของแคดเมียมในการเป็นสารก่อมะเร็งที่อวัยวะอื่น ๆ ยังไม่สามารถสรุปได้ (Kumar and Singh, 2010)

2.7 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุโลหะเนื้ออ่อนนุ่มสามารถยืดได้ เมื่อตัดใหม่ ๆ จะมีสีขาวอมน้ำเงิน แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา โลหะตะกั่วเป็นมีคุณสมบัติเด่นคือมีจุดหลอมเหลวต่ำ มีความหนาแน่นสูง มีความอ่อนตัวสูง ความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ต่ำ มีคุณสมบัติหล่อลื่น และต้านทานการกัดกร่อนได้ดี การใช้ประโยชน์โลหะตะกั่วส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมทำแบตเตอรี่รถยนต์ ใช้เป็นสารประกอบตะกั่วสำหรับผสมทำสี ใช้ทำลูกกระสุนและยุทธภัณฑ์ ใช้ทำฉากรังสีเพื่อป้องกันรังสีต่าง ๆ เช่น รังสีเอกซ์ รังสีเบตา รังสีแกมมา เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นธาตุผสมกับโลหะทองแดงและเหล็ก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านการกลึงหรือตัด นอกจากนี้ ยังมีการใช้ตะกั่วในการทำหลอดบรรจุสีสำหรับงานศิลปะ ออกไซด์ของตะกั่วใช้เป็นสารออกซิไดซ์ในการผลิตสีย้อม ไม้ขีดไฟ ยางเทียม กลั่นน้ำมัน กาว และใช้เป็นโลหะถ่วงน้ำหนัก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแมงกานีส

แมงกานีส เป็นเกลือแร่ส่วนน้อยแต่มีความสำคัญต่อชีวิตมาก ร่างกายขาดไม่ได้ พบมากที่สุดในโครงกระดูก ตับ ตับอ่อน หัวใจและต่อมพิทูอิทารี มีคุณสมบัติเป็นต่าง แมงกานีสส่วนใหญ่จะสูญเสียไประหว่างกระบวนการปรุงอาหาร และส่วนเกินจะออกผ่านทางน้ำดีแล้วจะออกทางอุจจาระ แหล่งที่พบคือในอาหาร ทะเล หอยนางรม ตับสัตว์ ไช้แดง ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต ข้าวเจ้า แห้ว แครอท หัวปลี ถั่วลันเตา เมล็ดอัลมอนต์ เมล็ดทานตะวัน มะพร้าว คะน้า กะหล่ำปลี กถั่ว สับปะรด องุ่น มะกอก ส้ม เซอร์รี่ แอปเปิ้ล อะโวคาโด แอปริคอต และผลไม้เปลือกแข็ง เช่น มะตูม มะขวิด กระจับ เป็นต้น อาหารเหล่านี้เป็นแหล่งที่ดีของแมงกานีส แต่ปริมาณที่มีอยู่อาจจะต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณที่มีอยู่ในดิน การขาดแมงกานีสจะมีผลเกี่ยวกับการต้านทานกลูโคส (Glucose tolerance) คือร่างกายไม่สามารถที่จะนำเอาน้ำตาลที่มากเกินไปออกจากเลือดโดยการออกซิเดชันหรือนำไปเก็บที่อื่นได้ การที่กล้ามเนื้อทำงานไม่พร้อมกัน (Ataxia) จะเกี่ยวข้องกับการที่บริเวณแมงกานีสไม่เพียงพอ นอกจากนี้การขาดแมงกานีสจะนำไปสู่อัมพาต ตาบอด หูหนวก และชักในทารก สำหรับผู้ใหญ่จะปรากฏการเวียนศีรษะ และไม่สามารถได้ยินเสียง

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 เกลียวทอง อังกาบกิ่งแก้ว และคณะ (2560) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมระหว่างถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพ จากการทดลองพบว่าค่า Zero point charge ของตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุง คุณภาพคือ 7.40 และ 3.00 ตามลำดับ การดูดซับสูงสุดของถ่านผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเมื่อน้ำเสียมีค่า pH เท่ากับ 8 และมีค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมสูงสุดที่เวลา 5 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมจะลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ และอุณหภูมิในการบำบัด ค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมจะลดลง

2.9.2 ขนิษฐา สมตรรกู และคณะ (2561) ได้ศึกษาผลของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตต่อการใช้สาบเสื่อบำบัดฟิแนนทรินและไพรีนที่ปนเปื้อนในดินร่วมกับแคดเมียมผลการทดลองพบว่าการเติม SDS ไม่มีผลกระตุ้นการลดปริมาณฟิแนนทรินและไพรีนในดินที่ปลูกพืช แต่กลับทำให้การสะสมแคดเมียมที่ยอดของสาบเสื่อลดลง

2.9.3 วิสาชา ภูจินดา (2548) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดน้ำเสียพบว่าสารลดแรงตึงผิวมีบทบาทที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวก็มีบทบาทที่สำคัญในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมเช่น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ในการกำจัดคราบน้ำมัน และสิ่งสกปรก ในการกำจัดสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ในน้ำ สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่จะสามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ ทั้งนี้ความสามารถในการถูกย่อยสลายจะขึ้นกับโครงสร้างรวมทั้งปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่จากการใช้ ในน้ำดื่มปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่สามารถเจือปนได้โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.9.4 Ahmed และคณะ (2016) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลและชี้ว่า วิธีการทำถ่านชีวภาพให้มีสภาพแม่เหล็กเป็นวิธีที่น่าทำการศึกษาเพิ่มเติม เนื่องจากกระบวนการได้มาซึ่งตัวดูดซับดังกล่าวมีหลายวิธีแต่ละวิธีอาจได้มาซึ่งตัวดูดซับที่มีความสามารถดูดซับที่ต่างกัน และงานวิจัยในเรื่องนี้ยังมีอยู่อย่างจำกัด

2.9.5 Anzeze และคณะ (2014) ใช้ผักตบชวาในส่วนรากมาดูด Pb (II) พบว่าค่าความสามารถในการบำบัดต่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ (Q_m) เท่ากับ 16.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่น้อย

2.9.6 Han และคณะ (2016) ได้ทำการปรับปรุงถ่านชีวภาพโดยนำเปลือกถั่ว 10 กรัมที่บดแล้วนำไปแช่ในสารละลาย 2 โมลาร์ $FeCl_3$ 80 มิลลิลิตร 0.5 ชั่วโมง ใช้แท่งปั่นกวนแม่เหล็กและเพิ่มอุณหภูมิเป็น $70^{\circ}C$ เช้าต่ออีก 0.5 ชั่วโมง นำไปกรองสารละลายทิ้ง นำตัวดูดซับไปเผาในอุณหภูมิที่ต่างกันดังนี้คือ $450^{\circ}C$, $500^{\circ}C$, $550^{\circ}C$, $600^{\circ}C$ และ $650^{\circ}C$ โดยในช่วงแรกให้ความร้อนที่อัตรา $5^{\circ}C$ ต่อนาที เผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็น ล้างน้ำหลายครั้ง นำไปอบให้แห้งที่ $70^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปทดสอบการดูดซับ ผลการทดลองคือ biochar/ Fe_2O_3 มีความสามารถในการดูดซับมากกว่า biochar 1 - 2 เท่า การเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นการดูดซับจะดีขึ้น เมื่อเผาที่ $650^{\circ}C$ ประสิทธิภาพการดูดซับจะเป็น 77.542 มิลลิกรัมต่อกรัม ในทางกลับกันถ้าเป็นถ่านชีวภาพที่ไม่เป็นสภาพแม่เหล็ก เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นการดูดซับจะแยลง ในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา พบว่าค่า R^2 ของ Elovich > second order > first order การดูดซับเป็นไปตามแลงเมียร์

2.9.7 Zhang และคณะ (2015) ได้ทำการปรับปรุงถ่านชีวภาพ โดยนำผักตบชวาที่บดแล้ว ไปแช่ในสารละลาย $FeCl_3$ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่ $80^{\circ}C$ จนแห้ง นำไปเผาที่ $600^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในสภาพไร้อากาศ ล้างและอบจนแห้งที่ $80^{\circ}C$ จะได้ biochar/ Fe_2O_3 จากนั้นนำ biochar/ Fe_2O_3 ไปซัง 6 กรัม แช่ลงในสารละลายไคโตซาน (ในสารละลายประกอบด้วยไคโตซาน 6 กรัมละลายอยู่ใน 1,000 มิลลิลิตรของ 2% กรดอะซิติก) เช้า 30 นาที ที่ $40^{\circ}C$ จากนั้นเติมกลูตาอิลดีไฮด์ 1% ปริมาตรต่อปริมาตร ลงไปโดยยังคงแช่ต่ออีก 30 นาที ที่ $40^{\circ}C$ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายจนมี pH เป็น 9 เช้าต่ออีก 1 ชั่วโมง จะได้ chitosan - biochar/ Fe_2O_3 จากงานวิจัยพบว่า biochar/ Fe_2O_3 สามารถดูด Cr (VI) ได้ค่า Q_m เท่ากับ 167.31 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ $40^{\circ}C$ ส่วนถ่านชีวภาพที่ไม่ได้พัฒนาต่อ (biochar) สามารถดูด Cr (VI) ได้ 30 มิลลิกรัมต่อกรัม pH 2 เป็น pH ที่ดีที่สุด การดูดซับเป็นไปตามแลงเมียร์เป็นการดูดความร้อน เกิดขึ้นได้เอง และอัตราการดูดซับเป็นไปตามการดูดซับอันดับ 2 ในการศึกษาผลของไอออนอื่นที่มีต่อการดูด Cr (VI) พบว่า PO_4^{3-} และ SO_4^{2-} ชัดขวางการดูดซับมากที่สุด

2.9.8 Zheng และคณะ (2016) ถ่านชีวภาพได้ถูกนำมาพัฒนาโดยใช้หลายกระบวนการ ด้วยกัน เช่น กระตุ้นด้วยไอน้ำ เพิ่มรูพรุนโดยใช้กรด ใช้เบส การเคลือบด้วยเกลือหรือออกไซด์ของโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) กระดาษกรอง (Filter Papers) เบอร์ 42 ยี่ห้อ Whatman
- 2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น FEI บริษัท ซายน์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3) เครื่องกรองแบบลดความดัน รุ่น VE-11 บริษัท Jeio Tech ประเทศเกาหลีใต้
- 4) เครื่องกลั่นไอน้ำ (Distillation unit) บริษัท Gerhardt ประเทศเยอรมัน
- 5) เครื่องเขย่าสาร (Orbital Shaker) บริษัท Gallenkamp ประเทศอังกฤษ
- 6) เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น B 1601085 QB บริษัท โปรวิซชั่น ไซแอนติฟิก จำกัด ประเทศไทย
- 7) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) รุ่น IRTracer-100 บริษัท SHIMADZU ประเทศญี่ปุ่น
- 8) เครื่องย่อย (Digestion Unit) บริษัท Gerhardt ประเทศเยอรมัน
- 9) เครื่องวัดความเป็นกรด - ด่าง (pH Meter) รุ่น 827 pH Lab บริษัท Metrohm ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 10) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD) รุ่น D8 Advance บริษัท Bruker
- 11) เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) รุ่น Genesys 10S บริษัท Thermo Scientific UV-Vis ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 12) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer; AAS) รุ่น Analyst 200 บริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 13) เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner) รุ่น 28X บริษัท Ney Dental (NDI) ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 14) ตู้อบไฟฟ้า รุ่น UN55 บริษัท memmert ประเทศเยอรมัน
- 15) เตาเผาแบบไพโรไลซิส
- 16) อ่างน้ำร้อน (Water Bath) ยี่ห้อ Wisd บริษัท Daihan ประเทศเกาหลีใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2. สารเคมี

- 1) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 2) กรดเอทิลีนไดอามีนเตตระแอกซีติก; EDTA ($C_{10}H_{16}N_2O_8$) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 3) กรดไดเอทิลีนไนเตรเอมีนเพนเตตระแอกซีติก; DTPA ($C_{14}H_{23}N_3O_{10}$) AR grade บริษัท Fisher Chemical ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 4) กรดไนตริก (HNO_3) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 5) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 6) ตะกั่วไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) Lab grade บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
- 7) เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 8) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2 \cdot H_2O$) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 9) แคดเมียมไนเตรทเตตระไฮเดรต ($Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) Lab grade บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
- 10) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2 \cdot H_2O$) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 11) แมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 12) แอมโมเนียมไนเตรต ($C_2H_7NO_2$) AR grade บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย
- 13) แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 14) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) RE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 15) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 16) โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS; $NaCH_3(CH_2)_{11}SO_4$) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

3.2 วิธีการเตรียมตัวดูดซับ และดินสังเคราะห์

3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ (Han *et al.*, 2016)

วัสดุที่ใช้ในการทำตัวดูดซับในการทดลองนี้คือผักตบชวา โดยนำมาปรับสภาพให้เป็นสภาพแม่เหล็ก แล้วนำไปเผาแบบไพโรไลซิส ซึ่งมีวิธีการเตรียมดังนี้

เก็บผักตบชวามาล้างน้ำให้สะอาด แล้วตากแดดให้แห้งตัดเป็นชิ้นพอประมาณ นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดให้ละเอียด และร่อนผ่านตะแกรง 35 mesh นำเข้าตู้อบอีกครั้งที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก นำผักตบชวาละเอียดที่ได้ไปแช่ $FeCl_3$ ความเข้มข้น 2.5 M ในอัตราส่วนผักตบชวา 10 กรัม ต่อสารละลาย $FeCl_3$ ปริมาตร 80 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $70^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ต่อมาเผาแบบไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ $650^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำถ่านชีวภาพแม่เหล็กมาแช่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย SDS ความเข้มข้น 0.01 M ในอัตราส่วนของถ่านชีวภาพต่อสารละลาย SDS คือ 20 กรัมต่อสารละลาย SDS ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C และเขย่า 4 ชั่วโมง กรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอน ล้างน้ำจน pH เป็นกลาง จากนั้นนำถ่านชีวภาพไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.2 การเตรียมตัวอย่างดินสังเคราะห์

1. ขั้นตอนการเตรียมดิน

ดินที่ใช้สำหรับการทดลองเป็นดินจากจังหวัดระยอง โดยจะสุ่มเก็บดินที่คาดว่าจะไม่ได้รับการปนเปื้อนแคดเมียมหรือปนเปื้อนแคดเมียมน้อยมาก โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้

เก็บตัวอย่างดินด้วยวิธี Equal interval on diagonal line โดยเก็บที่ระดับความลึกจากผิวน้ำดินลึกลงไป 30 เซนติเมตร ซึ่งทำการเก็บจากหลาย ๆ จุดแล้วนำมาผสมกัน เลือกเศษหินและเศษวัชพืชขนาดใหญ่ออก แล้วนำมาผึ่งแดดจนแห้ง ต่อมาบดด้วยครกหิน และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 mesh นำดินเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกมาตั้งทิ้งไว้ในเย็นที่อุณหภูมิห้อง

2. ขั้นตอนการสังเคราะห์ดิน

นำตัวอย่างดินมา 1 กิโลกรัม สังเคราะห์ให้ปนเปื้อนแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของดินแห้ง ตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 550 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของดินแห้ง และแมงกานีสที่ระดับความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของดินแห้ง ทิ้งไว้ 3 สัปดาห์ จากนั้นจึงนำดินสังเคราะห์ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนักโดยใช้เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

3.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับและดิน

1. วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิค scanning electron microscope (SEM)
2. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ในตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)
3. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ โดยวิธี X-ray diffraction (XRD) analysis
4. วิเคราะห์ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge; P_{PZC}) ของตัวดูดซับ (เกษราพร และ โกวิทย์, 2012)

เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M จากนั้นนำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร มาปรับความเป็นกรด - เบสให้อยู่ในช่วงระหว่าง pH 1 – 12 ด้วยสารละลายกรดไนตริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นชั่งถ่านชีวภาพแม่เหล็กปริมาณ 0.2 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดปากขวดรูปชมพู่ให้สนิทนำไปเขย่าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็ว 120 รอบต่อนาทีโดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองตัวดูดซับออกไป วัดความเป็นกรด - เบสภายหลังจากการเขย่าอีกครั้ง จากนั้นนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด - เบส เริ่มต้น (pH_i) และความเป็นกรด - เบสสุดท้าย (pH_f) โดยประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จากเส้นความเป็นกรด - เบสเริ่มต้น และความเป็นกรด - เบสสุดท้าย ตัดกับเส้นทแยงมุม

5. วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของดินตัวอย่างและตัวดูดซับ

ตารางที่ 3.1 วิธีการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ทางเคมี

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
Soil texture (เฉพะาดิน)	Hydrometer method
Moisture	Dry in an oven at 110 °C and calculating the mass loss. (ASTM 2216)
pH	pH meter (อัตราส่วนดิน:น้ำ เท่ากับ 1:100) (Consort, C860)
electrical conductivity	conductivity meter
Cation exchange capacity	Ammonium acetate method
loss of ignition	burning at 550 °C and calculating the mass loss
Organic matter	Walkley-Black titrations
Total nitrogen	Kjeldahl method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2561)
Nitrate ion	Brucine method (Gordon และคณะ, USA)
Chloride ion	Argentometric method (คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช)
Total phosphate	Molybdovanadophosphate method
Sulfate ion	Turbidimetric method (คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช)
Aluminium ion	Colorimetric method
Major element (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺) and Total heavy metal (Cd ²⁺)	Acid digestion/ Atomic absorption spectrophotometer (AAS) SW-846 method 3050b (US.EPA, 1996)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก (Wu *et al*, 2015)

ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพ 1 กรัม เติมสารละลาย HNO_3 เข้มข้น 10 มิลลิลิตร จากนั้นทำการ reflux เป็นเวลา 15 นาที เติมสารละลาย HNO_3 เข้มข้น 5 มิลลิลิตร และทำการ reflux เป็นเวลา 30 นาที ถ้าเหนือสารละลายมีไอสีส้มอมน้ำตาลให้เติมสารละลาย HNO_3 เข้มข้นที่ละ 5 มิลลิลิตร จนกว่าจะไม่มีไอสีส้มอมน้ำตาล จากนั้นทำการ reflux ต่อจนเหลือสารละลาย 5 มิลลิลิตรหรือประมาณ 2 ชั่วโมง เติมน้ำปราศจากไอออน 2 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 มิลลิลิตรโดยการเติมทีละ 1 มิลลิลิตร จนกว่าจะไม่เกิดฟอง (ไม่เกิน 10 มิลลิลิตร) ทำการ reflux ต่อจนเหลือสารละลาย 5 มิลลิลิตรหรือประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลาย HCl เข้มข้น ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และทำการ reflux เป็นเวลา 15 นาที ทำการกรองสารละลายด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (Whatman ขนาด 4.5 ไมโครเมตร) เจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่สกัดได้ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างดินปรับสภาพสำหรับวิเคราะห์

นำดินสังเคราะห์ผสมกับตัวดูดซับ โดยให้มีปริมาณตัวดูดซับ 0%, 0.5%, 1%, 2% และ 5% ทำการคลุกเคล้าให้เข้ากันด้วยน้ำกลั่น ทำการปรับเสถียรที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 สัปดาห์ ระหว่างทำการปรับเสถียรต้องทำการคลุกเคล้าเสมอ

3.3.3 การศึกษาความสามารถในการสะเทิน (Venegas *et al*, 2015)

ชั่งตัวอย่างดินสังเคราะห์ที่ผสมตัวดูดซับ 1 กรัม เติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน โดยใช้กระดาษกรอง Whatman ขนาด 4.5 ไมโครเมตร แล้วนำไปวัดค่า pH โดยค่านี้จะเป็นค่า pH เริ่มต้น จากนั้นแบ่งสารออกเป็น 2 ส่วน

ส่วนที่ 1 เติมกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยเติมทีละ 0.5 มิลลิลิตร พร้อมวัดค่า pH ทุกครั้งที่เติม จนค่า pH เท่ากับ 2 บันทึกค่า pH ที่ได้ และปริมาตรสารละลายที่ใช้

ส่วนที่ 2 เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ เติมทีละ 0.5 มิลลิลิตรเช่นกัน พร้อมวัดค่า pH ทุกครั้งที่เติม จนค่า pH เท่ากับ 12 บันทึกค่า pH ที่ได้ และปริมาตรของสารละลายที่ใช้เพื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH และปริมาตรของสารละลาย (meg/g) โดยเริ่มเขียนกราฟจาก pH เริ่มต้นจนถึง pH 4 เพื่อนำมาหาค่าความสามารถในการสะเทินของกรด (Acid neutralization capability; ANC) ดำเนินการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก

ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก โดยนำดินที่ปรับสภาพแล้วมาทำการสกัดดินด้วยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single – step extraction) (Sakcharoen, 2007) โดยจะใช้ DTPA, CaCl_2 , EDTA และ Ammonium acetate ในการสกัด

1. การสกัดด้วยสารละลาย DTPA ความเข้มข้น 0.005 M

ซึ่งตัวอย่างดินสังเคราะห์ที่ผสมตัวดูดซับ 10 กรัม เติมสารละลาย DTPA ความเข้มข้น 0.005 M ปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาทีในอุณหภูมิห้อง ทำการกรองสารละลายด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (Whatman ขนาด 4.5 ไมโครเมตร) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ

2. การสกัดด้วยสารละลาย CaCl_2 ความเข้มข้น 0.01 M

ซึ่งตัวอย่างดินสังเคราะห์ที่ผสมตัวดูดซับ 5 กรัม เติมสารละลาย CaCl_2 ความเข้มข้น 0.01 M ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่ pH 5.30 - 6.00 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 3 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ทำการกรองสารละลายด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (Whatman ขนาด 4.5 ไมโครเมตร) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ

3. การสกัดด้วยสารละลาย EDTA ความเข้มข้น 0.05 M

ซึ่งตัวอย่างดินสังเคราะห์ที่ผสมตัวดูดซับ 0.8 กรัม เติมสารละลาย EDTA ความเข้มข้น 0.05 M ที่ pH 7.50 ± 0.05 ปริมาตร 80 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 48 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ทำการกรองสารละลายด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (Whatman ขนาด 4.5 ไมโครเมตร) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ

4. การสกัดด้วยสารละลาย Ammonium acetate ความเข้มข้น 1 M

ซึ่งตัวอย่างดินสังเคราะห์ที่ผสมตัวดูดซับ 5 กรัม เติมสารละลาย ammonium acetate ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่ pH 7 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 1 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ทำการกรองสารละลายด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (Whatman ขนาด 4.5 ไมโครเมตร) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน

ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก โดยนำดินที่ปรับสภาพแล้วมาทำการทดลอง โดยใช้การสกัดตามลำดับ 6 ขั้นตอน (Six – step sequential extraction) (Shen *et al*, 2016) โดยเลือกเฉพาะตัวอย่างที่ให้ประสิทธิภาพการยับยั้งการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้ดีที่สุด

ส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ (Water soluble fraction)

ชั่งตัวอย่างดินสังเคราะห์ที่ผสมตัวดูดซับ 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน 15 มิลลิลิตร และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 °C จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทำการเก็บส่วนใสและปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นทำการล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่าและนำเข้าสู่เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อทำให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทำการทิ้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดส่วนที่ 2 ต่อไป

ส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction)

จากตัวอย่างดินที่เหลือในส่วนที่ 1 นำมาสกัดด้วยสารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ที่ pH 7 จากนั้นเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 °C จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทำการเก็บส่วนใสและปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นทำการล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่าและนำเข้าสู่เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อทำให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทำการทิ้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดส่วนที่ 3 ต่อไป

ส่วนที่ 3 ฟอร์มที่จับกับคาร์บอเนต (Carbonate bound fraction)

จากตัวอย่างดินที่เหลือในส่วนที่ 2 นำมาสกัดด้วยสารละลาย NH_4OAc ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และเขย่าต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 °C จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทำการเก็บส่วนใส ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 5 ด้วยกรดอะซิติก และปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่าและนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทำการทิ้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดส่วนที่ 4 ต่อไป

ส่วนที่ 4 รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (Fe-Mn oxide bound fraction)

จากตัวอย่างดินที่เหลือในส่วนที่ 3 นำมาสกัดด้วยสารละลาย $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ (pH 2) ความเข้มข้น 0.04 M ใน 25% (v/v) ของกรดอะซิติก ปริมาตร 8 มิลลิลิตร เขย่าต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ 96 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เก็บส่วนใสและปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจากนั้นล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่าและนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น จากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาทีทิ้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดส่วนที่ 5 ต่อไป

ส่วนที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic bound fraction)

จากตัวอย่างดินที่เหลือในส่วนที่ 4 นำมาสกัดด้วยสารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.02 M ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 30% ปริมาตร 5 มิลลิลิตร (ปรับค่า pH เท่ากับ 2 ด้วย HNO_3) เขย่าต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่านาน 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 80 °C จากนั้นเติมสารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.02 M ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 30% ปริมาตร 5 มิลลิลิตร (ปรับค่า pH เท่ากับ 2 ด้วย HNO_3) เขย่าต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่านาน 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 80 °C จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นจึงสกัดด้วยสารละลาย NH_4OAc ความเข้มข้น 3.2 M ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เก็บส่วนใสและปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจากนั้นล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่าและนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาทีทิ้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดส่วนที่ 6 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ (Residual fraction)

จากตัวอย่างดินที่เหลือในส่วนที่ 5 นำมาสกัดโดยการวิเคราะห์ด้วย Acid digestion จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เก็บส่วนใสและปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นวิเคราะห์หารูปฟอร์มของแคดเมียมในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างในแต่ละส่วนด้วยเครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดการเคลื่อนที่ของแคตเมียมในดินที่มีตะกั่วและแมงกานีสปนเปื้อน โดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพ โดยวิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวของตัวดูดซับ (SEM), ศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ (FTIR), วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ (XRD) และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการศึกษา ได้แก่ การวิเคราะห์ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge; P_{PZC}) ของตัวดูดซับ, วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี, วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก, วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน, วิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะทั้งหมด และวิเคราะห์ความสามารถการสะเทิน ได้ผลศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

4.1.1 วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวของตัวดูดซับ (SEM)



รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพก่อนปรับปรุงคุณภาพจากกล้อง SEM กำลังขยาย 9000 เท่า

(a) ผักตบชวา

(b) ถ่านชีวภาพ

(c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะของผักตบชวาก่อนนำไปเผาแบบไพโรไลซิส จะมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ (รูปที่ 4.1 a) แต่เมื่อนำไปเผาแบบไพโรไลซิสแล้ว (รูปที่ 4.1 b) ทำให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเผาด้วยอุณหภูมิที่สูงจะทำให้โครงสร้างพื้นผิวมีรูพรุนเพิ่มขึ้น (ภควดี, 2553) แต่เมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโดเดซิลซัลเฟต (รูปที่ 4.1 c) ซึ่งสันนิษฐานว่าบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโดเดซิลซัลเฟตมีผลึกของ $FeCl_3$ เกาะอยู่ จึงทำให้มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระและจำนวนรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)



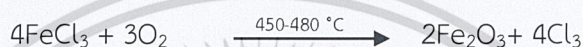
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ (FT-IR) ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

ตารางที่ 4.1. ลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

Wavenumber (cm ⁻¹)	พันธะ
3,500 – 3,200	O-H Stretch
2,950 – 2,800	C-H Stretch
1,750 – 1,350	S=O Stretch
550 - 440	Fe-O

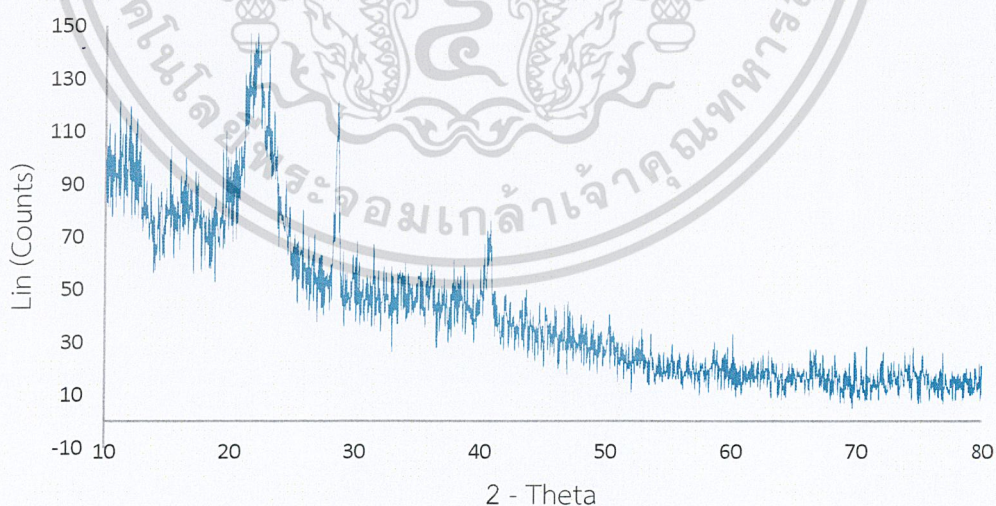
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของถ่านชีวภาพไม่ปรับปรุงคุณภาพและถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพ จะปรากฏพีคในตำแหน่งช่วง $3,500 - 3,200 \text{ cm}^{-1}$ เหมือนกัน แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิล ซึ่งเกิดจากการสั่นของ O-H Stretching พีคต่อมาปรากฏในตำแหน่งช่วง $2,950 - 2,800 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของ Alkane เกิดจากการสั่นของ C-H Stretching และถัดมาปรากฏพีคในตำแหน่งช่วง $1,750 - 1,350 \text{ cm}^{-1}$ ของถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของซัลโฟเนตซึ่งเกิดจากการสั่นของ S=O Stretching เนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีดิลซัลเฟตที่มี SO_4^- เป็นองค์ประกอบ แต่จะไม่ปรากฏพีคนี้ในถ่านชีวภาพ และพีคสุดท้ายที่ปรากฏในตำแหน่งช่วง $550 - 440 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงการยึดของพันธะ Fe-O ซึ่งเป็นโครงสร้างของ FeO_3 ที่เกิดจากการเผาไหม้ของ FeCl_3 ซึ่งปรากฏที่ถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพเท่านั้น แสดงดังสมการ



