

การลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินโดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก
ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

TRANSPORT RETARDATION OF CADMIUM IN SOIL USING
SODIUM DODECYL SULFATE MODIFIED MAGNETIC
BIOCHAR



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TRANSPORT RETARDATION OF CADMIUM IN SOIL USING
SODIUM DODECYL SULFATE MODIFIED MAGNETIC
BIOCHAR



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

ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรอ้างอิงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินโดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุง
คุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต
Transport Retardation of Cadmium in Soil Using Sodium Dodecyl
Sulfate Modified Magnetic Biochar

ชื่อนักศึกษา นางสาว นงคันทา โล่ห์คำ รหัสนักศึกษา 58050629
นางสาว รวิสรา คู่ยครอง รหัสนักศึกษา 58050671
นางสาว แสงอรุณ อาสนไพบุลย์ รหัสนักศึกษา 58050696

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2561

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

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินโดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต	
ชื่อนักศึกษา	นางสาว นงคณา โล่ห์คำ	รหัสนักศึกษา 58050629
	นางสาว รวิสร่า คุ่มครอง	รหัสนักศึกษา 58050671
	นางสาว แสงอรุณ อาสนไพบูลย์	รหัสนักศึกษา 58050696
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
ปีการศึกษา	2561	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการหาปริมาณ SDS Fe-BC ที่เหมาะสมในการเติมลงดิน แล้วสามารถลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินได้ดีที่สุด ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ SDS Fe-BC ประกอบด้วย SEM, FTIR, XRD, pH_{pzc}, และ ANC และศึกษาการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในรูปแบบต่างๆ จากการวิเคราะห์พบว่า SDS Fe-BC มีรูพรุนขนาดใหญ่ และจำนวนมากกว่าถ่านชีวภาพ (BC) และถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (Fe-BC) หมู่ฟังก์ชันของ SDS Fe-BC ประกอบด้วย C-O, Fe-O, และ S=O ภายในโครงสร้างของ SDS Fe-BC มีเฟอร์ริกออกไซด์เป็นองค์ประกอบ และมีโครงสร้างแบบ Hexagonal SDS Fe-BC สามารถดูดซับไอออนโลหะหนักที่มีประจุบวกได้ดีในช่วงความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 3.00-9.00 และมีค่า ANC เท่ากับ 1000.00 meq/kg ดินผสมถ่าน 5% สามารถลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในรูปแบบการเคลื่อนที่เข้าสู่พืช และรูปแบบการแลกเปลี่ยนไอออนในดินได้ และเพิ่มแคดเมียมในรูปแบบที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์ได้ 14.04% ซึ่งเป็นรูปฟอร์มที่ถูกชะออกมาได้ยาก การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าผักตบชวาสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพแม่เหล็กได้ และการปรับปรุงด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟตจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินได้

คำสำคัญ : การดูดซับ แคดเมียม โซเดียมโอดีซิลซัลเฟต ดิน ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ผักตบชวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Transport Retardation of Cadmium in Soil Using Sodium Dodecyl Sulfate Modified Magnetic Biochar	
Students	Ms. Nongnapa Lokham	Student ID 58050629
	Ms. Rawisara Kuikrong	Student ID 58050671
	Ms. Sangarun Artsanapaiboon	Student ID 58050696
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)	
Department of	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic year	2561	
Advisors	Assist. Prof. Dr.Chompoonut Chaiyarak	

Abstracts

This research aimed to investigate the suitable amount of SDS Fe-BC added to soil to reduce the movement of cadmium in the soil. The determination was on the physical and chemical properties of SDS Fe-BC using SEM, FTIR, and XRD. The observation was also on pH_{pzc} , ANC value and various forms of cadmium in the soil. The results indicated that SDS Fe-BC had a larger porosity and a higher number of pores than biochar (BC). The C-O, O-H, Fe-O, and S = O were found within the structure of SDS Fe-BC. SDS Fe - BC had a hexagonal structure. The value of pH_{pzc} and ANC were 3 and 1,000.00 meq/kg, respectively. Adding 5 % of SDS Fe-BC to soil could reduce cadmium in the form of movement into plants and the form of ion exchange in the soil. On the other hand, cadmium in the form of binding to iron oxide had increased by 14.04%, which was a stable form. This study showed that water hyacinth can be produced as magnetic biochar and after modify with sodium dodecyl sulfate, the efficiency of reducing cadmium movement in the soil was increased.

Keywords : Absorption, Cadmium, Magnetic biochar, Sodium dodecyl sulfate, Soil, Water

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำ และความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดี ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนการทดลอง ทำให้โครงการพิเศษสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ รศ.ดร.บรรจง บุญชม และดร.ชวาลย์ ศรีวงศ์ ที่ช่วยชี้แนะ ข้อบกพร่อง แนวทางการแก้ปัญหา รวมไปถึงการตรวจสอบและติชมโครงการพิเศษเพื่อให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวก ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ในการทดลองต่างๆ ส่งผลให้การจัดทำโครงการพิเศษ เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา บุคคลในครอบครัว ที่ให้การอบรม เลี้ยงดู ตลอดจนเพื่อนๆ ชั้นปีที่ 4 สาขาเคมีสิ่งแวดล้อมที่คอยเป็นกำลังใจ แนะนำ และเป็นທີ່ปรึกษาที่ดีตลอดการทำโครงการพิเศษฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

นงศันภา โสฬ์คำ
รวีสรา คู่ยครอง
แสงอรุณ อาสนไพบูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อและสัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ดิน	5
2.1.1 สภาพกรดต่างของดิน	5
2.1.2 แคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ และความจุในการแลกเปลี่ยน	5
2.2 โลหะหนัก	6
2.2.1 การปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม	6
2.2.2 สภาพละลายได้	6
2.2.3 การเคลื่อนย้ายและการคงอยู่ในดิน	6
2.2.4 รูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน	7
2.2.5 ลักษณะในดิน	8
2.2.6 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกระจายตัวของโลหะหนักในดิน	9
2.3 แคดเมียม	9
2.3.1 คุณสมบัติ.....	9
2.3.2 ปฏิกิริยาในดิน	10
2.4 เทคโนโลยีการฟื้นฟูดิน	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 เทคนิค Monitored Natural Attenuation (MNA)	11
2.4.2 การขุด หรือ ตักดินไปฟื้นฟู	11
2.4.3 การปิดคลุม	11
2.4.4 การเปลี่ยนรูปให้เป็นของแข็ง และการปรับเสถียร	12
2.4.5 การล้างดิน	13
2.4.6 จลนศาสตร์ไฟฟ้า	13
2.4.7 การสร้างกำแพงกัน	14
2.4.8 การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโดยใช้พืช	14
2.5 การดูดซับ	15
2.5.1 ประเภทของการดูดซับ	15
2.5.2 กลไกการดูดซับ	17
2.5.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ	17
2.5.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	18
2.6 ถ่านชีวภาพ (แม่เหล็ก)	19
2.6.1 การผลิตถ่านชีวภาพ	20
2.6.2 ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก	21
2.6.3 ประโยชน์โดยตรง และโดยอ้อมของถ่านชีวภาพ	21
2.6.4 ข้อควรระวังในการใช้งานของถ่านชีวภาพ	22
2.7 กระบวนการไพโรไลซิส	22
2.7.1 กระบวนการไพโรไลซิส	22
2.7.2 วิธีการไพโรไลซิส	23
2.8 โซเดียมโอดีเซลซัลเฟต	24
2.9 ผักตบชวา	25
2.9.1 ประวัติ	26
2.9.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์	26
2.9.3 การสืบพันธุ์ของผักตบชวา	27
2.9.4 ประโยชน์ของผักตบชวา	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.5 ผลกระทบจากผักตบชวา	28
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	31
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	31
3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ	31
3.1.2 สารเคมี	32
3.2 วิธีการดำเนินงาน	33
3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ	33
3.2.2 การเก็บและการเตรียมตัวอย่างดิน	33
3.2.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของวัสดุดูดซับและดิน	34
3.2.4 วิเคราะห์ความสามารถในการสะเทิน	38
3.2.5 วิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก	38
3.2.6 ศึกษาประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียม	39
3.2.7 กระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว	39
3.2.8 กระบวนการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน	41
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปราย	45
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของวัสดุดูดซับและดิน	45
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะรูพรุน และพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด	45
4.1.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของตัวดูดซับโดยฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปก- โทรสโคปี	47
4.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกโดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 48	48
4.1.4 ผลการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์	51
4.1.5 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้น	52
4.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการสะเทินของถ่านชีวภาพ ด้วยวิธีการไทเทรต	56
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียม	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 ผลการสกัดแบบขั้นตอนเดียว	58
4.3.2 ผลการสกัดตามลำดับชั้น 6 ขั้นตอน	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุปผลการวิจัย	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
บรรณานุกรม	63
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก	73
ภาคผนวก ข	86
ภาคผนวก ค	91
ภาคผนวก ง	96
ภาคผนวก จ	101
ภาคผนวก ฉ	103
ภาคผนวก ช	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อธิบายพารามิเตอร์และผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส	23
3.1 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของวัสดุคูดซับและดิน	36
4.1 ความยาวคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ	48
4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้น ด้วยวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดินและของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	52
ข.1 การหาประเภทเนื้อดิน ของตัวอย่างดิน	86
ข.2 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างดิน	86
ข.3 การหาค่าเฉลี่ยพีเอชเริ่มต้น และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างดินและถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	87
ข.4 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าการนำไฟฟ้า (Electric conductivity) ของตัวอย่างดินและถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	87
ข.5 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	87
ข.6 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (Loss of ignition) ของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	88
ข.7 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	88
ข.8 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไนโตรเจนของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	88
ข.9 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณไนเตรทของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	89
ข.10 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคลอไรด์ของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	89
ข.11 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณฟอสเฟตของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.12 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณซัลเฟตของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพ- แม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเซิลซัลเฟต	90
ข.13 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณอลูมิเนียมของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพ- แม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเซิลซัลเฟต	90
ข.14 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณแร่ธาตุต่างๆของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพ แม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเซิลซัลเฟต	90
ค.1 มาตรฐานแร่ธาตุอาหารในดินสำหรับไม้ยืนต้นและผลไม้	91
ค.2 เกณฑ์จำแนกความเหมาะสมของดินสำหรับพืชเศรษฐกิจ	92
ค.3 พระราชบัญญัติส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕	93
ฉ.1 ปริมาณกรด-เบสที่เติมกับค่า pH	103
ช.1 ผลการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์บชันสเปกโตรโฟโต มิเตอร์ (AAS)	109
ช.2 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความเข้มข้นของแคดเมียมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS	110
ช.3 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความเข้มข้นของแคดเมียมที่สกัดด้วยสารละลาย DTPA จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)	111
ช.4 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความเข้มข้นของแคดเมียมที่สกัดด้วยสารละลาย CaCl_2 จากการวิเคราะห์ด้วย AAS	111
ช.5 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความเข้มข้นของแคดเมียมที่สกัดด้วยสารละลาย EDTA จากการวิเคราะห์ด้วย AAS	112
ช.6 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความเข้มข้นของแคดเมียมที่สกัดด้วยสารละลาย NH_4Ac จากการวิเคราะห์ด้วย AAS	112
ช.7 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแคดเมียม โดยการสกัดด้วยวิธี Singel-Step Extraction จากการวิเคราะห์ ด้วย AAS	113
ช.8 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยสารละลาย DTPA	113
ช.9 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยสารละลาย CaCl_2	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ช.10 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยสารละลาย EDTA	114
ช.11 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยสารละลาย NH_4Ac	115
ช.12 การหาเปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของแคดเมียมที่สกัดด้วยวิธี Singel-Step Extraction	115
ช.13 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความเข้มข้นของแคดเมียมที่สกัดด้วยวิธี Six-step sequential extraction จากการวิเคราะห์ด้วย AAS ของดินผสมถ่าน 0%	117
ช.14 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยวิธี Six-step sequential extraction จากการวิเคราะห์ด้วย AAS ของดินผสมถ่าน 5%	117
ช.15 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยวิธี Six-step sequential extraction ของดินผสมถ่าน 0%	118
ช.16 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยวิธี Six-step sequential extraction ของดินผสมถ่าน 5%	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แคดเมียม	10
2.2 การดูดซับแบบหลายชั้น	16
2.3 การดูดซับแบบชั้นเดียว	16
2.4 ขั้นตอนการย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	18
2.5 โครงสร้างเซลล์โลส	19
2.6 โครงสร้างชีวมวลลิกเซลล์โลส	20
2.7 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุต่าง ๆ	21
2.8 เตาเผาประสิทธิภาพสูง	24
2.9 โครงสร้างของโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟต	25
2.10 ผักตบชวา	25
4.1 ภาพถ่ายพื้นผิว จากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า	46
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัม	47
4.3 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพ (BC).....	49
4.4 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (Fe-BC)	49
4.5 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียม เดซิลซัลเฟต (SDS Fe-BC)	50
4.6 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย โซเดียมโตะเดซิลซัลเฟต	51
4.7 กราฟแสดงความสามารถในการสะเทิน (Neutralization Capability) และค่า ANC ในหน่วย meg/kg ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟต	56
4.8 ผลการศึกษาการลดการเคลื่อนที่ของโลหะ ด้วยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว	58
4.9 ผลการศึกษาการความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก ด้วยกระบวนการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน	59
ก.1 กราฟแสดงการหาประเภที่น้อดิน.....	74
ง.1 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.1 สเปกตรัมของผักตบชวา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	102
ช.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Abs) กับ ความเข้มข้น (mg/L) ของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม	110
ช.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของแคดเมียม (%) กับ วิธีการสกัด Singel-Step Extraction	116
ช.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์แคดเมียมทั้งหมดที่สกัดได้ (%) กับ ขั้นตอนการสกัดวิธี Six-step sequential extraction	119



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

AAS	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์
ANC	ค่าความสามารถในการสะเทินกรด
BC	ถ่านชีวภาพ
°C	องศาเซลเซียส
Cd	แคดเมียม
CEC	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก
cmol/kg	เซนติโมลต่อกิโลกรัม
EC	สภาพการนำไฟฟ้า
Fe-BC	ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก
FTIR	วิเคราะห์หากกลุ่มฟังก์ชัน หรือ พันธะของโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ โดยอาศัยคลื่นรังสีอินฟราเรด
g	กรัม
LOL	ค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุ
M	โมลาร์
meq/kg	มิลลิอิกวาเลนต์ต่อกิโลกรัม
meq/g	มิลลิอิกวาเลนต์ต่อกรัม
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg /kg	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ND	ไม่สามารถอ่านค่าได้ (Not detect)
pH	พีเอช
pH _{pzc}	ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์
SD	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
SDS	โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต
SDS Fe-BC	ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
VEB	การสร้างกำแพงกัน
XRD	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แคดเมียม (Cd) มีความสำคัญอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งในด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และการอุปโภคบริโภค จากการศึกษาดินบริเวณอุตสาหกรรม พบว่ามีความเข้มข้นของแคดเมียมมากกว่าดินในพื้นที่เกษตรกรรม เนื่องจากการใช้วัตถุพิษ หรือ สารเคมี ที่มีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่มาก และความเข้มข้นสูงเป็นเวลานาน (Annu และคณะ, 2016) การปนเปื้อนแคดเมียมในดินของพื้นที่เกษตรกรรมเกิดจากการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัส สำหรับพื้นที่เกษตรกรรมประเทศไทยพบแคดเมียมปนเปื้อน 67-207 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในจังหวัดตาก ซึ่งมีค่าสูงเกินมาตรฐาน (สลิทธิย์, 2559) ตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริม และรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน กำหนดความเข้มข้นของแคดเมียมในดินไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2552) ถ้ามีการสะสมในพื้นที่เกษตรกรรมจะเกิดการเคลื่อนที่เข้าสู่พืช และห่วงโซ่อาหาร เกณฑ์มาตรฐานแคดเมียมในพืชอาหารของ CODEX อยู่ที่ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Codex alimentarius commission, 2006) มีการสำรวจมันสำปะหลังในประเทศไทยพบปริมาณแคดเมียม 0.08-0.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเกินมาตรฐาน (วนิดา และคณะ, 2557) รัฐไต้หวันเกิดสถานการณ์การบริโภคผักที่ปนเปื้อน มีค่าความเป็นอันตรายของแคดเมียมเท่ากับ 2.56 ในดิน จากการเพาะปลูกผักซีฝรั่ง (ราก) และแครอท พบแคดเมียมเฉลี่ย 0.941 และ 0.828 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Dziubanek และคณะ, 2017) มีงานวิจัยนำดินที่ผ่านการเติมแคดเมียมคลอไรด์ ใช้ทดลองเป็นอาหารหนูระยะเวลา 10 วัน พบแคดเมียมในไต ตับ และกระดูก (Li และคณะ, 2016) จากงานวิจัยข้างต้น แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ผ่านการบริโภค คาดว่ามนุษย์ได้รับแคดเมียมโดยเฉลี่ย 30 ไมโครกรัมต่อวัน จากอาหารที่รับประทานภายในเซลล์ แคดเมียมก่อให้เกิดภาวะเครียดที่เกิดจากออกซิเดชัน (Oxidative Stress) ทำให้อวัยวะต่าง ๆ เสียหายอย่างรุนแรง เช่น ปอด ไต อัมตะ กระดูก รก ฯลฯ นอกจากนี้แคดเมียมถือว่าเป็นสารก่อ-มะเร็ง โดยองค์การระหว่างประเทศเพื่อการวิจัยโรคมะเร็ง (IAPC) (Mitra และคณะ, 2018) เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว จึงมีงานวิจัยหลายงานศึกษาการลดการเคลื่อนที่ของโลหะเข้าสู่พืช โดยเติมสารปรับปรุงดิน เช่น การใช้กากตะกอนน้ำเสียจากเทศบาลผสมกับขยะมูลฝอย สามารถลดโลหะหนักในดินได้ (Fang และคณะ, 2016) การใช้ปุ๋ยคอกรวมกับหินปูน 0.05% สามารถลดแคดเมียมในธัญพืชได้ 78.5% และเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลผลิตได้ (Rehman และคณะ, 2018) และมีผู้วิจัยนำวัสดุธรรมชาติ หรือ วัสดุเหลือทิ้งจากเกษตรกรรมถึง วัชพืช มาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสได้เป็นถ่านชีวภาพ และนำมาใช้ในการปรับปรุงดิน เช่น การนำ กะลามะพร้าวมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ โดยกระบวนการไพโรไลซิส แล้วเติมลงในดินตัวอย่าง พบว่าสามารถ ลดความเข้มข้นของแคดเมียมในดินได้ 30.1% (Liu และคณะ, 2018) และการนำไม้ไผ่มาผลิตเป็นชีวภาพ โดยกระบวนการไพโรไลซิส แล้วนำมาใช้ปรับปรุงดินที่การปนเปื้อนโลหะ สามารถลดความเข้มข้นของ แคดเมียมได้ 29% (Ye และคณะ, 2015) เนื่องจากถ่านชีวภาพเป็นวัสดุที่อุดมไปด้วยคาร์บอน โครงสร้างมี รูพรุนและพื้นที่ผิวมาก (พินิจภณ, 2557) นอกจากนี้พื้นผิวของรูพรุนมีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมแลกเปลี่ยน ประจุ และยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสาร จึงสามารถนำไปใช้ในการดูดซับไอออนของโลหะหนักที่มีประจุบวก ได้ (สมใจ และคณะ, 2546) ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การเลือกวัสดุในการผลิตถ่านชีวภาพ เพราะ วัสดุแต่ละชนิดให้คุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่แตกต่างกัน มีงานวิจัยผลิตถ่านชีวภาพ จากวัสดุรองพื้นสัตว์ ปีก (Poultry litter) และยูคาลิปตัส ในการดูดซับโลหะหนัก พบว่าถ่านชีวภาพจากวัสดุรองพื้นสัตว์ปีก มีประสิทธิภาพมากกว่ายูคาลิปตัส 30% (Lu และคณะ, 2018) วัสดุที่นิยมนำมาใช้ผลิตถ่านชีวภาพส่วนใหญ่ เช่น ฟางข้าว ฟางข้าวโพด ชานอ้อย ไม้ไผ่ แกลบ เปลือกมังคุด ฯลฯ เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ต้นทุน ต่ำ และมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง วัสดุที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่ง คือ ผักตบชวา เพราะนอกจากจะหาได้ ง่าย มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง ขยายพันธุ์ง่ายและเจริญเติบโตเร็วแล้ว ยังเป็นการลดวัชพืชที่เป็น มลพิษทางน้ำได้อีกด้วย

ถ่านชีวภาพได้รับความสนใจอย่างมาก และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยการปรับปรุงถ่าน-ชีวภาพให้มีสภาพแม่เหล็ก และนำไปดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่าสามารถลดโลหะหนักในน้ำเสียได้ดี มีงานวิจัยนำกะลามะพร้าวมาทำเป็นถ่านชีวภาพแม่เหล็ก มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียม และ ตะกั่วในน้ำเสียได้ดี (Yapa และคณะ, 2017) อีกทั้งยังมีงานวิจัยนำถ่านชีวภาพสภาพแม่เหล็กมาปรับปรุง คุณสมบัติด้วยสารลดแรงตึงผิว เช่น สารโคโคซาน ทำให้ถ่านชีวภาพมีประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง และนิกเกิลได้ดีมากขึ้น และพบว่าตัวดูดซับมีประสิทธิภาพสูงสุดที่พีเอช 6 (วัชรพล และคณะ, 2560) สาร-โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) มาใช้ปรับปรุงสภาพถ่านชีวภาพสภาพแม่เหล็ก และนำมาดูดซับสารปน-เปื้อนไอออนบวกในน้ำเสีย พบว่าถ่านชีวภาพเมื่อปรับสภาพแล้วมีประสิทธิภาพมากกว่าถ่านชีวภาพที่ไม่ ปรับสภาพ (เกลียวทอง และคณะ, 2560) และมีการศึกษาเปรียบเทียบสารลดแรงตึงผิว 2 ชนิด คือ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) โซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต (SDBS) ในการปรับปรุงถ่านชีวภาพ เพื่อใช้ ในการดูดซับแอมโมเนียในสารละลาย พบว่า SDS มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียได้ดีที่สุด (Lee และคณะ, 2018) การวิจัยนี้มุ่งศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำถ่านชีวภาพสภาพแม่เหล็ก ที่ผลิตจากผักตบ-ชวามาปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตมาผสมลงในดินปนเปื้อนแคดเมียม เพื่อลดการเคลื่อน ที่ของแคดเมียมเข้าสู่พืชที่ปลูกในดินปนเปื้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชีวภาพสภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต
2. ศึกษารูปฟอร์มของแคดเมียมในดินก่อน และหลังการเติมถ่านชีวภาพสภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต
3. เพื่อหาปริมาณของถ่านชีวภาพสภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟตที่เหมาะสมในการเติมลงดิน แล้วสามารถลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินได้ดีที่สุด

