

การลดการเคลื่อนที่ของโลหะในดินโดยใช้ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา

TRANSPORT RETARDATION OF METALS IN SOIL USING
BIOCHAR FROM WATER HYACINTH



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TRANSPORT RETARDATION OF METALS IN SOIL USING BIOCHAR FROM WATER HYACINTH



NATTHAWUT KRUNGKAICHAK
THANAPORN WETTHAYAWONGKUL
NAPASSORN PHONIN

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การลดการเคลื่อนที่ของโลหะในดินโดยใช้ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา
Transport Retardation of Metals in Soil Using Biochar from Water Hyacinth

ชื่อนักศึกษา นายณัฐวุฒิ กรุงเทพมหานคร รหัสนักศึกษา 58050616
นางสาวธนภรณ์ เวทยาวงศ์กุล รหัสนักศึกษา 58050622
นางสาวนภัสสร โพธิ์นิล รหัสนักศึกษา 58050631

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา เคมี

ปการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี
สิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. บรรจง บุญชม ประธานกรรมการ	
ดร.ชวาลย์ ศรีวิงษ์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกา
นำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การลดการเคลื่อนที่ของโลหะในดินโดยใช้ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา		
ชื่อนักศึกษา	นายณัฐวุฒิ	กรุงไกรจักร	รหัสนักศึกษา 58050616
	นางสาวธนภรณ์	เวทยาวงศ์กุล	รหัสนักศึกษา 58050622
	นางสาวณภัสสร	โพธิ์นิล	รหัสนักศึกษา 58050631
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปการศึกษ	2561		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์		

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนโลหะหนักในดินก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมมาอย่างยาวนาน โครงการพิเศษนี้มุ่งศึกษาการลดการเคลื่อนที่ของโลหะในดินโดยใช้ผักตบชวา ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส สังเคราะห์ดินปนเปื้อนแคดเมียม($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), ตะกั่ว($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) และสังกะสี($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$) ผสมกับถ่านชีวภาพ 0.5%, 1%, 2% และ 5% หลังจาก 3 สัปดาห์ของการผสม ทำการศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนักในดินผสม และศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพ โดยการสกัดแบบขั้นตอนเดียว และสกัดแบบ 6 ขั้นตอน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของโลหะหนักในดินน้อยที่สุดเมื่อผสมถ่านชีวภาพลงในดินในปริมาณ 5% ค่าเปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสีในดินเท่ากับ 79.20%, 55.36% และ 99.01% ตามลำดับ จากการศึกษาแบบลำดับขั้น ผลการศึกษาชี้ว่า 91.77% ของแคดเมียมอยู่ในรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ 39.56% ของตะกั่วและ 37.57% ของสังกะสี อยู่ในรูปฟอร์มที่ที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งเป็นรูปฟอร์มที่ค่อนข้างเสถียร

คำสำคัญ : การดูดซับ, ผักตบชวา, แคดเมียม, ทองแดง, ถ่านชีวภาพ, สังกะสี

Title	Transport Retardation of Metals in Soil Using Biochar from Water Hyacinth	
Students	Mr. Natthawut Krungkaichak	Student ID 58050616
	Miss Thanaporn Wetthayawongkul	Student ID 58050622
	Miss Napassorn Phonin	Student ID 58050631
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2018	
Advisor	Assist. Prof. Dr.Chompoonut Chaiyaraksa	

Abstract

Heavy metal contamination in the soil has caused environmental damage for a long time. This special project aimed to study the reduction of metal movement in the soil using pyrolysis water hyacinth. The experimental soil was synthesized to contaminate with $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, and $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ and mixed with biochar for the amount of 0.5%, 1%, 2%, and 5%. After 3 weeks of mixing, the pH, the total concentration of heavy metals in the mixed soil, the biological access potential were determined by one-step extraction and 6-step extraction process. The results showed that the percentage of heavy metals in soil was the least when mixing biochar to soil at the amount of 5%. The remaining percentage of cadmium, lead and zinc in soil were 79.20%, 55.36%, and 99.01%, respectively. From the sequential extraction study, the results indicated that 91.77% of cadmium was in the form of exchangeable, 39.56% of lead and 37.57% of zinc were in the form of iron oxide and manganese oxide bound which was a relatively stable form.

Keywords: adsorption, biochar, cadmium, copper, water hyacinth, zinc

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดี ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือขอขอบพระคุณผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้ปรึกษาและช่วยชี้แนะข้อบกพร่อง แนวทางการแก้ปัญหา รวมถึงการตรวจสอบและติชมโครงการพิเศษ เพื่อให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นตลอดการทดลอง ทำให้โครงการพิเศษสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการการสอบที่ช่วยชี้แนะข้อบกพร่อง อันเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุง พัฒนาให้โครงการพิเศษเล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ในการทดลองต่าง ๆ ส่งผลให้การจัดทำโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

และสุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัว ที่คอยอบรมสั่งสอนเลี้ยงดูตลอดจนเพื่อน ๆ ชั้นปีที่ ๔ สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ที่คอยเป็นกำลังใจ แนะนำและเป็นที่ปรึกษาที่ดีตลอดการทำโครงการพิเศษเล่มนี้จนออกมาสมบูรณ์

ณัฐวุฒิ กรุงไกรจักร

ธนภรณ์ เวทยาวงศ์กุล

นภัสสร โพธิ์นิล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี สมมติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	4
2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับดิน	4
2.1.1 นิยามของดิน	4
2.1.2 ส่วนประกอบดิน	4
2.1.3 สมบัติทางเคมีของดิน	5
2.2 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับผักตบชวา	6
2.2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์	7
2.2.2 การขยายพันธุ์ของผักตบชวา	7
2.2.3 ปัญหาจากผักตบชวา	7
2.3 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับถ่านชีวภาพ	8
2.3.1 ถ่านชีวภาพ	8
2.3.2 ประโยชน์ของถ่านชีวภาพ	9
2.4 โลหะหนัก	9
2.4.1 ข้อมูลพื้นฐานของตะกั่ว	10
2.4.2 ข้อมูลพื้นฐานของแคดเมียม	11
2.4.3 ข้อมูลพื้นฐานของสังกะสี	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 กระบวนการไพโรไลซิส	14
2.5.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า	14
2.5.2 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว	14
2.6 กระบวนการดูดซับ	15
2.6.1 ชนิดของสารดูดซับ	15
2.6.2 กลไกการดูดซับ	16
2.6.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับ	16
2.6.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	17
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	20
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	20
3.1.1 อุปกรณ์	20
3.1.2 สารเคมี	21
3.2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน	22
3.2.1 การเก็บตัวอย่างดิน	22
3.2.2 การเตรียมตัวอย่างดิน	22
3.2.3 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดิน	22
3.3 การเตรียมตัวดูดซับ	24
3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ	24
3.3.2 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับ	24
3.4 ศึกษาผลต่อประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะ	24
3.5 กระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียวโดยการสกัดด้วยสารละลาย DTPA	
ความเข้มข้น 0.005 M	24
3.6 กระบวนการการสกัดตามลำดับชั้น 6 ขั้นตอน	25
3.7 การศึกษาความสามารถในการสะเทินของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา	
ด้วยวิธีการไทเทรต	27
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	28
4.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินตัวอย่าง	28

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ	29
4.2.1 วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวโดยใช้เทคนิค scanning electron microscopy (SEM)	29
4.2.2 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่างๆในตัวดูดซับโดยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)	30
4.2.3 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์	31
4.2.4 การศึกษาความสามารถในการสะเทินของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา ด้วยวิธีการไทเทรต	32
4.3 ศึกษาผลต่อประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะ	33
4.3.1 กระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว	33
4.4 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดินโดยการสกัดตามลำดับชั้น 6 ขั้นตอน.....	34
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	36
5.1 สรุปผลการทดลอง	36
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	43
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีเบื้องต้นของดินและถ่านชีวภาพ	44
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีดินและถ่านชีวภาพ	54
ภาคผนวก ค เกณฑ์และค่ามาตรฐานต่างๆในดิน.....	59
ภาคผนวก ง การศึกษาลักษณะรูพรุนและพื้นผิวโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	64
ภาคผนวก จ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของ ค่าประจุพื้นผิวที่เป็นศูนย์.....	67
ภาคผนวก ฉ ความสามารถในการสะเทินของถ่านชีวภาพด้วยวิธีการไทเทรต	68
ภาคผนวก ช การสกัดแบบขั้นตอนเดียว	69
ภาคผนวก ซ การสกัดแบบลำดับชั้น 6 ขั้นตอน	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดินและถ่านชีวภาพ	23
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างดินและถ่านชีวภาพจากผักตบชวา	28
ข-1 ความชื้นของดินตัวอย่าง.....	54
ข-2 ขนาดอนุภาคของดินตัวอย่าง	54
ข-3 ความเป็นกรดต่าง	54
ข-4 ค่าการนำไฟฟ้า	54
ข-5 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	55
ข-6 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผา.....	55
ข-7 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	55
ข-8 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	56
ข-9 ปริมาณไนเตรท.....	56
ข-10 ปริมาณคลอไรด์	56
ข-11 ปริมาณฟอสเฟต	57
ข-12 ปริมาณซัลเฟต.....	57
ข-13 ความเป็นกรดของดิน และอลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้.....	57
ข-14 ปริมาณธาตุอาหารหลักและโลหะหนักทั้งหมดในดิน	58
ค-1 ความเป็นกรดเบส	59
ค-2 ระดับอินทรีย์วัตถุในดิน.....	59
ค-3 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน	60
ค-4 ค่าการนำไฟฟ้า	60
ค-5 มาตรฐานแร่ธาตุอาหารในดินสำหรับไม้ยืนต้นและผลไม้	60
ค-6 มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม	61
จ-1 ค่า pH เริ่มต้น และ pH สุดท้ายของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใส่ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา ปริมาณ 100 มิลลิกรัม ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 24 ชั่วโมง.....	67
ฉ-1 ค่าความสามารถในการสะท้อนของถ่านชีวภาพด้วยวิธีการไทเทรต	68
ช-1 ผลการสกัดแบบขั้นตอนเดียวโดยการสกัดด้วยสารละลาย DTPA ความเข้มข้น 0.005 M	69
ช-1 ผลการสกัดแบบลำดับขั้น 6 ขั้นตอน	70

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบดิน.....	4
2.2 ผักตบชวา.....	6
2.3 ถ่านชีวภาพ	8
2.4 ตะกั่ว.....	10
2.5 แคลเมียม	11
2.6 สังกะสี.....	13
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวากำล้างขยาย x20000 และ x5000 เท่า	29
4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวพวากำล้างขยาย x5000 เท่า	30
4.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผักตบชวาและถ่านชีวภาพจากผักตบชวา	30
4.4 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา.....	31
4.5 ความสามารถในการสะเทินของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา.....	32
4.6 ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนักในถ่านชีวภาพจากผักตบชวาโดยกระบวนการสกัด แบบขั้นตอนเดียวด้วยสารละลาย 0.005 M DTPA.....	33
4.7 เปอร์เซ็นต์ของโลหะหนักในตัวอย่างดินผสมถ่านชีวภาพ 5% ที่สกัดได้ในแต่ละส่วน.....	35
ง-1 ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวของผักตบชวาและถ่านชีวภาพจากผักตบชวา.....	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันในพื้นที่บริเวณใกล้เคียงกับนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง มีปัญหาเกี่ยวกับภาคตะกอนโลหะหนักปนเปื้อนในดิน ทำให้คุณภาพดินเสื่อมโทรมเนื่องจากมีปริมาณโลหะหนักเกินที่กฎหมายกำหนดอย่างเช่น บริเวณชุมชนมาบข่า อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดระยอง มีการลักลอบทิ้งและฝังกลบกากของเสียอุตสาหกรรม (วิจารณ์, 2552) จากการตรวจสอบความเข้มข้นของโลหะหนักที่พบการปนเปื้อนในดิน พบว่า ปริมาณโลหะหนักที่พบสูงที่สุดในดินตะกอน คือ เหล็ก (753.23 ± 420.59 ppm) รองลงมาคือ แมงกานีส (100.12 ± 97.30 ppm) สังกะสี (28.00 ± 27.54 ppm) ทองแดง (4.74 ± 3.81 ppm) ตะกั่ว (4.19 ± 1.49 ppm) และแคดเมียม (0.91 ± 0.45 ppm) ตามลำดับ (พรพรรณ, 2557) ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำ คุณภาพดินและคุณภาพสิ่งแวดล้อมในพื้นที่และสุขภาพของคนในชุมชน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผ่านการดูดซึมเข้าสู่พืช และจะส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร เนื่องจากองค์ประกอบของโลหะผสมที่จำเป็นต่อธาตุอาหารประกอบด้วยเหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) โคบอลต์ (Co) ซิงค์ (Cr) แคดเมียม (Cd) ปรอท (Hg) และตะกั่ว (Pb) องค์ประกอบทั้งหมดเหล่านี้เป็นพิษต่อพืชเพาะปลูก ถ้ามีปริมาณและความเข้มข้นที่สูง (White et. al., 2012) จะทำให้โลหะหนักเกิดการสะสมในพืช เป็นอุปสรรคต่อการเจริญเติบโต ความเป็นพิษของโลหะหนักมีความเป็นอันตรายที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับลักษณะของธาตุ ความสามารถในการดูดซึมของพืช ความเป็นกรด-ด่าง และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน

โดยงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาการลดการเคลื่อนที่ของโลหะเข้าสู่พืช โดยเติมสารปรับปรุงดินหลายชนิด เช่น ใช้เปลือกหอยตากแห้งเป็นตัวดูดซับ ซึ่งมีการประยุกต์ใช้การปรับปรุงดินช่วยในการเจริญเติบโตของพืชและแก้ปัญหาเกี่ยวกับการปนเปื้อนโลหะหนักในผลิตผลทางการเกษตร โดยจะมีการตรึงโลหะหนักในรูปแบบของ Pb, Cu, Zn และ Cd ในดิน (Salmani, et al., 2014), การดูดซับสารปนเปื้อนโลหะหนักต่างๆโดยใช้กราฟีนออกไซด์ (GO) (Chen, 2016) เป็นตัวดูดซับใหม่สำหรับการดูดซับสารปนเปื้อนโลหะหนักต่างๆการใช้สารผสมกราฟีนออกไซด์เป็นตัวดูดซับสำหรับการกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากน้ำ (Peng et. al., 2017) และการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ซีลี้อยู่และซีลี้อยู่ปรับปรุงสภาพ ซึ่งซีลี้อยู่มีคุณสมบัติที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ค่า pH ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้นและอุณหภูมิ (พลวัฒน์, 2016) ซึ่งจากการศึกษาสารปรับปรุงดินที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติสามารถดูดซับได้ดี ดังนั้น ทางผู้วิจัยมีความสนใจในการนำผักตบชวาซึ่งเป็นวัสดุจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธรรมชาติที่ทำได้ง่ายในธรรมชาติมาทำเป็นถ่านชีวภาพ (Biochar) ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสโดยนำมาผสมกับดินที่มีสภาพความเป็นกรดและปนเปื้อนโลหะหนัก เพื่อลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน ซึ่งถ่านชีวภาพจากผักตบชวามีคุณสมบัติที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้ เนื่องจากมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ โดยผลิตจากการให้ความร้อนชีวมวล (Biomass) โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้น้อยมาก เรียกกระบวนการนี้ว่า การแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) นอกจากนี้ ผักตบชวายังเป็นวัชพืชที่มีมากในแม่น้ำลำคลอง ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำ เนื่องจากผักตบชวาที่ลอยอยู่อย่างหนาแน่นบนผิวน้ำบดบังแสงแดดที่ส่องลงไปใต้น้ำได้ และขัดขวางการไหลของน้ำ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำผักตบชวามาทำเป็นถ่านชีวภาพเพื่อลดปริมาณและนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ (กรรณิษฐ์, 2560)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อหาปริมาณของถ่านชีวภาพที่เหมาะสมที่เติมลงในดินแล้วสามารถลดการเคลื่อนที่ของไอออนของโลหะในดินได้ดีที่สุด
2. ศึกษารูปฟอร์มของไอออนของโลหะในดินหลังการเติมถ่านชีวภาพ
3. ศึกษาความสามารถในการสะเทิน (Neutralization Capability) ของถ่านชีวภาพ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. นำผักตบชวาไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ถ่านชีวภาพ (biochar)
2. นำถ่านชีวภาพมาศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีโดยใช้เครื่อง SEM, FTIR และหาค่า zero point charge
3. เก็บดินตัวอย่างจากจังหวัดระยอง วิเคราะห์คุณสมบัติ และองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างดินสังเคราะห์ให้มีการปนเปื้อนดังนี้ คือ แคดเมียม 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตะกั่ว 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และสังกะสี 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ทำการผสมตัวดูดซับกับดินด้วยหลายอัตราส่วน ทั้งไว้ 1 เดือน
4. ทดสอบประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของไอออนของโลหะโดยการสกัดดินด้วยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) ด้วย 0.005 M Diethylene triamine penta acetic acid (DTPA) และศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของไอออนของโลหะ ในตัวอย่างดินหลังจากทำการปรับเสถียรด้วยถ่านชีวภาพที่ทำการปรับปรุงคุณภาพ โดยการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) จากนั้นวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

5. ศึกษาความสามารถในการสะเทิน (Neutralization capability) ของถ่านชีวภาพด้วยวิธีการไทเทรต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเพิ่มคุณค่าของผักตบชวา โดยนำมาแก้ปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมทางดิน
2. เพิ่มความสามารถในการดูดซับของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพเป็นถ่านชีวภาพ
3. ช่วยลดการดูดซับไอออนของโลหะของพืชที่ปลูกในดินปนเปื้อน ซึ่งจะช่วยลดความเป็นพิษต่อสุขภาพของผู้ที่บริโภคพืชที่ปลูกในดินปนเปื้อน



บทที่ 2

ทฤษฎี สมมติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การศึกษาเรื่อง การลดการเคลื่อนที่ของโลหะในดินโดยใช้ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา ผู้ศึกษาได้รวบรวมแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นพื้นฐานและแนวทางในการศึกษา โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

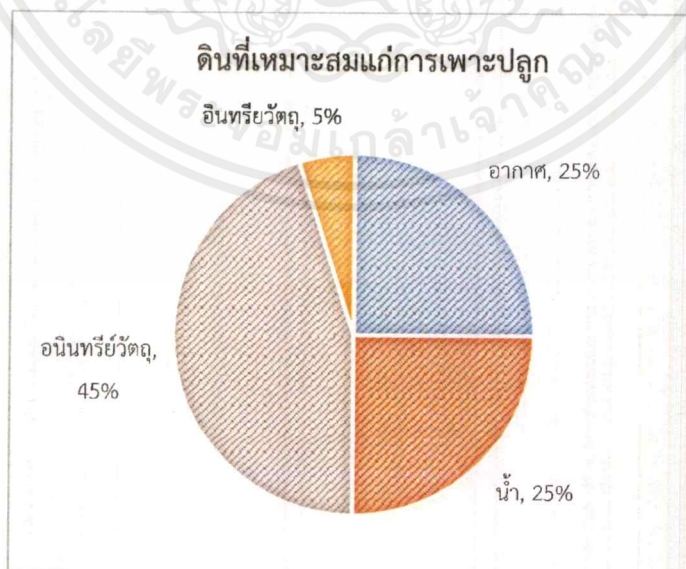
2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับดิน