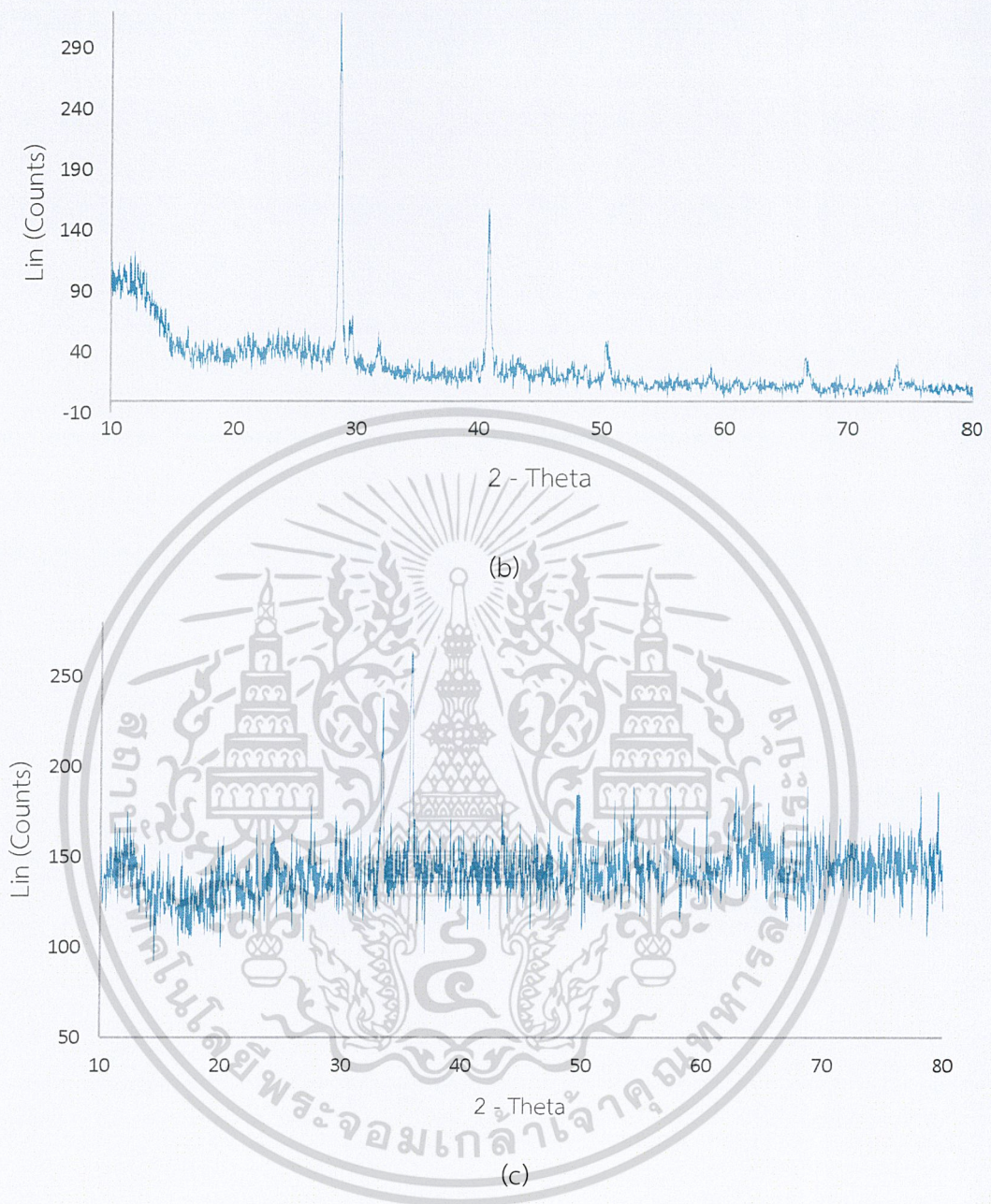
4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างและธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X - Ray Diffractometer (XRD)

จากผลการวิเคราะห์หาโครงสร้างและธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X - Ray Diffractometer (XRD) พบว่าเมื่อนำผักตบชวาไปเผาแบบไพโรไลซิส จากนั้นนำมาปรับสภาพเป็นแม่เหล็กด้วย FeCl_3 แล้วปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีดิลซัลเฟต ทำให้ตำแหน่งที่ 2 - Theta เกิดการเปลี่ยนแปลงพีคที่ช่วง 33.44° และ 35.88° ซึ่งแสดงถึงความเป็นแม่เหล็กของ Fe_2O_3 (รูปที่ 4.3 c) อ้างอิงจาก Rong *et al.* (2019) จากผลการทดลองการเลี้ยวเบนของ Fe_2O_3 ซึ่งมีจุดสูงสุดคือ 33.24° , 35.63° , 43.28° , 53.73° , 57.21° และ 62.92°



(a)

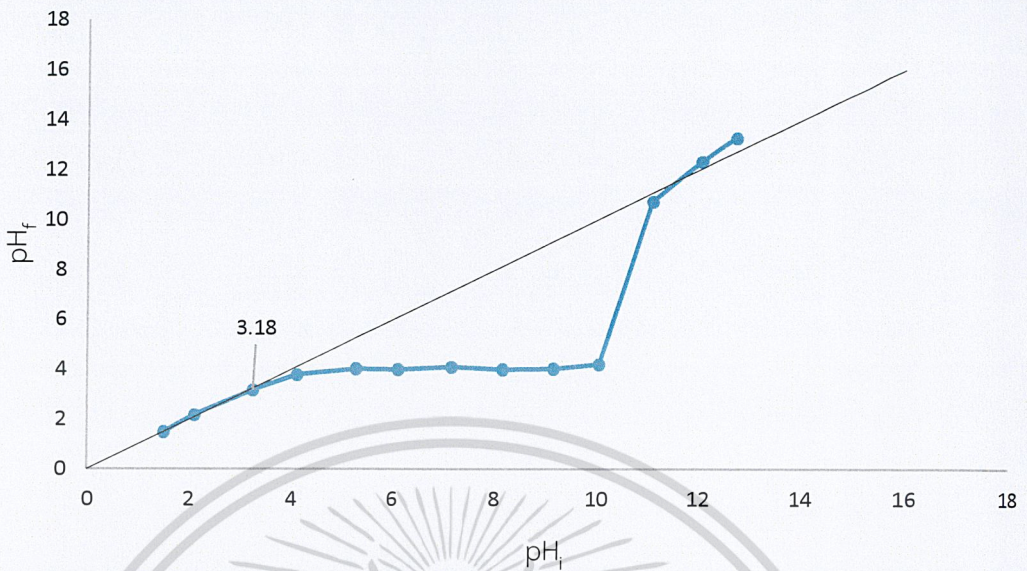
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ (XRD) ของตัวดูดซับ
 (a) ผักตบชวา
 (b) ถ่านชีวภาพ
 (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงด้วยไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การวิเคราะห์ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge; P_{PZC}) ของตัวดูดซับ



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge; P_{PZC}) ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลลเฟต

เมื่อพิจารณาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลลเฟต อธิบายได้ว่าเมื่อความเป็นกรด - เบสของสารละลายมีค่ามากกว่า $pH\ 3.18$ ประจุที่ผิวของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วแสดงค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถดูดซับไอออนโลหะที่มีประจุบวกได้เป็นอย่างดี ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเป็นกรด - เบสของสารละลายมีค่าน้อยกว่า $pH\ 3.18$ ประจุที่ผิวของ ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพ การดูดซับไอออนโลหะที่มีประจุบวกจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงหรือเกิดการดูดซับได้เพียงเล็กน้อย

4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางเคมีของดิน ถ่านชีวภาพ และถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์ (Mean \pm S.D.)			
	ดิน	ถ่านชีวภาพ	ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	
Soil texture (เฉพาะดิน)	ดินร่วนเหนียวปนทราย	-	-	
Moisture (%)	0.88	-	-	
pH	6.49	5.25	3.32	
electrical conductivity (dS/m)	6.53 \pm 0.32	41.73 \pm 1.65	9.08 \pm 0.45	
Cation exchange capacity	8.07 \pm 0.46	5.75 \pm 0.35	2.75 \pm 0.35	
loss of ignition (%)	0.38 \pm 0.01	4.53 \pm 0.47	2.90 \pm 0.09	
Organic matter (%)	3.54 \pm 2.45	16.52 \pm 0.44	16.22 \pm 0.45	
Total nitrogen (%)	0.07	0.07	0.05	
Nitrate ion	11.43 \pm 1.40	17.34 \pm 0.04	15.19 \pm 0.37	
Chloride ion (mg/l)	2.71 \pm 0.67	127.13 \pm 1.34	8.52 \pm 0.67	
Total phosphate	12.51 \pm 0.30	16.68 \pm 0.12	17.73 \pm 0.27	
Sulfate ion	45.78 \pm 9.78	10.20 \pm 0.25	6.14 \pm 1.00	
Aluminium ion	ND	ND	ND	
Major element (mg/kg)	Ca ²⁺	17.56	9.46	32160.00
	Mg ²⁺	1600.00	318.00	9.52
	K ⁺	13160.00	47600.00	380.00

หมายเหตุ 1. ND หมายถึง ไม่สามารถวิเคราะห์ได้

จากการศึกษาพารามิเตอร์เบื้องต้นดังตารางที่ 4.2 พบว่าดินที่นำมาวิเคราะห์มีสภาพเป็นกรดเล็กน้อย ค่าการนำไฟฟ้าของดินเท่ากับ 6.53 \pm 0.32 dS/m ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับความเค็มของดินมีความเค็มเพียงเล็กน้อย ส่วนค่า CEC แสดงให้เห็นว่าดินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนอยู่ในระดับที่ต่ำ ดังนั้นความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารที่เป็นประจุบวกจะดูดซับได้เพียงเล็กน้อย ต่อมาปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินอยู่ในระดับที่สูง ส่งผลให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินมีสูง คลอไรด์ไอออนที่อยู่ในดินมีปริมาณเพียงเล็กน้อย ดังนั้นความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนจึงมีน้อยซึ่งสอดคล้องกับค่าการนำไฟฟ้าของดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) และจากการศึกษาพารามิเตอร์เบื้องต้นดังตารางที่ 4.2 พบว่าถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟตที่มีการผสม FeCl₃ จะมีสภาพที่เป็นกรดสูงกว่าถ่านชีวภาพธรรมดา เนื่องจากมีการเติม FeCl₃ และในถ่านชีวภาพมีคลอไรด์ไอออน 127.13 \pm 1.34 mg/l ซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ดีกว่าถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต ซึ่งมีค่าคลอไรด์ไอออนเพียง 8.52 ± 0.67 mg/l เนื่องจากการเติม FeCl_3 ลงไป ทำให้มีคลอไรด์ละลายออกมาน้อยเพราะทำปฏิกิริยากับธาตุเหล็กอยู่ เนื่องจากผลการวิเคราะห์ปริมาณของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสเบื้องต้นในตัวอย่างดินมีปริมาณน้อย ทำให้ดินตัวอย่างยังไม่จัดอยู่ในเกณฑ์ที่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพดิน จึงต้องทำการสังเคราะห์ดินเพื่อให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยมีระดับความเข้มข้นแคดเมียม, ตะกั่ว และแมงกานีส เท่ากับ 50, 550 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของดิน ตามลำดับ ซึ่งระดับความเข้มข้นดังกล่าวเป็นค่าระดับความเข้มข้นที่สูงเกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่กำหนดไว้ภาคผนวก ง

โดยผู้วิจัยทำการสังเคราะห์ดินโดยการเติมสารละลายแคดเมียม, ตะกั่ว และแมงกานีสผสมเข้าไปในดิน ตั้งทิ้งไว้ 2 สัปดาห์

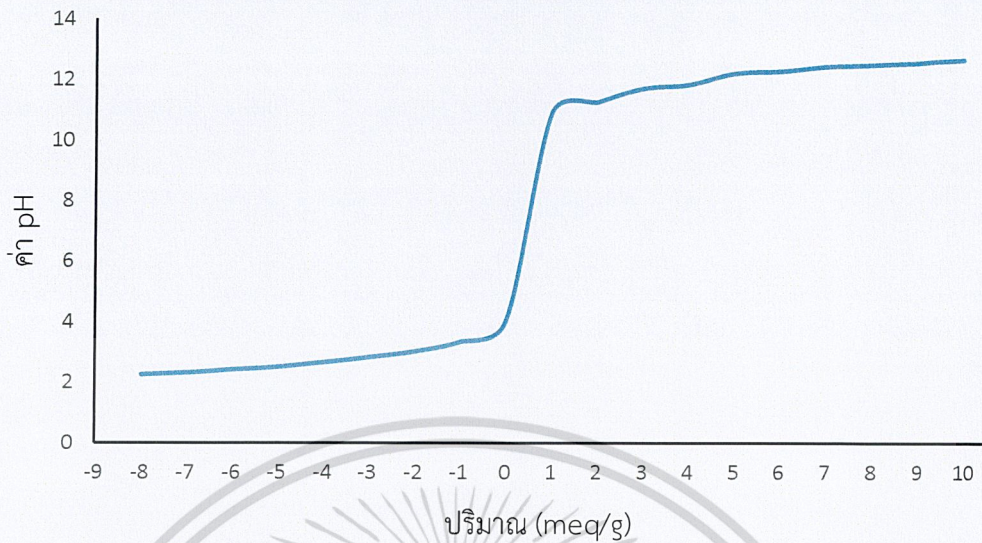
4.3 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะทั้งหมด

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักทั้งหมดหลังจากทำการสังเคราะห์ดิน

ชนิดของโลหะหนัก	ปริมาณแคดเมียม ที่วัดได้ (mg/kg)	ปริมาณตะกั่ว ที่วัดได้ (mg/kg)	ปริมาณแมงกานีส ที่วัดได้ (mg/kg)
ตัวอย่างดินระยอง	0	6.97 ± 0.42	7.9 ± 0.71
ดินผสมโลหะหนัก	64.93 ± 3.57	389.80 ± 120.89	934.77 ± 13.04
ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ปรับปรุงคุณภาพ	4.23 ± 0.31	43.13 ± 12.61	105.77 ± 0.45

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน พบว่าในตัวอย่างดินผสมโลหะหนักมีปริมาณแคดเมียม, ตะกั่ว และแมงกานีสทั้งหมดเท่ากับ 64.93 mg/kg, 389.80 mg/kg และ 934.77 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งเปรียบเสมือนความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีการปนเปื้อนและอยู่ในระดับความเข้มข้นที่สูง ในถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพ ตรวจพบโลหะหนักนั้น คาดว่าเกิดจากการปนเปื้อนจากแหล่งที่เก็บผักคชวาที่นำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ

4.4 วิเคราะห์ความสามารถของการสะเทิน (Neutralization Capability)



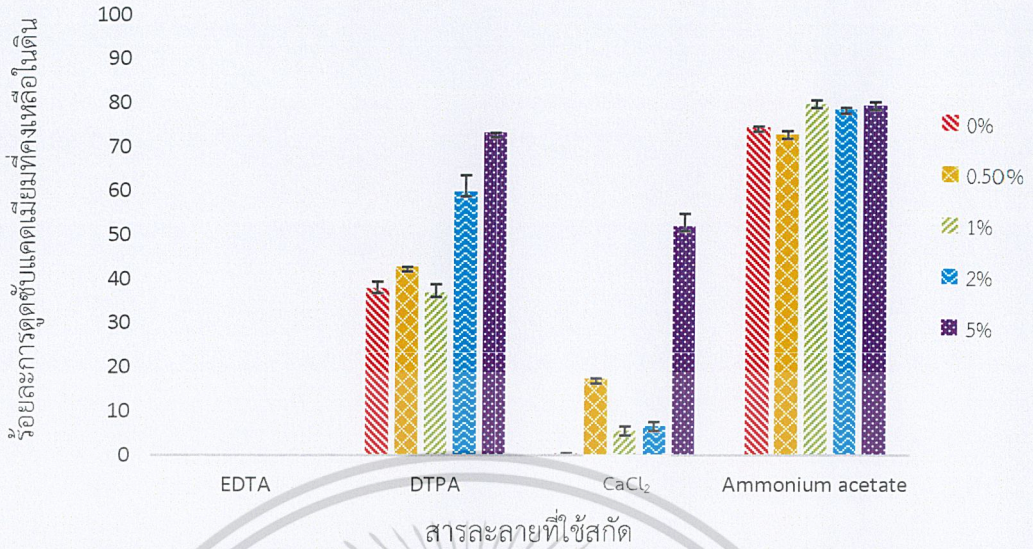
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความสามารถการสะเทินของถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต

จากรูปที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดหรือเบสที่ใช้ (meq/g) กับค่า pH สุดท้ายหลังจากหยดกรดหรือเบส โดยเริ่มแรกค่า pH ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต มีค่าเท่ากับ 4.00 ซึ่งมีสภาพเป็นกรด ดังนั้นเมื่อเติมเบสลงไปจึงทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนเมื่อ pH เท่ากับ 12 ค่า pH จึงเริ่มคงที่ และเมื่อเติมกรดลงไปค่า pH จะเปลี่ยนแปลงไม่รวดเร็วเท่าการเติมเบส ซึ่งเมื่อ pH เท่ากับ 2 ค่า pH จึงเริ่มคงที่ และเมื่อนำไปหาคำนวนหาค่า Acid Neutralization capability (ANC) จึงทราบค่าความสามารถในการสะเทินเท่ากับ 7,481.30 meq/kg แสดงถึงค่า ANC ที่สูง อ้างอิงจาก Venegas *et al* (2015) จากผลการทดลองความสามารถการสะเทิน ได้ค่า ANC เท่ากับ 7,100 meq/kg ซึ่งมีค่าที่สูง สามารถบ่งชี้ได้ว่าดูดซับเหมาะสมกับการใช้บำบัดดินที่ปนเปื้อน

4.5 การศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก

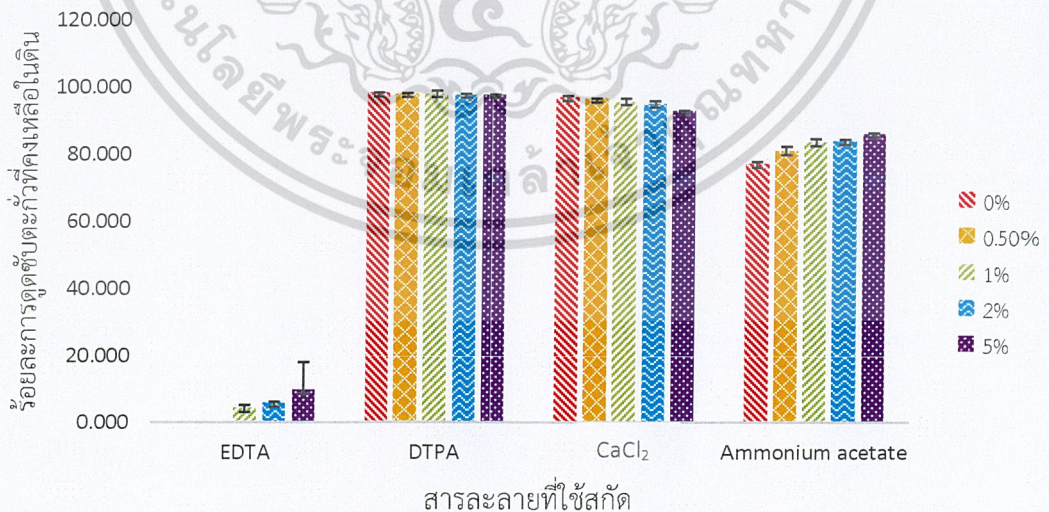
ในการศึกษาใช้วิธีการสกัดแบบ single step extraction เพื่อใช้ประเมินผลด้านสิ่งแวดล้อมของการปรับเสถียรในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส โดยสารสกัดที่ใช้ ได้แก่ 0.05 M Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), 0.005 M Diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA), 0.01 M Calcium chloride (CaCl₂) และ 1 M Ammonium acetate (NH₄OAc) ซึ่งสารละลายที่ใช้ในการสกัดแต่ละชนิดจะใช้ในการประเมินศักยภาพของโลหะหนักในดินกับการเข้าสู่ชีวภาพในด้านที่แตกต่างกันดังนี้ สารละลาย 0.05 M EDTA ใช้เพื่อประเมินศักยภาพในการเคลื่อนที่ (mobility), สารละลาย 1 M NH₄OAc เพื่อประเมินศักยภาพในการแลกเปลี่ยน (exchangeability), และสารละลาย 0.005 M DTPA, 0.01 M CaCl₂ เพื่อประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (phytoavailability) ของโลหะหนักในดิน (Tica *et al*, 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเนื้อหาเป็นเพียงข้อมูลเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ร้อยละของการดูดซับแคดเมียมไว้ในดิน อัตราดินสังเคราะห์ผสมกับตัวดูดซับ โดยให้มีปริมาณตัวดูดซับ 0%, 0.5%, 1%, 2%, 5% ตามลำดับ

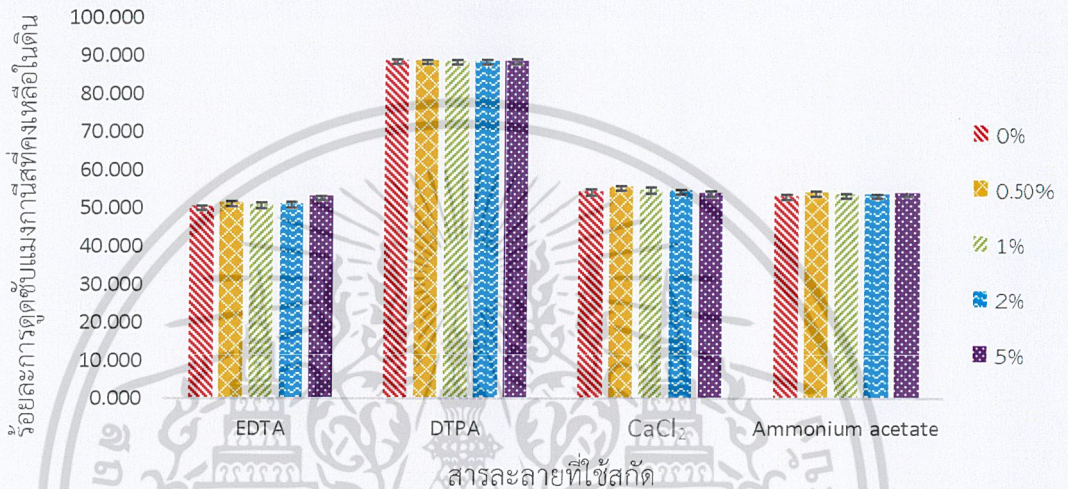
จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของการดูดซับแคดเมียมไว้ในดิน จะสังเกตเห็นว่าร้อยละของแคดเมียมที่คงอยู่ในดินที่สกัดด้วยสารละลาย EDTA มีปริมาณน้อยที่สุด แสดงถึงประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมได้น้อย ในดินที่ปนเปื้อน ตะกั่ว และแมงกานีส และร้อยละการคงอยู่ในดินของแคดเมียมด้วยสกัดด้วยสารละลาย DTPA, CaCl₂ และ NH₄OAc นั้น มีอัตราการคงอยู่ในดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวดูดซับเติมลงไป แสดงให้เห็นว่าดินที่เติมตัวดูดซับที่ 5% มีร้อยละของการดูดซับแคดเมียมไว้ในดินมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมตัวดูดซับ 5% สามารถลดการดูดซับโลหะหนักของพืชได้



รูปที่ 4.7 ร้อยละของการดูดซับตะกั่วไว้ในดิน อัตราดินสังเคราะห์ผสมกับตัวดูดซับ โดยให้มีปริมาณตัวดูดซับ 0%, 0.5%, 1%, 2%, 5% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของการดูดซับตะกั่วไว้ในดิน จะสังเกตเห็นว่าร้อยละของตะกั่วที่คงอยู่ในดินที่สกัดด้วยสารละลาย EDTA มีอัตราการคงอยู่ในดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวดูดซับเติมลงไป และเมื่อเติมตัวดูดซับลงไป 5% แสดงร้อยละของการดูดซับตะกั่วไว้ในดินได้มากที่สุด ทำให้ทราบว่าประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ได้ของตะกั่วในดินที่ปนเปื้อนมีประสิทธิภาพที่ดี และร้อยละของการดูดซับตะกั่วไว้ในดินที่สกัดด้วยสารละลาย DTPA, CaCl₂ และ NH₄OAc มีอัตราการคงอยู่ในดินที่สูง แสดงให้เห็นว่าสามารถลดศักยภาพการดูดซับตะกั่วของพืชและศักยภาพในการแลกเปลี่ยนได้ดี



รูปที่ 4.8 ร้อยละของการดูดซับแมงกานีสไว้ในดิน อัตราดินสังเคราะห์ผสมกับตัวดูดซับ โดยให้ปริมาณตัวดูดซับ 0%, 0.5%, 1%, 2%, 5% ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของการดูดซับแมงกานีสไว้ในดิน จะสังเกตเห็นว่าร้อยละของแมงกานีสที่คงอยู่ในดินที่สกัดด้วยสารละลาย EDTA มีอัตราการคงอยู่ในดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวดูดซับที่เติมลงไป ที่ 5% ร้อยละของการดูดซับแมงกานีสไว้ในดินมากที่สุด แสดงถึงประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ได้ของแมงกานีสในดินที่ปนเปื้อน และร้อยละของการดูดซับแมงกานีสไว้ในดินที่สกัดด้วยสารละลาย DTPA นั้น มีอัตราการคงอยู่ในดินที่สูง แสดงให้เห็นว่าสามารถลดศักยภาพการดูดซับแมงกานีสของพืชได้ดี

4.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส เพื่อจำแนกรูปฟอร์มของโลหะหนักหลังจากที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต ทำการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) (Shen *et al*, 2016) ซึ่งโลหะหนักในดินสามารถแบ่งออกเป็น 6 รูปฟอร์มดังนี้

ส่วนที่1 รูปฟอร์มที่ละลายน้ำได้ (Water soluble fraction)

ส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction) จะอยู่ในไอออนที่พืชสามารถ

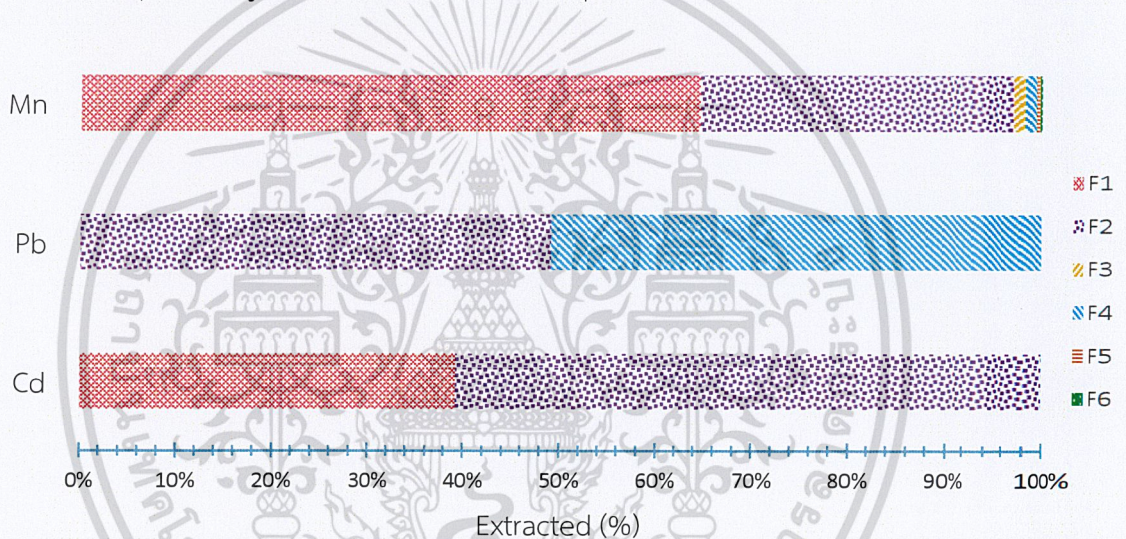
เอกรสารนี้ นำไปใช้ได้ทันที สารสกัดที่ใช้จึงมีความรุนแรงน้อย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 3 รูปฟอร์มที่ตรึงอยู่กับคาร์บอเนต (Carbonate bound fraction) จะอยู่ในรูปที่สร้างพันธะในดินอย่างหลวมๆ จึงมีโอกาที่จะละลายน้ำได้ง่ายเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ และไวต่อการเปลี่ยนแปลงของ pH

ส่วนที่ 4 รูปฟอร์มที่ตรึงอยู่กับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (Fe-Mn oxide bound fraction) จะละลายได้ยากกว่า ส่วนใหญ่จะเคลือบที่ผิวของเม็ดดินหรือผิวของแร่ เมื่อเกิดกระบวนการตกตะกอน การดูดซับ การสร้างตัวหรือการแลกเปลี่ยนประจุ ก็ทำให้รูปฟอร์มนี้มีโอกาสที่จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้

ส่วนที่ 5 รูปฟอร์มที่ตรึงอยู่กับสารอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic bound fraction) สันนิษฐานได้ว่ามีลักษณะเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในดินเป็นเวลานานและเมื่อผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปหรือกระบวนการย่อยสลาย จะทำให้ธาตุเหล่านี้มีความเป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น

ส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือหรือส่วนที่ตกค้าง (Residual fraction) เป็นรูปที่อยู่ในโครงสร้างของหินและแร่ธาตุที่สะสมอยู่ในดิน ต้องใช้ระยะเวลาในการผุพังสลายตัว



รูปที่ 4.9. ร้อยละรูปฟอร์มต่าง ๆ ของแคดเมียม ตะกั่วและแมงกานีสจากการสกัดลำดับส่วน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน เมื่อนำถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟตมาผสมกับดินสังเคราะห์โลหะหนักทั้งสามชนิด ในปริมาณ 5% พบว่าในการสกัดลำดับส่วนพบแคดเมียมในรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้มากที่สุดคือ 60.84% แสดงว่าโอกาสที่โลหะแคดเมียมสามารถเคลื่อนที่หรือถูกดูดเพื่อไปใช้มีโอกาสถึง 60.84% รองลงมาคือรูปฟอร์มที่ละลายน้ำได้ที่ 39.16% แสดงว่าโลหะแคดเมียมมีโอกาสละลายไปกับน้ำชะล้างถึง 39.16% ส่วนในการสกัดลำดับส่วนพบตะกั่วในรูปฟอร์มที่ตรึงอยู่กับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์มากที่สุดคือ 50.91% และรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ 49.09% ซึ่งตะกั่วพบในรูปฟอร์มที่ตรึงอยู่กับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์มากที่สุดเมื่อเทียบกับโลหะอีก 2 ชนิด สามารถบอกได้ว่าถ่านชีวภาพสามารถดูดซับตะกั่วไว้ได้ดีกว่าโลหะอีก 2 ชนิด และในการสกัดลำดับส่วนพบแมงกานีสในรูปฟอร์มที่ละลายน้ำได้มากที่สุดคือ 64.54% และพบในรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้รองลงมาคือ 32.65% ในส่วนของรูปฟอร์มที่ 3 ถึง 6 นั้นพบแมงกานีสเพียงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแคดเมียม ซึ่งมีโลหะอื่นอีก 2 ชนิดคือ ตะกั่วและแมงกานีสเป็นตัวรบกวน โดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กจากผักตบชวาซึ่งปรับปรุงคุณภาพด้วยโดเดซิลซัลเฟตเป็นตัวดูดซับ ซึ่งได้ผลการศึกษาดังนี้

1. การศึกษาตัวดูดซับพบว่ารูพรุนและพื้นผิวของตัวดูดซับมีจำนวนรูพรุนเพิ่มขึ้นและมีพื้นที่ผิวที่ขรุขระขึ้น เมื่อนำถ่านชีวภาพไปปรับสภาพแล้วนำไปเผาแบบไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงมาก และยังสามารถเพิ่มพีคในตำแหน่งช่วง $550 - 440 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงการยึดของพันธะ Fe-O ซึ่งเป็นโครงสร้างของเฟอร์ริกออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเฟอร์ริกคลอไรด์ แสดงถึงความเป็นสภาพแม่เหล็กของถ่านชีวภาพ ซึ่งความเป็นแม่เหล็กนี้เกิดจากการเติมสาร FeCl_3 ทำให้เมื่อนำตัวดูดซับไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ พบว่ามีรูปร่างของเหล็กออกไซด์อยู่เป็นโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal ต่อมาเป็นการวิเคราะห์ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตพบว่ามีความเท่ากับ 3.18 และวิเคราะห์ความสามารถการสะเทินเมื่อนำไปหา Acid Neutralization capability (ANC) ค่าความสามารถในการเสกทินเท่ากับ $7,481.30 \text{ meq/kg}$

2. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะหนักในดิน พบว่าต้องใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงด้วยโดเดซิลซัลเฟต 5% จึงจะสามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้ดีที่สุด และเมื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะหนักในดินพบว่าในแคดเมียมและแมงกานีสมีโอกาสถูกพืชดูดไปใช้มากกว่าตะกั่ว เนื่องจากส่วนใหญ่พบรูปร่างสามารถละลายน้ำและรูปร่างที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ แต่ในตะกั่วพบรูปร่างที่ตรึงอยู่กับกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์มากที่สุดเมื่อเทียบกับโลหะอีก 2 ชนิดสามารถบอกได้ว่าถ่านชีวภาพสามารถดูดซับตะกั่วไว้ได้ดีกว่าดูดซับโลหะอีก 2 ชนิด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการเปรียบเทียบในกรณีที่มีแคดเมียมปนเปื้อนในดินเพียงชนิดเดียว
2. ควรศึกษาในกรณีที่มีโลหะชนิดอื่นๆ ปนเปื้อนในดิน
3. ควรศึกษาการสกัดลำดับส่วนของดินปนเปื้อนก่อนเติมถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโดเดซิลซัลเฟต 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2561. ข้อมูลการจัดการดิน. [Online]. http://www.ldd.go.th/Web_Soil/polluted.htm.
- กิเลน ประลองเชิง. 2559, 13 กันยายน. “ต้นทางผักตบชวา.” **ไทยรัฐ**. หน้า 3
- กุลธิดา สะอาด. 2557. “ประสิทธิภาพการดูดติดผิวไอออนทองแดงของถ่านชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อม) คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- เกลียวทอง อังกาบกิ่งแก้ว, ชนิตา สิงห์บุบผา และปิติกร์ บุญยาศวิน. 2560. “การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมระหว่างถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพ.” โครงการพิเศษสาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เกษราพร สุอรุณ และ โกวิท ปิยะมิ่งคลา. 2012. “จลนศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยเรซินไคโตซาน.” **วารสารวิทยาศาสตร์ มข.** 40(4) : 1289.
- ชนิษฐา สมตระกูล และวารุภรณ์ ชูฉาย. 2561. “ผลของโซเดียมโอดีซิลซัลเฟตต่อการใช้สาบเสือบำบัดพีแนนทรินและไพรีนที่ปนเปื้อนในดินร่วมกับแคดเมียม” **วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร.** 35(1) : 23 – 33.
- ณัฐพร จันทรประภา. 2556. “การดูดซับไอออนของโลหะหนักด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมจากเปลือกหอยทะเล.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธมลวรรณ ใจผ่อง, ประกายกาญจน์ ทำเนาวิ และอนุจิตต์ อิมใจ. 2558. “การดูดซับสังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียมโดยใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุด.” โครงการพิเศษสาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นัยนันท์ อริยกานนท์. 2561. “ผักตบชวากับการบำบัดสารมลพิษในน้ำ.” **วารสารสิ่งแวดล้อม.** 22(3) : 49-55.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และคณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. **หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิตาพร มุหะมัด, สมภพ เกาทอง, อุบล ต้นสม และปิยศิริ สุนทรนนท์. 2559. “การดูดซับสี้อมด้วยกากชา.” รายงานวิจัย เสนอคณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เบญจมาศ อุ่นศรี. 2558. “การดูดซึมโลหะหนักของผักกาดเขียวปลีตามระยะเวลาการเจริญเติบโตและความเข้มข้นของโลหะหนักในดินร่วนปนทราย.” วิทยานิพนธ์ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ภควดี สุขอนันต์. 2553. “การศึกษาสมบัติและคุณลักษณะของพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดที่เตรียมแบบ 1 ชั้นและ 2 ชั้น.” วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 41(3/1) : 285 – 288.
- มูลนิธินิติธรรมสิ่งแวดล้อม. 2555. กินข้าวเป็อนพิษ ชีวิตชาวบ้านแม่ดาว. [Online]. <https://enlawfoundation.org/newweb/?p=642>.
- ลลิตา แสงอาทิตย์. 2554. “การดูดซับยาปฏิชีวนะ Norfloxacin โดยเถ้ากลบที่ pH 5 – 8” . วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2551. ผักตบชวา. [Online]. <https://th.wikipedia.org/wiki/ผักตบชวา>.
- วิทย์ เทียงบุญธรรม. 2542. หนังสือพจนานุกรมสมุนไพรไทย. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : รวมสาส์น.
- วิสาชา ภูจินดา. 2548. “การใช้ประโยชน์สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดน้ำเสีย.” วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม. 1(1) : 1 – 15.
- สุภาพดี. 2560. สรรพคุณประโยชน์ของผักตบชวา พืชผักสมุนไพรเป็นได้ทั้งอาหารและยาชนิด. [Online]. <https://sukkaphap-d.com/สรรพคุณประโยชน์ของผักตบชวา/>
- อรสา สุขสว่าง และศิริลักษณ์ ศิริสิงห์. 2556. “การประยุกต์ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเพื่อการเกษตร.” วารสารสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์. 39(2) : 212 - 225.
- An Venegas, Anna Rigol and miquel vidal. 2015. “Viability of organic wastes and biochars as amendments for the remediation of heavy metal-contaminated soils.” *Chemosphere*. 119 : 190 - 198.
- Brennan Pecha and Manuel Garcia-Perez. 2015. “ Chapter 26 - Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass: Oil, Char, and Gas.” *Bioenergy*. 413 - 442.
- Davis Amboga Anzeze, John Mmari Onyari, Paul Mwanza Shiundu and John W Gichuki. 2014. “ Adsorption of Pb (II) ions from aqueous solutions by water hyacinth (Eichhornia Crassipes) : Equilibrium and kinetic studies.” *International Journal of Environmental Pollution and Remediation (IJEPR)*. 2 : 89 - 95.
- De Chen, Xiaoyu Liu, Rongjun Bian, Kun Cheng, Xuhui Zhang, Jufeng Zheng, Stephen Joseph, David Crowley, Genxing Pan and Lianqing Li. 2018. “ Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals – A meta - analysis.” *Journal of Environmental Management*. 222 : 76 – 85.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Feng Zhang, Xin Wang, Daixia Yin, Bo Peng, Changyin Tan, Yunguo Liu, Xiaofei Tan and Shixue Wu. 2015A. "Efficiency and mechanisms of Cd removal from aqueous solution by biochar derived from water hyacinth (*Eichornia crassipes*)." *Journal of Environmental Management*. 153 : 68 – 73.
- Huanping Lu, Zhengao Li, Gabriel Gascó, Ana Mendez, Yong Shen and Jorge Paz-Ferreiro. 2018. "Use of magnetic biochars for the immobilization of heavy metals in a multi-contaminated soil." *Science of The Total Environment*. 622 : 892 – 899.
- Huakang Liu, Fei Xu, Yanluo Xie, Can Wang, Akang Zhang, Lingling Li and Heng Xu. 2018. "Effect of modified coconut shell biochar on availability of heavy metals and biochemical characteristics of soil in multiple heavy metals contaminated soil." *Science of The Total Environment*. 645 : 702 - 709.
- Jiachuan Zheng, Houqi Liu, Hui-Min Feng, Wenwei Li, Michael Hon Wah Lam, Paul Kwan Sing Lam and Han-Qing Yu. 2016. "Competitive sorption of heavy metals by water hyacinth roots." *Environmental Pollution*. 219 : 837 – 845.
- Kawamura. 2000. *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*. 2nd ed. New York : John Wiley and Sons.
- Mohammad Boshir Ahmed, John L. Zhou, Huu H. Ngo, Wenshan Guo and Mengfang Chen. 2016. "Progress in the preparation and application of modified biochar for improved contaminant removal from water and wastewater." *Bioresource Technology*. 214 : 836 – 851.
- M. Zhang, Y. Liu, T. Li, W. Xu, B. Zheng, X. Tan, H. Wang, Y. Guo, F. Guo and S. Wang. 2015. "Chitosan modification of magnetic biochar produced from *Eichornia crassipes* for enhanced sorption of Cr (VI) from aqueous solution." *RSC Adv*. 5 : 46955 – 46964.
- Puneet Kumar and Anu Singh. 2010. "Cadmium Toxicity in Fish : An Overview." *GERF Bulletin of Biosciences*. 1(1) : 41 – 47.
- Shan Wu, Siqing Peng, Xuexia Zhang, Duilin Wu, Wei Luo, Tianbin Zhang, Shungui Zhou, Guoyi Yang, Hongfu Wan and Leqin Wu. 2015. "Levels and health risk assessments of heavy metals in urban soils in Dongguan, China." *Journal of Geochemical Exploration*. 148 : 71 - 78.
- Thammananya Sakcharoen. 2007. *Bioavailable cadmium and zinc in soil in sugarcane cultivation area: Mae Sot, Tak province*. [Online]. <http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/41911>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Tuanhui Xie, Yunyun Li, Haixia Dong, Yuting Liu, Mingkuan Wang, Guo Wang. 2019. "Effects and mechanisms on the reduction of lead accumulation in rice grains through lime amendment." *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 173 : 266 - 272.
- Xing Rong, Meng Xie, Lingshuai Kong, Vinothkumar Natarajan, Long Ma and Jinhua Zhan. 2019. "The magnetic biochar derived from banana peels as a persulfate activator for organic contaminants degradation." *Chemical Engineering Journal*. 372 : 294 - 303.
- Xuhui Mao, Rui Jiang, Wei Xiao and Jiaguo Yu. 2015. "Use of surfactants for the remediation of contaminated soils : A review." *Journal of Hazardous Materials*. 285 : 419 - 435.
- Yitong Han, Xi Cao, Xin Ouyang, Saran Sohi and Jiawei Chen. 2016. "Adsorption kinetics of magnetic biochar derived from peanut hull on removal of Cr (VI) from aqueous solution: Effects of production conditions and particle size." *Chemosphere*. 145 : 336 - 341.
- Zhengtao Shen, Amelia Md Som, Fei Wang, Fei Jin, Oliver McMillan and Abir Al-Tabbaa. 2016. "Long-term impact of biochar on the immobilisation of nickel (II) and zinc (II) and the revegetation of a contaminated site." *Science of The Total Environment*. 542 : 771 - 776.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินและตัวดูดซับ

ก.1 Soil texture(เฉพาะดิน)

1. วิธีการทดลอง

การปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

1.1 เทสารละลายคัลคอน จำนวน 100 มล. ลงในกระบอกตวง 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 ลิตร ผสมให้ทั่วด้วยแท่งแก้วคนแบบ plunger ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่ (อยู่ในช่วง 20-25°C)

1.2 ค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในสารละลายอย่างระมัดระวัง อ่านค่าจากสเกลที่รอยเว้าบนของของเหลวที่ล้อมรอบไฮโดรมิเตอร์

2. การอ่านค่าจากสารละลายแขวนลอย

2.1 ชั่งดินที่ผึ่งและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 mesh แล้ว 40 กรัม (ถ้าเป็นดินทรายร่วนหรือทรายใช้ 100 g) ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มล. เติมสารละลายคัลคอน 100 มล. และน้ำกลั่นประมาณ 300 มล. ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน

2.2 นำสารแขวนลอยดินที่เตรียมไว้ มาควนด้วยเครื่องควนแม่เหล็กประมาณ 5 นาที แล้วเทลงกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร

2.3 ปรับปริมาตรสารในข้อ 2.2 ด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่

2.4 จุ่มแท่งแก้วคนแบบ plunger แบบขึ้น-ลง เบาๆ เพื่อให้เกิดการผสมกันทั่วทั้งกระบอกตวง (ให้หมุนขึ้น-ลงแบบเกลียวสว่าน 2-3 รอบ)

2.5 บันทึกเวลาเมื่อคนเสร็จ ถ้าที่ผิวของสารแขวนลอยมีฟอง เติมเอมัลลัลกอฮอล์ 1 หยด

2.6 ค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงอย่างระมัดระวังในสารแขวนลอย และอ่านค่าสเกลเหมือนเดิม

2.7 เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาที หลังจากการควนผสมค่าที่อ่านได้ต้องหักลบจากค่าที่อ่านได้จากการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

2.8 ค่อยๆ ดึงไฮโดรมิเตอร์ขึ้นอย่างระมัดระวังเมื่ออ่านเสร็จ ล้างและเช็ดให้แห้ง

2.9 เมื่อครบ 2 ชั่วโมง ให้อ่านค่าไฮโดรมิเตอร์อีกครั้งโดยทำเหมือนเดิม

3. การคำนวณ

$$\% \text{ sand} = \left(\frac{W-R_{40s}}{W} \right) \times 100$$

$$\% \text{ clay} = \left(\frac{R_{2hr}}{W} \right) \times 100$$

$$\% \text{ silt} = 100 - (\% \text{ sand} + \% \text{ clay})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 Moisture

1. วิธีการทดลอง

ชั่งตัวอย่างดิน 5 กรัม นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
คำนวณหาค่าความชื้นในดิน

2. การคำนวณ

$$\% \text{ ความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักดินก่อนอบ} - \text{น้ำหนักดินหลังอบ}}{\text{น้ำหนักดินหลังอบ}} \times 100$$

ก.3 pH

1. วิธีการทดลอง

1.1 ชั่งตัวอย่างดิน 10 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร

1.2 เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร

1.3 ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

1.4 วัดค่า pH ด้วย pH meter

1.5 การทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และเปลี่ยนจากตัวอย่างดินเป็นถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต

ก.4 electrical conductivity

1. วิธีการทดลอง

1.1 ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร

1.2 เติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร

1.3 ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

1.4 วัดค่าการนำไฟฟ้าโดยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductivity meter)

1.5 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และเปลี่ยนจากตัวอย่างดินเป็นถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต

ก.5 Cation exchange capacity

1. วิธีการทดลอง

1.1 ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต 2 กรัม ใส่ขวดชมพูขนาด 125 มิลลิลิตร เติมน้ำละลายแอมโมเนียมอะซิเตด 1 N ลงไปประมาณ 60 มิลลิลิตร ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน

1.2 กรองสารละลายที่แช่ไว้ด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอน แบบลดความดัน เก็บสารละลายดินที่ได้ไว้ทำต่อในข้อ 1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ชะล้างตัวอย่างดินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต 1 N ครั้งละ 30 มิลลิลิตร จนกระทั่งไม่มีแคลเซียมเหลืออยู่ ทดสอบได้โดยนำสารละลายที่ล้างดินมา 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองหยดแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N แอมโมเนียมออกซาลेट 10% และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 50 % อย่างละ 2-3 หยด นำไปต้มให้เดือด ถ้ามีแคลเซียมไอออนเหลืออยู่จะเกิด ตะกอนขาวหรือสารละลายขุ่น ต้องชะล้างต่อ

1.4 สารละลายที่ได้จากการกรอง และการชะล้างด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต 1N ใส่ในขวดวัดปริมาตร ทำให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ถ้าต้องการหา %BS ให้นำสารละลายที่ได้ไปวัด ปริมาณแคลเซียมและ แมกนีเซียม ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometers ที่ความยาวคลื่น 422 และ 285 นาโนเมตรและวัดปริมาณโพแทสเซียมและโซเดียม ด้วย Flame photometer ที่ความยาวคลื่น 383 และ 295 นาโนเมตร