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ผักตบชวาที่ใช้ทำการทดลองเก็บจากคลองประเวศ ไกล่บริเวณโรงเรียนพรตพิทยพยัต
2. นำผักตบชวาไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ถ่านชีวภาพ (Biochar) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้เป็น SDS-biochar/ Fe_2O_3 composite
3. ถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพและที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว นำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีโดยใช้เครื่อง SEM, FTIR, XRD และหาค่า Zero point charge
4. ดินตัวอย่างเก็บจากจังหวัดระยอง วิเคราะห์คุณสมบัติ และองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างดิน สังเคราะห์ให้มีการปนเปื้อนแคดเมียม 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำการผสมตัวดูดซับกับดินด้วยหลายอัตราส่วน ทั้งไว้ 2 สัปดาห์
5. ทดสอบประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียม โดยการสกัดดินด้วยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) ด้วย 0.005 M Diethylene triamine penta acetic acid (DTPA), 0.01 M Calcium chloride (CaCl_2), 0.05 M Ethylene diamine tetra acetic acid (EDTA) และ 1 M Ammonium acetate ($\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2\text{NH}_4$) และศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมในตัวอย่างดินหลังจากทำการปรับเสถียรด้วยถ่านชีวภาพที่ทำการปรับปรุงคุณภาพ โดยการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) และการวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก โดยการวิเคราะห์ด้วย Acid digestion จากนั้นวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)
6. ศึกษาความสามารถในการสะเทิน (Neutralization capability) ของถ่านชีวภาพที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการไทเทรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มคุณค่าให้กับผักตบชวา โดยนำมาใช้เพื่อลดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมทางดิน
2. เพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากผักตบชวา
3. ช่วยลดการดูดซับแคดเมียมของพืชที่ปลูกในดินปนเปื้อน ซึ่งจะช่วยลดความเป็นพิษ และลดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ที่บริโภค
4. สามารถนำวัสดุธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ และเป็นการลดวัชพืชทางน้ำ
5. เป็นแนวทางในการลดต้นทุนในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดิน (Soil) (ศุภมาศ, 2539)

ดิน คือ วัตถุตามธรรมชาติที่ปกคลุมพื้นผิวของโลก เกิดจากการผุพัง สลายตัวของหิน และแร่ต่าง ๆ ผสมคลุกเคล้ากัน โดยมีองค์ประกอบเป็น อนินทรีย์วัตถุ อินทรีย์วัตถุ น้ำ และอากาศ ที่ได้จากการสลายตัวของซากพืชซากสัตว์ เป็นที่ยึดเหนี่ยวในการเจริญเติบโตของพืช มีสมบัติทางเคมีดังต่อไปนี้

2.1.1 สภาพกรดต่างของดิน (Soil pH)

ความเป็นกรดของดิน (Soil acidity) เป็นดัชนีที่สำคัญในการบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางเคมีและความอุดมสมบูรณ์ การประเมินระดับความเป็นกรด สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของ H^+ ออกมาในรูปของค่า พีเอช ซึ่งเป็นการวัด H^+ ที่ถูกปล่อยออกมาอยู่ในสารละลายดินจะแสดงความเป็นกรดที่แท้จริง เรียกว่า สภาพกรดจริง (Active acidity) เนื่องจากค่า พีเอช แสดงความเข้มข้นของกรดส่วนนี้เท่านั้น ส่วน H^+ ที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable H^+) จะถูกดูดซับอยู่ที่ผิวคอลลอยด์ดิน และออกมาสู่สารละลายดินได้ด้วยปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cation exchange reaction) เรียกว่า สภาพกรดแฝง (Potential acidity) ดินกรดหรือดินเปรี้ยวคือดินที่มี พีเอชต่ำกว่า 7 มีวิธีการแก้ไขดินกรดโดยเติมปูนขาว หินปูนบด หรือ ใส่น้ำท่วมขังบริเวณที่เป็นกรด

ความเป็นด่างของดิน คือ ดินที่มีปริมาณของส่วนที่เป็นกรดจริงอยู่ในดินน้อยกว่าสารที่เป็นด่าง และส่วนที่เป็นกรดแฝงเหลืออยู่ปริมาณน้อย จะมีค่าพีเอชมากกว่า 7 มีการแก้ไขดินด่างโดยการเติมอินทรีย์วัตถุ หรือปลูกพืชบำรุงดิน

2.1.2 แคทไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ และความจุในการแลกเปลี่ยน (Exchangeable cations and Exchange capacity)

แคทไอออนที่ดูดซับ (Adsorbed cation) บนผิวอนุภาคดินที่สามารถแลกเปลี่ยนที่กับแคทไอออนอื่น ๆ จากสารละลายได้ง่าย เรียกว่า แคทไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ แคทไอออนเหล่านี้ดูดซับบนผิวอนุภาคด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ หรือ แรงคูโลมบ์ ซึ่งการดูดซับเป็นแบบ Non-specific adsorption แคทไอออนดังกล่าว ได้แก่ แคทไอออนเชิงซ้อนที่ผิวชั้นนอก และอยู่ในชั้นแพร่กระจาย ความสามารถของดินในการดูดซับแคทไอออนที่แลกเปลี่ยนได้มักจะออกมาในรูปของความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Cation exchange capacity, CEC) ในระบบ SI ใช้หน่วยเป็น cmol/kg ซึ่งจะเท่ากับ meq/100 g ในระบบเมตริก

การแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cation exchange) คือ กระบวนการแทนที่แคทไอออนแลกเปลี่ยนได้ โดยแคทไอออนแลกเปลี่ยนได้ส่วนใหญ่ในสารละลายดินจะเป็น Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} และ H^+ โดย Ca^{2+} , Mg^{2+} และ Al (Al^{3+} หรือ $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$) จะเป็นแคทไอออนแลกเปลี่ยนได้เป็นหลัก ในสภาพดินเป็นต่าง โดย Ca^{2+} และ Mg^{2+} จะยึดพื้นที่ประจุลบของดินเป็นส่วนใหญ่ ส่วนในดินเค็ม Na^+ จะเป็นแคทไอออนหลักที่ถูกดินดูดยึดไว้ ในดินบางสภาพจะมีเบสแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable base) เช่น ดินน้ำขังจะมี Mn^{2+} และ Fe^{2+} ละลายได้มากและส่วนใหญ่จะถูกดูดซับในสภาพดินที่เป็นกรด

2.2 โลหะหนัก (Heavy metal) (ศุภมาศ, 2539 ; Kaasalainen และคณะ, 2003 ; ชัชวพร, 2551)

โลหะหนัก คือ โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ 5 เท่าขึ้นไป ได้แก่ ดีบุก สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว สารหนู พรอท ฯลฯ เป็นสารที่มีอัตราการสลายตัวช้าทำให้สะสมในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน

2.2.1 การปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม

การปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม สาเหตุส่วนใหญ่มาจากองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในธรรมชาติ เช่น หิน ดิน ซากพืช ซากสัตว์ และกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การทำเหมืองแร่ การอุตสาหกรรม การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การใช้สารเคมีในการทำเกษตรกรรม และการทิ้งขยะมูลฝอยของแหล่งชุมชน รวมถึงการปล่อยน้ำเสีย ที่ผ่านการบำบัดและไม่ผ่านการบำบัดลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจากกิจกรรมดังกล่าวจะมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว พรอท แคดเมียม เป็นต้น

2.2.2 สภาพละลายได้

สภาพละลายได้ (Solubility) เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสภาพเคลื่อนที่ได้ (Mobily) ของโลหะหนักซึ่งปัจจัยที่ควบคุมสภาพการละลาย ได้แก่ สภาพกรด-ด่าง ศักย์รีดอกซ์ เนื้อดิน วัตถุกำเนิดดิน ชนิด และปริมาณสารประกอบอินทรีย์ในดิน ไอออนของธาตุอื่นที่มีอยู่ในสารละลายดิน ระดับความชื้นของดิน อุณหภูมิของดิน และจุลินทรีย์ในดิน

2.2.3 การเคลื่อนย้ายและการคงอยู่ในดิน

การเคลื่อนย้าย (Transportation) ของธาตุโลหะหนักจะเกิดขึ้น ในการดูดซึมโดยพืช และจุลินทรีย์ การเคลื่อนย้ายในสภาพละลาย (ขนาดเล็กกว่า 0.45 ไมครอน) และสารแขวนลอย (ขนาดใหญ่กว่า 0.45 ไมครอน) โลหะหนักอยู่ในสารละลายดิน สามารถเคลื่อนย้ายได้ด้วยการแพร่ (Diffusion) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนไปกับการไหลของสารละลายดิน หรือ การไหลโดยมวล (Mass flow) ซึ่งจะต้องเกี่ยวข้องกับ โมเลกุลของน้ำ หรือ สารลิแกนด์ (Ligand) อื่น ๆ โดยเฉพาะลิแกนด์ที่เป็นอินทรีย์สาร เช่น กรดฮิวมิก (Humic acid)

การคงอยู่ หรือ การหยุดการเคลื่อนที่ (Immobilization) ของโลหะหนักที่ละลาย หรือ แววนลอยในระยะแรกจะมีการดูดซับในรูปไอออนเชิงซ้อน (Ionic complexes) บนพื้นผิวของแข็งที่มี ประจุ และการจับกัอนกับสารแขวนลอย การย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินช่วยให้มีการปลดปล่อยจุลธาตุ เหล่านี้ออกมาแล้วอาจถูกดูดซับ หรือ ตรึงในออกไซด์ของเหล็ก แมงกานีส หรือสารอื่น ในระยะยาวอาจ รวมเข้ากับแร่ที่มีความเสถียร หรือตกตะกอนในรูปค่อนข้างเสถียร เช่น เกิดในรูปซิลิเกตต่าง ๆ

2.2.4 รูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน

1. **รูปที่ละลายในสารละลายดิน (Soluble form)** โลหะหนักที่อยู่ในรูปนี้ส่วนใหญ่จะเป็น กลุ่มที่มีการแพร่กระจายอยู่ในอนุภาคทราย (Sand) และทรายแป้ง (Silt) เนื่องจากอนุภาคของทรายและ ทรายแป้งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของดินเหนียว (Clay) ทำให้สามารถละลายออกสู่อ่างละลายดินได้ง่าย และเคลื่อนที่ได้ดี

2. **รูปที่ถูกดูดซับในตำแหน่งผิวของอนุภาคคอลลอยด์ดิน (Adsorbed form)** โลหะหนักที่ แพร่กระจายจะมีขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคดินเหนียว ทำให้สามารถอยู่ได้ด้วยกระบวนการต่าง ๆ เช่น การ ถูกดูดซับที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งเข้าไปแทนที่ในช่องว่าง นอกจากอนุภาคดินเหนียวเป็นอินทรีย์คอลลอยด์ ได้แก่ อินทรีย์วัตถุที่มีขนาดเล็ก และกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะมิโน ฮิวมัส และโปรตีน มีความสามารถในการดูดซับไอออนสูงเช่นเดียวกับแร่ดินเหนียว โลหะ- หนักจึงสามารถจับกับอินทรีย์วัตถุได้ และส่งผลให้โลหะหนักสามารถละลายน้ำได้ดี

3. **รูปที่ตกตะกอน (Precipitated form)** โลหะหนักที่ละลายในสารละลายดิน หรือ ถูกดูดซับ อยู่ที่อนุภาคของดิน อาจมีการตกตะกอนกับออกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีส เนื่องจากเป็น องค์ประกอบส่วนใหญ่ของดิน โอกาสที่โลหะหนักจะปะปน หรือ เกิดสารประกอบกับออกไซด์ หรือ ไฮดรอกไซด์ ออกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีสจึงพบได้เสมอ ซึ่งการตกตะกอนในรูปนี้จะสัมพันธ์กับความ เป็น กรด-ด่างและความเข้มข้นของสารละลายในดิน

4. **รูปที่ถูกตรึงและจับกับสารแขวนลอยอื่น หรือ แร่ในดิน (Fixed, Occluded form)** โลหะหนักที่อยู่ในรูปนี้พบในดินที่มีกระบวนการสลายตัวของสารหรือแร่ปฐมภูมิ ด้วยกระบวนการทาง ฟิสิกส์ หรือ เคมี โดยโครงสร้างเดิมจะยุบและเรียงตัวใหม่เกิดแร่ทุติยภูมิ ในระหว่างที่มีการสลายตัวอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของธาตุบางธาตุในโครงสร้างจะมีโลหะหนักแทนที่ได้ ถ้าโครงสร้างใหม่อ่อนแอกว่าโครงสร้างเดิม แร่เหล่านี้ก็จะสลายตัว และสร้างโครงสร้างใหม่จนกว่าจะได้โครงสร้างที่แข็งแรง

5. รูปที่ถูกคลุกเคล้าเข้าสู่ระบบชีวภาพเป็นสารอินทรีย์ (Organic form) โลหะหนักที่ถูกจับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ หรือ อยู่ในรูปคีเลต (Chelate) ที่มีโครงสร้างใหญ่ที่แข็งแรง และมีความเสถียรมาก โดยโลหะหนักทำหน้าที่เป็นตัวกลาง หรือ สะพานเชื่อมระหว่างสารอินทรีย์กับอนุภาคดินเหนียว เกิดเป็นโครงสร้างที่มีเสถียรภาพส่งผลให้โลหะหนักตกตะกอนในรูป Soluble form และ Adsorbed form ซึ่งเป็นรูปที่เคลื่อนที่ได้ดีในดิน ทำให้พืชสามารถนำไปใช้ได้ง่ายในขณะที่โลหะหนักที่พบในรูปอื่นจัดเป็นรูปที่เคลื่อนย้าย และแพร่กระจายได้น้อยมาก (Non-mobile)

2.2.5 ลักษณะในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2535)

ธาตุโลหะหนักมีลักษณะโดยทั่วไป คือ เปลี่ยนแปลงวาเลนซ์อยู่เสมอในรูปไฮดรอกไซด์ มีการละลายต่ำ มีความสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้สูง มักทำปฏิกิริยากับพอลิฟอสเฟต และธาตุโลหะหนักบางตัวคล้ายไอออนบวก ปัจจัยที่กำหนดการเปลี่ยนแปลงธาตุโลหะหนักในดิน ได้แก่ การดูดซับบนพื้นผิวอนุภาคดินเหนียวและฮิวมัส การเกิดสารเชิงซ้อนกับฮิวมัส เช่น การเกิดคีเลต (Chelation) ฮิวมัส (Humus) เป็นต้น การถูกดูดซับ และตกตะกอนโดย Hydrated oxide ของ เหล็ก อลูมิเนียม แมงกานีส เป็นต้น และการเกิดสารประกอบที่ไม่ละลายใน Redox potential บางสภาวะ หรือ อาจตกตะกอน กับคาร์บอเนต ฟอสเฟต และ ไฮดรอกซิล เป็นต้น ลักษณะของธาตุโลหะหนักแต่ละธาตุ มีดังนี้

(1) แมงกานีส การละลายได้ขึ้นอยู่กับสภาพกรด-ด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และ Redox potential ของดินในสภาพ pH 6.5 ขึ้นไป จะละลายให้พืชใช้ได้บ้าง โดยเฉพาะในสภาวะที่มีวาเลนซ์สูง (หรือในสภาพออกซิเดชัน) โดยทั่วไปก็คือแมงกานีสจะถูกดินยึดไว้ในสภาพดินเป็นกลางถึงด่าง และมีการระบายน้ำดี แมงกานีสในรูปคีเลตจะละลายได้ดีโดยความคงทนของคีเลตจะเป็นลำดับดังนี้ $Cu > Ni > Zn > Mn$ อย่างไรก็ตาม หากมีเหล็กอยู่มากก็จะแย่ง แมงกานีสเกิดเหล็กคีเลต ในสภาพดินระบายน้ำดียอมเกิดได้น้อย เพราะสภาพดังกล่าวเหล็กมีการละลายได้ต่ำ

(2) แคดเมียม จะละลายได้ดีในสภาพดินเป็นกรด ดังนั้นการใส่ปูนตลอดจนอินทรีย์วัตถุ Silicate clay Hydrated oxides Fe, Al จะสามารถลดการละลายได้ของแคดเมียม

(3) ตะกั่ว ในดินโดยส่วนใหญ่พืชไม่สามารถดูดซึมได้ เพราะอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย นอกจากในดินมีสภาพเป็นกรด ดังนั้นการใส่ปูนจึงลดตะกั่วในรูปดูดซึมได้เป็นอย่างมาก ตะกั่วส่วนใหญ่อยู่ในชั้นดินบน และมีการเคลื่อนย้ายลงสู่ดินชั้นล่างน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกระจายตัวของโลหะหนักในดิน (วรชาติ, 2555)

ค่าพีเอช ของดินเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมการเคลื่อนที่ของธาตุอาหาร หรือ สารมลพิษในดิน เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็น H^+ ในดิน จะมีการแข่งขันแคตไอออนกับโลหะหนักในดิน ส่งผลให้ดินมีความสามารถดูดซับแคตไอออน (ธาตุอาหาร หรือ โลหะหนัก) ต่ำลง และเป็นการเพิ่มการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก กลไกในการควบคุมความคงสภาพของโลหะหนักในดินด้วยวัสดุปูน เป็นการทำให้ตกตะกอนกับสารจำพวกคาร์บอเนตหรือหมู่ไฮดรอกซิล การใส่ปูนเพื่อบำบัดสิ่งปนเปื้อนจึงเป็นแนวทางจัดการดินที่ง่าย สะดวกและมีต้นทุนต่ำในการควบคุมการเคลื่อนที่ของธาตุเหล่านี้

สภาพออกซิเดชัน-รีดักชัน จะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินโดยการเกิดสภาพออกซิเดชัน จะทำให้โลหะหนักสามารถถูกดูดซับไว้ในดินได้ดี และในขณะที่เกิดสภาวะรีดักชัน การเคลื่อนที่ของโลหะจะเพิ่มขึ้น โลหะหนักบางชนิด เช่น แคดเมียม และปรอท มีสภาพการเคลื่อนที่ปานกลางในสภาพออกซิเดชัน แต่ในสภาพรีดักชัน จะมีสภาพการละลายต่ำ หรือ อยู่ในสภาวะที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ เนื่องจากมีการรวมตัวกับธาตุซัลเฟอร์ เกิดเป็นแร่ที่มีความเสถียรมากกว่าในสภาพออกซิเดชัน

2.3 แคดเมียม (Pubchem, 2017)

2.3.1 คุณสมบัติ

แคดเมียมอยู่ในหมู่ 3B น้ำหนักอะตอม 112.41 กรัม ความดันไอ 1.4 มิลลิเมตรปรอท ที่ 400 องศาเซลเซียส หรือ 1.6 มิลลิเมตรปรอท ที่ 500 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 765 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 8.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความแข็งโมห์ส 2.0

แคดเมียม เป็นธาตุโลหะหนักที่มีสีเงินแกมขาว มีคุณสมบัติ เบา อ่อนดัดโค้งได้ง่าย และทนต่อการกัดกร่อน เมื่อมีการใช้ความร้อนสูง เช่น การหลอมเหล็ก แคดเมียมจะมีลักษณะทางฟิสิกส์ และทางเคมี คล้ายกับสังกะสี เนื่องจากแคดเมียมอยู่ติดกับสังกะสีในตารางธาตุ แคดเมียมมีความเป็นพิษมากแต่ก็มีการนำมาใช้ประโยชน์มาก เช่น ใช้เป็นสารหล่อลื่น สารกันสนิม ทำสี แบตเตอรี่ และลวดเชื่อม ในธรรมชาติ แคดเมียมเป็นสารเจือปนในสินแร่สังกะสี เช่น สฟาเลอไรต์ (Sphalerite, ZnS) และ คาลาไมน์ (Calamine, $ZnCO_3$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แคดเมียม

ที่มา : <http://thaihealthlife.com>

2.3.2 ปฏิกริยาในดิน (ศุภมาศ, 2539)

แคดเมียมจะเคลื่อนที่ได้ดีในสภาพดินที่เป็นกรด เมื่อหินและแร่สลายตัว พบแคดเมียมอยู่รูป Cd^{2+} เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน (Complex ion) และสารประกอบต่างๆ เช่น

แคทไอออน : $CdCl^+$, $CdOH$, $CdHCO_3^+$

แอนไอออน : $CdCl_3$, $CdCl_4^{2-}$, $Cd(OH)^3-$, $Cd(OH)_4^{2-}$

สารประกอบต่างๆ : CdO , $CdCO_3$

ค่าพีเอช และศักย์รีดอกซ์เป็นปัจจัยสำคัญในการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดิน ซึ่งจะเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าพีเอช ระหว่าง 4.5-5.5 ส่วนการละลายของแคดเมียมในดินจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

มีการศึกษาพบว่าแคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าพีเอชต่ำ ถ้าในดินที่มีค่าพีเอชสูงจะทำให้แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ต่ำ ความสามารถในการดูดซับของดินจะสูงเมื่อดินมีค่าพีเอชสูง และดินจะมีอัตราการดูดซับที่สูงเมื่อดินมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.5 การดูดซับแคดเมียมเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้รวดเร็ว โดยทั่วไปแคดเมียมจะละลายได้น้อยลงเมื่อดินมีสภาพเป็นกรด จากรายงานองค์การอนามัยโลก พบว่ากิจกรรมของมนุษย์ทำให้ปริมาณโลหะหนักของแคดเมียมมีปริมาณเพิ่มขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งมีผลต่อการแพร่กระจายแคดเมียมที่เพิ่มขึ้นสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำ หรืออาหาร เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมในกระเพาะอาหารแล้วแพร่กระจายไปที่ตับ ม้าม และ ลำไส้ จะสะสมในปริมาณสูงทำให้เกิดโรคมะเร็ง ไตทำงานผิดปกติซึ่งจะทำให้ไตพิการได้ เกิดโรคความดันโลหิตสูง และยังทำให้ปวดกระดูกสันหลัง

อาการเฉียบพลันจากการกินจะมีอาการ เคลื่อนไส้ อาเจียน ท้องเสีย ปวดศีรษะ ปวดกล้ามเนื้อ น้ำหนักลด โลหิตจาง หายใจลำบาก ฟันมีคราบเปื้อนสีเหลือง ตับและไตอาจถูกทำลาย แคดเมียมยังเป็นอันตรายต่อสัตว์ เพราะพืชที่สะสมแคดเมียมจะไม่แสดงความเป็นพิษออกมา จึงทำให้สัตว์ที่กินพืชมีการสะสมแคดเมียมเข้าไปอาจตายได้ เพราะแคดเมียมจะไปยับยั้งการทำงานของระบบเอนไซม์ สำหรับมนุษย์ ถ้าได้รับแคดเมียมในระดับสูงจะส่งผลต่อระบบย่อยอาหาร และระบบทางเดินหายใจ ในระยะยาวจะทำให้มีผลต่อไต

2.4 เทคโนโลยีการฟื้นฟูดิน (ธเรศ, 2560)

เทคโนโลยีการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก As, Cd, Cr, Hg และ Pb มีดังนี้

2.4.1 Monitored Natural Attenuation (MNA)

เป็นเทคนิคการปล่อยให้เกิดการย่อยสลายเองตามธรรมชาติ โดยติดตามตรวจวัดเป็นระยะ ๆ ประสิทธิภาพของการบำบัดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น สภาพแวดล้อม ปริมาณความเข้มข้นของสารปนเปื้อน เป็นต้น

2.4.2 การขุด หรือ ตักดินไปฟื้นฟู (Excavation)

เป็นการฟื้นฟูดินปนเปื้อนที่สามารถทำได้ทั้งในดินที่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนสูง หรือ ต่ำ โดยการตักดินที่ปนเปื้อนออกไปนอกพื้นที่ (Ex-situ) นำไปเข้าเตาเผา หรือ ผ่านขั้นตอนการทำให้เสถียรก่อนนำไปฝังกลบที่หลุมฝังกลบของเสียอันตราย