2.1.1 นิยามของดิน

ดิน คือ เทหวัตถุธรรมชาติที่ปกคลุมพื้นผิวโลก ซึ่งเกิดจากการทับถมกันของหินแร่ที่สลายตัวจนมีขนาดเล็ก และซากพืชซากสัตว์เป็นเวลาหลายล้านปี เป็นวัตถุช่วยค้ำจุนการทรงตัวและการเจริญเติบโตของพืช ประกอบด้วยแร่ธาตุที่เป็นของแข็ง อินทรีย์วัตถุ น้ำ และอากาศที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

2.1.2 ส่วนประกอบของดิน

ดินสามารถแบ่งส่วนประกอบออกตามความสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืชได้ 4 องค์ประกอบใหญ่ คือ อนินทรีย์วัตถุ, อินทรีย์วัตถุ, น้ำ และอากาศ ดังนี้



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบดิน

ที่มา: <https://www.boardkonthai.com/ดินที่เหมาะสมต่อการปลูก>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อนินทรีย์วัตถุ (Inorganic matter) เป็นส่วนที่เกิดจากการสลายตัวของทางเคมี ฟอสเฟตและชีวเคมีของหินและแร่ธาตุต่างๆ จนมีขนาดเล็ก
2. อินทรีย์วัตถุ (Organic matter) เป็นส่วนที่เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังหรือสลายตัวของเศษซากพืชซากสัตว์ที่ทับถมกันอยู่บนดิน มีความสำคัญต่อกระบวนการต่างๆ ทั้งทางกายภาพและทางเคมี
3. น้ำ (Water) จะพบในช่องว่างระหว่างก้อนดิน (aggregate) หรืออนุภาคดิน (particle) จะช่วยในการละลายธาตุอาหารและก๊าซต่างๆในดิน เป็นบริเวณที่มีการเกิดปฏิกิริยาเกือบทั้งหมด และเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของพืช
4. อากาศ (Air) มีความสำคัญไม่ต่างกับน้ำในดิน พบในช่องว่างระหว่างก้อนดินและอนุภาคดิน ซึ่งก๊าซที่พบโดยทั่วไป ได้แก่ ไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

2.1.3 สมบัติทางเคมีของดิน

2.1.3.1 ความเป็นกรด-ด่างของดิน

ดินเป็นกรด หมายถึง ดินที่มีสภาพทางเคมีคล้ายกรดอ่อน (weak acid) ซึ่งประกอบด้วยสภาพความเป็นกรด 2 สภาพ คือ สภาพกรดจริง (active acidity) และสภาพกรดแฝง (potential acidity) โดยสภาพกรดจริงเป็นตัวแสดงถึงความรุนแรงของสภาพความเป็นกรดของดิน ซึ่งเป็นประจุบวกที่ละลายอย่างอิสระในน้ำ ส่วนสภาพกรดแฝงเป็นประจุบวกที่เกาะอยู่กับอนุภาคดินและจะถูกปลดปล่อยออกมาเมื่ออยู่ในน้ำ เพื่อชดเชยประจุบวกเดิมที่ถูกทำให้หมดไป

ดินเป็นด่าง หมายถึง ดินที่มีสภาพความเป็นกรดจริงอยู่น้อยกว่าสารที่มีสภาพเป็นด่าง และมีส่วนที่เป็นสภาพกรดแฝงอยู่ในปริมาณที่น้อยหรือถูกทำลายจนหมด

ความเป็นกรด-ด่างของดิน นิยมบอกด้วยค่า pH ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1-14 เป็นตัวควบคุมการละลายของธาตุอาหารในดิน เมื่อดินมีความเป็นกรด-ด่างที่ไม่เหมาะสม การละลายของธาตุอาหารอาจน้อยหรือมากเกินไปเกินต่อความต้องการของพืช เช่น ในดินที่มีสภาวะเป็นกรด ระดับธาตุอาหารแคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม จะค่อนข้างต่ำ เนื่องจากถูกชะล้างออกจากดินได้ง่าย ในทางตรงกันข้าม ธาตุอาหารแมงกานีส เหล็ก สังกะสี จะละลายได้ดี รวมถึงธาตุโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง จะละลายได้ดีในดินที่มีสภาวะเป็นกรดเช่นกัน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

2.1.3.2 ความสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity-CEC)

ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน หมายถึง ปริมาณของประจุบวกทั้งหมดที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้ ซึ่งสามารถบอกถึงความอุดมสมบูรณ์ของดิน เนื่องจาก เป็นกลไกในการ

ปลดปล่อยสารอาหารจุลภาค เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และอื่นๆ สู่อารละลายดิน โดยค่าที่วัดได้มีหน่วยเป็น มิลลิสมมูลต่อดินแห้ง 100 กรัม (meq/100 g of dry soil)

ประจุบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ส่วนใหญ่ คือ Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} และ H^+ ทั้งนี้การแลกเปลี่ยนประจุแต่ละตัวขึ้นอยู่กับสภาพดินต่างๆ เช่น ดินน้ำขังจะมี Mn^{2+} หรือ Fe^{2+} ละลายได้มาก และถูกดูดซับเป็นส่วนใหญ่ ในสภาพดินที่เป็นกรด Ca^{2+} , Mg^{2+} และ Al^{3+} หรือ $\text{Al}(\text{OH})_3$ เป็นประจุบวกหลักที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ ในดินสภาพที่เป็นด่าง Ca^{2+} และ Mg^{2+} จะยึดพื้นที่ประจุลบของดินเป็นส่วนใหญ่ และในดินเค็ม Na^+ เป็นประจุบวกหลักที่ยึดกับดินไว้

การที่ดินมีประจุบวกที่ถูกดูดซับสมดุลกับประจุบวกในสารละลายดิน ทำให้ดินมีสภาพคล้ายสารละลายบัฟเฟอร์ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีใดๆในดินจึงเป็นไปอย่างค่อยเป็นค่อยไป เพราะเมื่อประจุบวกในสารละลายดินมีปริมาณน้อยลง ประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้จะค่อยถูกปลดปล่อยจากส่วนที่เป็นของแข็งออกมาสู่ส่วนที่เป็นสารละลายดิน ดินที่มีค่า CEC สูง จึงมีคุณสมบัติเป็นสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer power) สูงด้วย (ศุภมาศ, 2539)

2.2 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับผักตบชวา



รูปที่ 2.2 ผักตบชวา

ที่มา: <https://medthai.com/ผักตบชวา>

- ชื่ออื่นๆ : บัวลอย ผักปง ผักตบ ผักปอด ผักป่อง สวะ ผักยะวา ผักอีโยก
 ชื่อสามัญ : Water hyacinth, Floating water hyacinth
 ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms
 อาณาจักร: พืช (Plantae)
 วงศ์ : Pontederiaceae
 สกุล : *Eichhornia*
 สปีชีส์: *E. crassipes*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้น :	Commelinidae
อันดับ :	Commelinales
ส่วน :	Liliopsida

2.2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ผักตบชวา เป็นพืชน้ำล้มลุกอายุหลายฤดู สามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ มีถิ่นกำเนิดในแถบลุ่มน้ำแอมะซอน ประเทศบราซิล ในทวีปอเมริกาใต้ ลำต้นสั้น แดกใบเป็นกอลอยไปตามน้ำ หากน้ำตื้นจะหยั่งรากลงดิน ใบเป็นใบเดี่ยวรูปไข่หรือเกือบกลม ก้านใบกลมอวบน้ำตรงกลางพองออก ภายในเป็นช่องอากาศคล้ายฟองน้ำช่วยให้ลอยน้ำได้ ดอกสีม่วงอ่อน คล้ายช่อดอกกล้วยไม้ ปลายยอดมีดอกย่อย 3-25 ดอก มีกลีบดอก 6 กลีบ ขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว โดยการแยกต้นอ่อนที่ปลายไหล

2.2.2 การขยายพันธุ์ของผักตบชวา

โดยทั่วไป ผักตบชวาขยายพันธุ์โดยการแตกไหลและเจริญเติบโตติดกับต้นแม่ เพิ่มจำนวนจนเกิดเป็นกอใหญ่ ไม่สืบพันธุ์โดยเมล็ดมากนัก นอกจากในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น ช่วงน้ำแห้งในฤดูแล้ง ต้นผักตบชวาแห้งตาย เมื่อถึงฤดูฝน เมล็ดที่พักตัวอยู่ในดินจะเริ่มงอกเป็นต้นอ่อน และเจริญเติบโตขึ้น การขยายพันธุ์ของผักตบชวาเป็นไปอย่างรวดเร็ว ในระยะเวลา 20 วัน ผักตบชวา 2 ต้นสามารถขยายพันธุ์ได้ 1,200 ต้น และครอบคลุมพื้นที่น้ำ 2.5 ไร่ ภายในเวลา 8 เดือน

2.2.3 ปัญหาจากผักตบชวา

2.2.3.1 การชลประทาน

งานชลประทานในประเทศไทยมีจุดมุ่งหมายสำคัญในการพัฒนาแหล่งน้ำ โดยการจัดสรรน้ำเพื่อใช้ประโยชน์หลายๆอย่าง โดยวิธีการต่างๆ กัน ซึ่งผักตบชวาเป็นอุปสรรคในการพัฒนาแหล่งน้ำเนื่องจาก

- ขัดขวางการไหลของน้ำ ทำให้การไหลของน้ำลดลงประมาณ 40%
- ส่วนต่างๆ ของผักตบชวาที่จมลงใต้น้ำ ทำให้เกิดอุปสรรคในการระบายน้ำและทำให้ทางเดินน้ำตื้นเขิน เกิดน้ำท่วมในหน้าน้ำ

2.2.3.2 การกสิกรรม

ปัญหาทางกสิกรรมที่มีสาเหตุมาจากผักตบชวา คือ

- เป็นวัชพืช แย่งน้ำและอาหารจากพืชของเกษตรกร

- เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ศัตรูพืช เช่น หนู ซึ่งมีปริมาณมากในบริเวณแพผักตบชวา ทำให้เกิดความเสียหายแก่พืชผลของเกษตรกร

2.2.3.3 การสาธารณสุข

- เป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำซึ่งเป็นพาหะนำโรค เช่น หอยโข่งเนื้อมีพยาธิใบไม้ในตับ

- เป็นที่วางไข่ของยุงและที่อยู่อาศัยของลูกน้ำยุงพาหะโรคเท้าช้าง ที่สามารถเจาะไชรากผักตบชวาเพื่อใช้เป็นที่ย่อยใจ

2.3 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับถ่านชีวภาพ

2.3.1 ถ่านชีวภาพ

วัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากการให้ความร้อนมวลชีวภาพ (biomass) โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้น้อยมาก เรียกรกระบวนการนี้ว่าการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) ซึ่งมีสองวิธีหลักๆ คือการแยกสลายอย่างรวดเร็วและอย่างช้า การผลิตไบโอชาร์ด้วยวิธีการแยกสลายอย่างช้าที่อุณหภูมิเฉลี่ย 500 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตของไบโอชาร์มากกว่า 50% แต่จะใช้เวลาเป็นชั่วโมง ซึ่งต่างจากวิธีการแยกสลายอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิเฉลี่ย 700 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาเป็นวินาที ผลผลิตที่ได้จะเป็นน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) 60% แก๊สสังเคราะห์ (syngas) ได้แก่ H_2 , CO และ CH_4 รวมกัน 20% และไบโอชาร์ 20% (Winsley, 2007; Zafar, 2008)



รูปที่ 2.3 ถ่านชีวภาพ

ที่มา: <https://www.nanagarden.com/product/294832>

ถ่านชีวภาพ (Biochar) มีความหมายแตกต่างจากถ่านทั่วไป (Charcoal) ตรงจุดมุ่งหมายของการใช้ประโยชน์ คือเมื่อกกล่าวถึง Charcoal จะหมายถึงถ่านที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ขณะที่ Biochar คือถ่านที่ใช้ประโยชน์เพื่อกักเก็บคาร์บอนลงดินและปรับปรุงดิน การกักเก็บคาร์บอนในดินด้วยการแยกสลายมวลชีวภาพด้วยความร้อนจะได้คาร์บอนถึง 50% ของคาร์บอนที่มีอยู่ในมวลชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนที่ได้จากการเผาไหม้ชีวภาพจะเหลือเพียง 3% และจากการย่อยสลายโดยธรรมชาติหลังจาก 5-10 ปี จะได้คาร์บอนน้อยกว่า 20% ปริมาณของคาร์บอนที่ได้จะขึ้นกับชนิดของมวลชีวภาพ สำหรับ อุณหภูมิจะมีผลน้อยมากถ้าอยู่ระหว่าง 350-500 องศาเซลเซียส (Lehmann et al., 2006)

2.3.2 ประโยชน์ของถ่านชีวภาพ

1. ช่วยบรรเทาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ เนื่องจากถ่านชีวภาพสามารถลดคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในระยะยาวได้ด้วยการกักเก็บคาร์บอนในดิน
2. ช่วยปรับปรุงดินและผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากเมื่อนำถ่านชีวภาพลงดิน ลักษณะความเป็นร่วนซุยของถ่านชีวภาพจะช่วยกักเก็บน้ำและอาหารในดิน และเป็นที่อยู่ให้กับจุลินทรีย์สำหรับทำกิจกรรมเพื่อสร้างอาหารให้ดิน เมื่อดินอุดมสมบูรณ์จะส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มขึ้น
3. ช่วยผลิตพลังงานทดแทน เนื่องจากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากมวลชีวภาพด้วยการแยกสลายด้วยความร้อนจะให้พลังงานชีวภาพที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อการขนส่งและในระบบอุตสาหกรรมได้
4. ช่วยในกระบวนการจัดการของเสียประเภทอินทรีย์วัตถุได้ เนื่องจากเทคโนโลยีไบโอชาร์มีศักยภาพในการกำจัดของเสียที่ทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นมิตรได้

2.4 โลหะหนัก

โลหะหนักเป็นคำทั่วไปซึ่งใช้กับกลุ่มโลหะและโลหะหนักที่มีความหนาแน่นของอะตอมมากกว่า 4 g / cm^3 แม้ว่าจะเป็นคำจำกัดความที่กำหนดไว้อย่างอิสระ แต่ก็เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางและมักใช้กับการปนเปื้อนที่แพร่หลายในระบบนิเวศของโลกและน้ำจืด ส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition metals โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ โลหะหนักที่รวมอยู่ใน APIS คือ แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ปรอท ตะกั่ว สังกะสี อาร์เซนิก โบรอน และโลหะกลุ่มทองคำขาว ซึ่งประกอบด้วย แพลทินัม แพลเลเดียม โรเดียม รูเทเนียม ออสเมียม และอิริเดียม ซึ่งแตกต่างจากสารอินทรีย์เกือบทั้งหมด เช่น Organochlorines โลหะหนักเป็นธาตุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในเปลือกโลก พวกเขาจึงพบตามธรรมชาติในดินและหินที่มีช่วงต่อมาของความเข้มข้นของพื้นหลังตามธรรมชาติในดินตะกอนน้ำและสิ่งมีชีวิต

2.4.1 ข้อมูลพื้นฐานของตะกั่ว (Lead)



รูปที่ 2.4 ตะกั่ว

ที่มา: <http://www.siamchemi.com/ตะกั่ว/>

เลขอะตอม	82 เป็นธาตุที่ 5 ของหมู่ IVA ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะ
น้ำหนักอะตอม	207.19 amu
จุดหลอมเหลว	327 °C
จุดเดือด	1737 °C
ความหนาแน่น	11.34 g/cc ที่ 20 °C
เลขออกซิเดชันสามัญ	+2,+4

ตะกั่วเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่มีสัญลักษณ์ Pb (ละติน: Plumbum) และในการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็น $[Xe] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^2$ เป็นโลหะหนักที่มีความหนาแน่นที่พบมากที่สุด ตะกั่วมีลักษณะเนื้ออ่อนนุ่มสามารถยืดได้ เมื่อตัดใหม่ๆ จะมีสีขาวอมน้ำเงิน แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีพิษ และจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ ขยายตัวได้มากเมื่อได้รับความร้อน มีความหลอ่ลื่นในตัวเอง ทนทานต่อการกัดกร่อน สามารถผสมกับโลหะต่างๆ เป็นโลหะผสม (alloys) ได้หลายชนิด ตะกั่วมีจำนวนอะตอมที่สูงที่สุดของธาตุใด ๆ ที่มีเสถียรภาพและไอโซโทปสามตัวของตะกั่วแต่ละตัวจะมีส่วนประกอบของธาตุที่หนักกว่าธาตุอื่นๆ

ตะกั่วจัดอยู่ในกลุ่มธาตุ Chalcophile ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบของแก่นโลกรวมทั้งธาตุอื่นๆ เช่น Galena PbS , Anglesite $PbSO_4$, Cerussite $PbCO_3$ และ Minium Pb_3O_4 นอกจากนี้ยังกระจายอยู่ในระดับช่วงของแร่ธาตุอื่น ๆ ได้แก่ K-feldspar, Plagioclase, Mica, Zircon และ Magnetite ตะกั่วคือหนึ่งในเจ็ดโลหะที่รู้จักกันในสมัยโบราณเนื่องจากความสะดวกในการสกัดเป็นโลหะ

แหล่งในประเทศ แร่ตะกั่ว-สังกะสีพบที่จังหวัดกาญจนบุรี ตาก เชียงใหม่ แม่ฮ่องสอน ลำปาง ลำพูน แพร่ เพชรบูรณ์ เลย เพชรบุรี นครศรีธรรมราช พัทลุง และยะลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.1 ตะกั่วในดิน

ตะกั่วในดินเกิดขึ้นเองทางธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด และเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์จากการใช้ประโยชน์ของตะกั่ว เช่น การถลุงแร่ซึ่งมีฝุ่นตะกั่วและน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับตะกั่ว เช่น โรงงานผลิตเครื่องประดับสตรี เซรามิค อุตสาหกรรมเคมี เชื่อมบัดกรี เป็นต้น ดังนั้น จึงมีการควบคุมมาตรฐานคุณภาพดินตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 พุทธศักราช 2547 โดยที่ตะกั่ว (Lead) ต้องไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม และตะกั่ว (Lead) ต้องไม่เกิน 750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามมาตรฐานคุณภาพดินนอกเหนือการใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2547)