1.5 ชะล้างสารละลายตัวอย่างดินต่อ ด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N ครั้งละ 30 มิลลิลิตร ทำ 3 - 4 ครั้ง และล้างด้วยสารแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 N อีก 1 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยเอซิลแอลกอฮอล์ 95% ประมาณ 150 - 200 มิลลิลิตร จนไม่มีคลอไรด์เหลืออยู่ ทดสอบการล้างโดย แบ่งเอซิลแอลกอฮอล์ที่ผ่านการล้างดินครั้งสุดท้ายมา 10 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง หยดสารละลายซิลเวอร์ไนเทต 0.1 N 1 - 2 หยด สังเกตว่ามีตะกอนขาวของซิลเวอร์คลอไรด์หรือไม่ ถ้ามีต้องล้างต่อ

1.6 ทิ้งสารละลายที่ได้จากข้อ 5 และล้างตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10 % ครั้งละ 30 มิลลิลิตร ทำ 3 ครั้ง เพื่อให้ Na^+ แทนที่ NH_4^+ ในดินจนได้สารละลายดินประมาณ 100 มิลลิลิตร

1.7 เทสารละลายดินที่กรองได้ใส่ในขวดเจสท์ดัล เติมหินพูมิช(Pumice stone) ลงไปเล็กน้อยเพื่อป้องกันการฟุ้งไหล

1.8 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงไป 5-25 มิลลิลิตร เพื่อปรับให้สารละลายดินมีฤทธิ์เป็นเบสและ NH_4^+ เปลี่ยนเป็นแอมโมเนียได้ง่ายขณะกลั่น

1.9 นำสารละลายกรดบอริก 3% ปริมาตร 50 มิลลิลิตรใส่ในขวดชมพู ขนาด 125 มิลลิลิตร และหยดอินดิเคเตอร์ผสม 5 หยด นำไปรองรับสารที่ได้จากการกลั่น

1.10 นำสารละลายที่ได้จากการกลั่น ไทเทรตกับไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1N ที่จุดยุติ สารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีชมพูม่วง

1.11 ทำแบลนก์ (Blank) โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10% จำนวน 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงไปในปริมาตรเท่ากับที่ใช้ในข้อ 8 ทำการกลั่นและไทเทรต เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการคำนวณ

$$\text{CEC}(\text{cmol kg}^{-1}) = \frac{(A-B)N \times 100}{w}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลนก์ (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)

W = น้ำหนักแห้งมีหน่วยเป็นกรัมของตัวอย่างดิน (กรัม)

การคำนวณปริมาณร้อยละประจุบวกที่เป็นต่าง (%BS)

$$\%BS = \frac{\sum(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K})}{\text{CEC}} \times 100$$

เมื่อ Ca = จำนวนมิลลีสมมูลของแคลเซียมต่อดิน 100 กรัม

Mg = จำนวนมิลลีสมมูลของแมกนีเซียมต่อดิน 100 กรัม

Na = จำนวนมิลลีสมมูลของโซเดียมต่อดิน 100 กรัม

K = จำนวนมิลลีสมมูลของโพแทสเซียมต่อดิน 100 กรัม

ก.6 วิเคราะห์หาการสูญเสียน้ำหนักหลังเผา; LOI (วิศวกรรมเซรามิก, มหาวิทยาลัยสุรนารี)

1. วิธีการทดลอง

ชั่งถ่านชีวภาพหรือดิน 2 กรัม ใส่คูซิเบลที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว จากนั้นนำไปเผาเป็นเวลา

2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 550 °C ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักหลังเผา จดบันทึกผลและคำนวณ

2. วิธีการคำนวณ

$$\%LOI = \frac{\text{น้ำหนักก่อนเผา} - \text{น้ำหนักหลังเผา}}{\text{น้ำหนักก่อนเผา}} \times 100$$

ก.7 Organic matter

1. วิธีการทดลอง

1.1. ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.2 มม. (80 mesh) หรือ 0.5 มม. (35 mesh) 0.2-2.0 กรัม ใส่ขวดชมพู ขนาด 250 มล.

1.2. บีเบตสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 1 N 10 มล. ลงในขวดรูปชมพู แก้วเบาๆ

1.3. เติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 15 มล. เขย่าเบาๆ ประมาณ 1 นาที ตั้งทิ้งไว้จนสารละลายเย็นเท่าอุณหภูมิห้อง (หากพบว่าสารละลายดินตัวอย่างเป็นสีเขียวก่อนไทเทรต แสดงว่าดินตัวอย่างมีสารอินทรีย์อยู่มาก ควรทำการวิเคราะห์ใหม่ โดยชั่งน้ำหนักดินให้น้อยกว่าเดิม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4. เติมน้ำกลั่น 50 มล. แล้วทิ้งไว้ให้เย็น
- 1.5. หยดอินดิเคเตอร์ BDS 5 หยด สารละลายเปลี่ยนเป็นสีม่วงปนน้ำเงิน
- 1.6. ไทเทรตด้วยสารละลาย FAS ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จนสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียวใส
- 1.7. ทำ Blank โดยเริ่มทำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง ขั้นตอนี่ 6

2. การคำนวณ

$$\% \text{ Organic meter} = \frac{(B-T) N}{N} \times \frac{100}{77} \times \frac{100}{58} \times \frac{3}{10^3} \times \frac{100}{W} \times 10$$

เมื่อ N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมท (นอร์มัล)

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับ blank (ml)

T = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (ml)

W = น้ำหนักดิน (g)

ก.8 วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) โดยวิธี Kjeldahl Methods

1. สารเคมีที่ใช้
 - 1.1 โพแทสเซียมซัลเฟต
 - 1.2 คอปเปอร์ซัลเฟต
 - 1.3 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น
 - 1.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์
 - 1.5 โซเดียมไทโอซัลเฟต เพนตะไฮเดรต
 - 1.6 โซเดียมคาร์บอเนต
 - 1.7 ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์
 - 1.8 เมทิลเรด อินดิเคเตอร์
 - 1.9 เมทิลีนบลู อินดิเคเตอร์
 - 1.10 กรดบอริก

2. วิธีการทดลอง

2.1 ขั้นตอนการย่อย

ชั่งดินหรือถ่านชีวภาพ 2 กรัม ใส่ในขวดเจตาห์ล เติมน้ำย่าย่อย 100 มิลลิลิตร นำ Insert rack ที่มีหลอดตัวอย่าง ครบทุกช่อง วางบน Digestion block ให้ตรงกับช่อง Exhaust manifold สวมลงบนหลอดตัวอย่าง เปิดวาล์วน้ำ และเปิด Power switch ของเครื่องย่อยตั้งอุณหภูมิที่ 250 องศาเซลเซียสย่อยเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมงจากนั้นปรับอุณหภูมิเป็น 380 องศาเซลเซียสจนกระทั่งเกิดควันสีขาวของ SO_3 ให้ต้มต่อไปเรื่อยๆ จนได้สารละลายใส ปิดสวิตช์ และปล่อยให้เย็นเพื่อนำไปกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ขั้นตอนการกลั่น

นำตัวอย่างที่ผ่านการย่อยแล้วมาเติมฟีนอล์ฟทาเลิน 3-4 หยด นำไปใส่เครื่องกลั่นที่ตั้งค่าเครื่องกลั่นให้เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไฮโอซัลเฟต 20 มิลลิลิตร และตั้งค่าให้เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้น เติม Indicating boric acid solution ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใน Erlenmeyer flask ขนาด 250 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องกลั่นเพื่อดูดซับ $\text{NH}_3\text{-N}$ ตั้งค่าเครื่องให้กลั่น 4 นาที จากนั้นนำสารที่อยู่ใน Erlenmeyer flask ไปไทเทรตกับกรดซัลฟิวริกที่หาความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว

3. วิธีการคำนวณ

$$\%T - N = \frac{1.4 \times (Y - B)}{A}$$

เมื่อ A = น้ำหนักดินตัวอย่าง (g)

B = ปริมาณ HCl ที่ใช้ไทเทรต Blank (ml)

Y = ปริมาณ HCl ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (ml)

X = ความเข้มข้นของ HCl

1.4 = น้ำหนักสมมูล (equivalent weight) ของไนโตรเจน

ก.9 วิเคราะห์ปริมาณไนเตรท โดยวิธี Brucine (Gordon Bain และคณะ, USA)

1. สารเคมีที่ใช้

1.1 สารมาตรฐานไนเตรท 1,000 ppm

1.2 สารละลายโซเดียม 30 %

1.3 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (กรด 4+1)

1.4 Brucine-sulfanilic acid

2. วิธีการทดลอง

ชั่งดินตัวอย่างดินหรือถ่าน 2 กรัม เทน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ลงขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีดินตัวอย่างหรือถ่านที่ชั่งมาแล้ว นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาทีกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ Whatman 0.45 ไมครอน แบบลดความดัน จากนั้นนำส่วนใสมาวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรท โดยปิเปตตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ลงหลอดทดลองขนาด 30 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคลอไรด์ 30% 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vorex เติมกรด 4+1 10 มิลลิลิตร (ระวังร้อน) เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vorex ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นจึงเติม Brucine-sulfanilic acid 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vorex อาจเกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีชมพูขึ้น สีที่เกิดขึ้นไม่มีผลกระทบกับการทดลอง จากนั้นนำไปต้มในอ่างต้มเป็นเวลา 30 นาที ที่ความร้อน 95 องศา เมื่อครบกำหนดนำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ทำซ้ำ 3 ซ้ำ

แบบลงค์และสารมาตรฐานทำการทดลองเช่นเดียวกับตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ความเข้มข้นของสารมาตรฐานไนเตรท

สารมาตรฐาน	ความเข้มข้น (ppm)
สารมาตรฐานไนเตรท	0, 5, 10, 15, 20 และ 25

ก.10 วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ (คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช)

1. สารเคมีที่ใช้
 - 1.1 ซิลเวอร์ไนเตรต
 - 1.2 โซเดียมคลอไรด์
 - 1.3 โพแทสเซียมไดโครเมต

2. วิธีการทดลอง

ชั่งดินหรือถ่านชีวภาพ 5 กรัม ลงขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาทีกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอน แบบลดความดัน จากนั้นนำส่วนใสมาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ โดยปิเปตส่วนใสมา 25 มิลลิลิตร เติมโพแทสเซียมไดโครเมต 5 หยด แล้วทำการไตเตรทกับซิลเวอร์ไนเตรท จนตัวอย่างเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นตะกอนแดงอิฐ

แบบล่งค์ทำเช่นเดียวกับตัวอย่าง

หาความเข้มข้นที่แน่นอนของซิลเวอร์ไนเตรทโดยใช้โซเดียมคลอไรด์

3. วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณ Cl} = \frac{N(A-B) \times 1000}{\text{ปริมาตรสารละลายดินที่ใช้}}$$

เมื่อ N = ความเข้มข้นของ $[AgNO_3]$ (นอร์มอล)

A = ปริมาตร $AgNO_3$ ที่ใช้ Sample (มิลลิลิตร)

B = Blank (มิลลิลิตร)

ก.11 Total phosphate

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)
 - 1.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 0, 2, 4, 6, 8, 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
 - 1.2 เติม Vanadate-Molybdate reagent 10 มิลลิลิตร ในแต่ละขวดผสมให้เข้ากัน และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร
 - 1.3 ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดสีอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำสารละลายแต่ละขวดมาวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การหาปริมาณฟอสเฟต

2.1 ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาดเล็กที่มีเศษกระเบื้อง (glass bead) เล็กน้อย
 2.2 เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H₂SO₄) 1 มิลลิลิตร และกรดไนตริกเข้มข้น (conc. HNO₃) 5 มิลลิลิตร นำไปย่อยด้วยความร้อนในตู้ดูดควันจนได้สารละลายใสไม่มีสี จนเหลือปริมาณ 2-5 มิลลิลิตรตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

2.3 กรองลดความดันด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร

2.4 นำส่วนสารละลายใส่ที่กรองได้มาหยดฟีนอล์ฟทาลีน 1-2 หยด แล้วปรับพีเอชให้เป็นกลางจนถึงจุดยุติด้วย 6N NaOH จะได้สารละลายสีชมพูอ่อน นำมาใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

2.5 เติม Vanadate-Molybdate reagent 10 มิลลิลิตร ในแต่ละขวดผสมให้เข้ากันและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดสีอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำสารละลายแต่ละขวดมาวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

2.6 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และเปลี่ยนจากตัวอย่างดินเป็นถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต

2.7 อ่านค่าฟอสเฟตของตัวอย่างที่ได้เทียบจากกราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้น และหาค่าความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารละลายที่ย่อยจากตัวอย่างดิน และตัวอย่างถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต

3. การคำนวณ

$$T-PO_4^{3-} \text{ (mg/kg)} = \frac{P}{X}$$

เมื่อ P = ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในรูปของฟอสเฟตที่อ่านได้จากกราฟ ($\mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P}$)

X = น้ำหนักแห้งของดินตัวอย่าง (กรัม)

ก.12 วิเคราะห์ปริมาณซัลเฟต (คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช)

1. สารเคมีที่ใช้

1.1 สารละลายซัลเฟอร์มาตรฐาน 100 mg/l

1.2 สารละลายกัมมะเคาเซีย 0.25%

1.3 กรดไฮโดรคลอริก 6 นอร์มอล

1.4 ผลึกแบเลียมคลอไรด์

2. วิธีการทดลอง

ชั่งดินหรือถ่านชีวภาพ 5 กรัม ลงขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอน แบบลดความดัน จากนั้นนำส่วนใสมาวิเคราะห์หาซัลเฟตโดยปิเปตส่วนใสที่สกัดได้มา 5 มิลลิลิตร ลงขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 6 นอร์มอล 1 มิลลิลิตร เติมผลึกแบเลียมคลอไรด์ 0.5 กรัม จากนั้นเขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ 1 นาที เติมกัมมะเคาเซีย 0.25% 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ 1 นาที จึงปรับปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 50 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นวัดค่าความขุ่นภายในเวลา 5- 30 นาที ด้วยเครื่องวัด UV ด้วยความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

แปลงค่าและสารมาตรฐานทำเช่นเดียวกับตัวอย่าง

ตารางที่ ก.2 ความเข้มข้นของสารมาตรฐานซัลเฟต

สารมาตรฐาน	ความเข้มข้น (ppm)
สารมาตรฐานซัลเฟต	0, 5, 10, 15, 20 และ 25

ก.13 Aluminium ion

1. วิธีการทดลอง

1.1 การทดลองส่วนที่ 1 การสกัดความเป็นกรดและ Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้

1.1.1 ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเซลซัลเฟต 5 กรัม เติม KCl เข้มข้น 1N จำนวน 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดขมพู่ ปิดจุก

1.1.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า นาน 10 นาที ที่ความเร็ว 200 รอบต่อ นาที ตั้งทิ้งไว้หนึ่งคืน

1.1.3 นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนติฟิวส์เป็นเวลา 10 นาที ที่ความเร็ว 2500 รอบต่อ นาที

1.1.4 ดูดส่วนใสด้านบน นำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ใช้ KCl 1N ซะล้าง

1.1.5 นำสารที่ได้จากการกรองในข้อ 4 มาปรับปริมาตรด้วย KCl 1 N ให้ได้ 100 มิลลิลิตร

1.1.6 นำสารละลายที่ได้แบ่งไปทำให้เกิดสีต่อไป และแบ่งไว้สำหรับหาความเป็นกรดที่แลกเปลี่ยนได้ โดยปิเปตมา 20 มิลลิลิตร และนำไปไทเทรตกับ NaOH 0.1 N ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ ถ้าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูตั้งแต่แรก แสดงว่าไม่เป็นดินเปรี้ยว มีความเป็นกรดน้อยมาก แต่ถ้าไม่มีสี เมื่อไทเทรตแล้วใช้ปริมาตรของ NaOH น้อยกว่า 5 มิลลิลิตร ให้ปิเปตสารละลายที่กรองได้เพิ่ม และไทเทรตต่อจนถึงจุดยุติสีชมพูอ่อนๆ

1.1.7 ใช้สารละลาย KCl 1N ทำแปลงค์ เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน และไทเทรตเช่นกัน