2.4.3 การปิดคลุม (Capping)

การปิดคลุม หรือ การคลุม เป็นการปกปิดวัสดุที่ปนเปื้อน เช่น หลุมฝังกลบหรือดินที่ปนเปื้อน การคลุมไม่ได้เป็นการทำลาย หรือ ขนย้ายสารปนเปื้อน แต่เป็นการแยกเก็บไว้ไม่ให้เกิดการปนเปื้อนแพร่กระจาย และป้องกันไม่ให้เกิดการสัมผัสสารปนเปื้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำการคลุมเป็นการแยก และป้องกันการกระจายหลายสาเหตุ เช่น

- ป้องกันฝนไม่ให้ซึมเข้าไปชะล้างสารปนเปื้อนออกมาปนเปื้อนแหล่งน้ำใต้ดิน
- ป้องกันมิให้น้ำฝนพัดพาสารปนเปื้อนออกนอกพื้นที่หรือลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ
- ป้องกันมิให้ลมพัดพาสารปนเปื้อนออกนอกพื้นที่
- ป้องกันก๊าซประเภทย่อยง่ายที่ผลิต และปล่อยออกมาจากการระเหย
- ป้องกันประชาชนและสัตว์ป่าจากการเข้าไปสัมผัสสารอันตรายและสารปนเปื้อนติดออกไปนอกพื้นที่

การเลือกแบบที่ปกคลุมสำหรับพื้นที่ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดและความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ขนาดพื้นที่ ปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่และการใช้งานในอนาคต การก่อสร้างแผ่นคลุมอาจเป็นแบบง่าย ๆ สำหรับดินปนเปื้อนน้อย หรือ อาจต้องใช้วัสดุหลายชั้นและหลายชนิดเพื่อจะกันของเสียที่มีการปนเปื้อนสูง หรือ บางครั้งมีการทำกำแพงกันบริเวณที่มีการปิดคลุมเพื่อป้องกันการแพร่กระจายการปนเปื้อน

2.4.4 การเปลี่ยนรูปให้เป็นของแข็ง และการปรับเสถียร (Solidification and Stabilization)

การเปลี่ยนรูปให้เป็นของแข็ง และการปรับเสถียร คือ วิธีการที่จะป้องกัน หรือ ทำให้สารปนเปื้อนในดินตะกอนดินหรือกากตะกอน (Sludge) ปล่อยออกมาช้าลง วิธีนี้โดยปกติจะไม่ทำลายสารปนเปื้อน แต่เป็นการเก็บสารปนเปื้อนไม่ให้ชะล้างออกมาสู่สิ่งแวดล้อมรอบ ๆ บริเวณที่ปลอดภัย การชะล้างจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำจากน้ำฝน หรือ แหล่งอื่น ๆ ละลายสารปนเปื้อน และไหลไปปนเปื้อนน้ำใต้ดิน ดิน ทะเลสาบ และแม่น้ำ

Solidification คือ การตรึงของเสียไว้ในก้อนวัสดุที่เป็นของแข็ง และยึดติดไว้กับที่ ประกอบด้วย การผสมสิ่งปนเปื้อนกับสารที่ทำหน้าที่จับสารปนเปื้อน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้วัตถุจับกันแบบหลวมๆ ติดกันแน่นขึ้น สารที่ทำหน้าที่ตรึงโดยทั่วไป เช่น ซีเมนต์ เถ้าลอยและดินเหนียวโดยต้องมีการผสมน้ำเพื่อจะทำให้มีการยึดจับหลังจากนั้นจะปล่อยให้แห้งให้ได้ก่อนที่แข็ง การเปลี่ยนรูปให้เป็นของแข็ง และการปรับเสถียรมักจะใช้ควบคู่กัน เพื่อป้องกันประชาชนและสัตว์ป่าจากการสัมผัสสารปนเปื้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากโลหะหนักและกัมมันตภาพรังสี

Stabilization คือ การทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งตรึงสารปนเปื้อนไม่ให้ชะล้างออกสู่สิ่งแวดล้อมได้น้อยลง คล้ายกับ Solidification ประกอบด้วย การผสมสิ่งปนเปื้อนกับน้ำและสารที่ทำหน้าที่ตรึง แต่สารที่ทำหน้าที่ตรึงในขณะเดียวกันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่จะทำให้สารปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยลงไปด้วย

การเปลี่ยนรูปให้เป็นของแข็งและการปรับเสถียร สามารถดำเนินการได้ทั้งในพื้นที่ (In-situ) และนอกพื้นที่ (Ex-situ)

การดำเนินงานในพื้นที่ วิธีการประกอบด้วยขั้นตอนการเจาะบ่อหรือรูโดยใช้รถเจาะ กับเครื่องผสม หรือ สว่านขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งเต็ม และผสมสารเข้าไปกับสิ่งปนเปื้อนบริเวณใต้ดิน ยกตัวอย่าง เช่น เมื่อนำดินปนเปื้อนโลหะหนักมาผสมกับสิ่งปนเปื้อน ณ บริเวณปนเปื้อน จำนวนบ่อ หรือ รูขึ้นอยู่กับขนาดสว่าน และพื้นที่ปนเปื้อน บางกรณีอาจจำเป็นต้องขุดบ่อหรือรูจำนวนมาก ถ้าหากสารปนเปื้อนพบในบริเวณตื้นจะขุดดินปนเปื้อนขึ้นมาและผสมกับสารเติมแต่งเหนือพื้นดิน (ณ ที่ปนเปื้อน) หรือ ใช้รถขุดเจาะที่เรียกว่า Pug mills จะสามารถบดและผสมสิ่งปนเปื้อนได้ในเวลาเดียวกัน ทำให้สิ่งปนเปื้อนแข็งตัวหรือเสถียรบริเวณเหนือพื้น (Solidification and Stabilization)

ส่วนการดำเนินการนอกพื้นที่ ได้แก่ การขุด หรือ ตักดินที่ปนเปื้อนออกจากบริเวณพื้นที่ปนเปื้อนจากนั้นสารปนเปื้อนเข้าสู่กระบวนการการเปลี่ยนรูป และนำไปฝังกลบในหลุมที่ปลอดภัย

2.4.5 การล้างดิน (Soil Washing)

การล้างดิน หรือ การขัดดิน เป็นการนำดินที่มีการปนเปื้อนจากสารปนเปื้อนมาทำการล้างด้วยน้ำสะอาดหรือสารละลาย เช่น สารลดแรงตึงผิว สารละลายกรดอ่อน สารละลายด่างอ่อน ฯลฯ เพื่อให้สารปนเปื้อนนั้นหลุดออกมาจากอนุภาคของดิน ซึ่งเป็นหนึ่งในการฟื้นฟูแบบ Ex-situ ระบบการล้างดินจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ คือ Scrubbing Unit และ Treatment Unit ดินที่มีการปนเปื้อนจะเข้าสู่ระบบ Scrubbing unit ซึ่งจะมีการเติมน้ำหรือสารละลาย ค่าความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อนที่หลุดออกมาจากอนุภาคดินจะละลายอยู่ในส่วนของของเหลว จากนั้นของเหลวที่ผ่านระบบ Scrubbing Unit จะเข้าสู่ระบบ Treatment Unit และทำการบำบัดสารปนเปื้อนตามวิธีการที่เหมาะสมต่อไป ส่วนดินที่ผ่านการบำบัดแล้วจะนำไปฝังกลบไว้ในพื้นที่ตามเดิม

2.4.6. จลนศาสตร์ไฟฟ้า (Electrokinetic)

เป็นกระบวนการสกัดโลหะหนัก หรือ สารปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ออกจากดิน ด้วยวิธีการทางไฟฟ้า โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทางขั้วไฟฟ้า (Electrodes) ซึ่งเป็นขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) โดยสารปนเปื้อนจะถูกทำให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าที่ได้มีการติดตั้งไว้

2.4.7 การสร้างกำแพงกัน (Vertical engineering barriers)

การสร้างกำแพงกัน คือ ผนังที่กั้นลงไปใต้ดินเพื่อจะควบคุมการไหลของน้ำใต้ดิน VEB อาจใช้เพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไม่ให้สัมผัสกับบ่อน้ำดื่ม พื้นที่ชุ่มน้ำ แม่น้ำลำธาร ใช้สำหรับการกักเก็บแยกดิน และน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไม่ให้ผสมกับน้ำใต้ดินที่สะอาด

VEB ทำจากวัสดุที่น้ำซึมผ่านไม่ได้หรือซึมผ่านได้น้อย ซึ่งหมายถึงการป้องกันหรือลดการไหลของน้ำ และสารปนเปื้อนผ่านผนัง ผนังชนิดที่พบมากที่สุด คือ กำแพงทึบน้ำ (Slurry wall) ก่อสร้างโดยขุดคูแคบ ๆ โดยทั่วไปกว้างประมาณ 60-120 เซนติเมตร เติมวัสดุที่ใช้ทำกำแพงลงในหลุมซึ่งประกอบด้วยดินผสมน้ำ และดินเหนียวสังเคราะห์ซึ่งนิยมใช้เบนโทไนท์ (Bentonite) เพราะมีคุณสมบัติขยายตัวเมื่อเปียก น้ำจมนปิดหลุมหรือคูที่ขุดไว้ โดยอาจมีการผสมซีเมนต์เพื่อให้กำแพงแข็งแรงขึ้น

VEB ยังสามารถสร้างโดยใช้แผ่นแม่เหล็ก ไวนิล หรือ วัสดุอื่น ๆ ซ้อนกันแล้วใช้เครื่องมือตอกให้แผ่นวัสดุฝังลงไปในดิน ในพื้นที่ปนเปื้อนบางแห่ง สามารถก่อสร้าง VEB และตอกให้ลึกลงไปถึงชั้นดินหรือหินที่น้ำซึมผ่านได้น้อย ทำให้ช่วยกักเก็บน้ำใต้ดินไม่ให้ซึมบริเวณด้านล่างของผนังออกไป อาจมีการติดตั้งแผ่นคลุมที่ด้านบนของ VEB เพื่อป้องกันความเสียหายจากยานพาหนะหรือกิจกรรมอื่น ๆ

แม้ว่าจะมีการล้อมรอบด้วย VEB น้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนอาจเกิดขึ้นในบริเวณอื่นหรืออาจไหลออกมาจากรูเล็กๆใน VEB ไปในบริเวณที่ยังไม่มีการปนเปื้อน ดังนั้นเพื่อป้องกันการปนเปื้อนไปสู่บริเวณอื่น จึงควรมีการขุดบ่อรอบนอกบริเวณเพื่อทำการตรวจสอบว่าไม่มีสารที่ปนเปื้อนกระจายออกมา

2.4.8 การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโดยใช้พืช (Phytoremediation)

เป็นการใช้พืชการบำบัดสารปนเปื้อนในบริเวณพื้นที่ปนเปื้อน เพื่อลดอันตรายของสารปนเปื้อนต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนทั้งที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นต่ำ และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในตัวกลาง ดิน น้ำ หรืออากาศ ซึ่งการบำบัดนี้อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำและแร่ธาตุผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืชในการเปลี่ยนสารปนเปื้อนให้มีความเป็นพิษลดลง

คุณสมบัติของพืชที่เหมาะสมต่อการทำ Phytoremediation มีดังนี้

- มีความทนทานต่อสารพิษที่ปนเปื้อนในพื้นที่
- เป็นพืชที่ง่ายต่อการปลูกและดูแลรักษา
- มีการเจริญเติบโตเร็ว
- ขยายพันธุ์ได้ในอัตราสูง
- มีวงจรชีวิตสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีการสะสมของสารพิษได้ในระดับสูง
- มีปริมาณของมวลชีวภาพมาก

2.5 การดูดซับ (Adsorption) (เดชา ,2552)

การดูดซับ เป็นกระบวนการสะสมตัวของสาร หรือ ความเข้มข้นของสารระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของแข็งกับของเหลว โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

คุณสมบัติที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ การมีรูพรุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น โครงสร้างการจัดเรียง ขนาด ฯลฯ คุณสมบัติเหล่านี้ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

2.5.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับจำแนกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

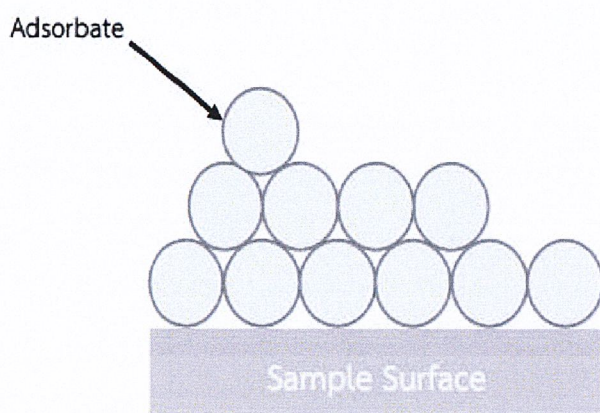
1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) คือ การดูด หรือ การดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดรวมกัน ได้แก่

(1) แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับความชื้นด้วยผลึกดูดความชื้น เป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วลบบนผิวผลึกดูดความชื้น

(2) แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) และไอออนแมกนีเซียม (Mg^{2+})

(3) แรงดึงดูดมวล ระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เช่น การดูดซับกลิ่น ซึ่งเป็นไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆด้วยถ่านดูดซับ หรือ การดูดซับไอสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยถ่านดูดซับ

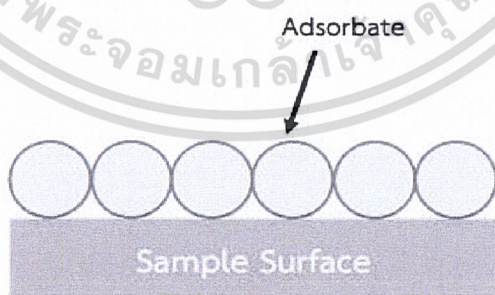
การดูดซับเกิดบนชั้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน เรียกว่า การดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)



รูปที่ 2.2 การดูดซับแบบหลายชั้น

ที่มา: สุพะไชย์, 2555

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) คือ การเกิดพันธะเคมี หรือ การใช้ อิเล็กตรอนร่วมกัน ระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกันกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องใช้พลังงานกระตุ้น เช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้น การดูดซับมักเกิดได้ดีหรือเกิดได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูง ๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือ การดูดซับทางเคมีจะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลสารดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับเช่นเดียวกับการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมีสามารถเกิดได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น



รูปที่ 2.3 การดูดซับแบบชั้นเดียว

ที่มา : สุพะไชย์, 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) โมเลกุลของตัวดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลของตัวดูดซับแทรกผ่านชั้นของของเหลวก่อนเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) โมเลกุลของตัวดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรง หรือรูพรุน ของตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

2.5.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับ (เกลียวทอง และคณะ, 2560)

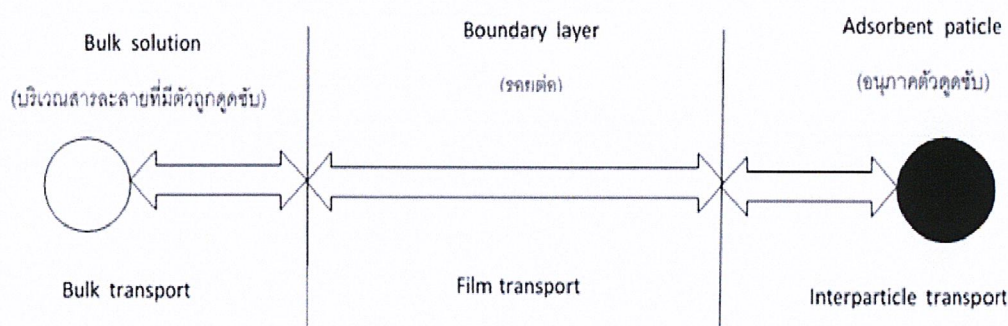
อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว ซึ่งจะถูกลบควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุด ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้

1) การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ

3) การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวดูดซับละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่าการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา : www.carit.rmut.ac.th/Ebook2017/Book/eb590577/eb590577/>.pdf

2.5.4. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ (เกลียวทอง และคณะ, 2560)

1) พื้นที่ผิว และโครงสร้างของรูพรุน

พื้นที่ผิวการดูดซับและโครงสร้างของรูพรุน มีจำนวนมาก จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะกระบวนการดูดซับส่วนใหญ่เกิดบริเวณพื้นที่ผิว

2) ขนาดของตัวดูดซับ

กรณีที่สารดูดซับไม่มีรูพรุน เมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลงพื้นที่ผิวในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงตามไปด้วย ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ

3) อัตราการเร่งการปั่นกววน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งโมเลกุลของระบบขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม และการแพร่เข้าสู่โพรง ถ้าการปั่นกววนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าการปั่นกววนสูงจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นอัตราการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นขั้นตอนในการกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4) อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้นแต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

5) ค่าพีเอช

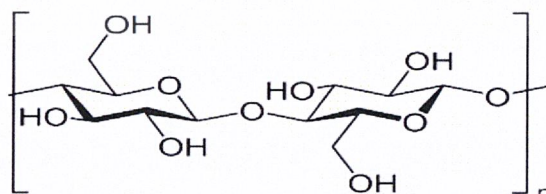
ผลของความเป็นกรด-เบสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ขึ้นอยู่กับสภาพความมีขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรดต่ำส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเพิ่มขึ้น และเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น มีผลทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้เพิ่มขึ้น แต่ถ้าสารละลายมีค่าพีเอชมากกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

6) ระยะเวลาในการดูดซับ

ระยะเวลาในการดูดซับมากขึ้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคายซับ (Rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด หลังจากนั้นจะมีค่าคงที่

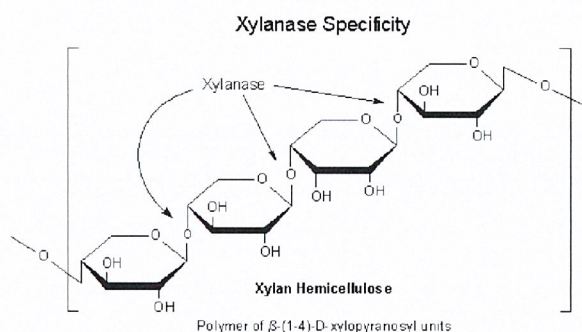
2.6 ถ่านชีวภาพ (แม่เหล็ก) (พินิจภณ, 2557)

ถ่านชีวภาพ คือ วัสดุแข็งที่มีเสถียรภาพ อุดมไปด้วยคาร์บอน มีสีดำตลอด (Uniformly black) เมื่อหักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (Shiny surface) มีรูพรุน และพื้นที่ผิวมาก ผลิตจากชีวมวลอินทรีย์มีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลส ซึ่งเป็นเส้นใย มีเอมิเซลลูโลสเป็นตัวยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน และมีลิกนินซึ่งทำหน้าที่ให้เส้นใยยึดเหนี่ยวกันอย่างแข็งแรง ทั้งหมดนี้รวมเรียกว่า ชีวมวลลิกเซลลูโลส ดังรูปที่ 2.5 - 2.6



รูปที่ 2.5 โครงสร้างเซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างชีวมวลลิกเซลลูโลส

ที่มา : https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigmaaldrich/lifescience/biochemicals/migrationbiochemicals1/hemicellulase_xylanase.gif

2.6.1 การผลิตถ่านชีวภาพ

ชีวมวลอินทรีย์ หรือ วัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรรวมถึงวัชพืช เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด กะลามะพร้าว แกลบ กก ผักตบชวา รุบฤๅษี ฯลฯ นำมาผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน โดยการควบคุมความร้อนระหว่าง 100 - 500 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน เพื่อป้องกันการเผาไหม้ ใช้ระยะเวลาหลายชั่วโมง เรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis)

โดยความร้อนจะไปทำลายพันธะทางเคมีของอินทรีย์วัตถุในส่วนต่างๆของพืช ทำให้ความชื้นและธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอน ได้แก่ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ จะแตกตัวอยู่ในรูปของก๊าซ (Gasification process) กระจายออกไป เรียกว่า การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) อนุมูลคาร์บอนอิสระที่เหลืออยู่จะรวมกลุ่มกันเป็นถ่านชีวภาพ ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัส รูพรุน และประจุลบสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการดูดซับธาตุ หรือ ไอออนโลหะหนักที่มีประจุบวกได้

จุดมุ่งหมายการนำมาใช้ประโยชน์ คือ ใช้เพื่อการปรับปรุงดินทางการเกษตรเป็นหลัก เนื่องจากถ่านชีวภาพมีรูพรุนจำนวนมาก ช่วยในการระบายอากาศ กักเก็บน้ำ ดูดซับธาตุอาหารในดิน เป็นที่อยู่ให้กับจุลินทรีย์ ปรับสภาพความเป็นกรด-เบส และยังช่วยเพิ่มคุณภาพของปุ๋ยให้สูงขึ้น เมื่อดินอุดมสมบูรณ์จะส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุต่าง ๆ

ที่มา : [https://www.facebook.com/shares/view?id=1367053453376481
&av=100002943912201](https://www.facebook.com/shares/view?id=1367053453376481&av=100002943912201)

2.6.2 ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (Magnetic biochar)

ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก คือ ถ่านชีวภาพที่มีสภาพแม่เหล็ก โดยการนำวัสดุชีวมวลอินทรีย์ชุบด้วย Fe^{2+}/Fe^{3+} เช่น เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) เฟอร์ริกซัลเฟต ($FeSO_4$) ฯลฯ จากนั้นนำไปอบเพื่อกำจัดความชื้น ก่อนนำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส มีงานวิจัยศึกษาการนำถ่านชีวภาพมาปรับปรุงให้มีสภาพแม่เหล็ก เช่น ไคโตซาน โซเดียมโอดีซิลเบนซีนซัลโฟเนต ฯลฯ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับมากขึ้น และสามารถดูดซับสารที่มีความจำเพาะมากขึ้น ถ่านชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงแล้วคุณสมบัติจะเปลี่ยนไป เช่น มีพื้นที่ผิวมาก รูพรุน โครงสร้างทางกายภาพมีความคงตัว และแข็งแรงมากขึ้น

ถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์ขึ้นเพื่อเป็นตัวดูดซับ สำหรับการกำจัดมลพิษในด้านต่างๆ เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ สีสังเคราะห์ ยาปฏิชีวนะ เป็นต้น

2.6.3 ประโยชน์โดยตรง และโดยอ้อมของถ่านชีวภาพ

1. นำมาใช้เป็นตัวดูดซับ ในการกำจัดมลพิษต่างๆ ทั้งในน้ำ ดิน และอากาศ เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ สีสังเคราะห์ ยาปฏิชีวนะ กลิ่น รวมถึงก๊าซเรือนกระจกบางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ลดการเกิดก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยการผลิตถ่านชีวภาพด้วย กระบวนการไพโรไลซิส ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในระยะยาว ด้วยการกักเก็บคาร์บอนไว้ในรูปของถ่านชีวภาพ

3. ช่วยปรับปรุงดิน และเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร เมื่อนำถ่านชีวภาพผสม หรือ ไถพรวนลงดิน ลักษณะความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพจะช่วยกักเก็บน้ำ อากาศ ธาตุอาหารในดิน ปรับสภาพความเป็นกรด-เบส และเป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์สำหรับทำกิจกรรมเพื่อสร้างอาหารให้ดิน เมื่อดินอุดมสมบูรณ์จะส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มขึ้น และช่วยลดการใช้ปุ๋ยเคมีทำให้ต้นทุนลดลงอีกด้วย