2.4.2 ข้อมูลพื้นฐานของแคดเมียม



รูปที่ 2.5 แคดเมียม

ที่มา: <http://thaihealthlife.com/พิษจากแคดเมียม>

เลขอะตอม	48 เป็นธาตุที่ 5 ของหมู่ IIB ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะ
น้ำหนักอะตอม	112.411 amu
จุดหลอมเหลว	321 °C
จุดเดือด	765 °C
ความหนาแน่น	8.65 g/cm ³ ที่ 20 °C
เลขออกซิเดชันสามัญ	+2

แคดเมียมเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่มีสัญลักษณ์ Cd และในการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็น [Kr] 4d¹⁰ 5s² มีลักษณะเป็นโลหะทรานซิชันสีขาว-ฟ้า เป็นธาตุมีพิษ แว่ววาวเป็นสีเงินจาง ๆ ไม่มีกลิ่นอ่อนตัวและเป็นมันเงา แคดเมียมสามารถเกิดได้ตามธรรมชาติ แต่ในส่วนใหญ่จะเกิดร่วมกับแร่สังกะสี ดังนั้น การทำเหมืองแร่สังกะสีจะทำให้เกิดแคดเมียมเกิดขึ้น แคดเมียมมีประโยชน์หลายอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น ใช้ผสมกับโลหะซึ่งเป็นโลหะผสม อัลลอยด์ (alloy) เพื่อเพิ่มความเหนียวทนทานต่อการกัดกร่อน ใช้ในการเคลือบโลหะ เช่น เหล็ก ทองแดง และอลูมิเนียม ใช้ในการผลิตแบตเตอรี่โดยผสมกับโลหะ นิกเกิล

แคดเมียมเป็นองค์ประกอบรองลงมาในแร่สังกะสีส่วนใหญ่และเป็นผลพลอยได้จากการผลิตสังกะสี แคดเมียมถูกนำมาใช้เป็นเวลานานเป็นชุปป้องกันกรกัดกร่อนในเหล็กและสารแคดเมียมจะใช้เป็นสีแดง, สีส้มและสีเหลืองเม็ดสีเพื่อสีแก้วและเพื่อรักษาเสถียรภาพพลาสติก ใช้แคดเมียมโดยทั่วไปลดลงเพราะมันเป็นพิษ (ที่ระบุไว้โดยเฉพาะในยุโรปข้อจำกัดการใช้สารอันตรายและแบตเตอรี่ นิกเกิล แคดเมียม ได้ถูกแทนที่ด้วยโลหะนิกเกิลและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน หนึ่งในการใช้งานใหม่ ๆ คือแคดเมียมเทลลูไรด์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าหากแคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ได้ ไม่ว่าจะเป็นการหายใจเข้า หรือมีสารปะปนอยู่กับอาหารที่รับประทานเข้าไป เมื่อสารได้เข้าไปอยู่ในร่างกายแล้ว จะทำให้เกิดอาการได้ 2 ลักษณะ คือ เกิดการเป็นพิษเฉียบพลัน และ เป็นพิษแบบเรื้อรังซึ่งอาการของโรคที่รู้จักกันมากที่สุดก็คือ อาการของโรค อีไต อีไต ซึ่งจะมีอาการป่วยเป็นโรคไต ปวดเอว และกระดูกผุ

2.4.2.1 แคดเมียมในดิน

แคดเมียมในดินเกิดขึ้นเองทางธรรมชาติที่จากการผุพังของแร่ในหินต่างๆ หรือบริเวณที่มีการทับถมของตะกอนที่ถูกพัดพาตามกระแสน้ำและลม ปริมาณแคดเมียมในดินจะแตกต่างกันไปตามลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะธรณีวิทยา และแคดเมียมในดินจะเกิดจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น การทำเหมืองแร่สังกะสี ตะกั่วและทองแดง จากการเผาไหม้กากของเสียและการปล่อยน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้น จึงมีการควบคุมมาตรฐานคุณภาพดินตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 พุทธศักราช 2547 โดยที่แคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม (Cadmium and compounds) ต้องไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม และแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม (Cadmium and compounds) ต้องไม่เกิน 810 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามมาตรฐานคุณภาพดินนอกเหนือการใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2547)

2.4.3 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสังกะสี



รูปที่ 2.6 สังกะสี

ที่มา: <https://www.siamchemi.com/สังกะสี>

เลขอะตอม	30
น้ำหนักอะตอม	65.409 กรัม/โมล
จุดหลอมเหลว	419.5 °C
จุดเดือด	907 °C
ความหนาแน่น	7.133 g/cm ³ ที่ 25 °C
เลขออกซิเดชันสามัญ	+2

สังกะสีอยู่ในตารางธาตุหมู่ 12 เป็นธาตุประเภทโลหะที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีพอสมควรกับออกซิเจนและธาตุที่ไม่ใช่โลหะ สังกะสีเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางจะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออก ธาตุชนิดนี้เป็นโลหะธาตุที่มีลักษณะที่เป็นสีเงิน มันวาว เป็นที่นิยมนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมมากมาย เพื่อเป็นโลหะโครงสร้างหรือโลหะผสมกับโลหะอื่นสำหรับประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ นอกจากนั้น สังกะสียังเป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งที่สามารถพบได้ในร่างกายมนุษย์ และสัตว์ เนื่องจากจัดเป็นแร่ที่ร่างกายต้องการชนิดหนึ่ง

แร่สังกะสีที่พบมากที่สุดคือ แร่สฟาเลอไรต์ (ZnS) เมื่อนำมาถลุงแล้วจะอยู่ในรูปของของเหลวไม่บริสุทธิ์ ในประเทศไทยพบแร่สังกะสีในหลายจังหวัด เช่น ลำปาง แพร่ แต่สำหรับที่ตากเป็นแร่สังกะสีชนิดซิลิเกต คาร์บอเนตและออกไซด์ ซึ่งจะมีลำดับวิธีการถลุงแร่แตกต่างกันออกไป

ปัจจุบันมีการใช้โลหะสังกะสีอย่างกว้างขวาง โดยใช้เป็นสารเคลือบเหล็กกล้า ใช้ผสมกับทองแดงเกิดเป็นทองเหลืองเพื่อใช้ขึ้นรูปหรือหลอมผลิตภัณฑ์ต่างๆ นอกจากนี้สารประกอบออกไซด์ของสังกะสียังนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยาง สี เซรามิกส์ ยา เครื่องสำอาง และอาหารสัตว์

2.5 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการเคมีความร้อนที่เปลี่ยนรูปชีวมวลพลาสติก ยางที่ใช้แล้ว โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง 500-800 องศาเซลเซียสในสภาวะไม่มีออกซิเจน เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนมากขึ้น ได้แก่ ถ่าน (charcoal) น้ำมัน (bio-oil) และก๊าซไม่กลั่นตัว (non-condensable gas) ผลิตภัณฑ์ที่ได้กระบวนการไพโรไลซิส แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

2.5.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการที่มีการให้อัตราความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อนาที) โดยมีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเหลว 30-50 เปอร์เซ็นต์ และถ่าน 25-35 เปอร์เซ็นต์

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ

1) คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (carbonization pyrolysis) เป็นกระบวนการให้ความร้อนที่ใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนนานประมาณหนึ่งวัน ได้ผลิตภัณฑ์ในสถานะของแข็งคือถ่านสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง ส่วนผลิตภัณฑ์ในสถานะก๊าซจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ

2) ไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (conventional pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนน้อย ประมาณ 15-30 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์ครบทั้งสามสถานะ คือ ถ่าน น้ำมัน และก๊าซไม่กลั่นตัว

2.5.2 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นกระบวนการที่มีการให้อัตราความร้อนสูง (มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส) โดยมีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิ 400-650 องศาเซลเซียสต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อใช้ชีวมวลเป็นวัตถุดิบจะได้ผลิตภัณฑ์ในสถานะของเหลว เรียกว่า น้ำมันชีวภาพประมาณ 60-75 เปอร์เซ็นต์ ของแข็ง 15-25 เปอร์เซ็นต์ และมีองค์ประกอบของน้ำในน้ำมันชีวภาพ 10-30 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นกับปริมาณความชื้นในชีวมวลเริ่มต้น

2.6 กระบวนการดูดซับ (Absorption)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะของสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ ส่วนสารที่ถูกดูดซับจะอยู่ในสภาวะที่เป็นของเหลวหรือแก๊ส การดูดซับแบบระหว่างสถานะต่างๆทั้งสามสถานะคือ ของเหลว (liquid) ก๊าซ (gas) และ ของแข็ง (solid) ซึ่งได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ และสารถูกดูดซับ โดยลักษณะของการดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) ซึ่งแรงนี้จะมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย เกิดจากการรวมแรง 2 ชนิดคือ แรงกระจาย (dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatics force) เป็นผลให้เกิดการคายความร้อนค่อนข้างต่ำ แต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น เมื่อลดความดันของระบบหรือเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากสารถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากสารดูดซับ เรียกว่า การคายซับ ซึ่งเป็นวิธีการนำสารดูดซับมาใช้ใหม่ สารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) โดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับจากชั้นของโมเลกุลของสารดูดซับที่อยู่ติดกันในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ

การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) การดูดซับเกิดขึ้นเมื่อสารถูกดูดซับและสารดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน นั่นคือเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างสารถูกดูดซับกับผิวหน้าของสารดูดซับ แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นค่อนข้างสูง ทำให้การดูดซับเคมีส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ โดยการดูดซับเกิดบนชั้นโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่บนพื้นผิวของสารดูดซับเพียงบางส่วนของบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้น เรียกการดูดซับนี้ว่า การดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วบนพื้นผิวทั้งหมด การดูดซับเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง

2.6.1 ชนิดของสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาณและขนาดของรูพรุนที่เหมาะสม โดยช่วงของการกระจายขนาดของรูพรุนนั้นแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

- รูพรุนขนาดใหญ่ (macropores): มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร
- รูพรุนขนาดกลาง (mesopores): มีขนาด 2-50 นาโนเมตร
- รูพรุนขนาดเล็ก (micropores): มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ รูพรุนขนาดเล็กยังถูกแบ่งย่อยออกเป็นสามช่วง ได้แก่

- อัลตราไมโครพอร์ (ultramicropores): มีขนาดเล็กกว่า 0.5 นาโนเมตร
- ไมโครพอร์ (micropores): มีขนาด 0.5-1.4 นาโนเมตร
- ซุปเปอร์ไมโครพอร์ (supermicropores): มีขนาดใหญ่กว่า 1.4-2 นาโนเมตร

โดยสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากเมื่อเทียบกับรูพรุนขนาดอื่น โมเลกุลของสารดูดซับจะสามารถอยู่ใกล้กับผิวของสารดูดซับ ทำให้เกิดแรงดึงดูดที่มากขึ้นด้วย ซึ่งสารดูดซับที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซีโอไลต์ (Zeolite) ซิลิกาเจล (Silica gel) อะลูมินา (Alumina) เป็นต้น

2.6.2 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็ง หรือของเหลว การเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะ ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารดูดซับ (Adsorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของสารดูดซับ โดยโมเลกุลจะแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของสารดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ผ่านภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารดูดซับแพร่กระจายเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับ เพื่อเกิดการดูดซับ

ระยะที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) เป็นกลไกที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างสารดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

2.6.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับ

อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของสารดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าหรือผิวสัมผัสของของเหลวที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่สารดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของสารดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3) การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่า การแพร่เข้าสู่รูพรุน (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในรูพรุนชั้นตอนนี้จัดเป็นชั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

2.6.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับของถ่านขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังนี้

1.) ความปั่นป่วน (Turbulence) อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านตามชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) โดยความปั่นป่วนของระบบจะส่งผลต่อการแพร่อีกด้วย นั่นคือถ่าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก ทำให้การเคลื่อนที่เข้าไปสารดูดซับของโมเลกุลเป็นไปได้ยากขึ้น ดังนั้น การแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้การแพร่ภายในจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (ลลิตา, 2554)

2.) ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกละลายมีความสัมพันธ์กับการละลาย คือถ้าวัตถุละลายมีความสามารถในการละลายสูง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกละลายกับตัวทำละลาย มีค่ามาก โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกแยกออกจากสารละลายไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ยาก ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับต่ำ ส่วนสารที่ไม่ละลายหรือละลายได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวตัวดูดซับได้ดีกว่า (ยวรัตน์, 2544)

3.) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น รวมถึงมีโครงสร้างรูพรุนจะช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากขบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวเป็นส่วนใหญ่ (ยวรัตน์, 2544)

4.) ขนาดของตัวดูดซับ ในกรณีที่สารดูดซับไม่มีรูพรุน เมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลงพื้นที่ผิวในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงตามไปด้วย แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ (ยวรัตน์, 2544)

5.) น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล เมื่อน้ำหนักและขนาดของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลทำให้ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายที่เป็นสารอินทรีย์ลดลง และการดูดซับในรูพรุนจะเกิดได้ดีเมื่อตัวถูกละลายมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย เนื่องจากตัวถูกละลายสามารถเข้าไปในรูพรุน ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น (ยวรัตน์, 2544)

6.) ค่าพีเอช ค่าพีเอชจะมีผลต่อการดูดซับหรือไม่ จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ กล่าวคือ ในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวกและตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุลบแล้ว สารละลายมีค่าพีเอชต่างๆ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับในตัวดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออนในสารละลาย แต่จะมีผลในทางตรงกันข้ามเมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูงๆ เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยจึงลดการแย่งจับหรือการดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบ จะมีให้ผลในทางตรงกันข้ามกับประจุบวก

7.) อุณหภูมิ ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับเป็นประเภทใด ถ้าเป็นการดูดซับทาง กายภาพอุณหภูมิจจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิจากเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้นและเพิ่มโอกาสที่ตัวดูดซับจะเคลื่อนที่ เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับได้มากขึ้น

8.) ระยะเวลาในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่ (กุลธิตา, 2557)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhang และคณะ (2015) ทำการศึกษาประสิทธิภาพและกลไกในการกำจัด Cd จากถ่านชีวภาพจากผักตบชวา (BC) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและกลไกในการกำจัด Cd โดยการเผาผักตบชวาที่อุณหภูมิ 250-550 องศาเซลเซียส โดยผักตบชวาที่ 450 องศาเซลเซียส (BC450) สามารถดำเนินการได้ดีกว่าผักตบชวาที่อุณหภูมิอื่นๆ ที่ความเข้มข้นของ Cd แตกต่างกันได้และสามารถกำจัด Cd ออกจากสารละลายในน้ำได้เกือบ 100% ภายในเวลา 1 ชั่วโมงที่ $Cd < 50 \text{ mg l}^{-1}$ กระบวนการดูดซับโดย BC450 ตามหลักจลนพลศาสตร์ลำดับที่สอง โดยเกิดจุดสมดุลหลังจากผ่านไป 24 ชม. ค่าเริ่มต้น Cd ตั้งแต่ 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับ Cd สูงสุดของ BC450 ได้ประมาณ 70.3 มก. กรัมตามแบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir model) ซึ่งโดดเด่นในกลุ่มของตัวดูดซับที่มีต้นทุนต่ำ จากการวิเคราะห์ความสมดุลระหว่างไอออนที่ปล่อยออกมาและการดูดซับ Cd ลงบน BC450 ร่วมกับข้อมูล SEM-EDX และ XPS การแลกเปลี่ยนไอออนโดยพื้นผิวเชิงซ้อน เป็นกลไกสำคัญในการทำให้ Cd ตรึงโดย BC450 ในทางเดียวกัน การวิเคราะห์ XRD ยังชี้ให้เห็นการจับตัวของ Cd ที่ไม่ละลายน้ำ $CdCO_3$, Cd_3P_2 , $Cd_3(PO_4)_2$ และ K_4CdCl_6 จากการตกตะกอนร่วมหรือ

แลกเปลี่ยนไอออน ผลจากการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนผักตบชวาเป็นถ่านชีวภาพเป็นวิธีการที่มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการตรึง Cd ที่มีประสิทธิภาพและเป็นการจัดการปัญหาการรุกรานของพืชชนิดนี้ที่ดีที่สุด

El-Naggar และคณะ (2018) ทำการศึกษาถ่านชีวภาพมีผลต่อการละลายและความเข้มข้นของคอลลอยด์ของ Cd, Cu, Ni, และ Zn และความสามารถในการปลดปล่อยและศักยภาพการเคลื่อนที่ในดินเหมือนแร่ภายใต้สภาวะรีดอกซ์ โดยเปรียบเทียบดินที่มีการบำบัดด้วยถ่านชีวภาพและดินที่ไม่ผ่านการบำบัด ภายใต้สภาวะรีดอกซ์ต่างๆจนถึงสภาวะออกซิไดซ์ อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในดิน, การละลายคาร์บอนอินทรีย์ (DOC), คาร์บอนอะโรมาติกที่ละลาย (DAC), Fe, Mn, SO_4^{2-} และ Cl^- ในการปลดปล่อยธาตุอาหาร พบว่าดินที่ผ่านการบำบัดมีช่วง pH ต่ำกว่าดินที่ไม่ได้รับการบำบัด ความเข้มข้นที่ละลายของ Cd, Cu, Ni, Zn, Fe, Mn, SO_4^{2-} และ DAC เพิ่มขึ้นภายใต้ภาวะออกซิไดซ์ในดินที่ผ่านการบำบัดแล้วและไม่ผ่านการบำบัดด้วยถ่านชีวภาพ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการลดลงของค่า pH และ / หรือออกซิเดชัน ซัลไฟด์ แคตเมียมมีมากขึ้น