1.2. การทดลองส่วนที่ 2 การทำให้เกิดสี เพื่อหา Al^{3+}

1.2.1 แบ่งสารละลายจากการทดลองส่วนที่ 1 จำนวน 5 มิลลิลิตร หยดฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด กรณีไม่มีการเกิดสีชมพูหรือสภาวะเป็นกรด ค่อยๆเติม KF เข้มข้น 1 N จำนวน 10 มิลลิลิตรทีละหยด สังเกตการเกิดสีชมพู

1.2.2 ถ้าเกิดสีชมพูให้หาปริมาณของ Al^{3+} ตามข้อ 4

1.2.3 จากข้อ 1 กรณีมีสีชมพูเกิดขึ้นตั้งแต่แรก ให้เติมกรด HCl 0.1 N 1-2 หยด ให้สีชมพูหายไปก่อน จึงเติม KF 1 N จำนวน 10 มิลลิลิตร ถ้าเกิดสีชมพูให้นำไปหาปริมาณ Al^{3+} ตามข้อ 4 แต่ถ้าไม่เปลี่ยนแปลงไม่ต้องหาปริมาณอลูมิเนียมต่อ

1.2.4 ปิเปตสารละลายที่สกัดได้ 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตร

1.2.5 เติมกรด HCl 1N ปรับ pH อยู่ระหว่าง 2-3

1.2.6 ทำการทดลองเหมือนขั้นตอนการเตรียมสารมาตรฐาน และ กราฟมาตรฐานใน

ข้อ 3-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการคำนวณ

$$[HCl, N] = \frac{(g)Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O}{V_{HCl}(mL) \times 0.19707} \quad [NaOH, N] = \frac{[HCl] \times V_{HCl}}{V_{NaOH}}$$

$$\text{ความเป็นกรดของดิน} = \frac{(B-S) \times N \times 100}{X / (100 + \%M)} \text{ meq/g dried soil}$$

เมื่อ N = ความเข้มข้นของ NaOH (นอร์มอล)

B = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต กับแบลงก์ (มิลลิลิตร)

S = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต กับตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร)

X = น้ำหนักเปียกของดิน (กรัม)

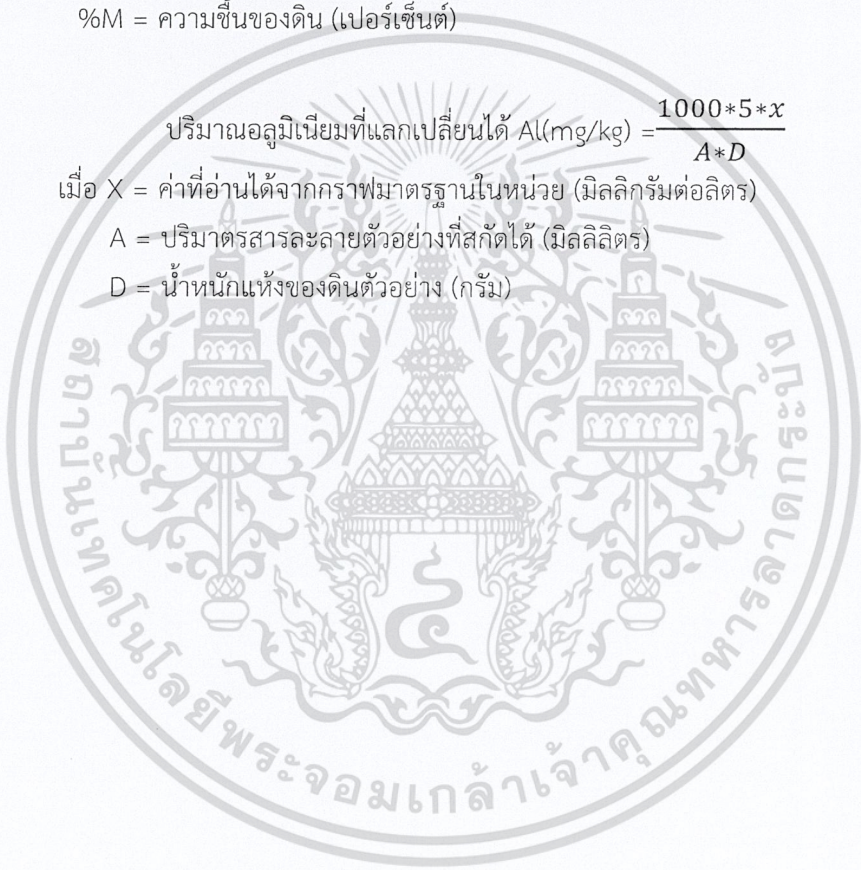
%M = ความชื้นของดิน (เปอร์เซ็นต์)

$$\text{ปริมาณอลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ Al(mg/kg)} = \frac{1000 \cdot 5 \cdot x}{A \cdot D}$$

เมื่อ X = ค่าที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐานในหน่วย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

A = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)

D = น้ำหนักแห้งของดินตัวอย่าง (กรัม)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่าผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินตัวอย่างและตัวดูดซับ

ตารางที่ ข.1 Soil texture (เฉพาะดิน)

ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย น้ำหนัก ดิน (g)	ขนาดอนุภาคดิน					ประเภทเนื้อ ดิน
		ค่าที่อ่านจากไฮโดรมิเตอร์		%	%	%	
		40 วินาที	2 ชั่วโมง	Sand	Clay	Silt	
ดินตัวอย่าง	40.00	11.00	9.00	72.50	22.50	5.00	ดินร่วนเหนียว ปนทราย

ตารางที่ ข.2 Moisture

ครั้งที่	น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)
1	5.01	4.14
2	5.08	4.18
3	5.11	4.25
เฉลี่ย	5.07	4.19

ตารางที่ ข.3 pH

ตัวอย่าง	pH
soil	6.49
Biochar	5.25
SDS/Fe-BC	3.32

ตารางที่ ข.4 electrical conductivity

ตัวอย่าง	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
soil	6.17	6.64	6.78	6.53
Biochar	39.9	42.2	43.1	41.73
SDS/Fe-BC	9.59	8.93	8.72	9.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 Cation exchange capacity

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ความสามารถในการและเปลี่ยนประจุ				
		น้ำหนักแห้ง (g)	ปริมาตร HCl (ml)		CEC (cmol kg ⁻¹)	เฉลี่ย CEC (cmol kg ⁻¹)
			แบลงค์	ตัวอย่าง		
soil	1	5.00	0.10	4.40	8.60	8.07
	2	5.00	0.10	4.00	7.80	
	3	5.00	0.10	4.00	7.80	
Biochar	1	2.00	0.10	1.30	6.00	5.75
	2	2.00	0.10	1.20	5.50	
SDS/Fe-BC	1	2.00	0.10	0.60	2.50	2.75
	2	2.00	0.10	0.70	3.00	

ตารางที่ ข.6 วิเคราะห์หาการสูญเสียน้ำหนักหลังเผา ; LOI

ตัวอย่าง	น้ำหนัก คูชิเปิด	น้ำหนัก ตัวอย่าง	น้ำหนัก รวม ก่อน เผา	น้ำหนัก รวม หลังเผา	ผลต่าง ก่อน และ หลังเผา	%LOI	Mean	S.D.	%RSD
ถ่านกลุ่ม 1	33.74	2.00	35.74	34.74	1.00	2.79	3.19	0.35	10.97
	28.78	2.00	30.78	29.76	1.02	3.32			
	27.10	2.00	29.10	28.09	1.01	3.45			
ถ่านกลุ่ม 2	33.74	2.00	35.74	34.29	1.45	4.05	4.53	0.47	10.38
	28.78	2.00	30.78	29.38	1.40	4.55			
	27.09	2.00	29.09	27.64	1.45	4.99			
ถ่านกลุ่ม 3	28.89	2.00	30.89	29.97	0.92	2.99	2.90	0.09	3.10
	30.47	2.00	32.47	31.53	0.93	2.88			
	30.80	2.00	32.81	31.88	0.93	2.82			
ดิน	28.89	2.00	30.89	30.77	0.12	0.38	0.38	0.01	2.63
	30.46	2.00	32.46	32.34	0.12	0.38			
	30.80	2.00	32.80	32.68	0.12	0.37			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

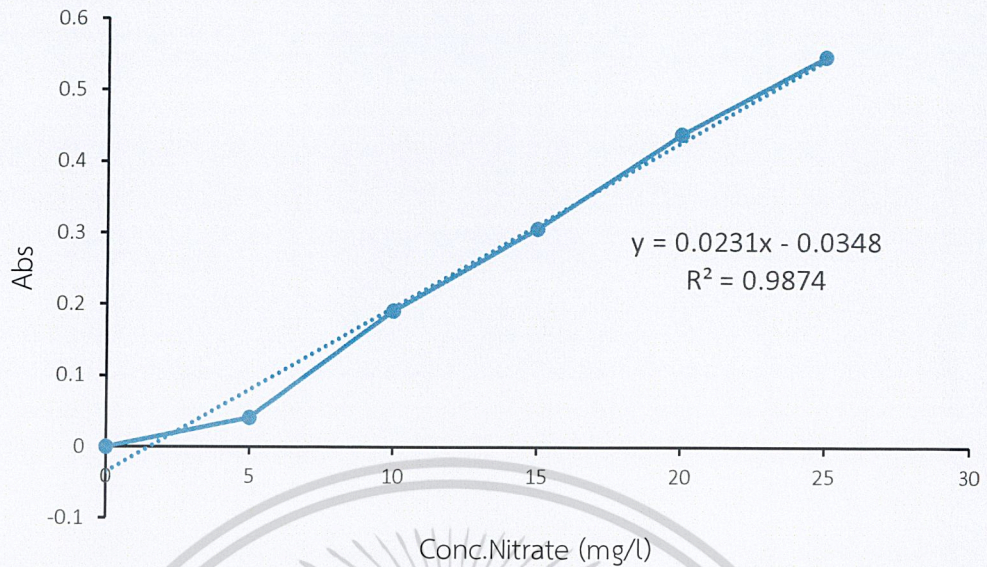
ตารางที่ ข.7 Organic matter

Organic Matter					
Sample	V FAS0.5 N (ml)	Weight (g)	% OM	เฉลี่ย % OM	ระดับ OM
Blank	15.1	0	-	-	-
Soil	13.3	0.1045	3.83	3.54	ค่อนข้างสูง
	13.5	0.1044	3.41		
	13.5	0.105	3.39		
Biochar	7.3	0.102	17.01	16.52	สูงมาก
	7.5	0.1033	16.36		
	7.6	0.1031	16.18		
SDS/Fe-BC	7.5	0.106	15.95	16.22	สูงมาก
	7.6	0.1044	15.98		
	7.2	0.105	16.74		

ตารางที่ ข.8 Total nitrogen

ตัวอย่าง	น้ำหนักดิน/ถ่าน (g)	ปริมาณ HCl (ml)	ปริมาณเฉลี่ย	%T-N (%N)
Blank	0	0.10	0.10	-
	0	0.10		
	0	0.10		
soil	2.0004	0.90	1.05	0.07
	2.0010	ND		
	2.0012	1.20		
Biochar	2.0005	1.00	0.97	0.07
	2.0002	1.10		
	2.0010	0.80		
SDS/Fe-BC	2.0002	0.75	0.78	0.05
	2.0003	0.80		
	2.0005	0.80		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายไนเตรทในการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC

ตารางที่ ข.9 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายไนเตรท ในการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC

ความเข้มข้นสารมาตรฐานไนเตรท (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.00	0.000
5.00	0.041
10.00	0.191
15.00	0.306
20.00	0.438
25.00	0.5470

ตารางที่ ข.10 ค่าการดูดกลืนแสงในการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทใน soil, Biochar และ SDS/Fe-BC

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	เฉลี่ย
soil	1	0.270	0.26
	2	0.260	
	3	0.250	
Biochar	1	0.410	0.41
	2	0.410	
	3	0.410	
SDS/Fe-BC	1	0.350	0.36
	2	0.360	
	3	0.370	

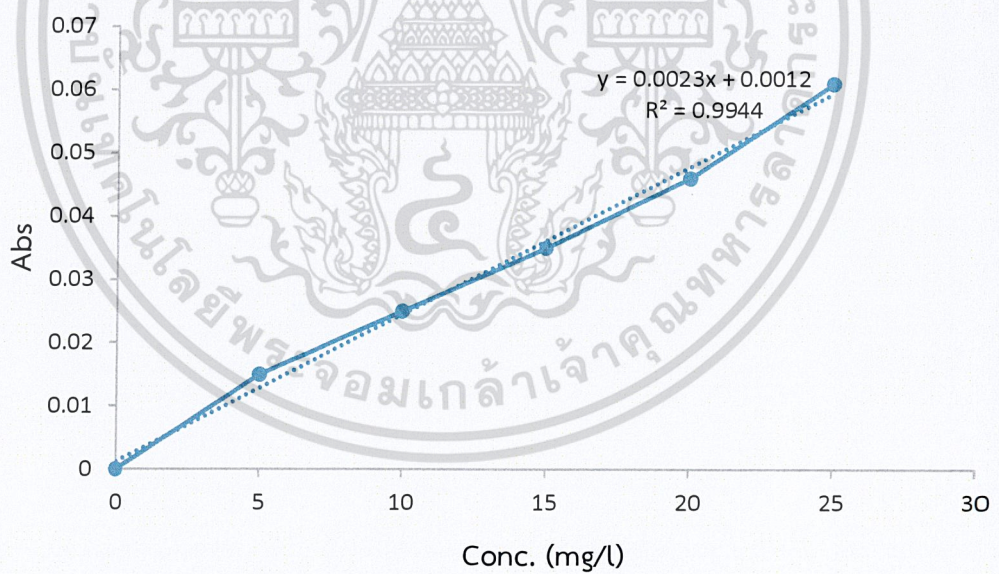
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ค่าการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตทั้งหมด (Total phosphate) ของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ปริมาณฟอสเฟต			
		น้ำหนักดิน แห้ง	ค่าการส่อง ผ่าน (%T)	ความเข้มข้นของ ฟอสเฟต()	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น ของฟอสเฟต()
soil	1	1.0000	29.83	12.5532	12.5070
	2	1.0000	31.58	12.1837	
	3	1.0000	28.58	12.784	
Biochar	1	1.0000	6.75	16.8164	16.6822
	2	1.0000	7.86	16.6114	
	3	1.0000	7.82	16.6188	
SDS/Fe-BC	1	1.0000	0.81	17.9136	17.7283
	2	1.0000	1.12	17.8564	
	3	1.0000	3.51	17.4149	

รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายฟอสเฟตในการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายซัลเฟตในการวิเคราะห์ ปริมาณซัลเฟตของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC

ความเข้มข้นสารมาตรฐานซัลเฟต(ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.00	0.000
5.00	0.015
10.00	0.025
15.00	0.035
20.00	0.046
25.00	0.061

ตารางที่ ข.13 ค่าการดูดกลืนแสงในการวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟตของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	เฉลี่ย
soil	1	0.080	0.105
	2	0.113	
	3	0.123	
Biochar	1	0.024	0.025
	2	0.025	
	3	0.026	
SDS/Fe-BC	1	0.018	0.015
	2	0.014	
	3	0.014	

ตารางที่ ข.14 การวิเคราะห์หา Aluminium ion ของ soil, Biochar และ SDS/Fe-BC

ตัวอย่าง	Al (mg/kg)			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
soil	ND	ND	ND	ND
Biochar	ND	ND	ND	ND
SDS/Fe-BC	ND	ND	ND	ND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 Major Element Cd²⁺

ตัวอย่าง	Major Element Cd ²⁺		
	SP. Conc.(mg/l)	signal	%RSD
soil	0.0845	0.015	63.96
Biochar	0.031	0.013	-
SDS/Fe-BC	0.095	0.017	-

ตารางที่ ข.16 Major Element K⁺

ตัวอย่าง	Major Element K ⁺		
	SP. Conc.(mg/l)	signal	%RSD
Soil1000	0.658	19655	3.306
Biochar 10000	0.238	7194	1.129
SDS/Fe-BC 100	0.19	5518	4.363