4. ช่วยผลิตพลังงานทดแทนซึ่งได้จากกระบวนการไพโรไลซิส นอกจากจะได้ถ่านชีวภาพแล้ว ผลผลิตที่ได้ คือ น้ำมันชีวภาพ (Bio oil) และแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ซึ่งสามารถพัฒนาเป็นพลังงานทดแทนได้ เช่น การกระแสไฟฟ้า สารสกัดชีวภาพ และองค์ประกอบของยา เป็นต้น

5. ช่วยในกระบวนการจัดการของเสียประเภทอินทรีย์วัตถุ โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร รวมถึงวัชพืชที่มีผลกระทบต่อระบบนิเวศ มาใช้ให้เกิดประโยชน์ และยังสามารเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุได้อีกด้วย

2.6.4 ข้อควรระวังในการใช้งานของถ่านชีวภาพ

1. วัตถุดิบที่ใช้ทำถ่านชีวภาพ อาจให้คุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น บางชนิดอาจมีคุณสมบัติเป็นกรด หรือ ต่าง ควรมีการทดสอบค่าพีเอช ก่อนนำไปใช้จริง

2. เมื่อเผาถ่านชีวภาพออกมาแล้วไม่ควรนำไปใช้ทันที แต่ต้องทำการปรับเสถียรก่อน เช่น การนำไปใช้ในการปรับปรุงดินต้องนำไปหมักกับปุ๋ยประมาณ 2-3 เดือนก่อนนำไปใช้

3. ก่อนนำถ่านชีวภาพไปใช้ต้องบดให้ละเอียด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแต่ต้องระวังฝุ่นเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ เพราะฝุ่นของถ่านชีวภาพสามารถสะสมในร่างกายได้นาน ดังนั้นก่อนบดจึงต้องพรมน้ำ หรือควรใส่หน้ากากป้องกันฝุ่น

2.7 กระบวนการไพโรไลซิส (วรดาณ, 2549)

2.7.1 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนในสภาวะไร้อากาศ หรืออับอากาศในช่วงอุณหภูมิสูง โดยการทำให้ชีวมวลที่มีองค์ประกอบพวกเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักนั้นปราศจากน้ำอาศัยกระบวนการทำให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 120-150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นชีวมวลจะถูกให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนจมีอุณหภูมิประมาณ 500-600 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ คือ น้ำมัน ถ่านชีวภาพ และพวกแก๊สเชื้อเพลิงต่างๆ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทน เป็นต้น

กระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า แบบปานกลาง แบบเร็วและกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมาก กระบวนการที่นิยมใช้ คือ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า และกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ถ่านชีวภาพที่ได้เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าในสภาวะอุณหภูมิปานกลาง อัตราการให้ความร้อนต่ำและใช้ระยะเวลาในการเผา ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อธิบายพารามิเตอร์และผลผลิตที่ได้อาจได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการ	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลาในการเผา	เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้อ		
			น้ำมัน	ถ่าน	แก๊ส
แบบช้า	300-500	5-30 นาที หรือ 25-35 ชั่วโมง	20-50%	20-35%	20-50%
แบบปานกลาง	300-450	น้อยกว่า 10 นาที	30-35%	25-40%	20-30%
แบบเร็ว	300-1000	น้อยกว่า 2 วินาที	60-75%	10-25%	10-30%

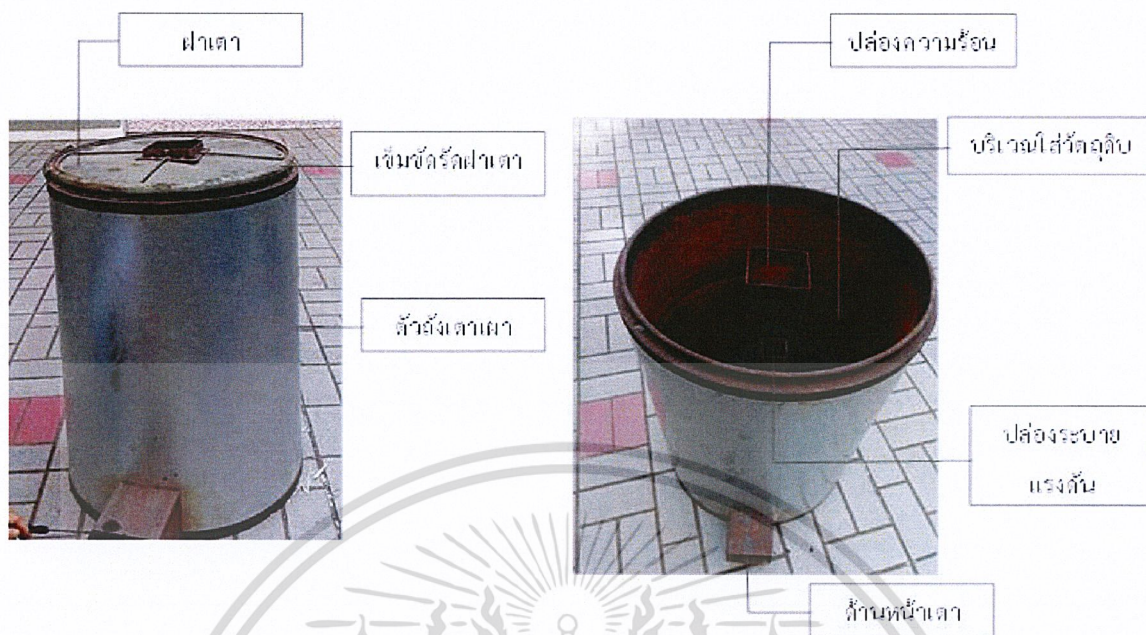
2.7.2 วิธีการไพโรไลซิส

วิธีการไพโรไลซิสแบ่งตามการให้ความร้อน ได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่

1. การไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) คือ การไพโรไลซิสโดยให้อัตราความร้อนน้อยกว่า 100 องศาเซลเซียสต่อวินาที และอุณหภูมิที่ใช้น้อยกว่า 500 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้จะเป็นน้ำมันดินและถ่านชีวภาพ

2. การไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) คือ การไพโรไลซิสโดยให้อัตราความร้อนอยู่ในช่วง 10-10,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที และอุณหภูมิตั้งอยู่ระหว่าง 400-1,000 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้จะเป็นแก๊ส และของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 เตาเผาประสิทธิภาพสูง

2.8 โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Pubchem, 2017)

โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) คือสารประกอบอินทรีย์สังเคราะห์ สูตรโครงสร้าง $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SO}_4^- \text{Na}^+$ เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant) ช่วยในการกระจายตัวของของเหลว และช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างของเหลวสองชนิด หรือระหว่างของเหลวกับของแข็ง นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและสุขอนามัย เช่น สบู่ และผงซักฟอก นอกจากนี้ยังมีบทบาทที่สำคัญในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย การกำจัดคราบน้ำมันและสิ่งสกปรก กำจัดมลพิษทางดิน และการดูดซับของเสีย เป็นต้น และยังสามารถนำไปใช้ในด้านอื่นอีกมากมาย

เนื่องจากโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต หรือ สารลดแรงตึงผิว ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ ความสามารถในการถูกย่อยสลายจะขึ้นกับโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว รวมทั้งปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่จากการใช้ จึงควรศึกษาปริมาณ ความเข้มข้นในการใช้งาน และชนิดของสารลดแรงตึงผิวนั้น ๆ เพื่อให้สารลดแรงตึงผิวทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ไม่เพิ่มปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อม และช่วยลดต้นทุนในการบำบัด US.EPA ได้กำหนดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในน้ำดื่มให้ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่ก่อให้เกิดอันตราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน 12 คาร์บอนที่สร้างพันธะกับโมเลกุลของซัลเฟต และส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) หมู่เอสเทอร์ ของ Dodecyl alcohol และ Sulfuric acid คือส่วนปลายของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกับ หัวของ “Headgroup”



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

ที่มา : https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_dodecyl_sulfate

2.9 ผักตบชวา (ภูษิต, 2562 ; นพพล, 2562)

ชื่อสามัญ : ผักตบชวา (Water hyacinth)

ชื่อทวินาม : *Eichhornia crassipes* Solms

อาณาจักร : พืช (Plantae)

หมวด : Liliopsida

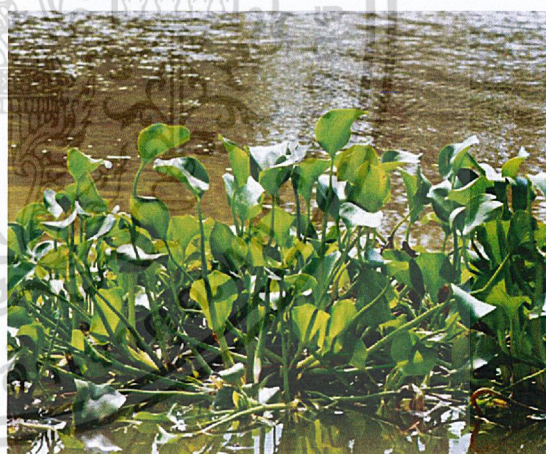
ชั้น : Commelinidae

อันดับ : Commelinales

วงศ์ : Pontederiaceae

สกุล : *Eichhornia*

สปีชีส์ : *E. crassipes*



รูปที่ 2.10 ผักตบชวา

ที่มา: <http://www.saohai.ac.th/tree/067.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 ประวัติ

ผักตบชวามีถิ่นกำเนิดในแถบลุ่มน้ำอะเมซอน ประเทศบราซิล ในทวีปอเมริกาใต้ ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2439 (ร.ศ. 115) โดยนำเข้ามาจากเกาะชวา ในสมัยรัชกาลที่ 5 พระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว พร้อมด้วยสมเด็จพระบรมราชินีนาถ (สมเด็จพระศรีพัชรินทราบรมราชินีนาถ พระบรมราชชนนีพันปีหลวง) โดยขณะเสด็จประพาสประเทศอินโดนีเซีย สมเด็จพระบรมราชินีนาถทรงพอพระทัยดอกผักตบชวาเป็นอย่างยิ่ง โดยผักตบชวาในเกาะชวาถูกนำเข้ามาจากเจ้าอาณานิคมฮอลันดา จึงทรงขออนำมาปลูกในเมืองไทยจำนวน 3 ช่ง พร้อมกับนำน้ำจากพื้นถิ่นกลับมาด้วยจำนวน 10 ปี๊บ เมื่อนำกลับมาปลูกได้ 1 เดือน ผักตบชวาก็ขึ้นแน่นกระถาง จึงโปรดเกล้าฯ แยกเอาลงปลูกในบ่อพระราชวังพญาไท ประมาณ 6 เดือนก็ขึ้นเต็มบ่ออย่างหนาแน่น เจ้านายต่าง ๆ ก็มาทูลขอพระราชทานจึงโปรดให้นำเอาต้นผักตบชวาปล่อยลงคลองเพื่อมีใครต้องการจะนำไปปลูกเป็นการแพร่พันธุ์

ผักตบชวามีการแพร่พันธุ์อย่างรวดเร็ว ใน 1 เดือน ผักตบชวาเพียง 1 ต้น อาจขยายพันธุ์ได้มากถึง 1000 ต้น ถึงแม้ว่าจะแห้งจนต้นตายแต่เมล็ดก็ยังมีชีวิตต่อได้นานถึง 15 ปี และทันทีที่เมล็ดได้รับน้ำที่เพียงพอ ก็จะแตกหน่อเป็นต้นใหม่ต่อไป จนกลายเป็นวัชพืชที่ร้ายแรงและเกิดปัญหาทางน้ำ ซึ่งไม่เพียงแต่ประเทศไทยเท่านั้น อีกกว่า 50 ประเทศทั่วโลกก็เจอปัญหาเช่นเดียวกัน เว้นแต่ประเทศในแถบยุโรปเท่านั้นที่ปลอดการรบกวน และบริเวณที่ถูกคุกคามมากที่สุดคือ ทะเลสาบวิกตอเรีย

ประเทศไทยเริ่มกำจัดผักตบชวาตั้งแต่สมัยรัชกาลที่ 6 มีการออกพระราชบัญญัติสำหรับกำจัดผักตบชวา พ.ศ. 2456 ปัจจุบันมีหน่วยงานและองค์กรต่างๆ ได้มาช่วยเหลือในการกำจัด เช่น นำไปผลิตเป็นของใช้ อาหารสัตว์ ทำปุ๋ย ฯลฯ และมีการนำแมลงฆวนผักตบชวาจากแหล่งกำเนิดที่ทวีปอเมริกาใต้ เข้ามาทดลองปล่อยในประเทศไทย เพื่อควบคุมจำนวนประชากรของผักตบชวา การขยายพันธุ์ได้รวดเร็วของผักตบชวา อีกหนึ่งปัจจัย คือ สารเคมีที่ใช้อยู่ในชีวิตประจำวัน เช่น สบู่ และผงซักฟอก ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นธาตุอาหารของพืชน้ำโดยเฉพาะผักตบชวา ทำให้การแพร่พันธุ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.9.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ผักตบชวาเป็นพืชน้ำล้มลุก สามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งน้ำสกปรกและน้ำสะอาด ในต้นพืชจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณร้อยละ 95 สูงประมาณ 50-100 เซนติเมตร สามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งแบบอาศัยเพศและแบบไม่อาศัยเพศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดอก สีม่วงอ่อน หรือสีฟ้าอมม่วง มีแต้มสีเหลืองที่กลางกลีบ เป็นช่อชนิดสไปด์ ก้านช่อดอกยาว ประมาณ 15-30 เซนติเมตร ดอกเกิดที่ปลายยอดมีดอกย่อย 6-30 ดอก มีกลีบดอก 6 กลีบ มีเกสรตัวผู้ 6 อัน เกสรตัวเมียเป็นเส้นบางๆ ที่ส่วนปลายเป็นตุ่มขาว ผลเป็นชนิดแคปซูล แบ่งเป็น 3 พู ภายในมีเมล็ดจำนวนมาก เมล็ดมีรูปร่างกลม ส่วนใหญ่ออกดอกปลายฤดูหนาวถึงต้นฤดูร้อน

ใบ เป็นใบเลี้ยงเดี่ยว รูปไข่ค่อนข้างกลมมน ขนาด 6-15 เซนติเมตร สีเขียวเป็นมัน ก้านใบกลมอวบน้ำ ภายในมีรูพรุนคล้ายฟองน้ำ ตรงกลางพองออกเป็นช่องอากาศ ช่วยให้ลอยน้ำได้ แตกใบเป็นกอลอยไปตามน้ำ ทรงพุ่มกลม ขนาดของใบและความยาวของก้านใบขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ในบริเวณที่เจริญเติบโต

ราก มีสีม่วงดำ เกิดจากสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ถ้าน้ำต้นจะหยั่งรากลงดิน แตกไหลตามซอกใบแล้วเจริญเป็นต้นอ่อนที่ปลายไหล

2.9.3 การสืบพันธุ์ของผักตบชวา

1) การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ

ผักตบชวา เป็นพืชที่มีดอกสมบูรณ์เพศ เมื่อการผสมเกสร คือการที่เกสรตัวผู้เข้าไปผสมหรือรวมกับเกสรตัวเมีย เกิดการปฏิสนธิ หลังจากนั้นจะเจริญต่อไปเป็นเมล็ด เมื่อหล่นลงน้ำ หรืออาจฝังตัวอยู่ในโคลนตม ซึ่งเมล็ดผักตบชวาสามารถมีชีวิตอยู่ได้ถึง 15 ปี หากสภาพแวดล้อมเหมาะสมจะสามารถงอกได้ทันที การเจริญเติบโตของผักตบชวามีปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิต้องมากกว่า 2 องศาเซลเซียส และต้องการแสงแดดที่เพียงพอต่อการสังเคราะห์แสง

2) การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ

เกิดจากการแตกไหลของต้นเก่าตามซอกใบ แล้วเจริญเป็นต้นใหม่ และสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว ผักตบชวาเพียง 10 ต้น สามารถที่จะแตกไหลได้ถึง 600,000 ต้น ในระยะเวลาเพียง 6 เดือน อีกทั้งยังอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ อย่างไรก็ตามการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ จะเจริญเติบโตได้ดีเมื่อพีเอชของแหล่งน้ำมีค่า 4-10 และมีอุณหภูมิไม่น้อยกว่า 34 องศาเซลเซียส

2.9.4 ประโยชน์ของผักตบชวา

1) การบริโภค

- ดอกอ่อน ใบอ่อนและก้านใบอ่อน สามารถนำมาประกอบอาหารได้ เช่น แกงส้ม และต้มจิ้มน้ำพริก

- อาหารสัตว์ เช่น สุนัข ไก่ เป็ด และวัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การอุปโภค

- ทำปุ๋ยหมัก เช่น การนำผักตบชวามาผสมกับมูลสัตว์ หรือขยะมูลฝอย
- ผลิตเป็นเครื่องจักสาน เช่น เสื่อ กระเป๋า ตระกร้า หมวก ฯลฯ
- ผลิตเป็นพลังงาน การทำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีว (โดยโครงการส่วนพระองค์ สวนจิตรลดา)

3) การแพทย์

- ใช้เป็นสมุนไพร แก้กพิษภายในร่างกาย ขับลม และใช้ทาหรือพอกแก้แผลอักเสบ

4) การบำบัดมลพิษในสิ่งแวดล้อม

การบำบัดน้ำเสีย โดยผักตบชวาจะดูดซึมธาตุอาหารที่เป็นตัวการในการทำให้น้ำเสียได้และยังกรองน้ำที่ไหลผ่านระบบรากผักตบได้ สถานที่แรกในประเทศไทยที่ใช้การบำบัดด้วยวิธีนี้ คือ “บึงมักกะสัน” โดยการกรองน้ำเสียด้วยผักตบชวา ซึ่งเป็นโครงการบึงมักกะสันอันเนื่องมาจากพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 9

มีงานวิจัยศึกษาประสิทธิภาพตัวดูดซับที่ผลิตจากผักตบชวา และพบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรม

2.9.5 ผลกระทบจากผักตบชวา

การขยายพันธุ์อย่างรวดเร็วของผักตบชวาทำให้เกิดขวางทางเดินน้ำ อัตราการไหลของน้ำลดลง และกีดขวางการระบายน้ำของประตูน้ำ อีกทั้งยังทำให้ระบบนิเวศเสียหายเมื่อมีปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตใต้น้ำ คือ สัตว์ใต้น้ำจะขาดออกซิเจนและตายลง และบดบังแสงแดดที่เป็นส่วนหนึ่งของการสังเคราะห์แสงของพืชใต้น้ำจะทำให้พืชเหล่านั้นเน่าและตาย ส่งผลให้เกิดน้ำเน่าเสียรวมทั้งทำลายระบบนิเวศอีกด้วย

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 Ye และคณะ (2015) ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ ที่เป็นอุณหภูมิตั้งแต่ 300 ถึง 500 °C ภายใต้การไหลของก๊าซไนโตรเจน และศึกษาประสิทธิภาพในการปรับปรุงดิน จากการทดลองพบว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ จะมีความหนาแน่นต่ำ แต่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ที่อุณหภูมิ 400 °C มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดซึ่งมีองค์ประกอบ ได้แก่ C, H, O, N, P และ K คือ 67.2%, 3.89%, 24.4%, 3.10%, 0.41% และ 1.07% ตามลำดับ ค่าการดูดซับไอโอดีน คือ 1254 ต่อมิลลิกรัม เมื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงดิน เพื่อศึกษาความสามารถดูดซับโลหะหนัก คือ Pb (II), Cr (III) และ Cd (II) ถ่านชีวภาพมีประสิทธิภาพใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับ 27%, 21% และ 29% เมื่อเติมถ่านชีวภาพ 2.5 %w/w ผลวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ไผ่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งทำให้ลดการปนเปื้อนโลหะหนักดินได้

2.10.2 Lui และคณะ (2018) ศึกษาการนำกะลามะพร้าวมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสผลิตเป็นถ่านชีวภาพ และปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุน นำถ่านชีวภาพจากกะลามะพร้าวมา 0%, 2.5% และ 5% เติมลงในดินตัวอย่าง จากการทดลองพบว่าปริมาณถ่านชีวภาพที่ 5% สามารถลด Cd, Ni และ Zn ได้ 30.1%, 57.2% และ 12.7% ตามลำดับ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกะลามะพร้าว มีส่วนช่วยในการตรึงโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน และยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและชีวภาพของดินได้อีกด้วย

2.10.3 Karunanayake และคณะ (2017) ได้ศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพจากไม้ดักลาสเฟอร์ และถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ในการดูดซับ Pb^{2+} และ Cd^{2+} ออกจากน้ำ โดยถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดนี้ถูกวิเคราะห์โดยวิธี SEM, EDX, TEM, PZC, XRD การวิเคราะห์ธาตุ การวัดพื้นที่ผิวจากการศึกษาการดูดซับแบบแบทช์ จาก พีเอช 2-7 ความเข้มข้นของตัวดูดซับ ตั้งแต่ 10-250 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ อุณหภูมิ 25, 35, 45 องศาเซลเซียส ถ่านชีวภาพทั้งสองจะดูดซับสารแขวนลอยที่ปนเปื้อนในสารละลาย จากนั้นนำไปกรองและวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมที่ถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดดูดซับได้มีค่าน้อยเมื่อพีเอช ต่ำ และจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอช เพิ่มขึ้น จากทฤษฎีของแลงเมียร์และการจำลองการดูดซับฟรุนดิช สามารถอธิบายได้ว่า ความสามารถในการดูดซับของถ่านชีวภาพจากไม้ดักลาสเฟอร์ ที่พีเอช 5 และ 45 องศาเซลเซียสของตะกั่ว คือ 40 มิลลิกรัมต่อกรัม และแคดเมียม 16 มิลลิกรัมต่อกรัม ความสามารถในการดูดซับของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ที่พีเอช 5 และ 45 องศาเซลเซียสของตะกั่ว คือ 27 มิลลิกรัมต่อกรัม และแคดเมียม 11 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่าถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดมีอัตราการดูดซับสูงและความสามารถในการดูดซับสูง

2.10.4 วัชรพล บุญเกียรติ และคณะ (2560) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและนิกเกิลโดยใช้ถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อการดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับ จลนศาสตร์ อุณหศาสตร์และการนำตัวดูดซับกลับมาใช้อีกครั้ง จากการทดลองพบว่าตัวดูดซับจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ พีเอช 6 เมื่อใช้ตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเติม NaCl, Na_2SO_4 , $Ca(NO_3)_2$, $CaCl_2$ และ Na_2HPO_4 พบว่าเกลือของแคลเซียมมีผลในการขัดขวางการดูดซับมากกว่าเกลือของโซเดียม การดูดซับโลหะทั้งสองชนิดเป็นไปตามไอโซเทอร์มแลงเมียร์ การศึกษาจลนศาสตร์ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทองแดง และนิกเกิลเป็นไปตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง และการแพร่ภายในอนุภาคตามลำดับ การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นไปตามปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนและการคายซับโดยใช้ EDTA จะแย่กว่าการใช้ HNO_3 และ NaNO_3