Meng และคณะ (2018) ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโลหะหนัก Pb และ Zn ในดินเหมือนแร่โดยการดูดซับของถ่านชีวภาพที่ผสมฟางข้าวและมูลสุกร ในการศึกษาครั้งนี้ ถ่านชีวภาพที่ได้จากมูลสุกรและฟางข้าวที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เพื่อประเมินผลกระทบต่อความสามารถในการใช้ประโยชน์ทางชีวภาพและการแยกโลหะหนัก 4 ชนิด ได้แก่ Cd, Cu, Pb และ Zn ในดินปนเปื้อน Pb Zn ที่ผ่านการสังเคราะห์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าถ่านที่ผสมฟางข้าวและมูลสุกรมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญต่อผลผลิต, ปริมาณถั่ว, ค่า pH, และการนำไฟฟ้า (EC) เมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพจากฟาง / ปุ๋ยหมักเพียงอย่างเดียว ถ่านชีวภาพผสมเหล่านี้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า pH ของดิน, ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ละลาย (DOC) อย่างมีนัยสำคัญในอัตราส่วนการเพิ่มถ่านชีวภาพ 3% ความเข้มข้นของโลหะที่สกัดได้ของ CaCl_2 $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cd}$ ตามลำดับ โลหะหนักที่แลกเปลี่ยนได้มีปริมาณลดลงในทุกดินที่ผ่านการปรับปรุงสภาพดิน ในขณะที่โลหะชนิดคาร์บอนเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของดิน pH และการลดลงของโลหะที่สกัดได้ของ CaCl_2 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้สามารถแปลงได้โดยตรง โลหะมีค่าสูงเพื่อการสีหรือที่มีเสถียรภาพในดิน สรุปได้ว่า ถ่านชีวภาพที่ผสมฟางข้าวกับมูลสุกรในอัตราส่วน 3 : 1 สามารถดูดซับโลหะหนักในดินได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น 1455 VP ยี่ห้อ Leo บริษัท Science Engineer International Co., LTD. ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) รุ่น Spectrum GX ยี่ห้อ Perkin Elmer บริษัท Perkin Elmer Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X - ray Diffractometer) รุ่น D8 Advance ยี่ห้อ Bruker บริษัท Bruker Biospin AG ประเทศไทย
4. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) รุ่น AAS 200 New บริษัท Perkin Elmer Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องกรองลดความดัน (Filter Pressure) รุ่น Aspirator A - 35 ยี่ห้อ EYEL ประเทศญี่ปุ่น
6. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น C860 ยี่ห้อ Consort ประเทศเบลเยียม
7. ตู้อบสาร (Oven) รุ่น UM400 ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมนี
8. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด รุ่น ML204 ยี่ห้อ Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
9. เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น Orbital shaker ยี่ห้อ Gallenkamp บริษัท Jebesen & Jessen Technology ประเทศเยอรมนี
10. ตะแกรงร่อน (Sieved) 35 mesh มาตรฐาน ASTM E11 ประเทศอังกฤษ
11. กระดาษกรอง (Filter papers) ยี่ห้อ Whatman เบอร์ 42
12. กรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
13. ขวดน้ำกลั่น (Wash bottle)
14. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ยี่ห้อ DURAN ประเทศเยอรมนี

3.1.2 สารเคมี

1. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) ยี่ห้อ Fisher Chemical, บริษัท European Distribution Center ประเทศเบลเยียม เกรตวิเคาระห์
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) บริษัท CARLO ERBA เกรตวิเคาระห์
3. ตะกั่วไนเตรท (Lead (II) nitrate ($Pb(NO_3)_2$))
4. แคดเมียมไนเตรทเตตราไฮเดรต (Cadmium nitrate tetrahydrate, $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) บริษัท Fluka เกรตวิเคาระห์
5. กรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3) ยี่ห้อ Loba Chemie, บริษัท Loba Chemie Pvt. Ltd. ประเทศอินเดีย เกรตห้องปฏิบัติการ
6. กรดไฮโดรคลอริก (conc. HCl) ยี่ห้อ Fisher Chemical, บริษัท European Distribution Center ประเทศเบลเยียม เกรตวิเคาระห์
7. สารละลายไดเอทิลอีนไตรอะซีนเพนตะอะซีติก แอซีติก (Diethylenetriaminepentaacetic, DTPA) AR grade บริษัท Fisher Chemical ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium chloride, $MgCl_2$) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
9. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) RE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
10. กรดแอซีติก (acetic acid) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
11. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate, $K_2Cr_2O_7$) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
12. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
13. แอมโมเนียมอะซิเตต (Ammonium acetate, $C_2H_7NO_2$) RPE grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
14. แอมโมเนียมไอรอนซัลเฟต (Ammonium iron(II) sulfate, $Fe(SO_4)(NH_4)_2(SO_4) \cdot 6H_2O$) AR grade บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย

3.2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

3.2.1 การเก็บตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินจากจังหวัดระยอง ด้วยวิธี Equal interval on diagonal lines ตั้งแต่ผิวดิน จนถึงระดับความลึก 30 เซนติเมตร โดยการเก็บตัวอย่างแบบผสมรวม ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างจากหลายๆจุดและนำมาผสมกัน เพื่อใช้เป็นตัวแทนของตัวอย่างดิน ทำการเลือกเศษหิน เศษหญ้าขนาดใหญ่ออก ผึ่งแดดจนแห้ง จากนั้นจึงนำมาบดด้วยครกบดดิน และร่อนดินด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร (Mesh no. 10) นำดินที่ร่อนแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็น

3.2.2 การเตรียมตัวอย่างดิน

นำดินตัวอย่างมาทำการสังเคราะห์ดินปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่วและสังกะสี ดังนี้คือ

1. ชั่ง $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 137.21 มิลลิกรัม ละลายน้ำแล้วผสมลงในดิน 1 กิโลกรัม (ระดับความเข้มข้นแคดเมียม เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง)
2. ชั่ง $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 201.95 มิลลิกรัม ละลายน้ำแล้วผสมลงในดิน 1 กิโลกรัม (ระดับความเข้มข้นตะกั่ว เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง)
3. ชั่ง $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 123.85 มิลลิกรัม ละลายน้ำแล้วผสมลงในดิน 1 กิโลกรัม (ระดับความเข้มข้นสังกะสี เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง)

ทิ้งไว้ 3 สัปดาห์ แล้วนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนักในดินเริ่มต้น โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)

3.2.3 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดิน

การนำตัวอย่างดินมาทำการทดสอบ ต้องทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวอย่างดินเบื้องต้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของดิน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.1 โดยดำเนินการทดสอบ 3 ซ้ำ

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดินและถ่านชีวภาพ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ	อ้างอิง
Soil texture (เฉพาะดิน)	Hydrometer method	(Bouyoucos, 1962.)
Moisture	Dry in an oven at 110 °C and calculating the mass loss.	(Department of transportation engineering service center, 1999)
pH	pH meter (อัตราส่วนดิน: น้ำ เท่ากับ 1:100) / (Consort, C860)	(มานิชญ์, 2541)
electrical conductivity	conductivity meter	(ไพฑูรย์, 2553)
Cation exchange capacity	Ammonium acetate method	(กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)
loss of ignition	burning at 550 °C and calculating the mass loss	(Heiri et. al., 1999)
Organic matter	Walkley–Black titrations	(กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
Total nitrogen	Kjeldahl method	(กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
Nitrate ion	Brucine method	(Gordon et. al., 2004)
Chloride ion	Argentometric method	(กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
Total phosphate	Molybdovanadophosphate method	(กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
Sulfate ion	Turbidimetric method	(อุดมลักษณ์, 2540)
Aluminium ion	Colorimetric method	(ไพฑูรย์, 2553)
Major element (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺) and Total heavy metal (Cd ²⁺)	Acid digestion/ Atomic absorption spectrophotometer (AAS)	(US.EPA, 1996)
	SW-846 method 3050b	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมตัวดูดซับ

3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ

นำผักตบชวามาล้างด้วยน้ำ เพื่อทำความสะอาด แล้วตัดเป็นชิ้นเล็กๆ อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้ละเอียด นำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ที่ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำถ่านชีวภาพมากรองผ่านตะแกรงร่อน (Sieve) 35 mesh แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับ

วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวโดยใช้เทคนิค scanning electron microscopy (SEM), ศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่างๆในตัวดูดซับโดยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), และหาค่า zero point charge ศึกษาคุณสมบัติอื่นๆตามตารางที่ 3.1

3.4 ศึกษาผลต่อประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะ

นำดินสังเคราะห์โลหะมาผสมถ่านชีวภาพโดยให้มีปริมาณถ่านชีวภาพ เท่ากับ 0% (ชุดควบคุม), 0.5%, 1%, 2%, 5% ทำการผสมคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันและเติมน้ำกลั่นจนอิ่มตัวด้วยน้ำ ทำการปรับเสถียรที่อุณหภูมิห้องนาน 2 สัปดาห์ โดยในระหว่างการปรับเสถียร ทำการคลุกเคล้าให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอ เมื่อครบกำหนดตามระยะเวลา นำดินสังเคราะห์โลหะที่ผ่านการปรับเสถียรไปทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก โดยการสกัดดินด้วยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) โดยใช้ AAS นอกจากนี้ยังศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดินโดยการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) (เฉพาะตัวอย่างที่ให้ประสิทธิภาพการยับยั้งการเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดเท่านั้น) การดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำตามวิธีข้างต้น

3.5 กระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) โดยการสกัดด้วยสารละลาย DTPA ความเข้มข้น 0.005 M (Khanmirzaei, et al., 2013)

ซึ่งตัวอย่างดินสังเคราะห์โลหะที่ผ่านการปรับเสถียร 10 กรัมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เติมสารละลาย DTPA ความเข้มข้น 0.005 M ปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาทีในอุณหภูมิห้อง ทำการกรองสารละลายส่วนใสด้วยกระดาษกรอง (Whatman ขนาดความเป็นรูพรุน 2.5 μm) และวิเคราะห์หาความเข้มข้น

ของไอออนของโลหะในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ

3.6 กระบวนการการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) โดยอ้างอิงตามวิธีของ Tessier และคณะ (1979)

ส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ (Water soluble fraction)

ซังตัวอย่างดินสังเคราะห์ที่ผ่านการปรับเสถียร 5% 1 กรัมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตรใส่ลงในหลอดเซนติฟิวส์ เติมน้ำปราศจากไอออน 15 มิลลิลิตร และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทำการเก็บส่วนใสและปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นทำการล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่าและนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (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 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทำการเก็บส่วนใสและปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นทำการล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่าและนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อทำให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทำการทิ้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดส่วนที่ 3 ต่อไป

ส่วนที่ 3 รูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต (Carbonate bound fraction)

จากตัวอย่างดินที่เหลือในส่วนที่ 2 นำมาสกัดด้วยสารละลาย NH_4OAc ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และเขย่าต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็น

เวลา 30 นาที ทำการเก็บส่วนใส ปรับค่า pH เท่ากับ 5 ด้วยกรดอะซิติก และปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส 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 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เก็บส่วนใสและปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร เขย่าและนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น จากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัด ส่วนที่ 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 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร และสารละลาย 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 องศาเซลเซียส 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 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส

เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร เขย่าและนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดส่วนที่ 6 ต่อไป

ส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ (Residual fraction)

จากตัวอย่างดินที่เหลือในส่วนที่ 5 นำมาสกัดโดยการวิเคราะห์ด้วย Acid digestion จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เก็บส่วนใส และปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นวิเคราะห์หารูปฟอร์มของโลหะ ในสารละลายที่สกัดได้จากดินในแต่ละส่วน ตัวอย่างด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

3.7 การศึกษาความสามารถในการสะเทิน (Neutralization Capability) ของสารปรับปรุงดินด้วยวิธีการไทเทรต (Jaipong, 2016)

1. ชั่งผงถ่าน 0.5 กรัม ละลายลงในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร เขย่า 120 รอบต่อนาที/นาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และวัดค่า pH เริ่มต้น จากนั้นเติมกรดไนตริกที่ปริมาณ 0.5-6 มิลลิลิตร เขย่าเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงและทำการวัดค่า pH ของสารแขวนลอย
2. ทำเช่นเดียวกับข้อที่ 1 แต่เปลี่ยนจากเติมกรดไนตริก เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 M
3. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับปริมาณของสารละลายกรดและเบสที่ใช้ โดยหน่วยเป็น meq/g
4. นำปริมาตรของสารละลายกรดและเบสที่ใช้ในการปรับค่า pH ตั้งแต่ค่า pH เริ่มต้นไปจนถึงค่า pH เท่ากับ 4 มาหาค่าความสามารถในการสะเทินกรด (Acid Neutralization Capability; ANC) โดยทำการทดลองดำเนินการ 3 ซ้ำ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับโลหะในดินได้แก่แคดเมียม ตะกั่ว และซิงค์ โดยใช้ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา เพื่อชะลอและลดปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียม ตะกั่ว และซิงค์ในการแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม รวมถึงค่าสภาพความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก และศึกษารูปฟอร์มของไอออนของโลหะในดินก่อนและหลังการเติมถ่านชีวภาพ ทดสอบประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของไอออนของโลหะโดยการสกัดดิน

4.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินตัวอย่าง

การวิเคราะห์เป็นการจำลองตัวอย่างดินจากจังหวัดระยองโดยนำตัวอย่างดินมาทำการสังเคราะห์ดินปนเปื้อนแคดเมียม (Cd^{2+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) และสังกะสี (Zn^{2+}) โดยสังเคราะห์ให้อยู่ในรูป $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, $Pb(NO_3)_2$ และ $Zn(NO_3)_2$

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างดินและถ่านชีวภาพจากผักตบชวา

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์ (Mean \pm S.D.)	
	ดิน	ถ่านชีวภาพ
Soil texture (เฉพาะดิน)	11.67	-
Moisture (%)	0.88	-
pH	6.49	5.25
electrical conductivity (dS/cm)	6.53 \pm 0.32	41.73 \pm 1.65
Cation exchange capacity (meq/100 g)	8.07 \pm 0.46	5.75 \pm 0.35
loss of ignition (%)	0.38 \pm 0.01	4.53 \pm 0.47
Organic matter (%)	3.54 \pm 2.45	16.52 \pm 0.44
Total nitrogen (%)	0.07	0.07
Nitrate ion (mg/l)	11.43 \pm 1.40	17.34 \pm 0.04
Chloride ion (mg/l)	2.71 \pm 0.67	127.13 \pm 1.34
Total phosphate (mg/l)	12.51 \pm 0.30	16.68 \pm 0.12
Sulfate ion (mg/l)	45.78 \pm 9.78	10.20 \pm 0.25
Aluminium ion (mg/kg)	ND	ND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

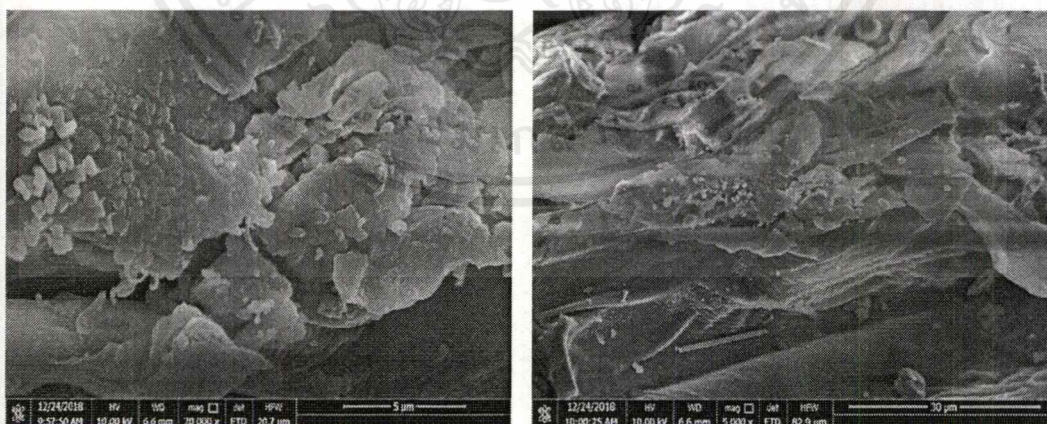
Major element (mg/kg)	Ca ²⁺	17.56	9.46
	Mg ²⁺	1,600	318
	K ⁺	13,160	47,600
Total heavy metal (mg/kg)	Cd ²⁺	1.69	0.62
	Pb ²⁺	0.65	-
	Zn ²⁺	0.29	-

หมายเหตุ ND (Not Detected) = ไม่สามารถวิเคราะห์ได้

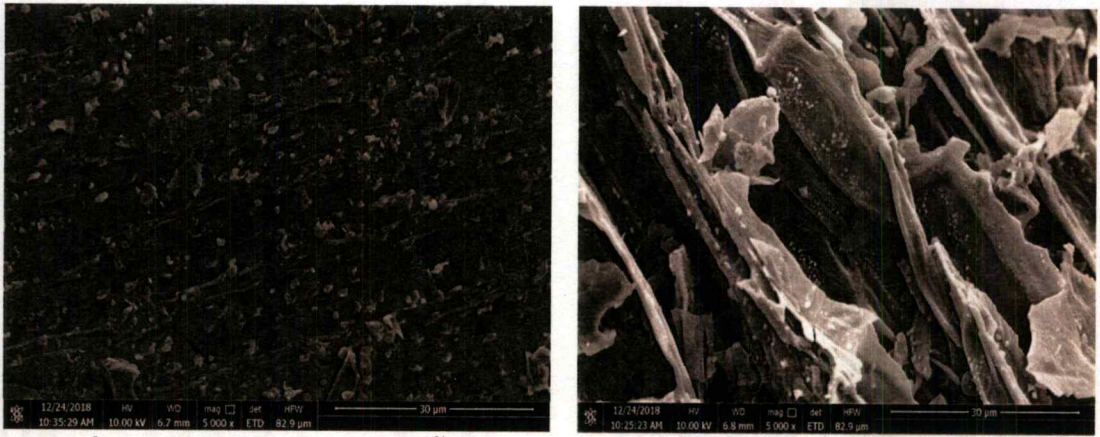
4.2 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ

4.2.1 วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวโดยใช้เทคนิค scanning electron microscopy (SEM)

นำผักตบชวาแห้งและถ่านชีวภาพจากผักตบชวาไปบดให้เป็นผงละเอียดขนาด 35 mesh ลักษณะทางกายภาพภายในผักตบชวาแห้งสามารถแสดงได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ด้วยกำลังขยาย x20000 และ x5000 เท่าตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของผักตบชวาบดแห้งมีลักษณะพื้นผิวขรุขระ จัดเรียงกันไม่เป็นระเบียบและเห็นเป็นเส้นใบของผักตบชวา เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างทางจุลภาคของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา ดังรูปที่ 4.2 มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ จัดเรียงเป็นชั้นและมีลักษณะเป็นรูพรุน



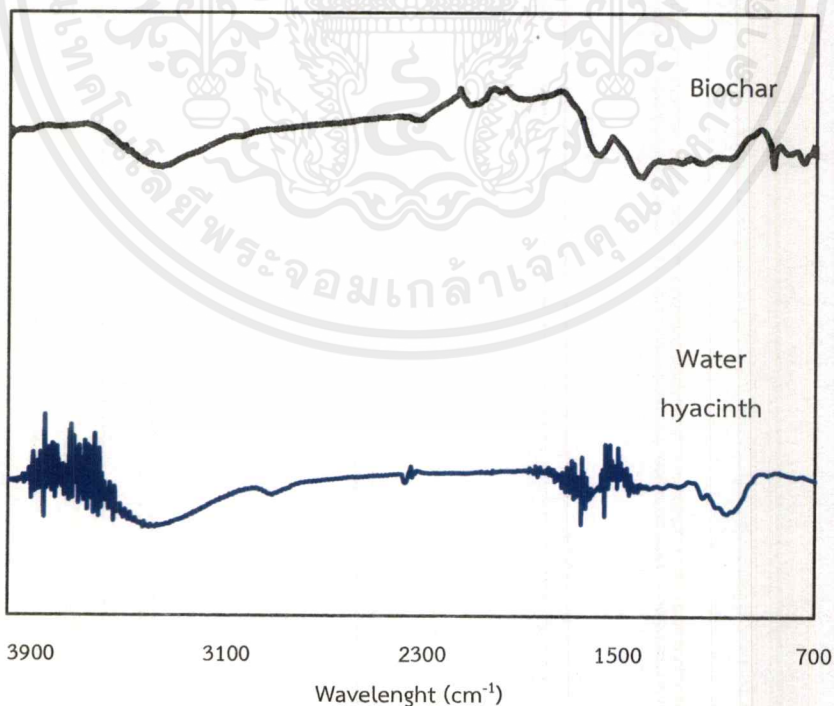
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวากำลังขยาย x20000 และ x5000 เท่า