ตารางที่ ข.17 Major Element Ca²⁺

ตัวอย่าง	Major Element Ca ²⁺			
	SP. Conc.(mg/l)	signal	%RSD	Ca ²⁺
soil	0.878	0.021	7.449	0.0876
Biochar	0.473	0.012	21.52	0.0472
SDS/Fe-BC (1000)	1.608	0.039	4.884	40.9182

ตารางที่ ข.18 Major Element Mg²⁺

ตัวอย่าง	Major Element Mg ²⁺		
	SP. Conc.(mg/l)	signal	% RSD
Soil 1000	0.08	0.088	9.98
Biochar 100	0.159	0.163	4.574
SDS/Fe-BC 100	0.467	0.384	2.737

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.19 Major Element

ตัวอย่าง	Major Element			
	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cd ²⁺
soil	658	0.878	80	0.0845
Biochar	2380	0.473	15.9	0.031
SDS/Fe-BC	19	1608	0.467	0.095



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงผลการวิจัย

ตารางที่ ค.1 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียมที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคงอยู่ของแคดเมียมในดิน ที่สกัดโดย EDTA

ปริมาณถ่าน/ดิน 100 g	ความเข้มข้นของ Cd^{2+} ที่เหลือ				เงืงจาง	ร้อยละค่าคง อยู่ในดิน
	ครั้งที่1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Biochar 0%	0.667	0.689	0.492	0.616	1	0 %
Biochar 0.5%	0.451	0.501	0.550	0.501	1	0 %
Biochar 1%	0.544	0.607	0.622	0.591	1	0 %
Biochar 2%	0.656	0.641	0.624	0.640	1	0 %
Biochar 5%	0.544	0.563	0.564	0.551	1	0 %

ตารางที่ ค.2 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียมที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคงอยู่ของแคดเมียมในดิน ที่สกัดโดย DTPA

ปริมาณถ่าน/ดิน 100 g	ความเข้มข้นของ Cd^{2+} ที่เหลือ				เงืงจาง	ร้อยละค่าคง อยู่ในดิน
	ครั้งที่1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Biochar 0%	1.583	1.525	1.201	1.436	10	37.84±1.64%
Biochar 0.5%	1.432	1.345	1.432	1.403	10	42.72±0.00%
Biochar 1%	1.543	1.416	1.608	1.522	10	36.98±1.84%
Biochar 2%	1.229	1.074	0.939	1.081	10	59.74±3.81%
Biochar 5%	0.775	0.669	0.67	0.705	10	73.22±0.03%

ตารางที่ ค.3 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียมที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคงอยู่ของแคดเมียมในดิน $CaCl_2$

ปริมาณถ่าน/ดิน 100 g	ความเข้มข้นของ Cd^{2+} ที่เหลือ				เงืงจาง	ร้อยละค่าคง อยู่ในดิน
	ครั้งที่1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Biochar 0%	0.462	0.498	0.499	0.486	10	0.30±0.14%
Biochar 0.5%	0.410	0.413	0.415	0.413	10	17.20±0.28%
Biochar 1%	0.476	0.450	0.469	0.465	10	5.50±0.99%
Biochar 2%	0.471	0.464	0.411	0.449	10	6.50±0.99%
Biochar 5%	0.305	0.251	0.230	0.262	10	51.90±2.99%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียมที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคงอยู่ของแคดเมียมในดิน ที่สกัดโดย NH_3OAc

ปริมาณถ่าน/ดิน 100 g	ความเข้มข้นของ Cd^{2+} ที่เหลือ				เงาจาก	ร้อยละค่าคงอยู่ในดิน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Biochar 0%	0.128	0.139	0.127	0.131	10	73.73±1.33%
Biochar 0.5%	0.119	0.133	0.138	0.130	10	74.00±1.97%
Biochar 1%	0.098	0.103	0.117	0.106	10	78.80±1.97%
Biochar 2%	0.097	0.106	0.109	0.104	10	79.20±1.25%
Biochar 5%	0.082	0.100	0.105	0.096	10	80.87±2.41%

ตารางที่ ค.5 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแมงกานีสที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคงอยู่ของแมงกานีสในดิน ที่สกัดโดย EDTA

ปริมาณถ่าน/ดิน 100 g	ความเข้มข้นของ Mn^{2+} ที่เหลือ				เงาจาก	ร้อยละค่าคงอยู่ในดิน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Biochar 0%	9.928	9.884	9.894	9.902	1	50.49±0.12%
Biochar 0.5%	9.737	9.626	9.775	9.713	1	51.44±0.39%
Biochar 1%	9.719	9.913	9.840	9.824	1	50.88±0.49%
Biochar 2%	9.649	9.845	9.842	8.779	1	51.11±0.56%
Biochar 5%	9.327	9.418	9.450	9.398	1	53.01±0.56%

ตารางที่ ค.6 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแมงกานีสที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคงอยู่ของแมงกานีสในดิน ที่สกัดโดย DTPA

ปริมาณถ่าน/ดิน 100 g	ความเข้มข้นของ Mn^{2+} ที่เหลือ				เงาจาก	ร้อยละค่าคงอยู่ในดิน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Biochar 0%	11.17	11.15	10.94	11.084	10	88.91±0.13%
Biochar 0.5%	11.09	11.11	11.14	11.113	10	88.89±0.03%
Biochar 1%	11.16	11.26	11.38	11.267	10	88.73±0.11%
Biochar 2%	11.19	11.39	11.42	11.333	10	88.67±0.13%
Biochar 5%	11.37	11.37	11.44	11.393	10	88.61±0.04%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแมงกานีสที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคงอยู่ของแมงกานีสในดิน ที่สกัดโดย CaCl_2

ปริมาณถ่าน/ดิน 100 g	ความเข้มข้นของ Mn^{2+} ที่เหลือ				เงื่อจาง	ร้อยละค่าคง อยู่ในดิน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Biochar 0%	9.006	9.215	9.217	9.146	10	54.27±0.61%
Biochar 0.5%	8.854	8.934	8.895	8.894	10	55.53±0.20%
Biochar 1%	9.199	8.958	8.972	9.043	10	54.79±0.68%
Biochar 2%	9.077	9.122	9.053	9.084	10	54.58±0.18%
Biochar 5%	9.325	9.147	9.179	9.236	10	53.92±0.47%

ตารางที่ ค.8 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแมงกานีสที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคงอยู่ของแมงกานีสในดิน ที่สกัดโดย NH_3OAc

ปริมาณถ่าน/ดิน 100 g	ความเข้มข้นของ Mn^{2+} ที่เหลือ				เงื่อจาง	ร้อยละค่าคง อยู่ในดิน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Biochar 0%	9.262	9.419	9.409	9.363	10	53.18±0.44%
Biochar 0.5%	9.121	9.19	9.211	9.174	10	54.13±0.24%
Biochar 1%	9.258	9.258	9.294	9.270	10	53.65±0.10%
Biochar 2%	9.268	9.304	9.275	9.282	10	53.59±0.10%
Biochar 5%	9.144	9.311	9.126	9.194	10	54.03±0.51%

ตารางที่ ค.9 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคงอยู่ของตะกั่วในดิน ที่สกัดโดย EDTA

ปริมาณถ่าน/ดิน 100 g	ความเข้มข้นของ Pb^{2+} ที่เหลือ				เงื่อจาง	ร้อยละค่าคง อยู่ในดิน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Biochar 0%	6.511	6.291	6.025	6.276	1	0%
Biochar 0.5%	5.576	5.862	5.286	5.576	1	0%
Biochar 1%	5.266	5.634	5.278	5.393	1	4.15±0.15%
Biochar 2%	5.736	5.187	5.191	5.189	1	5.66±0.05%
Biochar 5%	4.649	5.316	5.829	5.265	1	9.41±8.58%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคงอยู่ของตะกั่วในดิน ที่สกัดโดย DTPA

ปริมาณถ่าน/ดิน 100 g	ความเข้มข้นของ Pb^{2+} ที่เหลือ				เจือจาง	ร้อยละค่าคง อยู่ในดิน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Biochar 0%	5.027	4.829	5.149	5.002	1	98.18±0.06%
Biochar 0.5%	6.030	5.171	6.025	5.742	1	97.91±0.18%
Biochar 1%	5.627	6.011	6.081	5.906	1	97.85±0.09%
Biochar 2%	5.867	6.819	6.453	6.380	1	97.68±0.18%
Biochar 5%	6.246	6.430	6.613	6.430	1	97.66±0.09%

ตารางที่ ค.11 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคงอยู่ของตะกั่วในดิน ที่สกัดโดย $CaCl_2$

ปริมาณถ่าน/ดิน 100 g	ความเข้มข้นของ Pb^{2+} ที่เหลือ				เจือจาง	ร้อยละค่าคง อยู่ในดิน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Biochar 0%	1.530	1.600	2.072	1.734	1	96.85±0.54%
Biochar 0.5%	2.101	1.889	1.995	1.995	1	96.37±0.18%
Biochar 1%	2.426	2.608	2.226	2.420	1	95.60±0.35%
Biochar 2%	2.945	2.258	3.103	2.769	1	94.97±0.82%
Biochar 5%	4.108	3.979	3.956	4.014	1	92.70±0.15%

ตารางที่ ค.12 การหาค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับของถ่านชีวภาพและร้อยละค่าคงอยู่ของตะกั่วในดิน ที่สกัดโดย NH_3OAc

ปริมาณถ่าน/ดิน 100 g	ความเข้มข้นของ Pb^{2+} ที่เหลือ				เจือจาง	ร้อยละค่าคง อยู่ในดิน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Biochar 0%	12.44	12.40	13.14	12.66	1	76.98±0.76%
Biochar 0.5%	10.51	11.41	9.748	10.556	1	80.81±1.51%
Biochar 1%	8.713	9.244	9.333	9.097	1	83.46±0.61%
Biochar 2%	8.957	8.619	9.187	8.921	1	83.78±0.51%
Biochar 5%	7.487	7.907	7.934	7.776	1	85.86±0.46%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.13 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมในดิน

ตัวอย่างดิน	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง (g)	เจือ จาง	ความเข้มข้น (mg/L)						ความเข้มข้น (mg/kg)					
				F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
ดินโลหะ+ SDS/Fe- BC 5%	1	1.0000	1	0.114	0.181	-0.032	-0.029	-0.061	-0.063	11.4	18.1	ND	ND	ND	ND
	2	1.0000	1	0.128	0.199	-0.042	-0.028	-0.062	-0.066	12.8	19.9	ND	ND	ND	ND
	3	1.0000	1	0.148	0.226	-0.047	-0.027	-0.067	-0.066	14.8	22.6	ND	ND	ND	ND

ตารางที่ ค.14 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่วในดิน

ตัวอย่างดิน	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง (g)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/L)						ความเข้มข้น (mg/kg)					
				F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
ดินโลหะ+ SDS/Fe- BC 5%	1	1.0000	1	-0.349	1.483	-0.161	2.006	-0.188	-0.276	ND	148.3	ND	200.6	ND	ND
	2	1.0000	1	-0.173	1.805	-0.113	1.613	-0.651	-0.205	ND	180.5	ND	161.3	ND	ND
	3	1.0000	1	-0.162	2.105	-0.231	1.975	-0.528	-0.130	ND	210.5	ND	197.5	ND	ND

ตารางที่ ค.15 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีสในดิน

ตัวอย่างดิน	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/L)						ความเข้มข้น (mg/kg)					
				F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
ดินโลหะ+ SDS/Fe- BC 5%	1	1.0000	1	7.689	4.602	0.122	0.163	0.052	0.018	769.9	460.2	12.2	16.3	5.2	1.8
	2	1.0000	1	8.093	4.045	0.079	0.177	0.050	0.032	809.3	404.5	7.9	17.7	5	3.2
	3	1.0000	1	8.175	3.473	0.112	0.159	0.046	0.037	817.5	347.3	11.2	15.9	4.6	3.7

ภาคผนวก ง

เกณฑ์มาตรฐานในดิน

ตารางที่ ง.1 ค่า pH แสดงความเป็นกรดต่างของดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

ระดับ	ช่วง pH
กรดรุนแรงมากที่สุด	< 3.5
กรดรุนแรงมาก	3.5 - 4.4
กรดจัดมาก	4.5 - 5.0
กรดจัด	5.1 - 5.5
กรดปานกลาง	5.6 - 6.0
กรดเล็กน้อย	6.1 - 6.5
เป็นกลาง	6.6 - 7.3
ด่างอ่อน	7.4 - 7.8
ด่างปานกลาง	7.9 - 8.4
ด่างจัด	8.5 - 9.0
ด่างจัดมาก	> 9.0

ตารางที่ ง.2 จำแนกระดับความเค็มที่มีผลกระทบต่อพืช (U.S. Soil Salinity Laboratory Staff, 1954)

ค่าการนำไฟฟ้า (EC _e) dS/m	เกลือในดิน	ระดับความเค็ม ของดิน	อิทธิพลต่อพืช
2	< 0.1	ไม่เค็ม	ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช
2 - 4	0.1 - 0.2	เค็มเล็กน้อย	มีผลต่อพืชที่ทนเค็ม
4 - 8	0.2 - 0.4	เค็มปานกลาง	มีผลต่อพืชหลายชนิด
8 - 16	0.4 - 0.8	เค็มมาก	พืชทนเค็มเท่านั้นที่ยังเจริญเติบโตได้ดี
16	> 0.8	เค็มจัด	พืชทนเค็มน้อยชนิดหรือพืชชอบเกลือที่เจริญเติบโตได้ดี

ตารางที่ ง.3 ระดับปริมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน

ระดับ CEC	(cmol/kg)
ต่ำมาก	< 5
ต่ำ	5 - 15
ปานกลาง	15 - 25
สูง	25 - 40
สูงมาก	> 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.4 ระดับอินทรีย์วัตถุ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

ระดับอินทรีย์วัตถุ	%OM
ต่ำมาก	< 0.5
ต่ำ	0.5 – 1.0
ค่อนข้างต่ำ	1.0 – 1.5
ปานกลาง	1.5 – 2.5
ค่อนข้างสูง	2.5 – 3.5
สูง	3.5 – 4.5
สูงมาก	> 4.5

ตารางที่ ง.5 มาตรฐานโลหะหนักในดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและการเกษตร, กรมควบคุมมลพิษ

ชนิดโลหะ	ค่ามาตรฐาน	วิธีตรวจสอบ
สารหนู (Arsenic)	ต้องไม่เกิน 3.9 mg/kg	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธี Atomic Absorption, Gaseous Hydride หรือวิธี Atomic Absorption, Borohydride Reduction หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
แคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม (Cadmium and compounds)	ต้องไม่เกิน 37 mg/kg	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ต้องไม่เกิน 300 mg/kg	ใช้วิธี Coprecipitation หรือวิธี Colorimetric หรือวิธี Chelation/Extraction หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
ตะกั่ว (Lead)	ต้องไม่เกิน 400 mg/kg	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดโลหะ	ค่ามาตรฐาน	วิธีตรวจสอบ
ตะกั่ว (Lead)	ต้องไม่เกิน 400 mg/kg	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma -Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
แมงกานีสและสารประกอบแมงกานีส (Manganese and compounds)	ต้องไม่เกิน 1,800 mg/kg	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma -Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
ปรอทและสารประกอบปรอท (Mercury and compounds)	ต้องไม่เกิน 23 mg/kg	ให้ใช้วิธี Cold-Vapor Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
นิกเกิลในรูปของเกลือที่ละลายน้ำได้ (Nickel, soluble salts)	ต้องไม่เกิน 1,600 mg/kg	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
ซีลีเนียม (Selenium)	ต้องไม่เกิน 390 mg/kg	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธี Atomic Absorption, Gaseous Hydride หรือวิธี Atomic Absorption, Borohydride Reduction หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้