2.10.5 lee และคณะ (2018) ศึกษาผลของการปรับลดแรงตึงผิวแบบประจุลบที่มีต่อถ่านกัมมันต์ (AC) เพื่อเพิ่มการดูดซับของแอมโมเนียมไอออนในสารละลาย สารลดแรงตึงที่ใช้ คือ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 55 มิลลิกรัม ($\text{NH}_4\text{-N}$) ต่อลิตร และปริมาณของตัวดูดซับเท่ากับ 50 กรัมต่อลิตร ถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมสูงสุด 82% และเมื่อเพิ่มปริมาณ SDS ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมจะเพิ่มขึ้น 5% แต่ถ้าในสารละลายมี Na^+ , K^+ หรือ Ca^{2+} อยู่ร่วมกับสารละลายแอมโมเนียมที่มีความเข้มข้น 55 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมจะลดลง 5% การศึกษารั้้นนี้แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์เมื่อปรับลดแรงตึงผิวด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต สามารถดูดซับแอมโมเนียมไอออนในสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.10.6 เกลียวทอง และคณะ (2560) ศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์จากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS-biochar/ Fe_2O_3) โดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแคดเมียม ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสีย (pH) ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นของน้ำเสีย อุณหภูมิของระบบ ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพและที่ปรับปรุงคุณภาพ และศึกษาค่า Zero point charge นอกจากนี้ยังศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม, จลนศาสตร์การดูดซับ และอุณหพลศาสตร์การดูดซับ จากการทดลองพบว่าค่า Zero point charge ของตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพคือ 7.40 และ 3.00 ตามลำดับ การดูดซับสูงสุดของถ่านผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเมื่อน้ำเสียมีค่า pH เท่ากับ 8 และมีค่าร้อยละการดูดซับแคดเมียมสูงสุดที่เวลา 5 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมจะลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ และอุณหภูมิในการบำบัด ค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมจะลดลง ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและผ่านการปรับปรุง คุณภาพสอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบ Freundlich และจลนศาสตร์การดูดซับพบว่าสอดคล้อง กับแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) รุ่น 1455 VP ยี่ห้อ Leo บริษัท Science Engineering International Co.,LTD. ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR) รุ่น spectrum GX ยี่ห้อ Perkin Elmer บริษัท Perkin Elmer Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer : XRD) รุ่น D8 Advance ยี่ห้อ Bruker บริษัท Bruker Biospin AG ประเทศไทย
4. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer : AAS) รุ่น AAS-200 New บริษัท Perkin Elmer Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องบด ยี่ห้อ Bosco บริษัท Bosco Engineering ประเทศไทย
6. เครื่องกรองลดความดัน (Filter Pressure) รุ่น Aspirator A-35 ยี่ห้อ EYEL ประเทศญี่ปุ่น
7. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น 287 pH lab ยี่ห้อ Metrohm ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
8. ตู้อบสาร (Oven) รุ่น UM 400 ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมนี
9. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด รุ่น MS204TS ยี่ห้อ Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
10. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) รุ่น 14H ยี่ห้อ NEY ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
11. ตะแกรงร่อน (Sieved) 35 mesh มาตรฐาน ASTM 11 ประเทศอังกฤษ
12. กระดาษกรอง (Filter Paper) ยี่ห้อ Whatman เบอร์ 42
13. กรวยกรองบุชเนอร์ (Buncher Funnel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่
14. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ยี่ห้อ DURAN ประเทศเยอรมนีไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 สารเคมี

1. เฟอริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (Ferric chloride hexahydrate : $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ACS Certified Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
2. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate (SDS) : $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
3. แคดเมียมไนเตรต เตตระไฮเดรต (Cadmium nitrate tetrahydrate : $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) AR Grade บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
4. กรดไดเอทิลีนไตรเอมีน เพนตะอะซิติก (Diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA) : $\text{C}_{14}\text{H}_{23}\text{N}_3\text{O}_{10}$) GR Grade บริษัท ACROS ORGANICS ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride : CaCl_2) ACS Certified Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
6. กรดเอทิลีนไดเอมีน เตตระอะซิติก (Ethylene diamine tetra-acetic acid (EDTA) : $\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_2\text{COOH})_2$) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
7. แอมโมเนียมอะซิเตต (Ammonium acetate : $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{CO}_2$) ACS Certified Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
8. แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium chloride : MgCl_2) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
9. กรดอะซิติก (Acetic acid : CH_3COOH) GR Grade บริษัท DUKSAN ประเทศเกาหลีใต้
10. ไฮดรอกซิลามีน ไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxylamine hydrochloride : $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$) ACS Certified Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
11. กรดไนตริก (Nitric acid : HNO_3) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
12. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide : H_2O_2) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
13. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid : HCl) AR Grade บริษัท LobaChemie ประเทศอินเดีย
14. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide : NaOH) ACS Certified Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการดำเนินงาน

3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ (วิธีปรับปรุงมาจากการทดลองของ Han และคณะ (2016), Song และคณะ (2016), Zhang และคณะ (2015))

1. ล้างผักตบชวาด้วยน้ำ เพื่อทำความสะอาด ตัด หรือ หั่น เป็นชิ้นเล็ก แล้วนำไปตากแดดให้แห้ง
2. ผักตบชวาที่ตากแห้งแล้วมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
3. บดผักตบชวาให้ละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 mesh อบต่อที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. แช่ผักตบชวาในสารละลาย FeCl_3 2.5 M ในอัตราส่วน 10 กรัมต่อปริมาตร 80 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. นำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. จากนั้นนำตัวดูดซับที่มีสภาพแม่เหล็กปริมาณ 20 กรัม แช่ลงในสารละลาย SDS 0.01 M (2.9 กรัมต่อลิตร) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส และเขย่าเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
7. กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอน ล้างด้วยน้ำ 3 ครั้ง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง

3.2.2 การเก็บ และการเตรียมตัวอย่างดิน

1. เก็บตัวอย่างดินที่ จ.ระยอง ด้วยวิธี Equal interval on diagonal line ตั้งแต่ผิวดินจนถึงความลึก 30 เซนติเมตร
2. นำตัวอย่างที่เก็บแต่ละจุดมาผสมรวมกัน เลือกเศษหิน เศษหญ้าขนาดใหญ่ออก แล้วนำไปตากแดดจนแห้ง
3. บด และร่อนดิน ผ่านตะแกรงขนาด 10 mesh อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น
4. ชั่ง $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ มา 274.42 มิลลิกรัม ละลายน้ำและผสมในดินที่ผ่านการอบ 2 กิโลกรัม (ระดับความเข้มข้นแคดเมียมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) ตั้งทิ้งไว้ 3 สัปดาห์
5. นำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนักในดิน ด้วยเครื่อง Atomic absorption-spectrophotometer (AAS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของวัสดุดูดซับและดิน

วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)

นำถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ และปรับปรุงคุณภาพไปบดให้เป็นผงละเอียดขนาด 35 mesh ลักษณะทางกายภาพภายในถ่านชีวภาพ สามารถแสดงได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy ; SEM) ด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่างๆในตัวดูดซับโดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy : FTIR)

1. บดตัวอย่างให้ละเอียด
2. ฉีดอะซิโตนลงบนที่ขูดที่แท่นแม่พิมพ์และแม่พิมพ์ทิ้งไว้ให้แห้ง
3. ใช้ช้อนตักสารสแตนด์เลสตัดตัวอย่างใส่ลงในแม่พิมพ์
4. นำตัวอย่างเครื่อง FTIR และทำการวิเคราะห์

วิเคราะห์โครงสร้างของผลึกโดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer : XRD)

1. นำตัวอย่างดินบดละเอียดใส่ในแท่นบรรจุตัวอย่าง
2. ใช้แท่นโลหะกดตัวอย่างให้แน่นติดกับแท่นบรรจุ เปลี่ยนตัวอย่างส่วนเกินออก
3. นำแท่นบรรจุตัวอย่างไปวางที่แท่นวางตัวอย่างของเครื่อง XRD และทำการวิเคราะห์

ศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{pzc}) (Evangelou, 1998)

1. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปรับ pH ของสารละลายเป็น 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
3. เมื่อปรับ pH ได้ตามค่าที่ต้องการ จึงใส่ตัวดูดซับ 0.1000 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ปิดฝาขวดให้สนิท
4. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัดค่า pH หลังจากเขย่าอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำค่า pH ที่ได้จากการทดลองไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (pH_i) และความเป็นกรด-เบสสุดท้าย (pH_f) โดยประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จากเส้นความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น และความเป็นกรด-เบสสุดท้ายตัดกับเส้นทแยงมุม
6. ทำการทดลองข้อ 1-5 ซ้ำ 3 ครั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาคูณสมบัติอื่นๆ ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของวัสดุดูดซับและดิน

พารามิเตอร์	วิเคราะห์ / เครื่องมือ	ชื่อมาตรฐาน	แหล่งข้อมูลที่ค้นได้
Soil texture (เฉพาะดิน)	Hydrometer method	ASTM D7928 - 17	https://www.astm.org/Standards/D7928.htm สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].
Moisture	Dry in an oven and calculating the mass loss	ASTM D2216 - 19	https://www.astm.org/Standards/D2216.htm สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].
pH	pH meter (อัตราส่วนดิน : น้ำ เท่ากับ 1 : 100)	ASTM D4972 - 18	https://www.astm.org/Standards/D4972.htm สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].
Electrical conductivity	conductivity meter	ASTM D1125 - 14	https://www.astm.org/Standards/D1125.htm สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].
Cation exchange capacity	Ammonium acetate method	SW-846 method 9080 US.EPA 1986	https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/9080.pdf สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].
Loss ignition	Burning at 550 °C and calculating the mass loss	ASTM D7348 - 13	https://www.astm.org/Standards/D7348.htm สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].
Organic matter	Walkley-Black titrations	ASTM D2974 - 14	https://www.astm.org/Standards/D2974.htm สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].
Total nitrogen	Kjeldahl method	ASTM D3590 - 17	https://www.astm.org/Standards/D3590.htm สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].

Nitrate ion	Brucine method	method 352.1 US.EPA 1986	https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/method_352-1_1971.pdf สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].
Chloride ion	Argentometric method	ASTM D512 - 12	https://www.astm.org/Standards/D512 สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].
Total phosphate	Molybdovanadophosphate method	APHA Method 4500-P	https://betastatic.fishersci.com/content/dam/fishersci/en_US/documents/programs/scientific/technical-documents/white-papers/apha-phosphates-standard-methods-white-paper.pdf สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].
Sulfate ion	Turbidimetric method	SW-846 method 9038 US.EPA 1986	https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/9038.pdf สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].
Aluminium ion	Colorimetric method	ASTM D857 - 17	https://www.astm.org/Standards/D857.htm สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].
Major element (Ca ²⁺ ,Mg ²⁺ ,k ⁺) and Total heavy metal (Cd ²⁺)	Acid digestion/Atomic absorption spectrophotometer (AAS)	SW-846 method 3050b US.EPA 1996	https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf สืบค้นเมื่อ [วันที่ 1 สิงหาคม 2561].

หมายเหตุ : วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้น แสดงในภาคผนวก ก

3.2.4 วิเคราะห์ความสามารถในการสะเทิน (Neutralization capability) ของถ่านชีวภาพ สภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต ด้วยวิธีการไทเทรต (Venegas และคณะ, 2015)

1. ชั่งตัวอย่างถ่านชีวภาพ 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อ
นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ใช้กระดาษกรอง Whatman
เบอร์ 42
4. นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่า pH โดยบันทึกค่านี้เป็นค่า pH เริ่มต้น
5. แบ่งสารละลายออกเป็นสองส่วน ส่วนละ 50 มิลลิลิตร
6. ส่วนที่ 1 นำไปเติมกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยใช้ไมโครปิเปต ครั้งละ 10 ไมโครลิตร
เขย่าให้เข้ากันเป็นเวลา 20 นาที และวัดค่า pH พร้อมบันทึกค่า pH ที่ได้ และปริมาตร
สารละลายที่ใช้
7. ทำซ้ำ ข้อ 6 จนสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 2
8. ส่วนที่ 2 นำไปเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ โดยใช้ไมโครปิเปต ครั้งละ 10
ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากันเป็นเวลา 20 นาที และวัดค่า pH พร้อมบันทึกค่า pH ที่ได้ และ
ปริมาตรสารละลายที่ใช้
9. ทำซ้ำ ข้อ 7 จนสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 12
10. ดำเนินการทดลองข้อ 1-9 ซ้ำ 3 ครั้ง
11. นำค่า pH ที่บันทึกไว้ ไปใช้ในการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH และปริมาตร
กรดเบสที่ใช้ (หน่วย meq/g) เพื่อนำมาหาค่าความสามารถในการสะเทินกรด (Acid
neutralization capability ; ANC)

3.2.5 วิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก โดยวิธี Acid digestion (กรมทรัพยากร ธรณี, 2546)

1. ชั่งตัวอย่างดินและถ่านชีวภาพ 1 กรัม ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เติมสารละลาย
conc.HNO₃ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ปิดด้วยกระจกนาฬิกา
2. ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95±5 องศาเซลเซียส (Reflux) โดยไม่ให้สารละลายเดือดเป็นเวลา
15 นาที ยกทิ้งไว้ให้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เติมน้ำประปาจากไอออน 2 มิลลิลิตร เติมน้ำ 30% Hydrogen peroxide ทีละ 1 มิลลิลิตร จนกว่าจะไม่เกิดฟอง (ไม่เกิน 10 มิลลิลิตร)
4. Reflux จนเหลือสารละลาย 5 มิลลิลิตรหรือประมาณ 2 ชั่วโมง ยกตั้งไว้ให้เย็น
5. เติมน้ำปราศจากไอออน 2 มิลลิลิตร เติมน้ำ 30% Hydrogen peroxide ทีละ 1 มิลลิลิตร จนกว่าจะไม่เกิดฟอง (ไม่เกิน 10 มิลลิลิตร)
6. Reflux จนเหลือสารละลาย 5 มิลลิลิตรหรือประมาณ 2 ชั่วโมง ยกตั้งไว้ให้เย็น
7. เติมน้ำปราศจากไอออน 2 มิลลิลิตร เติมน้ำ 30% Hydrogen peroxide ทีละ 1 มิลลิลิตร จนกว่าจะไม่เกิดฟอง (ไม่เกิน 10 มิลลิลิตร)
8. กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร
9. หาคความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS)

3.2.6 ศึกษาประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียม

1. นำดินที่ได้จากการวัด AAS มาผสมกับถ่านชีวภาพปริมาณ 0% (ชุดควบคุม), 0.5%, 1%, 2% และ 5%
2. คลุกเคล้าให้เข้ากันพร้อมเติมน้ำกลั่นจนอิ่มตัวด้วยน้ำ ปรับเสถียรโดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 2 สัปดาห์ (ระหว่างที่ปรับเสถียรทำการคลุกเคล้าอย่างสม่ำเสมอ)
3. เมื่อครบ 2 สัปดาห์ นำไปการศึกษาศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพของโลหะหนัก โดยการสกัดดินด้วยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนักโดยใช้ AAS และศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนัก โดยการสกัดดินด้วยกระบวนการสกัดตามลำดับ 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction)

3.2.7 กระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction)

เนื่องจากกระบวนการปรับเสถียรโลหะหนักในดินเป็นกลไกที่มีความซับซ้อน และเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่า รูปฟอร์มทางเคมีของโลหะหนักในดินมีความสัมพันธ์กับสิ่งมีชีวิต ในลักษณะเดียวกัน จึงมีการคำนึงถึงศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพเพื่อการประเมินมลพิษในดิน (Manouchehri และคณะ, 2014) ในการศึกษาจึงใช้วิธีการสกัดแบบ Single step extraction เพื่อใช้ประเมินผลด้านสิ่งแวดล้อมของการปรับเสถียรในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม โดยสารสกัดที่ใช้ ได้แก่ 0.05 M Ethylenediamine-tetraacetic acid (EDTA), 0.005 M Diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA), 0.01 M Calcium chloride (CaCl₂) และ 1 M Ammonium acetate (NH₄OAc) ซึ่งสารละลายที่ใช้ในการสกัด, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละชนิดจะใช้ในการประเมิน ศักยภาพของโลหะหนักในดินกับการเข้าสู่ชีวภาพในด้านที่แตกต่างกันดังนี้ สารละลาย 0.005 M DTPA, 0.01 M CaCl_2 เพื่อประเมิน ศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (Phytoavailability) ของโลหะหนักในดิน สารละลาย 0.05 M EDTA ใช้เพื่อประเมินศักยภาพในการเคลื่อนที่ (Mobility) และ สารละลาย 1 M NH_4OAc เพื่อประเมินศักยภาพ ในการแลกเปลี่ยน (Exchangeability) (Tica และคณะ, 2011; วีรภัทร์, 2557)

การสกัดด้วยสารละลาย DTPA ความเข้มข้น 0.005 M

1. ชั่งตัวอย่างดินผสม 10 กรัม ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร
2. เติมสารละลาย DTPA ความเข้มข้น 0.005 M ปริมาตร 20 มิลลิลิตร
3. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
4. ทำการกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วเก็บสารละลายส่วนใส
5. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียม ในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ดำเนินการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

การสกัดด้วยสารละลาย CaCl_2 ความเข้มข้น 0.01 M

1. ชั่งตัวอย่างดินผสม 5 กรัม ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร
2. เติมสารละลาย CaCl_2 ความเข้มข้น 0.01 M ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่ pH 5.30-6.0
3. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 3 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
4. ทำการกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วเก็บสารละลายส่วนใส
5. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียม ในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ดำเนินการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

การสกัดด้วยสารละลาย EDTA ความเข้มข้น 0.05 M

1. ตัวอย่างดินผสม 0.8 กรัม ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร
2. เติมสารละลาย EDTA ความเข้มข้น 0.05 M ที่ pH 7.50 ± 0.05 ปริมาตร 80 มิลลิลิตร
3. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 48 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วเก็บสารละลายส่วนใส
5. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียม ในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ดำเนินการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

การสกัดด้วยสารละลาย NH_4OAc ความเข้มข้น 1 M

1. ชั่งตัวอย่างดินผสม 5 กรัม ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร
2. เติมสารละลาย NH_4OAc ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่ pH 7
3. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 1 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที
4. ทำการกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วเก็บสารละลายส่วนใส
5. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียม ในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ดำเนินการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

3.2.8 กระบวนการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) (Tessier และคณะ, 1979)

การสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียม เพื่อจำแนกรูปฟอร์มของโลหะหนักในตัวอย่างดิน และใช้ประเมินศักยภาพการเคลื่อนที่

ส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ (Water soluble fraction)

1. ชั่งตัวอย่างดินผสมที่แห้ง 1 กรัม ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 10 mesh ใส่ลงในขวดรูปชมพู่
2. เติมน้ำปราศจากไอออน 15 มิลลิลิตร และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
3. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
4. ทำการเก็บส่วนใส และปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน
5. ทำการล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่า และนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อทำให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทำการทิ้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดส่วนที่ 2 ต่อไป

ส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction)

1. จากตัวอย่างดินที่เหลือในส่วนที่ 1 นำมาสกัดด้วยสารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ที่ pH 7
2. เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
3. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
4. ทำการเก็บส่วนใสและปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน
5. ทำการล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่าและนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น
6. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดส่วนที่ 3 ต่อไป

ส่วนที่ 3 รูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอเนต (Carbonate bound fraction)

1. จากตัวอย่างดินที่เหลือในส่วนที่ 2 นำมาสกัดด้วยสารละลาย NH_4OAc ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 8 มิลลิลิตร
2. เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
3. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
4. ทำการเก็บส่วนใส ปรับค่า pH เท่ากับ 5 ด้วยกรดอะซิติก และปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน
5. จากนั้นล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่าและนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น
6. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดส่วนที่ 4 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 4 รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ (Fe-Mn oxide bound fraction)

1. 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
2. เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ 96 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
3. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เก็บส่วนใส และปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน
4. จากนั้นล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร เขย่าและนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น
5. จากนั้นปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ทั้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดส่วนที่ 5 ต่อไป

ส่วนที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic bound fraction)

1. 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)
2. เขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
3. จากนั้นเติมสารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.02 M ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 30% ปริมาตร 5 มิลลิลิตร (ปรับค่า pH เท่ากับ 2 ด้วย HNO_3)
4. เขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที จากนั้นตั้งให้เย็น
5. สกัดด้วยสารละลาย NH_4OAc ความเข้มข้น 3.2 M ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตร 20 มิลลิลิตร
6. เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
7. ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เก็บส่วนใสและปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ล้างดินโดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร เขย่า และนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น
9. จากนั้นปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ที่ตั้งสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดส่วนที่ 6 ต่อไป

ส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ (Residual fraction)

1. จากตัวอย่างดินที่เหลือในส่วนที่ 5 นำมาสกัดโดยการวิเคราะห์ด้วย Acid digestion
2. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
3. เก็บส่วนใสและปรับปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน
6. จากนั้นวิเคราะห์หารูปฟอร์มของแคดเมียมในสารละลายที่สกัดได้จากดินในแต่ละส่วน ตัวอย่างด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS)



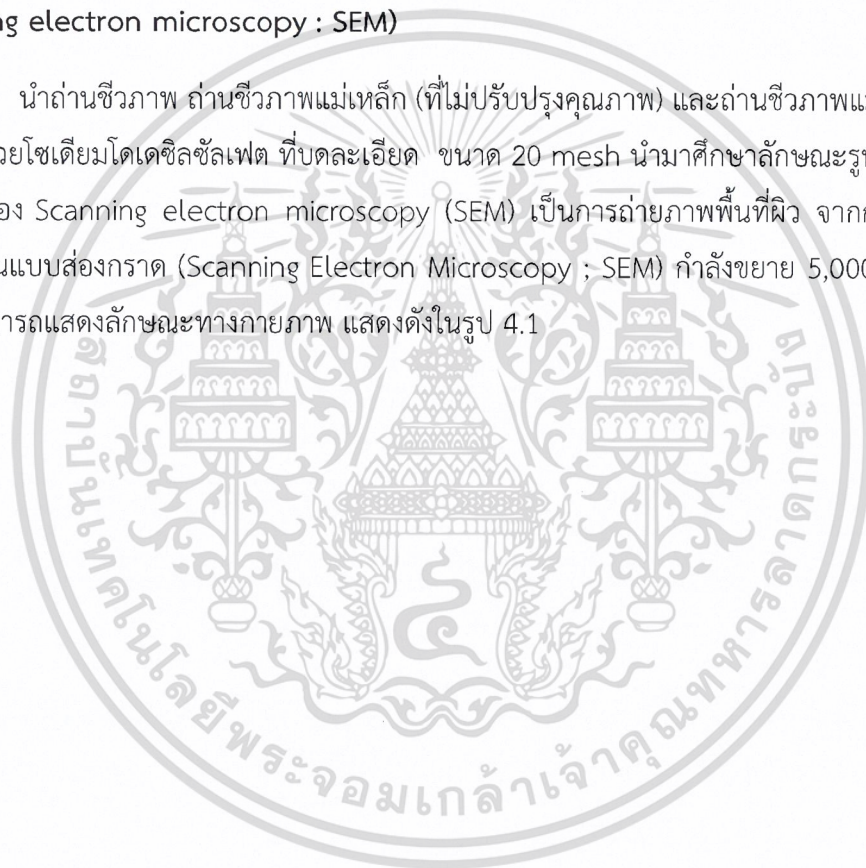
บทที่ 4

ผลการวิจัย และอภิปราย

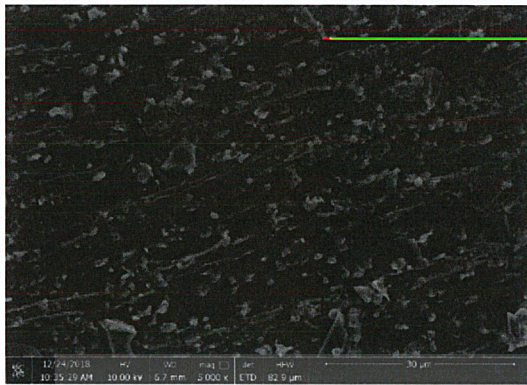
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของวัสดุดูดซับและดิน

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM)

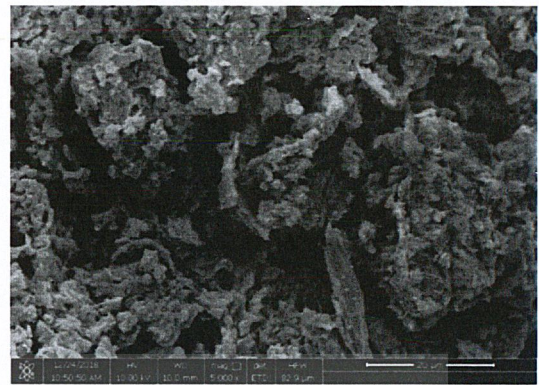
นำถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ) และถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเซลซัลเฟต ที่บดละเอียด ขนาด 20 mesh นำมาศึกษาลักษณะรูพรุน และพื้นผิว โดยใช้เครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) เป็นการถ่ายภาพพื้นที่ผิว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy ; SEM) กำลังขยาย 5,000 เท่า ภาพถ่ายพื้นผิวสามารถแสดงลักษณะทางกายภาพ แสดงดังในรูป 4.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

(a) ถ่านชีวภาพ (BC)

(b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (Fe-BC)

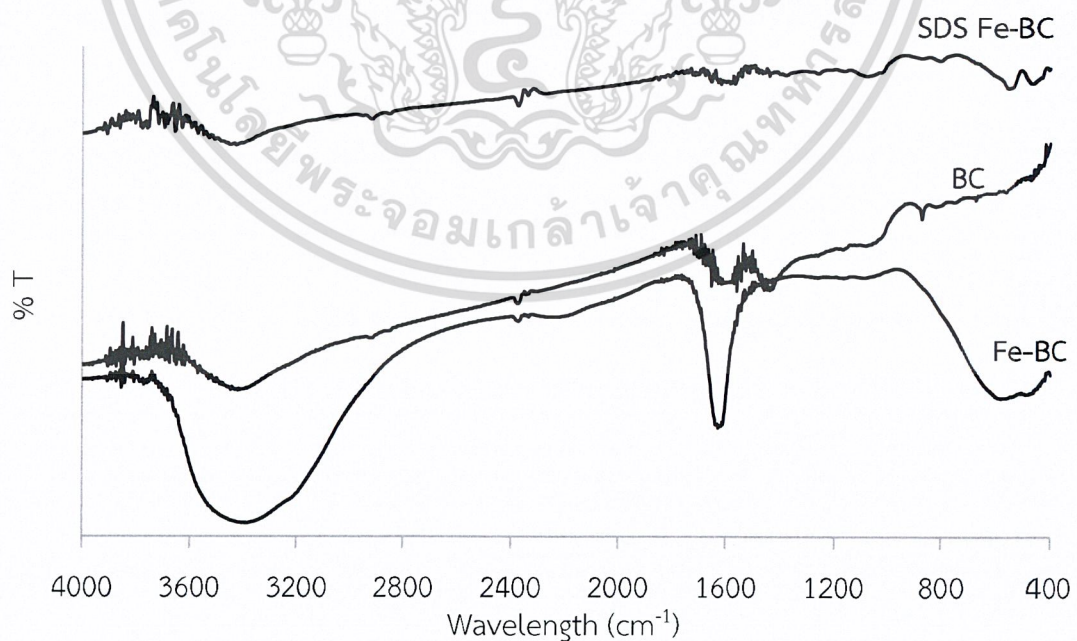
(c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS Fe-BC)

จากรูปที่ 4.1 (a) ถ่านชีวภาพ (BC) มีลักษณะพื้นผิวขรุขระอย่างสม่ำเสมอ ความหนาแน่นสูง ปรากฏรูพรุนน้อย และไม่ชัดเจน รูปที่ 4.1 (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (Fe-BC) มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ รูพรุนมากกว่า BC เพราะว่า Fe-BC มีลักษณะของผลึกเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เคลือบอยู่บนพื้นผิว หรือ แทรกอยู่ในรูพรุน ทำให้มีความขรุขระมากขึ้น เนื่องจากการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ก่อนผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง สามารถทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้มีรูพรุนเพิ่มมากกว่าจาก BC และรูปที่ 4.1 (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS Fe-BC) มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ รูพรุนมากกว่า Fe-BC เพราะว่า SDS Fe-BC มีลักษณะของผลึกเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เคลือบอยู่บนพื้นผิว หรือ แทรกอยู่ในรูพรุน ทำให้มีความขรุขระมากขึ้น เนื่องจากการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ก่อนผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง สามารถทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้มีรูพรุนเพิ่มมากกว่าจาก BC และรูปที่ 4.1 (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS Fe-BC) มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ รูพรุนมากกว่า Fe-BC เพราะว่า SDS Fe-BC มีลักษณะของผลึกเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เคลือบอยู่บนพื้นผิว หรือ แทรกอยู่ในรูพรุน ทำให้มีความขรุขระมากขึ้น เนื่องจากการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ก่อนผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง สามารถทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้มีรูพรุนเพิ่มมากกว่าจาก BC

แม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS Fe-BC) มีลักษณะพื้นผิวบางส่วนที่ขรุขระ และมีบางส่วนที่เรียบ รูพรุนมีจำนวนมากและขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการใช้โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบในการดัดแปลง หรือปรับปรุงคุณภาพ Fe-BC โดย SDS จะทำหน้าที่ในการชะเฟอร์ริกคลอไรด์ส่วนเกินออกจากรูพรุน หรือพื้นผิว ส่งผลให้มีลักษณะดังกล่าว และยังมีมีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มมากขึ้น โดย SDS จะเพิ่มประจุลบที่ผิวของ Fe-BC ทำให้แรงผลักระหว่างประจุบวกของเฟอร์ริกออกไซด์ และประจุบวกของโลหะหนักลดลง (Shariati และคณะ, 2011)

4.1.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวดูดซับโดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy : FTIR)

นำถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ) และถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ที่บดละเอียดขนาด 20 mesh นำมาศึกษาหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบสารโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ได้เป็นกราฟอินฟราเรดสเปกตรัม แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการส่องผ่าน (%T) กับเลขคลื่น (Wavenumber) แสดงดังในรูป 4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัม** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

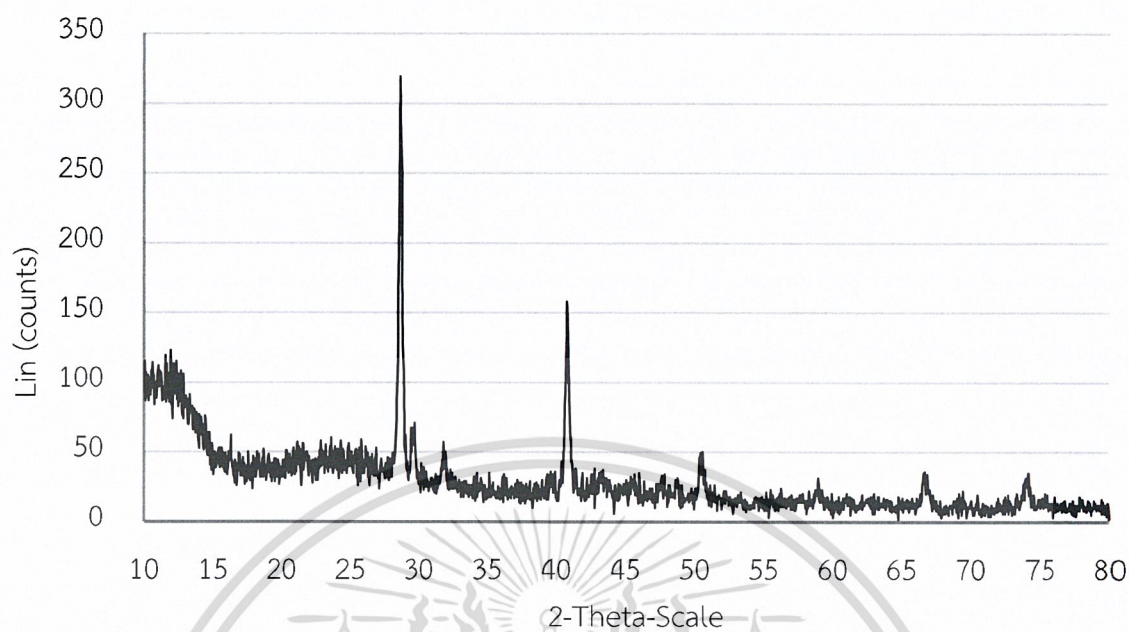
ตารางที่ 4.1 ความยาวคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

Wavenumber (cm ⁻¹)			หมู่ฟังก์ชัน
BC	Fe-BC	SDS Fe-BC	
3415.93	3417.86	3431.36	O-H
1581.63	1624.06	1656.85	C-O (cellulose)
2926.01	-	2922.16	C-H
-	561.29	553.57	Fe-O
-	-	1082.07	S=O (stretch)

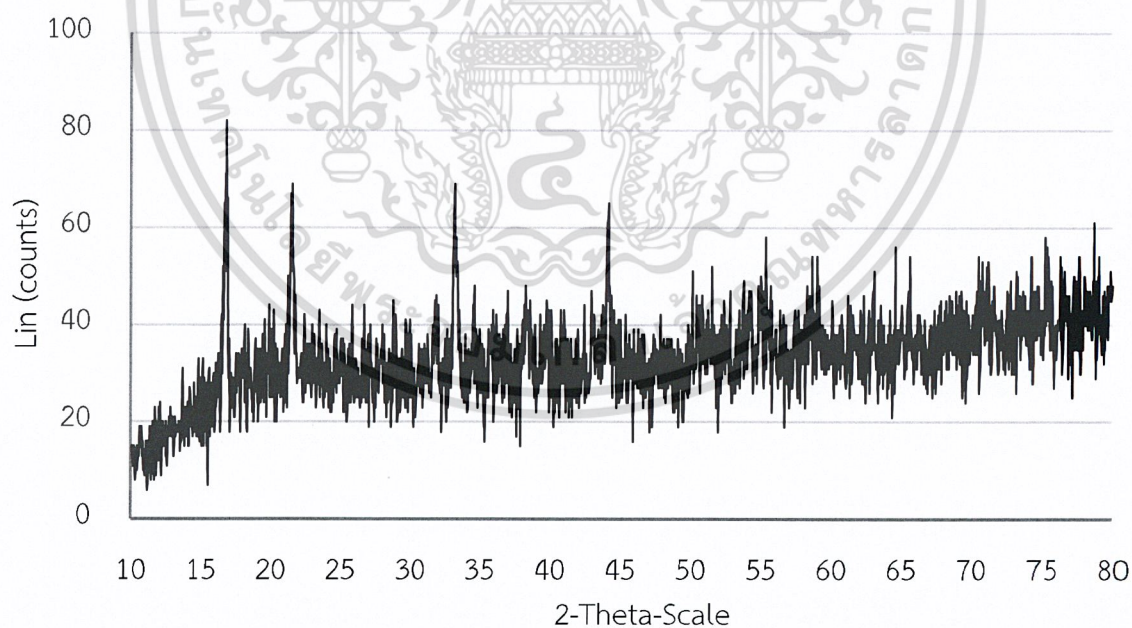
จากตารางที่ 4.1 พบว่าตัวอย่างทั้งสามชนิดพบพีคที่เลขคลื่นช่วง 3,600-3,400 และ 1,500-1,650 cm⁻¹ เป็นหมู่ฟังก์ชัน O-H และ C-O ตามลำดับ บ่งบอกว่า ถ่านชีวภาพทั้งสามชนิดมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เนื่องจากการเผาแบบไพโรไลซิส ทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสยังคงเหลืออยู่ เมื่อพิจารณาพีคของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (Fe-BC) และถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS Fe-BC) พบพีคที่เลขคลื่นช่วง 500 cm⁻¹ เป็นหมู่ฟังก์ชัน Fe-O แสดงว่าในโครงสร้างของตัวอย่างทั้งสองมีเฟอริกออกไซด์เป็นองค์ประกอบ และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของ SDS Fe-BC พบว่ามีเลขคลื่นช่วง 1,000 cm⁻¹ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน S=O ที่มาจากโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

4.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกโดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffractometer : XRD)

นำถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ) และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ที่บดละเอียด ขนาด 20 mesh มาศึกษาโครงสร้างของผลึกโดยวิธี X-ray diffraction (XRD) เป็นการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ได้กราฟดังแสดงในรูปต่อไปนี้

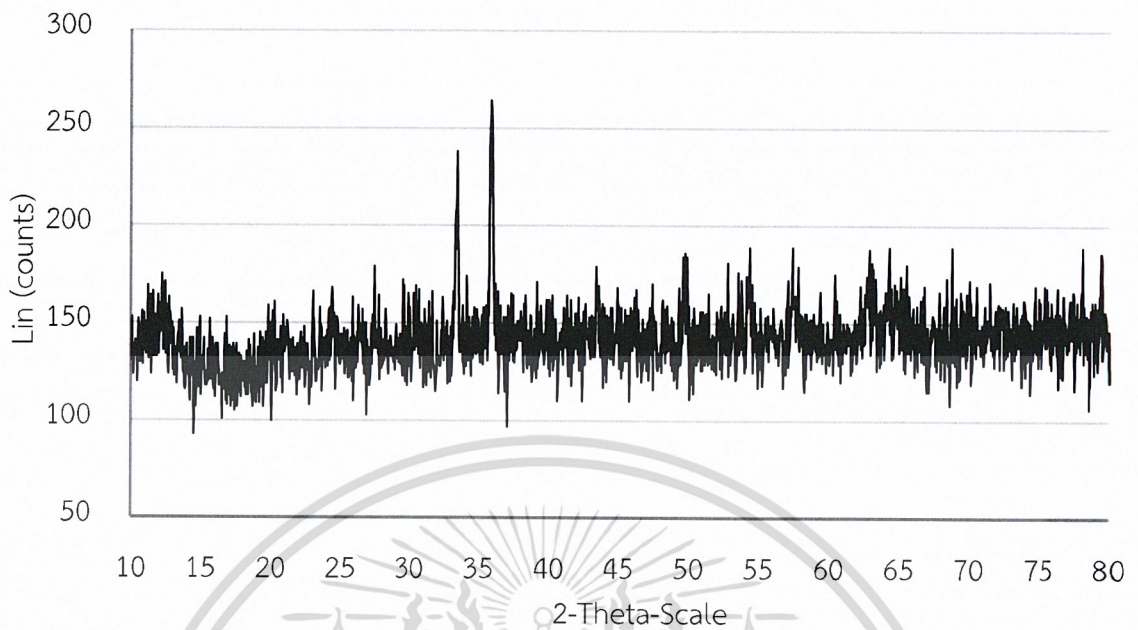


รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพ (BC)



รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (Fe-BC)

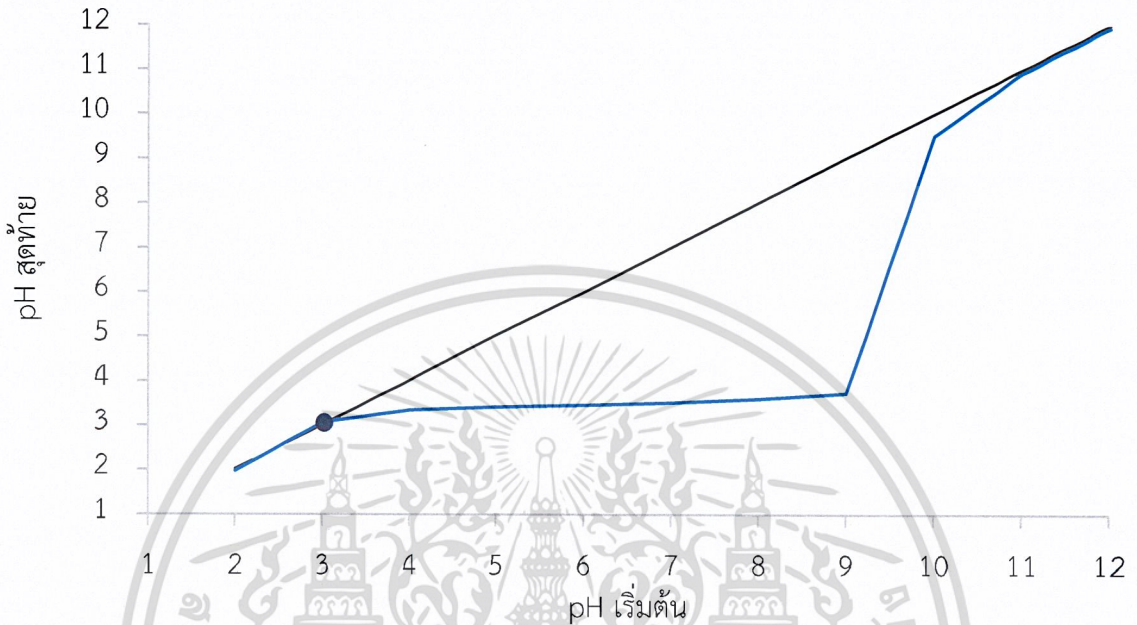
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมเดซิลซัลเฟต (SDS Fe-BC)

จากรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD) เมื่อนำสัญญาณที่วัดได้มาเทียบกับสัญญาณมาตรฐาน พบว่ารูปที่ 4.3 มีลักษณะของสัญญาณที่ไม่ตรงกับธาตุและสารประกอบใดๆ รูปที่ 4.4 และ 4.5 มีลักษณะสัญญาณใกล้เคียงกับเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แสดงว่าภายในโครงสร้างของ Fe-BC และ SDS Fe-BC มีเฟอร์ริกออกไซด์เป็นองค์ประกอบ และยังสามารถคล้องกับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่างๆ โดยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) อีกด้วย และจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบ Fe-BC และ SDS Fe-BC มีโครงสร้างแบบ Hexagonal ซึ่งเป็นแบบโครงสร้างของเฮลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (เป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์พืช) ดังนั้นแสดงว่า Fe-BC และ SDS Fe-BC มีโครงสร้างแบบ Hexagonal และมีเหล็กเป็นองค์ประกอบภายในโครงสร้าง หรือสร้างพันธะกับ Hexagonal (Mian และคณะ, 2018; Wang และคณะ, 2019; Yang และคณะ, 2016)

4.1.4 ผลการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{pzc})



รูปที่ 4.6 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

จากรูปที่ 4.6 ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของ SDS Fe-BC คือค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 3.00 สามารถอธิบายได้ว่า ที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 3.00 ประจุที่ผิวของ SDS Fe-BC มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายที่มีค่าน้อยกว่า 3.00 ทำให้ประจุลบที่ผิวของ SDS Fe-BC ลดลง จนมีค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ และเริ่มเปลี่ยนเป็นประจุบวก สามารถดูดซับไอออนโลหะที่มีประจุบวกได้ไม่ดี หรือการดูดซับเกิดขึ้นได้เพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่ามากกว่า 3.00 ประจุที่ผิวของ SDS Fe-BC แสดงค่าเป็นลบ จึงสามารถดูดซับไอออนโลหะที่มีประจุบวกได้เป็นอย่างดี จากกราฟค่าความเป็นกรด-เบสคงที่ตั้งแต่ 3.00-9.00 แสดงว่าประจุที่ผิวของ SDS Fe-BC จะคงที่แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบส และเมื่อพิจารณาที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายที่มีค่ามากกว่า 9 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบสอย่างรวดเร็ว ค่าประจุที่ผิวของ SDS Fe-BC มีค่าเป็นลบสูง แต่เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-เบสมากกว่า 9 จะส่งผลให้โลหะหนักบางชนิด รวมถึงแคดเมียมเกิดการตกตะกอน ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง ดังนั้น SDS Fe-BC สามารถดูดซับไอออนโลหะหนักที่มีประจุบวกได้ดีในช่วงความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 3.00-9.00 มอนูญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้น

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้น ด้วยวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดิน และของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต

พารามิเตอร์	ชนิดของตัวอย่าง	
	ดินตัวอย่าง	SDS Fe-BC
Soil texture (เฉพาะดิน)	ดินร่วนเหนียว	-
Moisture (%)	21%	-
pH	7.77	3.67
Electrical conductivity (mS cm ⁻¹)	6.53	10.02
Cation exchange capacity (cmol Kg ⁻¹)	8.07	4.00
Loss ignition (%Lol)	0.38	3.19
Organic matter (%OM)	3.54	12.97
Total nitrogen (%TKN)	73.85	11.64
Nitrate ion (mg L ⁻¹)	10.76	14.07
Chloride ion (mg L ⁻¹)	2.7132	6.9767
Total phosphate (mg Kg ⁻¹)	12.51	17.09
Sulfate ion (mg L ⁻¹)	45.28	4.7
Aluminium ion (mg Kg ⁻¹)	ND	ND
Major element (mg Kg ⁻¹)		
Ca ²⁺	0.878	0.41
Mg ²⁺	80	15.8
K ⁺	658	14.3
Cd ²⁺	0.0845	0.059

หมายเหตุ : 1. ND (NOT Detected) = วิเคราะห์ไม่พบ

2. ผลการวิเคราะห์ทางเคมี ของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต แสดงในภาคผนวก ข

3. เกณฑ์มาตรฐานต่าง ๆ ในดิน แสดงในภาคผนวก ค ลักษณะเนื้อดิน (Soil texture)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเนื้อดิน (Soil texture)

เป็นการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคดิน โดยการหาสัดส่วนของกลุ่มขนาดอนุภาคดินเหนียว (Clay) กลุ่มขนาดอนุภาคทรายแป้ง (Silt) และกลุ่มขนาดอนุภาคทราย (Sand) จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น พบว่า ดินมีร้อยละของ Sand, Silt และ Clay เท่ากับ 72.50, 5.00 และ 22.50 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบอัตราส่วนร้อยละกับไดอะแกรมสามเหลี่ยมแฉงประเภทเนื้อดินตาม ระบบของกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา พบว่าจัดอยู่ในเนื้อดินประเภทดินเหนียวร่วนปนทราย (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

ความชื้น (Moisture)

ในทางปฐพีวิทยากระบวนการผุพังและกระบวนการเกิดชั้นดิน รวมทั้งการใช้ที่ดินในด้านอื่น นอกเหนือจากการเกษตรส่วนใหญ่ ล้วนแล้วแต่มีน้ำเข้าไปเกี่ยวข้องเป็นปัจจัยสำคัญ จากการวิเคราะห์พบว่า ตัวอย่างดินมีความชื้นร้อยละ 21 ± 0.07 โดยทั่วไปดินเนื้อละเอียดจะมีความจุน้ำได้มากกว่าดินเนื้อหยาบ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

ค่าความเป็นกรด-เบสในดิน (pH)