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพกำลังขยาย x5000 เท่า

4.2.2 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่างๆในตัวดูดซับโดยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

นำผักตบชวาแห้งและถ่านชีวภาพจากผักตบชวาไปบดให้เป็นผงละเอียดขนาด 35 mesh มาศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.3 คือ สเปกตรัมของผักตบชวาบดแห้ง และสเปกตรัมของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผักตบชวาและถ่านชีวภาพจากผักตบชวา

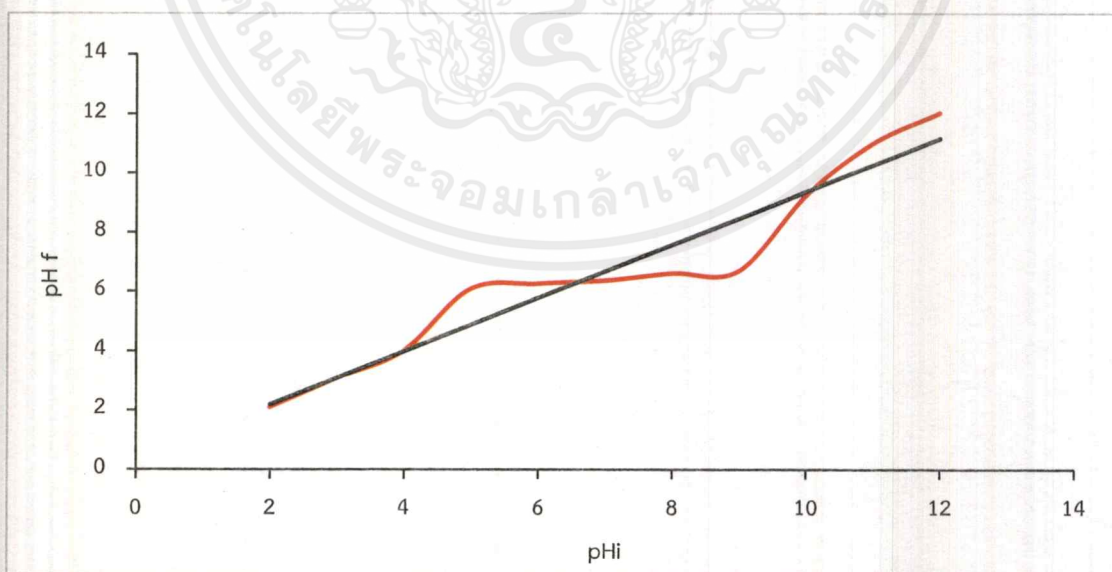
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของผักตบชวาพบว่าที่แถบการดูดกลืนที่ 3412 cm^{-1} แสดงถึงกลุ่มของ O-H stretching แถบการดูดกลืนที่ 2924 cm^{-1} แสดงถึง C-H stretching แถบการดูดกลืนที่ 2374 cm^{-1} แสดงถึง C-O ของกลุ่มคีทีน(ketene) หรือคีโตน(ketone) แถบการดูดกลืนที่ประมาณ 1710 cm^{-1} นั้นมาจากพันธะ C=O แถบการดูดกลืนที่ 1431 cm^{-1} , 1373 cm^{-1} , 1323 cm^{-1} , 1257 cm^{-1} แสดงถึง C=C aromatic และที่ความสูงสูงสุด 1062 cm^{-1} นั้นสอดคล้องกับ C-O stretching และ O-H bending ของกลุ่มแอลกอฮอล์ ฟีนอลิก และคาร์บอกซิลิก

การวิเคราะห์สเปกตรัมของถ่านชีวภาพ พบว่าที่แถบการดูดกลืน 3415 cm^{-1} แสดงถึง O-H stretching แถบการดูดกลืน 2926 cm^{-1} แสดงถึง C-H stretching แถบการดูดกลืน 2376 cm^{-1} พันธะ C-O ของกลุ่มคีทีน(ketene) หรือคีโตน(ketone)

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของผักตบชวาและถ่านชีวภาพจากผักตบชวาพบว่าที่แถบการดูดกลืนของ O-H stretching พิกของถ่านชีวภาพมีลักษณะกว้างกว่าเนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนและแสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นที่มากขึ้นด้วย และพบหมู่ C-H และ C-O ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในผักตบชวาเช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในถ่านชีวภาพยังพบหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวอีกด้วย แสดงถึงเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบของผักตบชวาหลงเหลืออยู่ในถ่านชีวภาพ

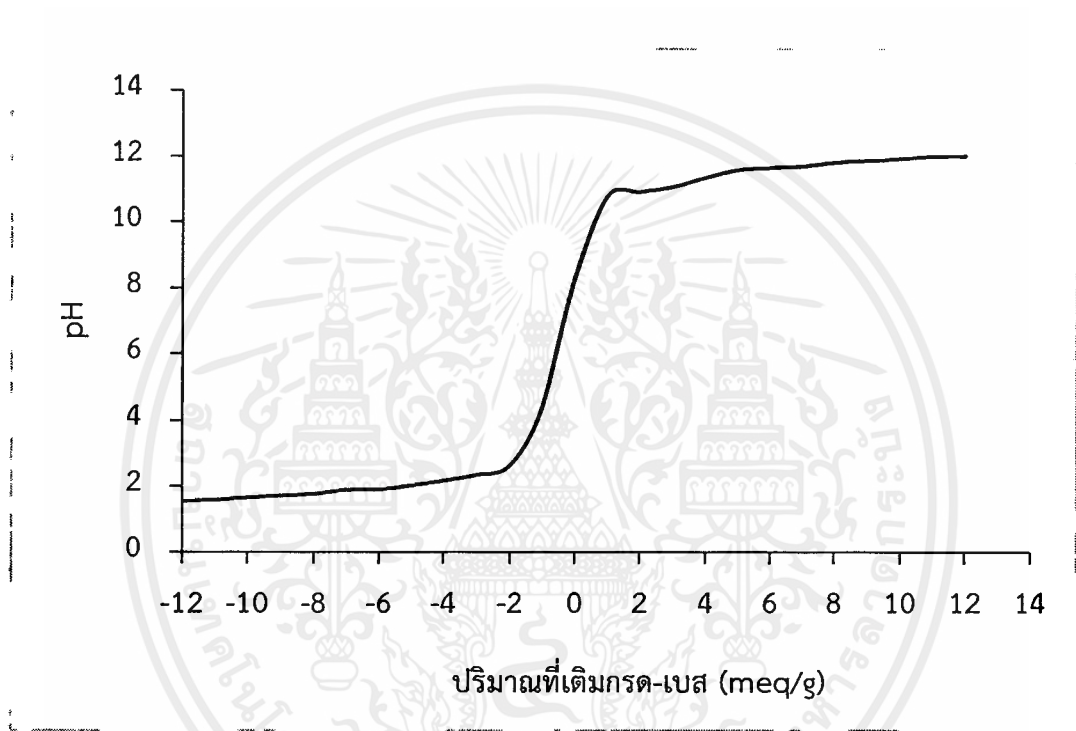
4.2.3 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{PZC})



รูปที่ 4.4 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา

จากรูปที่ 4.4 อธิบายได้ว่าเมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่ามากกว่า pH 6.5 ประจุที่ผิวของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาแสดงค่าเป็นลบ ดังนั้น จึงสามารถดูดซับไอออนโลหะที่มีประจุบวกได้เป็นอย่างดี ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่าน้อยกว่า pH 6.5 ประจุที่ผิวของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาดูดซับไอออนโลหะบวกได้ไม่ดีหรือดูดซับได้เพียงเล็กน้อย

4.2.4 การศึกษาความสามารถในการสะเทิน (Neutralization Capability) ของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาด้วยวิธีการไทเทรต



รูปที่ 4.5 ความสามารถในการสะเทิน (Neutralization Capability) ของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา
 (a) ค่าลบ แสดงความเป็นกรด เมื่อเติม HNO_3
 (b) ค่าบวก แสดงความเป็นเบส เมื่อเติม NaOH

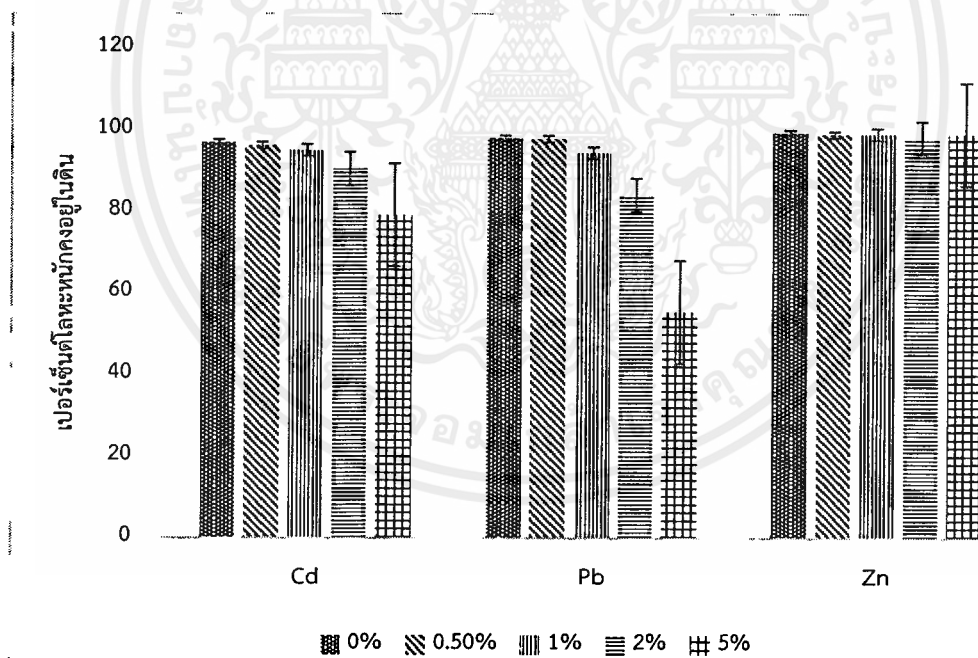
จากรูปที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดหรือเบสที่ใช้ (meq/g) กับค่า pH สุดท้ายหลังจากหยดกรดหรือเบส โดย pH เริ่มต้นของถ่านชีวภาพ มีค่าเท่ากับ 8.28 ซึ่งมีสภาพความเป็นเบส ดังนั้นเมื่อเติมกรดลงไปจึงทำให้ค่า pH ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เมื่อ pH ลดลงเท่ากับ 2 ค่า pH จะไม่เปลี่ยนแปลงในสภาวะเป็นกรด และเมื่อเติมเบสลงไปค่า pH จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่รวดเร็วเท่ากับการเติมกรด ซึ่งค่า pH เท่ากับ 11 จะไม่เปลี่ยนแปลงและจากผลการทดลองดังกล่าวเมื่อนำไปค่า pH ที่ได้ไปศึกษาความสามารถในการสะเทินกรด (Acid Neutralization Capability; ANC) พบว่าค่าความสามารถในการสะเทินของถ่านชีวภาพเท่ากับ 4997.9 meq/kg

ซึ่งค่า ANC ที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงซึ่งมีความสอดคล้องจากงานวิจัยของ Venegas et al., 2014 ระบุว่าวัสดุที่มีค่า pH เป็นต่างและมีค่า ANC สูงเป็นวัสดุที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการปรับปรุงดินที่ปนเปื้อนซึ่งสามารถเพิ่มค่า pH ให้กับดินที่เป็นกรดได้

4.3 ศึกษาผลต่อประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะ

4.3.1 กระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction)

กระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียวด้วยการนำดินสังเคราะห์โลหะที่ผ่านการปรับเสถียร 0%, 0.5%, 1%, 2% และ 5% มาสกัดด้วยสารละลาย 0.005 M DTPA แล้วนำไปหาความเข้มข้นของไอออนโลหะด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) พบว่า ปริมาณแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ตะกั่วไอออน (Pb^{2+}) ที่คงเหลืออยู่ในดินน้อยที่สุดที่ 5% มีปริมาณ 79.2% และ 55.36% ตามลำดับ และซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) มีปริมาณโลหะหนักที่เหลือคงอยู่ในดินที่ดินสังเคราะห์ที่ผ่านการปรับเสถียร 0.5%, 1%, 2% และ 5% ปริมาณใกล้เคียงกันคือ 98.92%, 98.98%, 98.12, 99.01% ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนักในถ่านชีวภาพจากผักตบชวาโดยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียวด้วยสารละลาย 0.005 M DTPA

4.4 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดินโดยการสกัดตามลำดับชั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction)

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี เพื่อจำแนกรูปฟอร์มของโลหะ โดยทำการสกัดตามลำดับชั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) โดยอ้างอิงตามวิธีของ Tessier (1979) ซึ่งโลหะหนักในดินสามารถแบ่งออกเป็น 6 รูปฟอร์มดังนี้

ส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ (Water soluble fraction, F1)

ส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction, F2) จะอยู่ในไอออนที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที สารสกัดที่ใช้จึงมีความรุนแรงน้อย

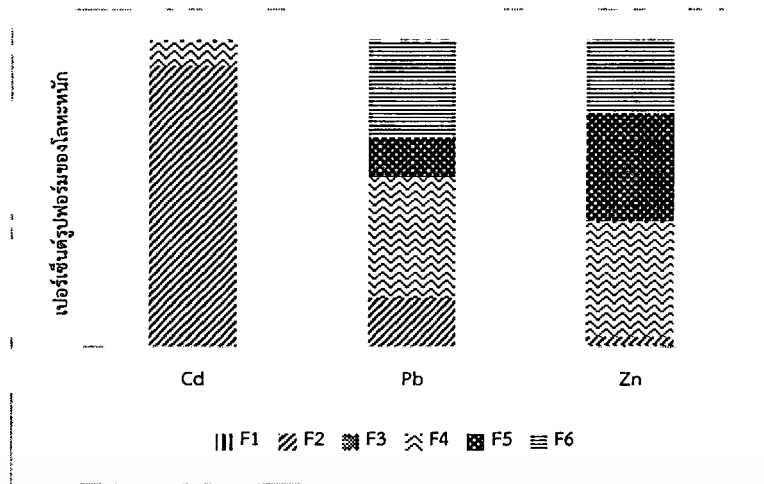
ส่วนที่ 3 รูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอเนต (Carbonate bound fraction, F3) จะอยู่ในรูปที่สร้างพันธะในดินอย่างหลวมๆ จึงมีโอกาที่จะละลายน้ำได้ง่ายและเป็นประโยชน์ต่อพืชได้

ส่วนที่ 4 รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (Fe-Mn oxide bound fraction, F4) จะละลายได้ยากกว่า ส่วนใหญ่จะเคลือบที่ผิวของเม็ดดินหรือผิวของแร่ เมื่อเกิดกระบวนการตกตะกอน การดูดซับ การสร้างตัวหรือการแลกเปลี่ยนประจุจะทำให้รูปนี้มีโอกาสที่จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้

ส่วนที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic bound fraction, F5) สันนิษฐานได้ว่ามีลักษณะเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในดินเป็นเวลานานและเมื่อผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปหรือกระบวนการย่อยสลายจะทำให้ธาตุเหล่านี้มีความเป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น

ส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ (Residual fraction, F6) เป็นรูปที่อยู่ในโครงสร้างของหินและแร่ที่สะสมอยู่ในดิน ความเป็นประโยชน์ในรูปนี้อยู่ในระดับต่ำมากและต้องใช้ระยะเวลาในการผุพังสลายตัว

เนื่องจากรูปฟอร์มของโลหะหนักในดินสามารถจำแนกตามความสามารถในการเคลื่อนที่ในดิน ไปยังตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมชนิดอื่นๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้ ประเภทที่ 1 คือรูปฟอร์มที่ไม่เสถียร (Non-stable form) ซึ่งได้แก่ ส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ ส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ และส่วนที่ 3 รูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอเนต และประเภทที่ 2 คือรูปฟอร์มที่เสถียร (Stable form) ซึ่งได้แก่ ส่วนที่ 4 รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ ส่วนที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน และส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ (ชัชวพร, 2551)



รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ของโลหะหนักในดินสังเคราะห์ที่ผ่านการปรับเสถียร 5% ที่สกัดได้ในแต่ละส่วน

จากการทดลองจากการสกัดแบบขั้นตอนเดียวดินสังเคราะห์ที่ผ่านการปรับเสถียร 5% มีเปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของโลหะหนักในดินของสังกะสีมากที่สุด เนื่องมาจากถ่านชีวภาพช่วยชะลอการเคลื่อนที่ของโลหะหนักทำให้มีเปอร์เซ็นต์การคงอยู่ในดินเหลืออยู่มาก ดังนั้นจึงเลือกดินสังเคราะห์ที่ผ่านการปรับเสถียร 5% มาทำการสกัดแบบลำดับส่วน เพื่อศึกษารูปฟอร์มของโลหะหนัก

รูปฟอร์มของแคดเมียม (Cd) ส่วนใหญ่จะพบอยู่ในรูปฟอร์มที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (F2, Exchangeable) 91.77% มากที่สุด รองลงมาคือรูปฟอร์มที่ 4 รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (Fe-Mn oxide bound fraction, F4) 8.32% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen, 2007 ทำการศึกษาดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม ส่วนใหญ่จะพบรูปฟอร์มที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้มากที่สุด

รูปฟอร์มของตะกั่ว (Pb) ส่วนใหญ่พบรูปฟอร์มที่ 4 รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (Fe-Mn oxide bound fraction, F4) 39.56% มากที่สุด รองลงมาคือรูปฟอร์มที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ (Residual fraction, F6) 31.60% , รูปฟอร์มที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (F2, Exchangeable) 15.89% เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ในดินของตะกั่ว เคลื่อนที่ได้น้อยมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่มีความเสถียร (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

รูปฟอร์มของสังกะสี (Zn) ส่วนใหญ่พบในรูปฟอร์มที่ 4 รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4, Fe-Mn oxide bound fraction) 37.57% มากที่สุด รองลงมาคือ รูปฟอร์มที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic bound fraction, F5) 35.32%, รูปฟอร์มที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ (Residual fraction, F6) 23.68%, รูปฟอร์มที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (F2, Exchangeable) 2.57% , รูปฟอร์มที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ (Water soluble fraction, F1) 0.49%, รูปฟอร์มที่ 3 รูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอเนต 0.33% (Carbonate bound fraction, F3) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. โครงสร้างทางจุลภาคของผักตบชวาบดแห้งมีลักษณะพื้นผิวไม่เป็นระเบียบ และยังเห็นเป็นเส้นใยของผักตบชวา ต่างจากโครงสร้างทางจุลภาคของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่มีลักษณะพื้นผิวก่อนล้างขรุขระ เรียงตัวเป็นชั้น ๆ และมีรูพรุน

2. ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของผักตบชวาและถ่านชีวภาพจากผักตบชวาพบว่าที่แถบการดูดกลืนของ O-H stretching พีกของถ่านชีวภาพมีลักษณะกว้างกว่าเนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจน และแสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นที่มากขึ้นด้วย และพบหมู่ C-H และ C-O ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในผักตบชวาเช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในถ่านชีวภาพยังพบหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวอีกด้วย แสดงถึงเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบของผักตบชวาหลงเหลืออยู่ในถ่านชีวภาพ

3. ความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่ามากกว่า pH 6.5 ประจุที่ผิวของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาแสดงค่าเป็นลบ ดังนั้น ความสามารถดูดซับไอออนโลหะที่มีประจุบวกได้เป็นอย่างดี ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่าน้อยกว่า pH 6.5 ประจุที่ผิวของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาดูดซับไอออนโลหะบวกได้ไม่ดีหรือดูดซับได้เพียงเล็กน้อย

4. ค่าความสามารถในการสะเทินของถ่านชีวภาพเท่ากับ 4997.9 meq/kg

5. กระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียวด้วยสารละลาย 0.005 M DTPA พบว่าปริมาณแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ตะกั่วไอออน (Pb^{2+}) และสังกะสีไอออน (Zn^{2+}) ที่เหลืออยู่ในดินที่ผสมถ่านชีวภาพ 5% มีปริมาณ 82.67% 36.91% และ 98.74% ตามลำดับ

6. การสกัดลำดับส่วน 6 ขั้นตอนในดินสังเคราะห์ที่ผ่านการปรับเสถียร 5% พบว่ารูปฟอร์มของแคดเมียม (Cd) ส่วนใหญ่จะพบอยู่ในรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ 91.77% มากที่สุดของรูปฟอร์มแคดเมียมทั้งหมด รองลงมาคือรูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ 8.32% รูปฟอร์มของตะกั่ว (Pb) ส่วนใหญ่พบรูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ 39.56% มากที่สุดของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด รองลงมาคือรูปฟอร์มที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ 31.60% รูปฟอร์มของสังกะสี (Zn) ส่วนใหญ่พบในรูปฟอร์มที่ 4 รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ 37.57% มากที่สุดของรูปฟอร์มสังกะสีทั้งหมด รองลงมาคือ รูปฟอร์มที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน 35.32%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการใช้วัสดุธรรมชาติชนิดอื่นๆมาใช้ในการดูดซับโลหะหนักนอกเหนือจาก ผักตบชวา
2. ควรนำไปประยุกต์ใช้กับดินที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมและทองแดงในโรงงาน อุตสาหกรรม
3. ควรศึกษาการดูดซับโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ที่มีพิษสูงกว่าหรือน้อยกว่านอกเหนือการทดลอง
4. ควรศึกษาเพิ่มเติมการนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วมาใช้ให้เป็นประโยชน์ หรือทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับว่าสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือไม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรกฤษณ์ อัมพุช และคณะ. 2560. “การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็คบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก ผักตบชวา”. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 (มกราคม – เมษายน).
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2547. คู่มือการปฏิบัติงานกระบวนการวิเคราะห์พืช ปุ๋ยและสิ่งปรับปรุงดิน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. ดินเพื่อประชาชน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานกระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- กุลธิดา สะอาด. 2557. “ประสิทธิภาพการดูดติดผิวไอออนทองแดงของถ่านชีวภาพในการบำบัด น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ”. วิทยาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการ สิ่งแวดล้อม) คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
- คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. “ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน”. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 121 ตอนพิเศษ 119 ง
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. *ปฐพีวิทยาเบื้องต้น*. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541. “*ปฐพีวิทยาเบื้องต้น*”. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชัชวพร ยิ่งสมบัติ. 2551. “การปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ ฟอสเฟต.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ดร.วิจารย์ สิมาฉายา. 2552. “การแก้ไขการลักลอบทิ้งและการฝังกลบกากของเสียอุตสาหกรรม บริเวณชุมชนมาบข่า อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดระยอง”. *จดหมายข่าวพิทักษ์สิ่งแวดล้อม*. ฉบับที่ 2 ปีที่ 2 (เมษายน-มิถุนายน)
- พลวัฒน์ พาพรหมพิง และปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์. 2016. “การดูดซับนิกเกิล (Ni^{2+}) โดยใช้ซีลีอ และซีลีอปรับปรุงสภาพ”. *วารสารฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการ*. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม วิจัย ครั้งที่ 12

- ไพฑูรย์ หมายหมั่นสมสุข. 2553. การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียเบื้องต้น. สำนักงานวิจัยและพัฒนา
สิ่งแวดล้อมโรงงาน.
- มาโนชญ์ มาตรฐาน. 2541. ปริมาณต้องการปุ๋ยของพื้นที่ดินกรด. หนังสืองานวิจัย. ห้องสมุดกรม
ป่าไม้. เลขที่ 410023
- ยุวรัตน์ ประมิตนาภรณ์. 2544. “การพัฒนาวัสดุดูดซับจากเปลือกไข่เพื่อกำจัดแคดเมียม”. วิทยานิพนธ์
มหาบัณฑิต. วิทยาศาสตร์ (การจัดการทรัพยากรชีวภาพ). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี. บัณฑิตวิทยาลัย
- ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2539. “ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี”. มลพิษในดิน
พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อุดมลักษณ์ รัตนอำพล. 2540. ผลการวิเคราะห์หาซัลเฟตในตัวอย่างน้ำบาดาลโดย Automated
methylthymol blue และ turbidimetric method. กองวิเคราะห์ กรมทรัพยากรน้ำ
ประณี. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size
analysis of soils. *Agron.* Volume 54. Pages 464-465.
- Chen, X. Zhou, S. Zhang, L. You, T. and Xu, F. 2016. “Adsorption of Heavy Metals by
Graphene Oxide/Cellulose Hydrogel Prepared from NaOH/Urea Aqueous
Solution”. *Materials (Basel)*. 9(7): 582.
- Chen, S. Xu, M. Ma, Y. and Yang, J. 2007. “Evaluation of different phosphate
amendments on availability of metals in contaminated soil.” *Ecotoxicology
and Environmental Safety*. Volume 67. Pages 278-285.
- Department of transportation engineering service center. 1999. *Method for
determining moisture content by oven drying*. State of California—
business, Transportation and Housing agency.
- El-Naggar, A. Shaheen, S. Ok, Y. and Rinklebe, J. 2018. “Biochar affects the dissolved
and colloidal concentrations of Cd, Cu, Ni, and Zn and their phytoavailability
and potential mobility in a mining soil under dynamic redox-conditions”.
Science of the Total Environment. Volume 624. Pages 1059-1071.
- Gordon, A. Arolfo, M. Yao, L. and Diamond, I. 2004. “Ethanol operant self-administration
in rats is regulated by adenosine A₂ receptors”. *Alcohol Clin Exp*. Volume 28.
Pages 1308–16.

- Heiri, O. Lotter, A. and Lemcke, G. 1999. "Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results". *Journal of Paleolimnology*. Volume 25. Pages 101–110.
- Hu, X. Xu, J. Wu, M. Xing, J. Bi, W. Wang, K. Ma, J. and Liu, X. 2017. "Effects of biomass pre-pyrolysis and pyrolysis temperature on magnetic biochar properties". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Volume 127. Pages 196-202.
- Jia, W. Wang, B. Wang, C. and Sun, H. 2017. "Tourmaline and biochar for the remediation of acid soil polluted with heavy metals". *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Volume 5. Issue 3. Pages 2107-2114.
- Khanmirzaei, A. Bazargan, K. Moezzi, A. and Richards, B. 2013. "Single and Sequential Extraction of Cadmium in Some Highly Calcareous Soils of Southwestern Iran". *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. Volume 13. Pages 153-164.
- Khalid, S. Shahid, M. Niazib, N. Murtaza, B. Bibi, I. and Dumate, C. 2017. "A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils". *Journal of Geochemical Exploration*. Volume 182. Pages 247-268.
- Lehmann, J., Gaunt, J., and Rondon, M. 2006. "Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review". *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. Volume 11. Issue 2. Pages 403–427.
- Meng, J. Tao, M. Wang, L. and Liu, X. 2018. "Changes in heavy metal bioavailability and speciation from a Pb-Zn mining soil amended with biochars from co-pyrolysis of rice straw and swine manure". *Science of the Total Environment*. Volume 633. Pages 300-307.
- Mengxiong, W. Han, X. Zhong, T. Yuan, M. and Wu, W. 2016. "Soil organic carbon content affects the stability of biochar in paddy soil". *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Volume 223. Pages 59-66.
- Park, S. 2017. "Ultrasonic and mechanical soil washing processes for the removal of heavy metals from soils". *Ultrasonics Sonochemistry*. Volume 35. Pages 640-645.

- Peng, W. Li, H. Liu, L. and Song, S. 2017. "Comparison of Pb(II) adsorption onto graphene oxide prepared from natural graphites: Diagramming the Pb(II) adsorption sites" *Applied Surface Science*. Volume 364. Pages 620-627.
- Salmani, M. Khorsandi, F. Yasrebi, J. and Karimian, N. 2014. "Effects of Biochar on Sunflower Yield and Some Soil Properties in a Copper Contaminated Calcareous Soil". *Advances in Environmental Biology*. Volume 8. Pages 2310-2313.
- Tarek, A. Mahmoud, M. Ahmed, S. Huff, M. W.Lee, J. and Kumar, S. 2015. "Biochar from woody biomass for removing metal contaminants and carbon sequestration". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Volume 22. Pages 103-109.
- Tessier, A. Campbell, C. and Bisson, M. 1979. "Sequential extraction procedure For the speciation of particulate trace metals". *Analytical Chemistry*. Volume 51. Pages 844-851.
- Tobias U.Schüllli. 2018. "X-ray nanobeam diffraction imaging of materials". *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. Volume 22. Issue 5. Pages 188-201.
- U.S. EPA. 1996. "Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils," Revision 2. Washington, DC.
- White, P. Broadley, M. Hammond, J. and Ramsay, G. 2012. "Bio-fortification of potato tubers using foliar zinc-fertiliser". *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. Volume 87. Pages 123-129.
- Winsley, P. 2007. "Biochar and bioenergy production for climate change mitigation." *New Zealand Science Review*. Volume 64. Pages 5-10.
- Zafar, S. 2008. *Biochar and its Role in Mitigating Climate Change*. [Online]. Available: http://news.mongabay.com/2008/1217-zafar_biochar.html.
- Zhang, F. Wang, X. Yin, D. Peng, B. Tan, C. Liu, Y. Tan, X. and Wu, S. 2015. "Efficiency and mechanisms of Cd removal from aqueous solution by biochar derived from water hyacinth (*Eichornia crassipes*)". *J Environ Manage*. Volume 153. Pages 68-73.

Zheng, C. Liu, Q. Feng, M. Li, W. Lam, H. Lam, K. and Yu, Q. 2016. "Competitive sorption of heavy metals by water hyacinth roots". *Environmental Pollution*. Volume 219. Pages 837–845.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีเบื้องต้นของดินและถ่านชีวภาพ

ก.1 การเก็บตัวอย่างดิน (ปรับใช้จาก กรมวิชาการเกษตร, 2555)

1. ใช้เสียมขุดดินตามจุดที่กำหนดไว้ใส่กระสอบพลาสติก จนครบทุกจุด
2. เทดินกองบนแผ่นผ้าใบและคลุกเคล้าให้เข้ากัน จะได้ตัวอย่างดินรวม (composite sample)

ก.2 การเตรียมตัวอย่างดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

1. นำตัวอย่างดินมาผึ่งลม จนดินแห้ง
2. บดดินโดยใช้ครกบดดิน แล้วร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 2 มิลลิเมตร
3. เก็บแยกไว้ในถุงพลาสติก เพื่อนำมาวิเคราะห์ต่อไป

ก.3 การวิเคราะห์หาความชื้น

1. ชั่งตัวอย่างดิน 5 กรัม
2. นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

การคำนวณ

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

ก.4 การหาขนาดของอนุภาคดิน (Particle size analysis) (กรองแก้ว, 2553)

1. การปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

1.1 เทสารละลายคัลกอน 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 มิลลิลิตร. เติมสารละลายคัลกอน 100 มล. และน้ำกลั่นประมาณ 300 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 นำสารแขวนลอยดินที่เตรียมไว้ มาควนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กประมาณ 5 นาที แล้วเทลงกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร

2.3 ปรับปริมาตรสารในข้อ 2.2 ด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 ลิตร ตั้งไว้จนอุณหภูมิคงที่

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

2.5 บันทึกเวลาเมื่อคนเสร็จ ถ้าที่ผิวของสารแขวนลอยมีฟอง เติมเอมิลอัลกอฮอล์ 1 หยด

2.6 ค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงอย่างระมัดระวังในสารแขวนลอย และอ่านค่าสเกลเหมือนเดิม

2.7 เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาที หลังจากการกวนผสมค่าที่อ่านได้ต้องหักลบจากค่าที่อ่านได้จากการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

2.8 ค่อยๆ ดึงไฮโดรมิเตอร์ขึ้นอย่างระมัดระวังเมื่ออ่านเสร็จ ล้างและเช็ดให้แห้ง

2.9 เมื่อครบ 2 ชั่วโมงให้อ่านค่าไฮโดรมิเตอร์อีกครั้งโดยทำเหมือนเดิม

การคำนวณ

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

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

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

ก.5 การวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ ขนาด 100 มล.
2. เติมน้ำกลั่นลงไป 100 มล. ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากันหลายๆ ครั้ง ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที
3. นำสารละลายดินไปวัด pH ด้วยเครื่องวัด pH
4. ปรับเครื่องวัด pH ก่อนวัดตัวอย่าง

ก.6 ค่าการนำไฟฟ้า (Electric conductivity)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร
3. ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที
4. วัดค่าการนำไฟฟ้าโดยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductivity meter)
5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และเปลี่ยนจากตัวอย่างดินเป็นถ่านชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.7 การวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity)

1. ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพ 2 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต 1 N ลงไปประมาณ 60 มิลลิลิตร ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน
3. กรองสารละลายที่แช่ไว้ด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอน แบบลดความดัน เก็บสารละลายดินที่ได้ไว้ทำต่อในข้อ 5
4. ชะล้างตัวอย่างดินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต 1 N ครั้งละ 30 มิลลิลิตร จนกระทั่งไม่มีแคลเซียมเหลืออยู่ ทดสอบได้โดยนำสารละลายที่ล้างดินมา 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองหยดแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N แอมโมเนียมออกซาลेट 10% และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 50 % อย่างละ 2-3 หยด นำไปต้มให้เดือด ถ้ามีแคลเซียมไอออนเหลืออยู่จะเกิด ตะกอนขาว หรือสารละลายขุ่น ต้องชะล้างต่อ
5. สารละลายที่ได้จากการกรอง และการชะล้างด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต 1N ใส่ในขวดวัดปริมาตร ทำให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ถ้าต้องการหา %BS ให้นำสารละลายที่ได้ไปวัดปริมาณแคลเซียมและ แมกนีเซียม ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometers ที่ความยาวคลื่น 422 และ 285 นาโนเมตร และวัดปริมาณโพแทสเซียม และโซเดียม ด้วย Flame photometer ที่ความยาวคลื่น 383 และ 295 นาโนเมตร
6. ชะล้างสารละลายตัวอย่างดินต่อ ด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 1N ครั้งละ 30 มิลลิลิตร ทำ 3-4 ครั้ง และล้างด้วยสารแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 N อีก 1 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 95% ประมาณ 150-200 มิลลิลิตร จนไม่มีคลอไรด์เหลืออยู่ ทดสอบการล้างโดย แบ่งเอทิลแอลกอฮอล์ที่ผ่านการล้างดินครั้งสุดท้ายมา 10 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง หยดสารละลายซิลเวอร์ไนเทต 0.1 N 1-2 หยด สังเกตว่ามีตะกอนขาวของซิลเวอร์คลอไรด์หรือไม่ ถ้ามีต้องล้างต่อ
7. ทิ้งสารละลายที่ได้จากข้อ 5 และล้างตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10 % ครั้งละ 30 มิลลิลิตร ทำ 3 ครั้ง เพื่อให้ Na^+ แทนที่ NH_4^+ ในดินจนได้สารละลายดินประมาณ 100 มิลลิลิตร
8. เทสารละลายดินที่กรองได้ใส่ในขวดเจลท์ดัล เติมหินพูมิช (Pumice stone) ลงไปเล็กน้อย เพื่อป้องกันการฟุ้งไหล
9. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงไป 5-25 มิลลิลิตร เพื่อปรับให้สารละลายดินมีฤทธิ์เป็นเบสและ NH_4 เปลี่ยนเป็นแอมโมเนียได้ง่ายขณะกลั่น
10. นำสารละลายกรดบอริก 3% ปริมาตร 50 มิลลิลิตรใส่ในขวดชมพู่ ขนาด 125 มิลลิลิตร และหยดอินดิเคเตอร์ผสม 5 หยด นำไปกรองรับสารที่ได้จากการกลั่น

11. นำสารละลายที่ได้จากการกลั่น ไทเทรตกับไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1N ที่จุดยุติ สารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีชมพูม่วง

12. ทำแบลงค์ (Blank) โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10% จำนวน 100 มิลลิลิตร เติม สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงไปในปริมาตรเท่ากับที่ใช้ในข้อ 9 ทำการกลั่นและไทเทรต เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

การคำนวณ

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

เมื่อ A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์ (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)

W = น้ำหนักแห้งมีหน่วยเป็นกรัมของตัวอย่างดิน (กรัม)

การคำนวณปริมาณร้อยละประจุบวกที่เป็นต่าง (%BS)

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

เมื่อ Ca = จำนวนมิลลีสมมูลของแคลเซียมต่อดิน 100 กรัม

Mg = จำนวนมิลลีสมมูลของแมกนีเซียมต่อดิน 100 กรัม

Na = จำนวนมิลลีสมมูลของโซเดียมต่อดิน 100 กรัม

K = จำนวนมิลลีสมมูลของโพแทสเซียมต่อดิน 100 กรัม

ก.8 วิเคราะห์หาการสูญเสียน้ำหนักหลังเผา ; LOI (วิศวกรรมเซรามิก, มหาวิทยาลัยสุรนารี)