ค่าความเป็นกรด-เบสของดิน เป็นดัชนีหนึ่งที่ใช้มากที่สุดในการตรวจวัดคุณสมบัติทางเคมีของดิน เนื่องจากค่าความเป็นกรด-เบสของดินสามารถใช้ในการทำนายคุณสมบัติทางเคมีอื่นๆ ของดิน เป็นดัชนีที่ใช้ชี้วัดสถานะของธาตุต่าง ๆ ในดิน (พัชรี, 2552) จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าความเป็นกรด-เบสเฉลี่ยของตัวอย่างดิน คือ 7.77 ± 0.36 ซึ่งจัดระดับความรุนแรงของความเป็นกรด-เบสของดินอยู่ใน ระดับต่างปานกลาง (Moderately alkaline : pH 7.4-7.8)

ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)

ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำหรือสารละลายดินใช้ในทางปฐพีศาสตร์เป็นดัชนีที่บ่งบอกปริมาณเกลือที่ละลาย โดยหากมีปริมาณเกลือสูงจะส่งผลต่อการดูดใช้น้ำของราก จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวอย่างดิน คือ 6.53 ± 0.32 ซึ่งจัดระดับความเค็มอยู่ใน ระดับเค็มปานกลาง (ค่า 4-8 dS m⁻¹) โดยอาจมีผลกระทบต่อพืชหลายชนิด (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity)

ดินทั่วไปมีประจุสุทธิเป็นลบ ทำให้ดินสามารถดูดซับประจุตรงข้าม ซึ่งได้แก่ ประจุบวกต่างๆ ไว้รอบพื้นผิวอนุภาคด้วยจำนวนสมมูลที่เท่ากัน ประจุบวกที่ถูกดูดซับนี้สามารถแลกเปลี่ยนที่กับประจุบวกอื่น ๆ ได้ (พัชรี, 2552) จากการวิเคราะห์ พบว่าตัวอย่างดินมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ $8.07 \pm 0.46 \text{ cmol kg}^{-1}$ ซึ่งจัดอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ (ค่า CEC : 5.0-10.0) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) ซึ่งดินที่มี CEC สูงจะมีความสามารถในการกักเก็บประจุบวกได้มากกว่า รวมทั้งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของดิน เช่น ค่าความเป็นกรดต่างของดินตลอดจนมีความสามารถในการต้านทานการชะล้างได้ดีกว่าดินที่มี CEC ต่ำ ค่า CEC ของดินได้รับอิทธิพลจากชนิดและปริมาณแร่ดินเหนียว ปริมาณอินทรีย์วัตถุตลอดจน ค่าความเป็นกรดต่างของดิน อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่แลกเปลี่ยนประจุบวกได้บนพื้นผิวอนุภาคดิน จะมีความเกี่ยวข้องกับอินทรีย์วัตถุในดินมากกว่าแร่ดินเหนียว เนื่องจากอินทรีย์วัตถุซึ่งมีประจุลบสุทธิ มากกว่าแร่ดินเหนียวเป็นอย่างมาก จึงมีค่า CEC สูงกว่ามากด้วย (พัชรี, 2552)

ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (Loss of ignition)

ค่าการสูญเสียน้ำหนักของสารอินทรีย์ในดินรวมกับปริมาณน้ำในโครงสร้างดินที่สลายตัวไปเมื่ออุณหภูมิสูง ซึ่งปริมาณน้ำในโครงสร้างของดินแต่ละชนิดหรือแต่ละแหล่งมีค่าไม่เท่ากัน ปริมาณสารอินทรีย์ในดินจะบอกถึงค่าความเหนียวของดินได้ ดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงก็จะมีค่าความเหนียวที่ดีในการขึ้นรูป แต่ข้อเสียสำหรับดินที่มีสารอินทรีย์สูงนั้นจะทำให้เกิดแกนดำ (Black coring) จากการวิเคราะห์พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาของตัวอย่างดิน เท่ากับ 0.38 ± 0.01 ซึ่งหากดินมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผามาก หมายถึง ดินมีปริมาณคาร์บอนและรุกรุนสูง ทำให้ค่าความต้องการน้ำสูงตามไปด้วย (สมิตร, 2562)

ร้อยละของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic matter)

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเป็นอินทรีย์สารทุกชนิดที่มีอยู่ในดิน ซึ่งได้จากซากพืช ซากสัตว์ และสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อาศัยอยู่ในดิน สลายตัวทับถมอยู่ในดิน อินทรีย์วัตถุในดินประกอบด้วยอินทรีย์สารหลายชนิดและเมื่อสลายตัวโดยจุลินทรีย์ถึงขั้นสุดท้ายจะได้ฮิวมัส (humus) ซึ่งเป็นของแข็งที่มีอนุภาคละเอียดมาก มีบทบาทสำคัญคือ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนสูง สามารถดูดซับน้ำได้ดี และมีบทบาทสำคัญต่อการยึดเกาะกันเป็นเม็ดของอนุภาคดิน จากการวิเคราะห์ พบว่าในตัวอย่างดิน มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินคิดเป็นร้อยละ 3.54 ± 0.25 ซึ่งจัดว่าอยู่ในระดับค่อนข้างสูง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen)

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินอาจจะเป็นเรื่องที่ยาก ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินส่วนใหญ่มีประมาณ $< 0.02\%$ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548) พบว่ามีร้อยละของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด คือ 73.85 ± 16.47 ซึ่งจัดว่าอยู่ในระดับสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ปริมาณไนเตรท (Nitrate ion)

การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทในดิน พบว่ามีปริมาณไนเตรท 10.76 ± 0.40 ซึ่งจัดว่าอยู่ในเกณฑ์ระดับต่ำ

วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ (Chloride ion)

การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ในดิน พบว่ามีปริมาณคลอไรด์ 2.7132 ± 0.67 ซึ่งจัดว่าอยู่ในระดับเกณฑ์ที่เหมาะสม

ปริมาณฟอสเฟตทั้งหมด (Total phosphate)

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารพืชธาตุหนึ่งที่พืชต้องการในปริมาณมาก และจะมีอยู่ในดินต่ำมาก โดยมีค่าเฉลี่ยเพียง 0.06% ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินอยู่ในรูปอนุมูลฟอสเฟต คือ H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} ซึ่งได้จากกระบวนการแปรสภาพของอินทรีย์วัตถุ และจากการละลายของสารประกอบฟอสเฟตต่างๆ ในดิน ออกมาอยู่ในสารละลายดิน ซึ่งอยู่ในสภาพสมดุลกัน โดยผลการวิเคราะห์ดิน พบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 12.51 ± 0.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

วิเคราะห์ปริมาณซัลเฟต (Sulfate ion)

การวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟตในดิน พบว่ามีปริมาณซัลเฟตทั้งหมด 45.28 ± 9.79 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิเคราะห์ปริมาณอลูมิเนียม (Aluminium ion)

การวิเคราะห์ปริมาณอลูมิเนียมในดิน ไม่พบปริมาณอลูมิเนียม ซึ่งสอดคล้องกับค่าพีเอชของดินที่เป็นเบส

ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน (Major element)

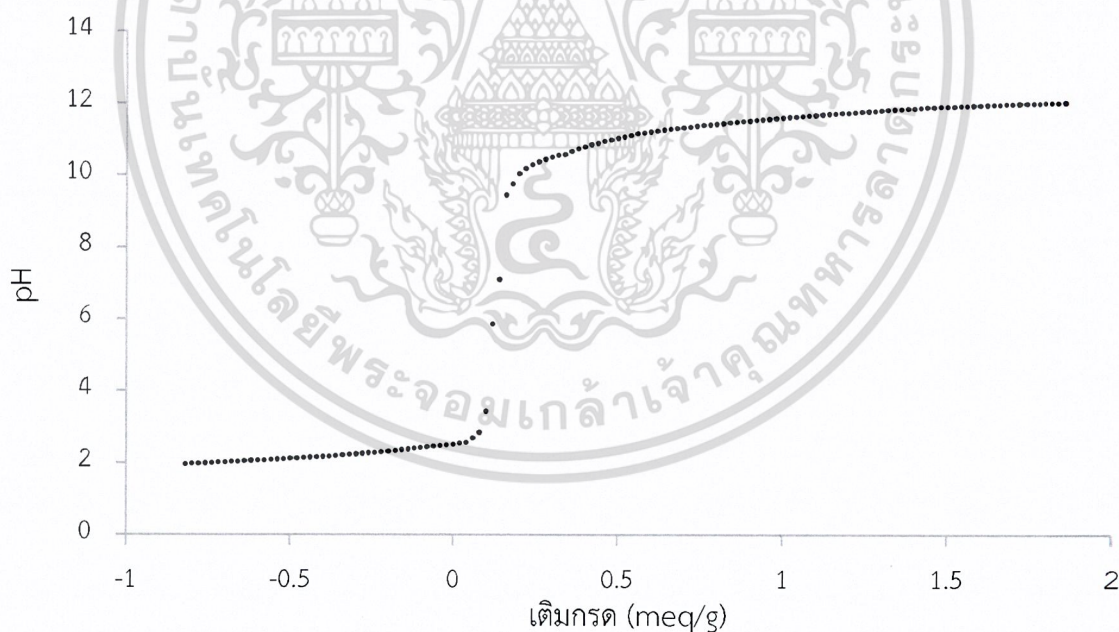
ในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแร่ เมื่อโครงสร้างของดินถูกทำลาย หรือ เปลี่ยนแปลงชนิด แร่จะปลดปล่อย K^+ ออกมาได้ การวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมในดิน เท่ากับ 658.00 ซึ่งจัดว่าอยู่ในระดับสูง ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม เท่ากับ 0.878 และ 80.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ซึ่งจัดว่าอยู่ในระดับต่ำ ส่วนปริมาณแคดเมียม เท่ากับ 0.085 ซึ่งจัดว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แคดเมียมในดิน ไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการสะเทิน (Neutralization capability) ของถ่านชีวภาพสภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต ด้วยวิธีการไทเทรต

ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน วัดค่า pH โดยบันทึกค่านี้เป็นค่า pH เริ่มต้น แบ่งสารละลายออกเป็นสองส่วน ส่วนละ 50 มิลลิลิตร ส่วนที่ 1 นำไปเติมกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ และวัดค่า pH พร้อมบันทึกค่า pH ที่ได้ และปริมาตรสารละลายที่ใช้ ทำซ้ำจนสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 2 ส่วนที่ 2 นำไปเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ และวัดค่า pH พร้อมบันทึกค่า pH ที่ได้ และปริมาตรสารละลายที่ใช้ ทำซ้ำจนสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 12

โดยนำค่า pH ที่บันทึกได้ มาใช้ในการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH และปริมาตรกรดเบสที่ใช้ (หน่วย meq/g) แล้วนำมาหาค่าความสามารถในการสะเทินกรด (Acid neutralization capability ; ANC) แสดงดังในรูป 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสามารถในการสะเทิน (Neutralization Capability) และค่า ANC ในหน่วย meq/kg ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต

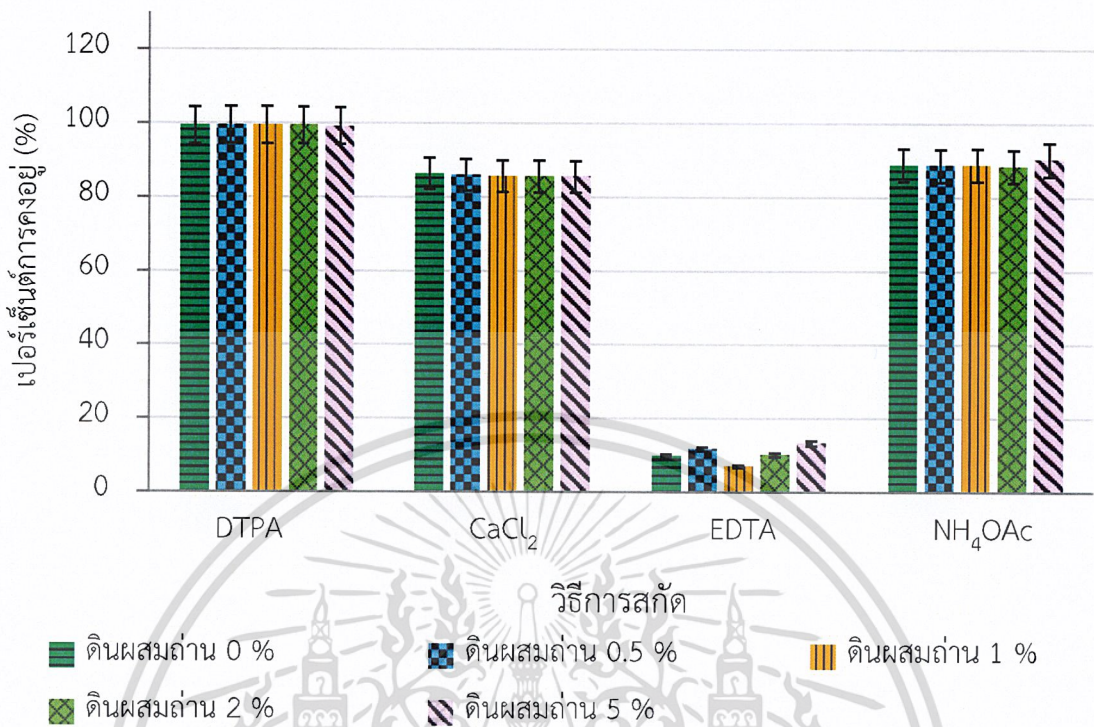
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของกรดเบสที่เติม (meq/kg) กับค่า pH ที่เปลี่ยนไป พบว่าค่า pH เริ่มต้นของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS Fe-BC) มีค่าเท่ากับ 2.42 เมื่อเติมกรดไนตริกลงไปค่า pH ค่อยๆลดลงอย่างช้า ๆ จนเมื่อ pH มีค่าเท่ากับ 2 ค่า pH จะไม่เปลี่ยนแปลงมาก และเมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป ค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงแรกจนเมื่อ pH เท่ากับ 12 ค่า pH จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จากผลการทดลองดังกล่าวเมื่อนำมาศึกษาความสามารถในการสะเทินกรด (Acid neutralization capability; ANC) พบว่า SDS Fe-BC มีค่าความสามารถในการสะเทินเท่ากับ 1000.00 meq/kg ซึ่งจากค่า pH เริ่มต้นที่มีค่าความเป็นกรดสูง เมื่อทำการสะเทินกรดจึงใช้ปริมาณกรดน้อยกว่า ทำให้ค่าความสามารถในการสะเทินกรดต่ำ จากงานวิจัยของ Venegas และคณะ, 2015 ได้กล่าวว่า วัสดุที่มีค่า ANC สูง เป็นวัสดุที่เหมาะสมในการนำไปใช้ปรับปรุงดิน เนื่องจากสามารถเพิ่ม pH ให้กับดินได้ จากผลการทดลองข้างต้น SDS Fe-BC เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการรักษาการเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่ำ SDS Fe-BC จึงไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน แต่เป็นวัสดุที่สามารถช่วยตรึงโลหะหนักหรือลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินที่ปนเปื้อนได้

4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียม

4.3.1 กระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction)

นำดินที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างดินมาผสมกับถ่านชีวภาพ ให้มีปริมาณเท่ากับ 0% (ชุดควบคุม), 0.5%, 1%, 2% และ 5% หลังจากการปรับเสถียรเป็นเวลา 2 สัปดาห์ นำมาสกัดด้วยสารละลาย โดยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว ได้แก่ กรดไดเอทิลซีนไตรเอมีนเพนตะอะซิติก (DTPA) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) กรดเอทิลซีนไตรเอมีนเตตระอะซิติก (EDTA) และแอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAc) แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม โดยใช้เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 228.80 นาโนเมตร แล้วนำมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของแคดเมียม เพื่อศึกษาศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพของโลหะหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.8



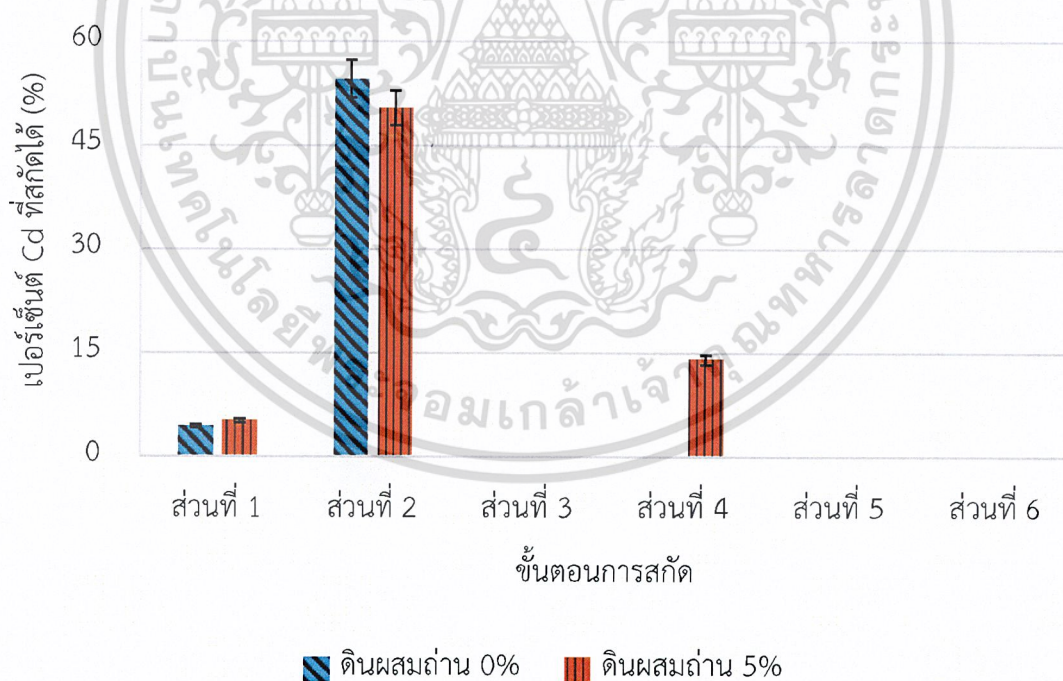
รูปที่ 4.8 ผลการศึกษาการลดการเคลื่อนที่ของโลหะ ด้วยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว

จากรูปที่ 4.8 ผลการทดลองการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) สามารถประเมินศักยภาพของการเข้าสู่ระบบชีวภาพของโลหะหนักได้ดังนี้ พิจารณาว่าการสกัดด้วยสารละลาย DTPA และ CaCl₂ เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของดินผสมถ่านทุกสัดส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน อธิบายได้ว่าการเติมถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS Fe-BC) ไม่สามารถตรึง หรือลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในรูปแบบการดูดซับด้วยพีซีได้ เมื่อพิจารณาว่าการสกัดด้วยสารละลาย EDTA และ NH₄OAc พบว่าดินผสมถ่าน 5% สามารถตรึง หรือลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในรูปแบบการเคลื่อนที่ และรูปฟอร์มการแลกเปลี่ยนไอออนในดินได้ แสดงว่า SDS Fe-BC สามารถลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมเข้าสู่พีซีได้บางส่วน สามารถสรุปได้ว่า SDS Fe-BC มีประสิทธิภาพในการตรึง หรือลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมเข้าสู่ระบบชีวภาพได้บางรูปฟอร์มเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 กระบวนการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) โดยอ้างอิงตามวิธีของ Tessier และคณะ (1979)

นำดินที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างดินมาผสมกับถ่านชีวภาพให้มีปริมาณเท่ากับ 0% (ชุดควบคุม) และ 5% หลังจากการปรับเสถียรเป็นเวลา 2 สัปดาห์ นำมาสกัดด้วยกระบวนการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนัก ได้แก่ รูปฟอร์มที่ละลายได้ (Water soluble fraction) รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction) รูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต (Carbonate bound fraction) รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (Fe-Mn oxide bound fraction) รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic bound fraction) และรูปฟอร์มที่เหลือ (Residual fraction) โดยนำสารละลายที่สกัดได้ในแต่ละส่วนมาวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม โดยใช้เครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 228.80 นาโนเมตร แล้วนำมาหาค่าความเข้มข้นของแคดเมียม ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการศึกษาการลดการเคลื่อนที่ของโลหะ ด้วยกระบวนการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 การศึกษารูปฟอร์มของแคดเมียมในดินผสมถ่าน 0% คือดินก่อนเติม SDS Fe-BC พบแคดเมียมในรูปฟอร์มละลายน้ำได้ 4.40% เป็นรูปฟอร์มที่สามารถเคลื่อนที่ได้ เมื่อเกิดน้ำท่วม หรือน้ำฝนชะผ่าน และรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ 54.60% เป็นรูปฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งแสดงว่าพืชสามารถดูดซึ่มไปใช้ได้ง่าย เมื่อพิจารณาดินผสมถ่าน 5% หรือ ดินผสมแคดเมียมที่เติม SDS Fe-BC พบว่ามีรูปฟอร์มละลายน้ำได้ 5.20% และรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้มีปริมาณลดลงเป็น 50.42% แสดงว่าการเติม SDS Fe-BC ลงในดินจะทำให้แคดเมียมในรูปฟอร์มที่ละลายน้ำได้ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย สามารถลดแคดเมียมในรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ และพบรูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์ 14.04% ซึ่งเป็นรูปฟอร์มที่เคลื่อนที่ได้ยาก เนื่องจาก SDS Fe-BC มีเหล็กออกไซด์เป็นองค์ประกอบ แคดเมียมจะจับกับเหล็กในรูปสารประกอบออกไซด์ จากผลการทดลองการเติม SDS Fe-BC ลงในดินจะมีผลต่อรูปฟอร์มของแคดเมียม แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมบางส่วนเปลี่ยนพอร์มจากรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายไปสู่ พอร์มที่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ส่งผลให้แคดเมียมเคลื่อนที่ได้น้อยลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS Fe-BC) มีรูพรุนมีขนาดใหญ่ และจำนวนมากกว่า BC และ Fe-BC
2. ถ่านชีวภาพทั้งสามตัวอย่างมีหมู่ฟังก์ชัน C-O และ O-H ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (Fe-BC) และถ่านชีวภาพแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS Fe-BC) มีหมู่ฟังก์ชัน Fe-O และ SDS Fe-BC ยังพบหมู่ฟังก์ชัน S=O ที่มาจากเพอริกคลอไรต์เฮกซะไฮเดรต และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ตามลำดับ โครงสร้างของ Fe-BC และ SDS Fe-BC คือแบบ Hexagonal ซึ่งเป็นแบบโครงสร้างของเซลล์ลูโลส และเฮมิเซลล์ลูโลส
3. ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของ SDS Fe-BC คือค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 3 อธิบายได้ว่า SDS Fe-BC สามารถดูดซับไอออนโลหะหนักที่มีประจุบวกได้ดีในช่วงความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 3.00-9.00
4. ค่าความสามารถในการสะเทินกรดของ SDS Fe-BC มีค่าเท่ากับ 1000.00 meq/kg แสดงว่า SDS Fe-BC เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการรักษาการเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่ำ จึงไม่เหมาะสำหรับใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน แต่เป็นวัสดุที่สามารถช่วยตรึงโลหะหนัก หรือลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินที่ปนเปื้อนได้
5. ปริมาณของ SDS Fe-BC ที่เหมาะสมในการเติมลงดิน คือ ดินผสมถ่าน 5% สามารถตรึง หรือลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในรูปแบบการเคลื่อนที่เข้าสู่พืช และรูปแบบการแลกเปลี่ยนไอออนในดินได้ และพบการเติม SDS Fe-BC ลงไปในดินจะมีผลต่อรูปฟอร์มของแคดเมียม แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมบางส่วนเปลี่ยนฟอร์มจากรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายไปสู่ ฟอร์มที่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ส่งผลให้แคดเมียมเคลื่อนที่ได้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. นำ SDS Fe-BC ไปใช้ในการปลูกพืช เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น
2. ศึกษาสัดส่วนของปริมาณ เพอริคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต และโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพถ่านชีวภาพ เพื่อศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก
3. การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกโดยวิธี X-ray diffraction (XRD) ควรนำตัวอย่างไปอัดเม็ดก่อนการวิเคราะห์ เพื่อลดสัญญาณรบกวน (Noise signal) และเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์
4. การเตรียมตัวดูดซับ ในขั้นตอนการแช่ผักตบชวาในสารละลาย FeCl_3 2.5 M และขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพถ่านชีวภาพแม่เหล็กด้วยสารละลาย SDS 0.01 M และการเตรียมตัวอย่างดิน ในขั้นตอนการนำดินมาผสมกับแคดเมียม ควรเพิ่มการนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้อนุภาคของสารละลายมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น
5. กระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) ควรเพิ่มชุดควบคุม โดยการสกัดด้วยน้ำ
6. กระบวนการการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) ควรเพิ่มชุดควบคุม คือ SDS Fe-BC กับ แคดเมียม โดยไม่มีดิน เพราะศึกษารูปฟอร์มที่เปลี่ยนแปลงไป
7. ศึกษาว่าการมีคุณสมบัติแม่เหล็กมีส่วนช่วยในการดูดซับแคดเมียมหรือไม่ อย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. 2552. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 กฎ ประกาศ และระเบียบที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมมลพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 6 แก้ไขเพิ่มเติม. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก.
- กรมทรัพยากรธรณี. 2546. การเตรียมวัสดุอ้างอิงภายใน TS-2 และการประเมินค่ารับรอง โดย สุวรรณ ไหลไพบูลย์. กรุงเทพฯ : กองวิเคราะห์และตรวจสอบทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการ วิเคราะห์ เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : วิทยาศาสตร์ เพื่อการพัฒนาที่ดิน.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการ วิเคราะห์ เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : วิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน.
- กองสำรวจดินและจำแนกดิน. 2541. การจำแนกความเหมาะสมของดินสำหรับพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย. กองสำรวจดินและจำแนกดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (ฉบับที่ 442)
- กรมวิชาการเกษตร. 2555. การเก็บตัวอย่างดินเพื่อการวิเคราะห์. กรุงเทพฯ : กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. หน้า 4.
- กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์. 2553. ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม 2. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เกลียวทอง อังกาบกิ่งแก้ว, ชนิดา สิงห์บุบผา, ปิติกร บุญยาศวิน. 2560. “การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมระหว่าง ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ และปรับปรุงคุณภาพ.” โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (สิ่งแวดล้อม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2535. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชัชวพร ยิ่งสมบัติ. 2551. “การปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ชัยวิทย์ วงศ์หิรัญวัฒน์. 2554. การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดกาแฟด้วยปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิซิเอนชัน และอัลคิเลชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา CcMo/MCM-41 ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยากรด. [Online]. Available : http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/73124/a1cb8be78d7f949c44c23689a572874c?Resolve_Doi=10.14457/KU.the.2011.160 .
- ณัฐนันท์ รอดสา. 2560. “การชะลอการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินโดยใช้หินฟอสเฟตไดแอมโมเนียม ฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธมลวรรณ ใจผ่อง, ประกายกาญจน์ ทำเนาว์, อนุจิตต์ อิมใจ. 2558. “การดูดซับสังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียมโดยใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด.” โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ธเรศ ศรีสถิต. 2560. เทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน และตะกอนลำน้ำ. [Online]. Available : <https://www.eng.chula.ac.th/wp-content/uploads/2017/07/kaarfuenfuuphuuenthiicchaakkaarpnepuuensaarolhahnak.pdf>.