1. ชั่งผักตบชวาอบแห้ง 2 กรัม ใส่คูชิเบลที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว
2. นำไปเผา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส
3. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักหลังเผา จดบันทึกผลและคำนวณ

การคำนวณ

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

ก.9 การวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter, OM) โดยวิธี Walkley and Blank (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

1. ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.2 มม. (80 mesh) หรือ 0.5 มม. (35 mesh) 0.2-2.0 กรัม ใส่ขวดชมพู ขนาด 250 มล.
2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 1 N 10 มล. ลงในขวดชมพู แก้วเบาๆ
3. เติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 15 มล. เขย่าเบาๆ ประมาณ 1 นาที ตั้งทิ้งไว้จนสารละลายเย็นเท่าอุณหภูมิห้อง (หากพบว่าสารละลายดินตัวอย่างเป็นสีเขียวก่อนไทเทรต แสดงว่าดินตัวอย่างมีสารอินทรีย์อยู่มาก ควรทำการวิเคราะห์ใหม่ โดยชั่งน้ำหนักดินให้น้อยกว่าเดิม)
4. เติมน้ำกลั่น 50 มล. แล้วทิ้งไว้ให้เย็น
5. หยดอินดิเคเตอร์ BDS 5 หยด สารละลายเปลี่ยนเป็นสีม่วงปนน้ำเงิน
6. ไทเทรตด้วยสารละลาย FAS ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จนสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียวใส

7. ทำ Blank โดยเริ่มทำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง ขั้นตอนี่ 6

การคำนวณ

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

เมื่อ N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมต (นอร์มัล)

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับ blank (ml)

T = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (ml)

W = น้ำหนักดิน (g)

ก.10 วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen)

1. ขั้นตอนการย่อย

1.1 ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพ 2 กรัม ใส่ในขวดเจลดาห์ล และเติมน้ำย่าย่อย 100 มิลลิลิตร

1.2 นำ Insert rack ที่มีหลอดตัวอย่าง ครอบทุกช่อง วางบน Digestion block ให้ตรงกับช่อง Exhaust manifold สวมลงบนหลอดตัวอย่าง เปิดวาล์วน้ำ และเปิด Power switch ของเครื่องย่อย ตั้งอุณหภูมิที่ 250 องศาเซลเซียส ย่อยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 okmu จากนั้นปรับอุณหภูมิเป็น

380 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเกิดควันสีขาวของ SO_3 ให้ต้มต่อไปเรื่อยๆ จนได้สารละลายใส ปิดสวิตช์ และปล่อยให้เย็นเพื่อนำไปกลั่น

2. ขั้นตอนการกลั่น

2.1 นำตัวอย่างที่ผ่านการย่อยแล้วมาเติมฟีนอล์ฟทาลีน 3-4 หยด

2.2 นำไปใส่เครื่องกลั่นที่ตั้งค่าเครื่องกลั่นให้เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไฮโอซัลเฟต 20 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติม Indicating boric acid solution ปริมาตร 50 มิลลิลิตรในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.3 นำเข้าเครื่องกลั่นเพื่อดูดซับ $\text{NH}_3\text{-N}$ ตั้งค่าเครื่องให้กลั่น 4 นาที จากนั้นนำสารที่อยู่ในขวดรูปชมพู่ ไปไทเทรตกับกรดซัลฟิวริกที่หาความเข้มข้นที่แน่นอนก่อนแล้ว จดบันทึกปริมาตร

การคำนวณ

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

เมื่อ A = น้ำหนักดินตัวอย่าง (กรัม)

B = ปริมาตรของกรดที่ไทเทรตกับแบลนค์ (มิลลิลิตร)

Y = ปริมาตรของกรดที่ไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

X = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)

ก.11 วิเคราะห์ปริมาณไนเตรท NO_3^- ; Brucine Method (Gordon Bain และคณะ, USA)

1. ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพ 2 กรัม ลงขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. เติมน้ำกลั่น 100 มล.

2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที

3. กรองแบบสุญญากาศ ด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอน นำส่วนใสวิเคราะห์หาไนเตรท

4. บีบตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองขนาด 30 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคลอไรด์ 30% 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vorex

5. เติมกรด 4+1 10 มิลลิลิตร (ระวังร้อน) เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vorex และตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

6. เติม Brucine-sulfanilic acid 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vorex อาจเกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีชมพูขึ้น สีที่เกิดขึ้นไม่มีผลกระทบกับการทดลอง

7. นำไปต้มในอ่างต้มเป็นเวลา 30 นาที ที่ความร้อน 95 องศาเซลเซียส เมื่อครบกำหนดนำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

8. ทำการเตรียมแบลนค์และสารมาตรฐานเช่นเดียวกับตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.12 วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ (Chloride ion)

1. ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านถ่านชีวภาพ 5 กรัม ลงขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
3. กรองแบบสุญญากาศ ด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอน และนำส่วนใสมาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์
4. ปิเปตส่วนใส 25 มิลลิลิตร เติมนิโตรเจนไดออกไซด์ 5 หยด ทำการไทเทรตกับซิลเวอร์ไนเตรท จนตัวอย่างเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นตะกอนแดงอิฐ

การคำนวณ

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

เมื่อ N = ความเข้มข้นของ AgNO₃ (นอร์มอล)

A = ปริมาตร AgNO₃ ที่ใช้ Sample (มิลลิลิตร)

B = Blank (มิลลิลิตร)

ก.13 การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟต (PO₄³⁻)

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)
 - 1.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 0, 2, 4, 6, 8, 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
 - 1.2 เติมนิโตรเจนไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตร ในแต่ละขวดผสมให้เข้ากันและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร
 - 1.3 ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดสีอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำสารละลายแต่ละขวดมาวัดค่า %T ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร
2. การหาปริมาณฟอสเฟต
 - 2.1 ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาดเล็กที่มีเศษกระเบื้อง (glass bead) เล็กน้อย
 - 2.2 เติมนิโตรเจนไดออกไซด์เข้มข้น (conc.H₂SO₄) 1 มิลลิลิตร และกรดไนตริกเข้มข้น (conc.HNO₃) 5 มิลลิลิตร นำไปย่อยด้วยความร้อนในตู้ดูดควันจนได้สารละลายใสไม่มีสี จนเหลือปริมาณ 2-5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
 - 2.3 กรองแบบสุญญากาศด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 นำส่วนสารละลายใส่ที่กรองได้ หยดฟีนอล์ฟทาลีน 1-2 หยด แล้วปรับพีเอชให้เป็นกลาง จนถึงจุดยุติด้วย 6 N NaOH จะได้สารละลายสีชมพูอ่อน นำมาใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

2.5 เติม Vanadate-Molybdate reagent 10 มิลลิลิตร ในแต่ละขวดผสมให้เข้ากันและปรับ ปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดสีอย่าง สมบูรณ์ จากนั้นนำสารละลายแต่ละขวดมาวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

2.6 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และเปลี่ยนจากตัวอย่างดินเป็นถ่านชีวภาพ

2.7 อ่านค่าฟอสเฟตของตัวอย่างที่ได้เทียบจากกราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้น และหาค่าความ เข้มข้นของฟอสเฟตในสารละลายที่ย่อยจากตัวอย่างดิน และตัวอย่างถ่านชีวภาพ

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.14 วิเคราะห์ปริมาณซัลเฟต (Sulfate ion)

1. ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพ 5 กรัมลงขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
3. กรองแบบสุญญากาศด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอน นำส่วนใสมาวิเคราะห์ หาปริมาณซัลเฟต
4. ปิเปตส่วนใสที่สกัด 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
5. เติมกรดไฮโดรคลอริก 6 N 1 มิลลิลิตร และผลึกแบเรียมคลอไรด์ 0.5 กรัม เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ 1 นาที
6. เติมกำมะถัน 0.25% 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ 1 นาที ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น
7. วัดค่าความขุ่นภายในเวลา 5- 30 นาที ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ความ ยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

ก.15 ความเป็นกรดของดิน และการหาอลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Aluminium ion)

1. การสกัดความเป็นกรด และ Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้

1.1 ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพ 5 กรัม เติม KCl เข้มข้น 1 N จำนวน 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดชมพู ปิดจุก

1.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า เวลา 10 นาที ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตั้งทิ้งไว้หนึ่งคืน

1.3 นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนติฟิวส์เป็นเวลา 10 นาที ที่ความเร็ว 2500 รอบต่อนาที

1.4 ดูดส่วนใสด้านบน และนำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ ซะล้างด้วย KCl 1 N

1.5 นำสารที่ได้จากการกรองในข้อ 4 มาปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วย KCl 1 N

1.6 นำสารละลายที่ได้แบ่งไปทำให้เกิดสีต่อไป และแบ่งไว้สำหรับหาความเป็นกรดที่แลกเปลี่ยนได้ โดยปิเปตมา 20 มิลลิลิตร และนำไปไทเทรตกับ NaOH 0.1 N ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว โดยใช้ ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ ถ้าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูตั้งแต่แรก แสดงว่าไม่เป็นดินเปรี้ยว มีความเป็นกรดน้อยมาก แต่ถ้าไม่มีสีเมื่อไทเทรตแล้วใช้ปริมาตรของ NaOH น้อยกว่า 5 มิลลิลิตร ให้ปิเปตสารละลายที่กรองได้เพิ่ม และไทเทรตต่อจนถึงจุดยุติสีชมพูอ่อนๆ

1.7 ใช้สารละลาย KCl 1 N ทำแบลนด์ เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน และไทเทรตเช่นเดียวกัน

2. การทำให้เกิดสี เพื่อหา Al^{3+}

2.1 แบ่งสารละลายจากการทดลองส่วนที่ 1 จำนวน 5 มิลลิลิตร หยดฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด กรณีไม่มีการเกิดสีชมพูหรือสภาวะเป็นกรด ค่อยๆเติมสารละลาย KF ความเข้มข้น 1 N จำนวน 10 มิลลิลิตรที่ละลาย สังเกตการเกิดสีชมพู

2.2 ถ้าเกิดสีชมพูให้หาปริมาณของ Al^{3+} ตามข้อ 4

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

2.4 ปิเปตสารละลายที่สกัดได้ 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร

2.5 เติมกรด HCl 1N ปรับ pH ให้อยู่ระหว่าง 2-3

2.6 ทำการทดลองเหมือนขั้นตอนการเตรียมสารมาตรฐาน และ กราฟมาตรฐานในข้อ 3-5

การคำนวณ

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

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

เมื่อ N = ความเข้มข้นของ NaOH (นอร์มอล)

B = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต กับแบลنگก์ (มิลลิลิตร)

S = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต กับตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร)

X = น้ำหนักเปียกของดิน(กรัม)

%M = ความชื้นของดิน (เปอร์เซ็นต์)

$$\text{ปริมาณอลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ Al}^{3+} \text{ (mg/kg)} = \frac{1000 \cdot 5 \cdot x}{A \cdot D}$$

เมื่อ X = ค่าที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐานในหน่วย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

A = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)

D = น้ำหนักแห้งของดินตัวอย่าง (กรัม)

ก.16 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลักและโลหะหนักทั้งหมดในดิน (SW-846 method 3050b (US.EPA, 1996))

1. สารเคมี

1.1 กรดไนตริกเข้มข้น (conc. HNO₃)

1.2 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl)

2. วิธีการทดลอง

2.1 ชั่งดินตัวอย่าง 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร.

2.2 เติมสารละลาย (Reagent A) กรดไนตริกเข้มข้นผสมกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ในอัตราส่วน 3:7 10 มิลลิลิตร.

2.3 ปิดด้วยกระຈกนาฬิกา แล้วนำไปย่อยบนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70-80 C เป็นเวลา 30 นาที

2.4 ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วกรองแบบสุญญากาศด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 5

2.5 ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 2-5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร.

2.6 นำไประเหยเอากรดออกให้เหลือปริมาตร 1-3 มิลลิลิตร. ปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร

2.7 เก็บสารละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีดินและถ่านชีวภาพ

ตารางที่ ข-1 ความชื้นของดินตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ความชื้น		
		น้ำหนักเปียก (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	ความชื้น (%)
ดินตัวอย่าง	1	5.01	4.14	17.3653
	2	5.08	4.18	17.7165
	3	5.11	4.25	16.8297

ตารางที่ ข-2 ขนาดอนุภาคของดินตัวอย่าง

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-3 ความเป็นกรดต่าง (pH)

ตัวอย่าง	ค่าความเป็นกรดต่าง	
	น้ำหนักแห้ง (g)	ค่า pH
ดินตัวอย่าง	1.0000	9.46
ถ่านชีวภาพ	1.0000	5.22

ตารางที่ ข-4 ค่าการนำไฟฟ้า (Electric conductivity)

ตัวอย่าง	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
ดินตัวอย่าง	6.17	6.64	6.78	6.53
ถ่านชีวภาพ	39.90	42.20	43.10	41.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก				
		น้ำหนัก แห้ง (g)	ปริมาตร HCl (ml)		CEC (cmol kg ⁻¹)	CEC เฉลี่ย (cmol kg ⁻¹)
			Blank	ตัวอย่าง		
ดินตัวอย่าง	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	
ถ่านชีวภาพ	1	2.00	0.10	1.30	60	5.75
	2	2.00	0.10	1.20	5.50	

ตารางที่ ข-6 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผา (LOI)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนัก (g)		% น้ำหนักที่สูญหาย (LOI)
		ก่อนเผา	หลังเผา	
ดินตัวอย่าง	1	2.0019	1.8835	5.9144
	2	2.0003	1.8764	6.1941
	3	2.0002	1.8796	6.0294
ถ่านชีวภาพ	1	2.0018	0.544	72.8244
	2	2.0006	0.5996	70.0290
	3	2.0009	0.5499	72.5174

ตารางที่ ข-7 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter, OM)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	อินทรีย์วัตถุ			
		น้ำหนักแห้ง (g)	FAS (ml)		OM (%)
			Blank	ตัวอย่าง	
ดินตัวอย่าง	1	0.1045	15.10	13.30	3.83
	2	0.1044	15.10	13.50	3.41
	3	0.1050	15.10	13.50	3.39
ถ่านชีวภาพ	1	0.1020	15.10	7.30	17.01
	2	0.1033	15.10	7.50	16.36
	3	0.1031	15.10	7.60	16.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-8 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ไนโตรเจนทั้งหมด			Total N (mg/l)
		น้ำหนักแห้ง (g)	ปริมาตร HCl (ml)		
			Blank	ตัวอย่าง	
ดินตัวอย่าง	1	2.0004	0.10	0.90	73.86
	2	2.0010	0.10	ND	
	3	2.0012	0.10	1.20	
ถ่านชีวภาพ	1	2.0005	0.10	1.00	67.39
	2	2.0002	0.10	1.10	
	3	2.0010	0.10	0.80	

ตารางที่ ข-9 ปริมาณไนเตรท NO_3^-

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ไนเตรท			ความเข้มข้น (mg/l)
		ค่าการดูดกลืนแสง	เจือจาง		
ดินตัวอย่าง	1	0.266	1		9.7490
	2	0.263	1		
	3	0.251	1		
ถ่านชีวภาพ	1	0.413	1		16.3290
	2	0.412	1		
	3	0.411	1		

ตารางที่ ข-10 ปริมาณคลอไรด์ (Chloride ion)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	คลอไรด์		ปริมาณ Cl (mg/l)
		ปริมาตร AgNO_3 (ml)		
		Blank	ตัวอย่าง	
ดินตัวอย่าง	1	0.00	0.20	2.7132
	2	0.00	0.30	
	3	0.00	0.20	
ถ่านชีวภาพ	1	0.00	10.80	127.1318
	2	0.00	11.00	
	3	0.00	11.00	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-11 ปริมาณฟอสเฟต (PO_4^{3-})

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ฟอสเฟต		
		น้ำหนักดินแห้ง (g)	ค่าการส่องผ่าน	ความเข้มข้นของ ฟอสเฟต (mg/l)
ดินตัวอย่าง	1	1.00	29.83	12.5532
	2	1.00	31.58	12.1837
	3	1.00	28.58	12.7840
ถ่านชีวภาพ	1	1.00	6.75	16.8164
	2	1.00	7.86	16.6114
	3	1.00	7.82	16.6188

ตารางที่ ข-12 ปริมาณซัลเฟต (Sulfate ion)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ซัลเฟต		
		ค่าการดูดกลืน แสง	ความเข้มข้นจาก กราฟ (ppm, mg/l)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น จากกราฟ (ppm, mg/l)
ดินตัวอย่าง	1	0.08	34.2609	45.2754
	2	0.113	48.6087	
	3	0.123	52.9565	
ถ่านชีวภาพ	1	0.024	9.9130	10.2029
	2	0.025	10.3478	
	3	0.025	10.3478	

ตารางที่ ข-13 ความเป็นกรดของดิน และอลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Aluminium ion)

ตัวอย่าง	Al (mg/kg)			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
ดิน	ND	ND	ND	ND
ถ่านชีวภาพ	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ ND (Not Detected) = ไม่พบค่าอลูมิเนียม

ตารางที่ ข-14 ปริมาณธาตุอาหารหลักและโลหะหนักทั้งหมดในดิน (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cd^{2+})

ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุอาหารหลัก (mg/kg)			
	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cd^{2+}
ดินตัวอย่าง	13,160	17.56	1,600	1.69
ถ่านชีวภาพ	47,600	9.46	318	0.62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เกณฑ์และค่ามาตรฐานต่างๆในดิน

ตารางที่ ค-1 ความเป็นกรดเบส (pH)

ระดับ	ช่วง pH
กรดรุนแรงมากที่สุด	< 3.5
กรดรุนแรงมาก	3.6 – 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 ค-2 ระดับอินทรีย์วัตถุในดิน

ระดับ	พิสัย (ร้อยละ)
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน (Cation Exchange Capacity, C.E.C.)

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

ตารางที่ ค-4 ค่าการนำไฟฟ้า (Electric conductivity)

ระดับความเค็ม	ค่าการนำไฟฟ้า(mS/cm) ที่เนื้อดินต่างๆ				
	ทราย/ร่วนปนทราย	ร่วน	ร่วนปนเหนียว	ค่อนข้างเหนียว	เหนียวจัด
ไม่เค็ม	< 0.15	< 0.17	< 0.25	< 0.30	< 0.40
เค็มน้อยมาก	0.16 – 0.30	0.18 – 0.35	0.26 – 0.45	0.31 – 0.60	0.41 – 0.80
เค็มปานกลาง	0.31 – 0.60	0.36 – 0.75	0.46 – 0.90	0.61 – 1.15	0.81 – 1.60
เค็มจัด	0.61 – 1.20	0.76 – 1.50	0.91 – 1.75	1.16 – 2.30	1.61 – 3.20
เค็มจัดมาก	> 1.20	> 1.50	> 1.75	> 2.30	> 3.20

ตารางที่ ค-5 มาตรฐานแร่ธาตุอาหารในดินสำหรับไม้ยืนต้นและผลไม้

ธาตุอาหาร	เกณฑ์		
	ต่ำ	เหมาะสม	สูง
อินทรีย์วัตถุ (%)	<1.0	1-3>3	>3.0
ไนโตรเจนในรูปไนเตรท (mg kg ⁻¹)	<20	20-40	>40
ฟอสฟอรัส (mg kg ⁻¹)	<21	20-60	>60
โพแทสเซียม(mg kg ⁻¹)	<78	78-195	>195
แคลเซียม(mg kg ⁻¹)	<1200	1200-2000	>2000
แมกนีเซียม(mg kg ⁻¹)	<192	192-384	>384

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลอรีน(mg kg^{-1})		<250	
ค่าการนำไฟฟ้า (ms cm^{-1})		<0.4	
โซเดียม(mg kg^{-1})		<390	
ทองแดง(mg kg^{-1})		0.3-10	
สังกะสี(mg kg^{-1})		2-15	
แมงกานีส(mg kg^{-1})		2-50	
โบรอน(mg kg^{-1})		1.0-5.0	
อลูมิเนียม(mg kg^{-1})		<540	

ตารางที่ ค-6 มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม

โลหะหนัก (Heavy metals)			
ดัชนีคุณภาพดิน	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	วิธีการตรวจวัด
1) สารหนู (Arsenic)	มิลลิกรัม/ กิโลกรัม	ต้องไม่เกิน 3.9	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
2) แคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม (Cadmium and compounds)	"	ต้องไม่เกิน 37	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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	"	ต้องไม่เกิน 300	ใช้วิธี Coprecipitation หรือวิธี Colorimetric หรือวิธี Chelation/Extraction หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
4) ตะกั่ว (Lead)	"	ต้องไม่เกิน 400	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
5) แมงกานีสและสารประกอบแมงกานีส (Manganese and compounds)	"	ต้องไม่เกิน 1,800	"
6) ปรอทและสารประกอบปรอท (Mercury and compounds)	"	ต้องไม่เกิน 23	ให้ใช้วิธี Cold-Vapor Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
7) นิกเกิลในรูปของเกลือที่ละลายน้ำได้ (Nickel, soluble salts)	"	ต้องไม่เกิน 1,600	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
8) ซีลีเนียม (Selenium)	"	ต้องไม่เกิน 390	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Atomic

			Absorption, Furnace Technique หรือวิธี Atomic Absorption, Gaseous Hydride หรือวิธี Atomic Absorption, Borohydride Reduction หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุม มลพิษเห็นชอบ
--	--	--	--

หมายเหตุ:วิธี Test Methods of Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846) ขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency

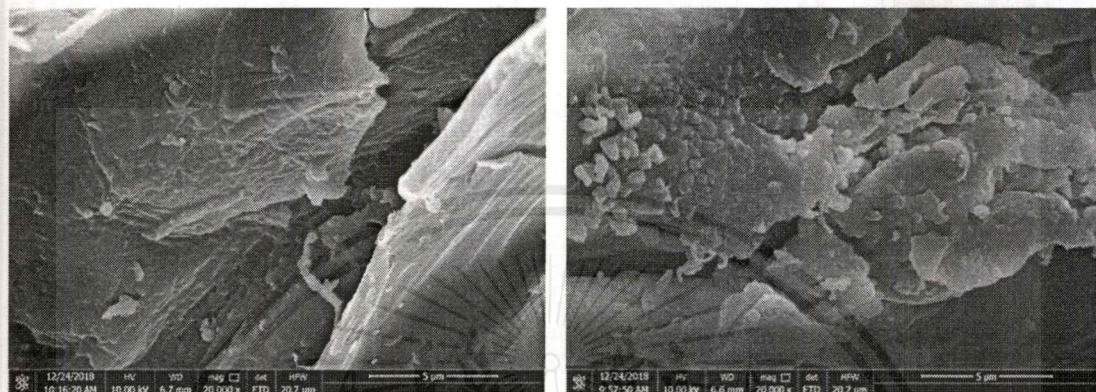


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

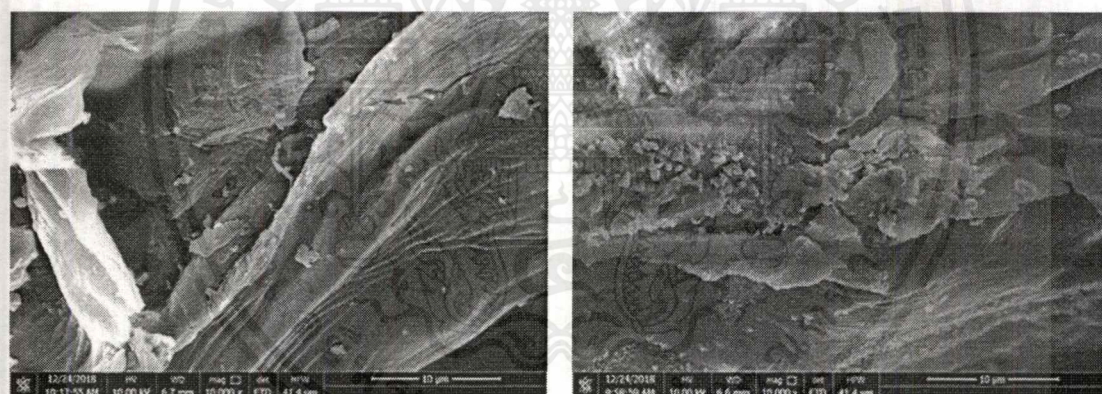
ภาคผนวก ง

การศึกษาลักษณะรูพรุนและพื้นผิวโดยใช้เครื่อง

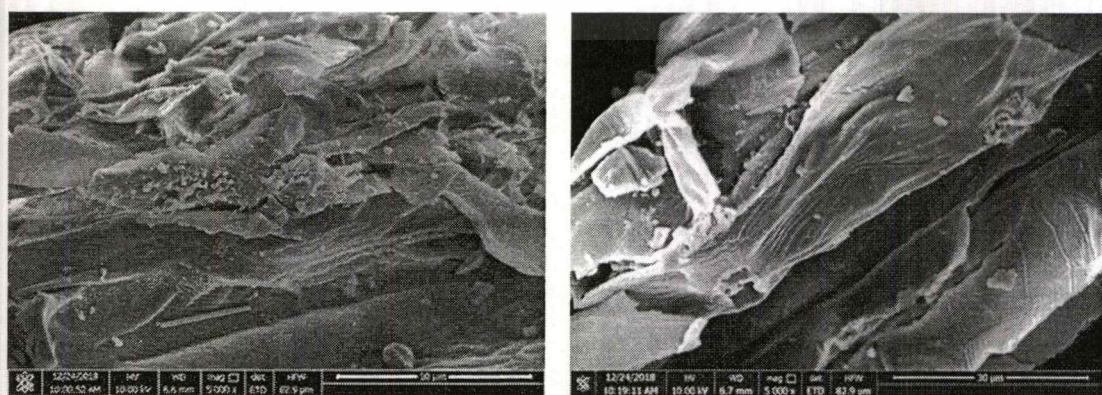
Scanning Electron Microscope (SEM)



(a)

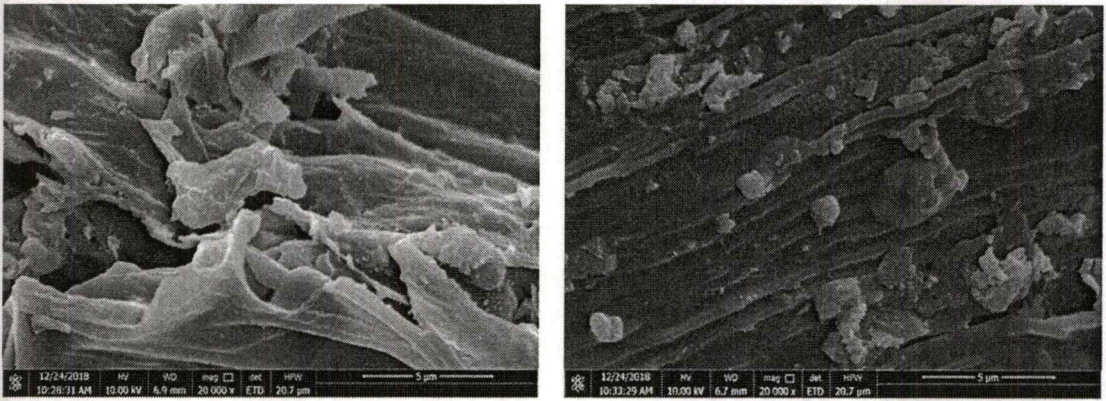


(b)

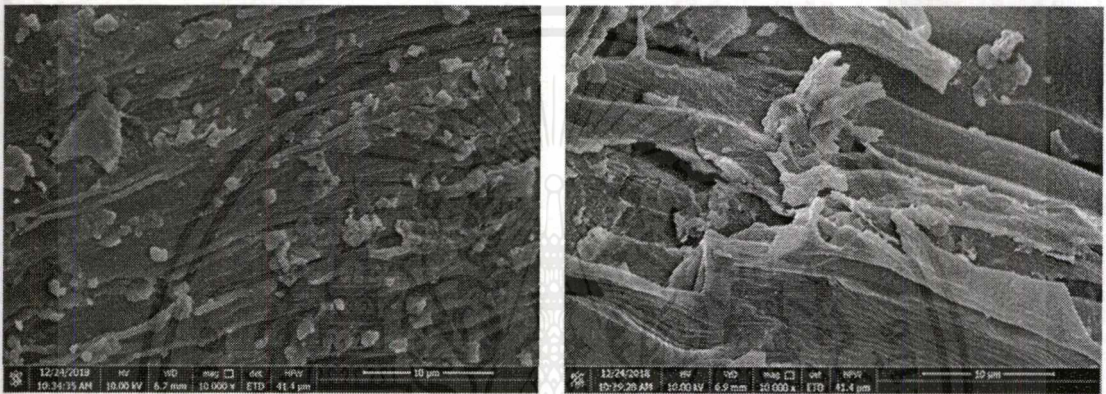


(c)

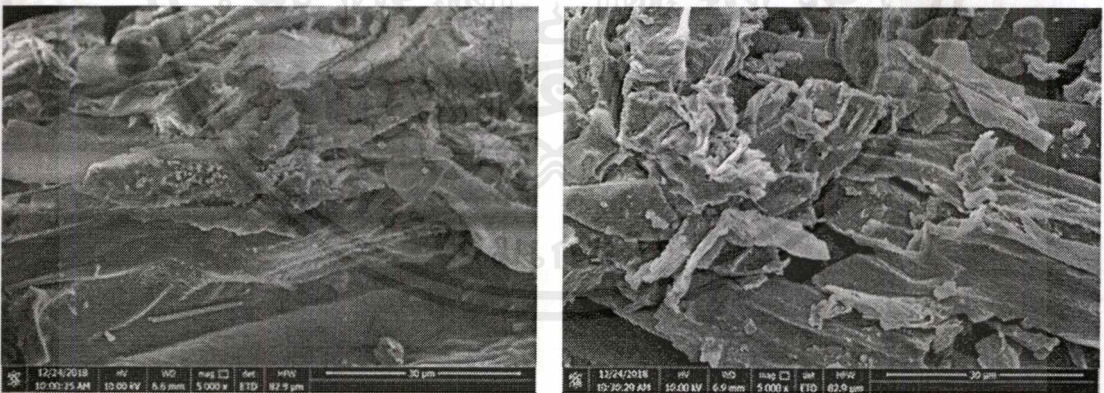
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d)



(e)

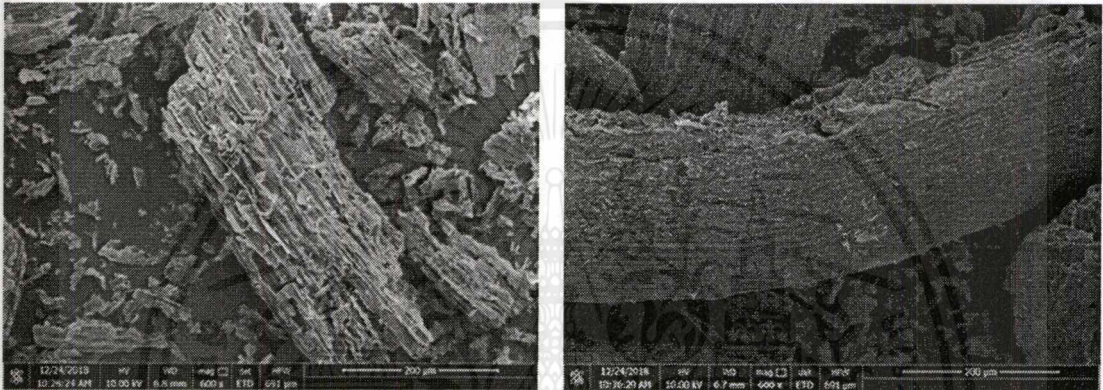


(f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g)



(h)

รูปที่ ง-1 ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวของผักตบชวาและถ่านชีวภาพจากผักตบชวา

- a) ผักตบชวา กำลังขยาย x20000 เท่า
- b) ผักตบชวา กำลังขยาย x10000 เท่า
- c) ผักตบชวา กำลังขยาย x5000 เท่า
- d) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา กำลังขยาย x20000 เท่า
- e) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา กำลังขยาย x10000 เท่า
- f) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา กำลังขยาย x5000 เท่า
- g) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา กำลังขยาย x1000 เท่า
- h) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา กำลังขยาย x600 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่าประจุ
พื้นผิวที่เป็นศูนย์ (pH_{PZC})

ตารางที่ จ-1 ค่า pH เริ่มต้น และ pH สุดท้ายของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใส่ผ่านชีวภาพจาก
ผักตบชวาปริมาณ 100 มิลลิกรัม ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 24 ชั่วโมง

pH เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
2	2.11	2.11	2.10	2.11
3	3.13	3.04	3.05	3.07
4	4.08	3.97	3.95	4.00
5	6.00	6.10	6.14	6.08
6	6.22	6.27	6.31	6.27
7	6.38	6.38	6.35	6.37
8	6.60	6.61	6.62	6.61
9	6.70	6.70	6.71	6.70
10	9.35	9.21	9.17	9.24
11	10.91	11.08	11.05	11.01
12	12.11	11.94	12.08	12.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

ความสามารถในการสะท้อนของถ่านชีวภาพด้วยวิธีการไทเทรต

ตารางที่ ฉ-1 ค่าความสามารถในการสะท้อนของถ่านชีวภาพด้วยวิธีการไทเทรต

pH ของถ่านชีวภาพ				ปริมาณกรด-เบส (meq/g)
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1.57	1.56	1.56	1.56	-12
1.58	1.59	1.60	1.59	-11
1.64	1.66	1.67	1.66	-10
1.70	1.73	1.72	1.72	-9
1.77	1.78	1.77	1.77	-8
1.88	1.89	1.88	1.88	-7
1.91	1.90	1.90	1.90	-6
2.03	2.01	2.02	2.02	-5
2.16	2.16	2.15	2.16	-4
2.33	2.34	2.33	2.33	-3
2.66	2.61	2.63	2.63	-2
4.36	4.38	4.38	4.37	-1
8.28	8.28	8.28	8.28	0
10.8	10.78	10.79	10.79	1
10.89	10.90	10.90	10.90	2
11.07	11.05	11.06	11.06	3
11.36	11.34	11.34	11.35	4
11.58	11.55	11.57	11.57	5
11.64	11.64	11.63	11.64	6
11.68	11.70	11.69	11.69	7
11.8	11.80	11.81	11.80	8
11.85	11.86	11.85	11.85	9
11.91	11.90	11.92	11.91	10
11.99	11.98	11.98	11.98	11
11.99	11.99	11.99	11.99	12

หมายเหตุ ปริมาณการเติมกรด(meq/g)แสดงในค่าลบ และปริมาณการเติมเบสแสดงค่าบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-Step Extraction)

ตารางที่ ข-1 ผลการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-Step Extraction) โดยการสกัดด้วยสารละลาย DTPA ความเข้มข้น 0.005 M

ครั้งที่ทำการทดลอง	% Biochar	Cd ²⁺	Pb ²⁺	Zn ²⁺
ครั้งที่ 1	0%	96.36	98.69	99.42
	0.50%	96.64	97.67	98.99
	1%	94.36	94.54	99.09
	2%	92.84	84.11	99.04
	5%	89.6	48.6	98.86
ครั้งที่ 2	0%	97.09	97.41	99.26
	0.50%	95.84	97.98	98.46
	1%	95.78	94.12	98.87
	2%	92.36	72.79	98.12
	5%	78.84	62.12	99.15
ครั้งที่ 3	0%	97.49	89.33	98.89
	0.50%	88.92	85.94	98.85
	1%	88.84	87.23	98.17
	2%	86.24	83.996	98.11
	5%	79.56	84.332	98.22
เฉลี่ย	0%	96.98	98.05	99.34
	0.50%	96.24	97.825	98.92
	1%	95.07	94.33	98.98
	2%	90.48	84.053	98.115
	5%	79.2	55.36	99.005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การสกัดแบบลำดับขั้น (Six-Step Extraction)

ตารางที่ ข-1 ผลการสกัดแบบลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-Step Extraction)

ครั้งที่	รูปฟอร์มของโลหะหนัก	Cd ²⁺	Pb ²⁺	Zn ²⁺
ครั้งที่ 1	รูป 1	-0.008	-0.043	0.048
	รูป 2	0.316	0.244	0.271
	รูป 3	-0.03	-0.016	0.058
	รูป 4	-0.001	0.887	6.320
	รูป 5	-0.036	0.275	4.130
	รูป 6	-0.019	0.612	2.740
ครั้งที่ 2	รูป 1	-0.0012	-0.334	0.054
	รูป 2	0.269	0.293	0.273
	รูป 3	-0.008	-0.031	0.023
	รูป 4	0.048	0.924	2.900
	รูป 5	-0.022	0.305	3.200
	รูป 6	-0.018	0.821	1.540
ครั้งที่ 3	รูป 1	-0.005	-0.022	0.047
	รูป 2	0.285	0.481	0.244
	รูป 3	-0.014	-0.027	0.021
	รูป 4	0.032	0.724	2.300
	รูป 5	-0.046	0.25	3.500
	รูป 6	-0.006	0.592	2.990
เฉลี่ย	รูป 1	-0.005	-0.133	0.049
	รูป 2	0.290	0.339	0.263
	รูป 3	-0.017	-0.025	0.034
	รูป 4	0.026	0.845	3.840
	รูป 5	-0.035	0.277	3.610
	รูป 6	-0.014	0.675	2.423

หมายเหตุ : รูปฟอร์มที่มีค่าเป็นลบ(-) ให้มีค่าเป็นศูนย์ในกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้