นพพล เกตุประสาท. 2562. **ผักตบชวา**. หน่วยอนุรักษ์และใช้ประโยชน์พืชพรรณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม. [Online]. Available : <http://clgc.agri.kps.ku.ac.th/resources/weed/eichornia.html>

พัชรี วีร์จินดาขจร. 2552. คู่มือการวิเคราะห์ดินทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

พินิจภณ ปิตุยะ. 2557. เอกสารองค์ความรู้ เรื่อง ถ่านชีวภาพ ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. [Online]. Available : http://www.huaysaicenter.org/index2.php?ge=nav_view&gen_lang=030216041215&lang=

วนิดา โนบรรเทา, สุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์, ศราริน กลิ่นโพธิ์, แววตา พลกุล, และอนันต์ ทองภู. 2557. “ศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินและพืชในแหล่งปลูกพืชเศรษฐกิจ.” กรุงเทพฯ : กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร.

วัชรพล บุญเกียรติ, วันนิสา บุกขุนทด, วันวิสา งามคม. 2560. “การดูดซับโลหะหนักโดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี.” โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (สิ่งแวดล้อม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วีรภัทร์ ทองอนันต์. 2557. “การเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะที่สกัดได้ในดินในนาข้าวที่ทำการสกัดด้วยวิธีที่เลือก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.

วรชาติ วิสวพิพัฒน์. 2555. “เทคโนโลยีการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวัสดุพอสเฟต”. เกษตร. 40(4) : 373-378.

วรตาม์ มุลศรีแก้ว. 2549. “การผลิตน้ำมันชีวภาพจากซังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลมะนาว และปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์”. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภูษิต โพธิ์แสง. 2562. **ผักตบชวา พืชพิสดาร**. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. [Online]. Available : <http://www.most.go.th/main/th/492-knowledge/genius-of-king/7362-2018-06-19-05-45-17>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2539. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมิตร ส่งพิริยะกิจ. 2562. คุณสมบัติของเถ้าถ่านหินเบื้องต้น.สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. [Online]. Available : <http://research.rid.go.th/vijais/pdf/CoalConcrete1.pdf>
- สลิทธิพย์ วิภาตวิทย์. 2559. การประเมินความเสี่ยงการปนเปื้อนของน้ำบาดาลเนื่องจากดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม บริเวณตำบลแม่สอด อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล. 2555. “การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ”. สรร สาระ. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ ปีที่ 60 ฉบับที่ 189 พฤษภาคม 2555.
- สิทธิชัย อินทร์ปนาม. 2558. “รูปของโลหะหนักตามความเข้มข้นของโลหะหนักในดินที่สกัดด้วยวิธี Sequential extraction”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- สมใจ ขจรชีพันธุ์งาม, นันทวุฒิ พลไชย, พีระ ชนะชัย, และมงคล บุญแต่ง. 2546. “การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เพื่อใช้บำบัดโลหะหนักและสีย้อม”. วิศวกรรมสาร ม.ช.. 30(4) : 295-303.
- Abdelhadia, S. O., C. G. Dosoretz, G. Rytwo, Y. Gerchmane and H. Azaizeha (2017). "Production of biochar from olive mill solid waste for heavy metal removal." *Bioresource Technology* 2444: 759-767.
- Annu, A. Garg and Urmila (2016). "Level of Cd in different types of soil of Rohtak district and its bioremediation." *Environmental Chemical Engineering* 4 (2016) 4(4).
- Bigalke, M., A. Ulrich, A. Rehmus and A. Keller (2017). "Accumulation of cadmium and uranium in arable soils in Switzerland." *Environmental Pollution* 221: 85-93
- Caini, S., B. Bendinelli, G. Masala, C. Saieva, T. Lundh, S. A. Kyrtopoulos and D. Palli (2018). "Predictors of erythrocyte cadmium levels in 454 adults in Florence, Italy." *Science of the Total Environment* 644: 37-44.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Cao, Y., S. Zhang, G. Wang, T. Li, X. Xu, O. Deng, Y. Zhanga and Y. Pu (2017). "Enhancing the soil heavy metals removal efficiency by adding HPMA and PBTCA along with plant washing agents." 339 Journal of Hazardous Materials: 33-42.
- Chen, Y., J. Xu, Z. Lv, R. xie, L. Huang and J. Jiang (2018). "Impacts of biochar and oyster shells waste on the immobilization of arsenic in highly contaminated soils." Journal of Environmental Management 217: 646-653.
- Chena, W.-f., L. Pan, L.-f. Chen, Z. Yu, Q. Wang and C.-c. Yan (2014). "Comparison of EDTA and SDS as potential surface impregnation agents for lead adsorption by activated carbon." Applied Surface Science 309: 38-45.
- Codex Alimentarius Commission. (2006). Joint FAO/WHO Food Standards Programme Codex Alimentarius Commission Report of the 29th Session. [online]. Available: <http://www.codexalimentarius>
- Dziubaneka, G., R. Baranowska, M. Cwielag-Drabek, A. P. Anna Spychala, M. Rusin and I. Hajok (2017). "Cadmium in edible plants from Silesia, Poland, and its implications for health risk in populations." Ecotoxicology and Environmental Safety 142: 8-13.
- Evangelou, V. P. (1998). Environmental Soil and Water Chemistry: Principles and Applications. New York: Wiley-Interscience.
- Fang, W., Y. Wei and J. Liu (2016). "Comparative characterization of sewage sludge compost and soil : Heavy metal leaching characteristics." Journal of Hazardous Materials 310: 1-10.
- Han, Y., X. Cao, X. Ouyang, S. P.Sohi and J. iChen (2016). "Adsorption kinetics of magnetic biochar derived from peanut hull on removal of Cr (VI) from aqueous solution: Effects of production conditions and particle size." Chemosphere 145: 336-341.
- Kaasalainen, M. and M. Yli-Halla (2003). "Use of sequential extraction to assess metal partitioning in soils." Environmental Pollution 126(2): 225-233.

- Karunanayake, A. G., O. A. Todd, M. Crowley, L. Ricchetti, U. P. Jr., R. Anderson, D. Mohan and T. Misna. (2017). "Lead and cadmium remediation using magnetized biochar from Douglas fir." *Chemical Engineering Journal* 331: 480-491.
- Lee, W., S. Yoon, J. K. Choe, M. Lee and Y. Choi (2018). "Anionic surfactant modification of activated carbon for enhancing adsorption of ammonium ion from aqueous solution." *Science of The Total Environment* 639: 1432-1439.
- Li, S.-W., H.-J. Sun, H.-B. Li, J. Luo and L. Q. Ma (2016). "Assessment of cadmium bioaccessibility to predict its bioavailability in contaminated soils." *Environment International* 94: 600-606.
- Li-li, H., Z.-k. ZHONG and H.-m. YANG (2017). "Effects on soil quality of biochar and straw amendment in conjunction with chemical fertilizers." *Journal of Integrative Agriculture* 16(3): 704-712.
- Liu, H., F. Xu, Y. Xie, C. Wang, A. Zhang, L. Li and H. Xu (2018). "Effect of modified coconut shell biochar on availability of heavy metals and biochemical characteristics of soil in multiple heavy metals contaminated soil." *Science of the Total Environment* 645: 702-709.
- Lu, H. P., Z. A. Li, G. Gasco, A. Mendez, Y. Shen and J. Paz-Ferreiro (2018). "Use of magnetic biochars for the immobilization of heavy metals in a multi-contaminated soil." *Science of the Total Environment* 622-623: 892-899.
- Manouchehri, N., Nguyen, T. M. L., Besancon, S., Le, L. A., and Bermond, A. 2014. "Use of sequential, single and kinetic extractive schemes to assess cadmium (Cd) and lead (Pb) availability in Vietnamese urban soils." *American Journal of Analytical Chemistry*. 5(17) : 12-14.
- Mian, M. M., G. Liu, B. Yousaf, B. Fu, H. Ullah, M. U. Ali, Q. Abbas, M. A. M. Munir and L. Ruijia (2018). "Simultaneous functionalization and magnetization of biochar via NH₃ ambient pyrolysis for efficient removal of Cr (VI) " *Chemosphere*.

- Mitra, S., K. Pramanika, A. Sarkara, P. K. Ghosh, T. Sorena and T. K. Maitia (2018). "Bioaccumulation of cadmium by *Enterobacter* sp. and enhancement of rice seedling growth under cadmium stress." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 156: 183-196.
- O.Abdelhadi, S., C. G. Dosoretz, G. Rytwo, Y. Gerchmane and H. Azaizeha (2017). "Production of biochar from olive mill solid waste for heavy metal removal." *Bioresource Technology* 244: 759-767.
- Pobchem. 2017. **Sodium lauryl sulfate**. [Online]. Available : https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium_dodecyl_sulfate#section=Top
- Pobchem. 2017. **Cadmium**. [Online]. Available : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/#query=Cadmium>
- Rehman, M. Z. u., M. Rizwan, H. Khalid, S. Ali, A. Naeem, B. Yousaf, G. Liu and M. Sabir (2018). "Farmyard manure alone and combined with immobilizing amendments reduced cadmium accumulation in wheat and rice grains grown in field irrigated with raw effluents." *Chemosphere* 199: 468-476.
- Shariati, S., M. Faraji, Y. Yamini and A. A. Rajabi (2011). "Fe₃O₄ magnetic nanoparticles modified with sodium dodecyl sulfate for removal of safranin O dye from aqueous solutions." *Desalination* 270: 160-165.
- Song, Q., B. Yang and H. W. S. X. Y. Cao (2016). "Effective removal of copper (II) and cadmium (II) by adsorbent prepared from chitosanmodified magnetic biochar." *Journal of residuals science and technology* 13(3).
- Tahir Abbas, M. R., Shafaqat Ali, Muhammad Zia-ur-Rehman, Muhammad Farooq Qayyum, Farhat Abbas, Fakhir Hannan, Jorg Rinklebe, Yong Sik Ok (2017). "Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 140: 37-47.
- Tessier, A., P. G. C. Campbell and M. Bisson (1979). "Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals." *Analytical chemistry* 51(7).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Tica, D., Udovic, M., and Lestan, D. 2011. "Immobilization of potentially toxic metals using different soil amendments." *Chemosphere*. 85(4) : 577-583.
- Venegas, A., A. Rigol and M. Vidal (2015). "Viability of organic wastes and biochars as amendments for the remediation of heavy metal-contaminated soils." *Chemosphere* 119: 190-198.
- Venegas, A., A. Rigol and M. Vidal (2016). "Changes in heavy metal extractability from contaminated soils remediated with organic waste or biochar." *Gedema* 279: 132-140.
- Wang, L., J. Wang, Z. Wang, J. Feng, S. Lia and W. Yan (2019). "Synthesis of Ce-doped magnetic biochar for effective Sb(V) removal: Performance and mechanism." *Powder Technology* 345: 501-508.
- Wang, R.-Z., D.-L. Huang, Y.-G. Liu, C. Zhang, C. Lai, G.-M. Zeng, M. Cheng, X.-M. Gong, J. Wan and H. Luo (2018). "Investigating the adsorption behavior and the relative distribution of Cd²⁺ sorption mechanisms on biochars by different feedstock." *Bioresource Technology* 261: 265-271.
- Wang, Y., Y. Xu, D. Li, B. Tang, S. Man, Y. Jia and H. Xu (2018). "Vermicompost and biochar as bio-conditioners to immobilize heavy metal and improve soil fertility on cadmium contaminated soil under acid rain stress." *Science of the Total Environment* 621: 1057-1065.
- Wei, X., Z. Wu, C. Du, Z. Wu, B.-C. Ye and G. Cravotto (2017). "Enhanced Adsorption of atrazine on a coal-based activated carbon modified with odium dodecyl benzene sulfonate under microwave heating." *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 77: 257-262.
- Wu, J., D. Huang, X. Liu, J. Meng, C. Tang and J. Xu (2018). "Remediation of As(III) and Cd(II) co-contamination and its mechanism in aqueous systems by a novel calcium-based magnetic biochar." *Journal of Hazardous Materials* 348: 10-19.

- Yang, J., Y. Zhao, S. Ma, B. Zhu, J. Zhang and C. Zheng (2016). "Mercury Removal by Magnetic Biochar Derived from Simultaneous Activation and Magnetization of Sawdust." *Environ. Sci. Technol.* 50(21): 12040-12047.
- Yapa, M. W., N. M. Mubarak, J. N. Sahuc and E. C. Abdullah (2017). "Microwave induced synthesis of magnetic biochar from agricultural biomass for removal of lead and cadmium from wastewater." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 45: 287-295.
- Ye, L., J. Zhang, J. Zhao, Z. Luo, S. Tu and Y. Yin (2015). "Properties of biochar obtained from pyrolysis of bamboo shoot shell." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 114: 172-178.
- Zhang, F., X. Wang, D. Yin, B. Peng, C. Tan, Y. Liu, X. Tan and S. Wu (2015). "Efficiency and mechanisms of Cd removal from aqueous solution by biochar derived from water hyacinth (*Eichornia crassipes*)." *Journal of Environmental Management* 153: 68-73.
- Zhang, M.-m., Y.-g. Liu, T.-t. Li, W.-h. Xu, B.-h. Zheng, X.-f. Tan, H. Wang, Y.-m. Guo, F.-y. Guo and S.-f. Wang (2015). "Chitosan modification of magnetic biochar produced from *Eichornia crassipes* for enhanced sorption of Cr(VI) from aqueous solution." *RSC Advances* 5: 46955-46964.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดินและของถ่าน ชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต

การหาขนาดของอนุภาคดิน (Particle size analysis) (กรองแก้ว, 2553)

วิธีการทดลอง

1. การปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

- 1.1 เทสารละลายคัลกอน จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในกระบอกตวง 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 ลิตร ผสมให้ทั่วด้วยแท่งแก้วคนแบบ Plunger ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่ (ในช่วง 20-25 องศาเซลเซียส)
- 1.2 ค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในสารละลายอย่างระมัดระวัง อ่านค่าจากสเกลที่รอยเว้าบนของของเหลวที่ล้อมรอบไฮโดรมิเตอร์

2. การอ่านค่าจากสารละลายแขวนลอย

- 2.1 ชั่งดินที่ผึ่งและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 mesh แล้ว 40 กรัม (ถ้าเป็นดินทรายร่วนหรือทรายใช้ 100 กรัม) ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติมสารละลายคัลกอน 100 มิลลิลิตร และน้ำกลั่นประมาณ 300 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน
- 2.2 นำสารแขวนลอยดินที่เตรียมไว้ มาควนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กประมาณ 5 นาที แล้วเทลงกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร
- 2.3 ปรับปริมาตรสารในข้อ 2.2 ด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่
- 2.4 จุ่มแท่งแก้วคนแบบ plunger แบบขึ้น-ลง เบาๆ เพื่อให้เกิดการผสมกันทั่วทั้งกระบอกตวง (ให้หมุนขึ้น-ลงแบบเกลียวสว่าน 2-3 รอบ)
- 2.5 บันทึกเวลาเมื่อคนเสร็จ ถ้าผิวของสารแขวนลอยมีฟอง เติมเอธิลแอลกอฮอล์ 1 หยด
- 2.6 ค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงอย่างระมัดระวังในสารแขวนลอย และอ่านค่าสเกลเหมือนเดิม
- 2.7 เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาที หลังจากการกวนผสมค่าที่อ่านได้ต้องหักลบจากค่าที่อ่านได้จากการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์
- 2.8 ค่อยๆ ดึงไฮโดรมิเตอร์ขึ้นอย่างระมัดระวังเมื่ออ่านเสร็จ ล้างและเช็ดให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

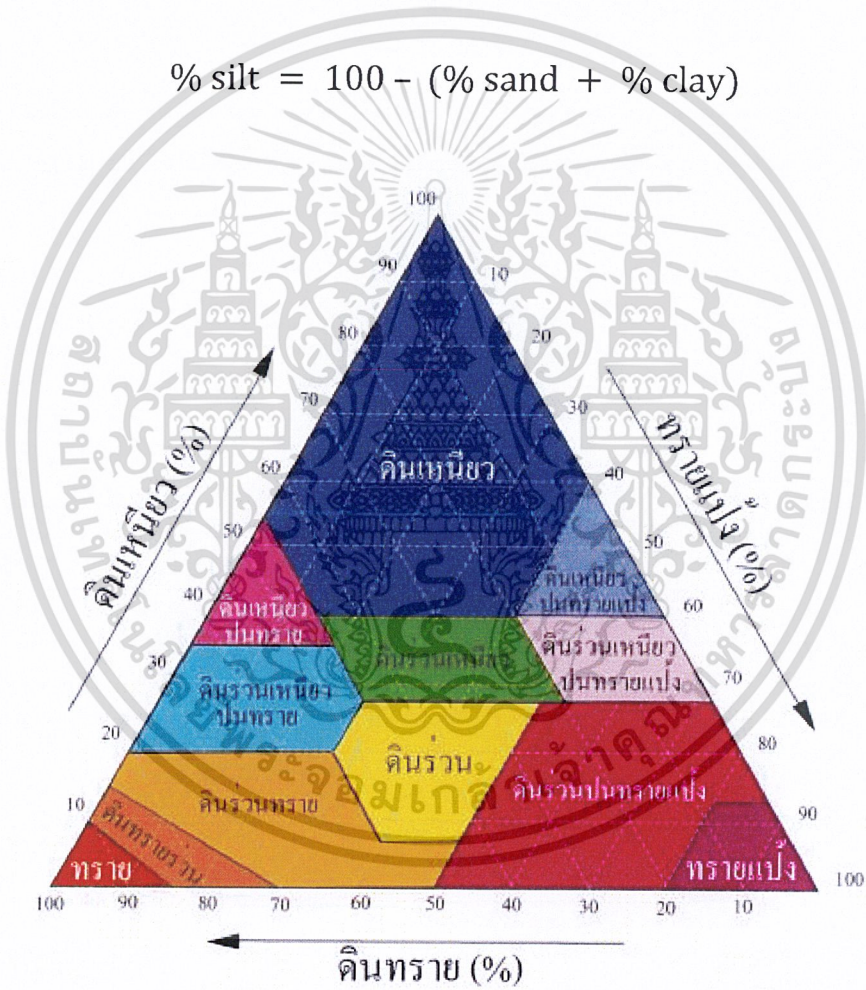
2.9 เมื่อครบ 2 ชั่วโมงให้อ่านค่าไฮโดรมิเตอร์อีกครั้งโดยทำเหมือนเดิม

การคำนวณ

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

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

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



รูปที่ ก.1 กราฟแสดงการหาประเภทเนื้อดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ค่าความชื้น (Moisture)

วิธีการทดลอง

ชั่งตัวอย่างดิน 5 กรัม นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

คำนวณหาค่าความชื้นในดิน

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

การวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นลงไป 100 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากันหลายๆ ครั้ง ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที
3. นำสารละลายดินไปวัด pH ด้วยเครื่องวัด pH โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 7 และ pH 4 ปรับเครื่องวัด pH ก่อนวัดตัวอย่าง

ค่าการนำไฟฟ้า (Electric conductivity)

วิธีการทดลอง

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 และเปลี่ยนจากตัวอย่างดินเป็นถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity)

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต 2 กรัม ใส่ขวดชมพูขนาด 125 มิลลิลิตร เติมสารละลายแอมโมเนียม อะซิเตด 1 นอร์มอล ลงไปประมาณ 60 มิลลิลิตร ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน
2. กรองสารละลายที่แช่ไว้ด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เก็บสารละลายดินที่ได้ไว้ทำต่อในข้อ 4
3. ชะล้างตัวอย่างดินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตด 1 นอร์มอล ครั้งละ 30 มิลลิลิตร จนกระทั่งไม่มีแคลเซียมเหลืออยู่ ทดสอบได้โดยนำสารละลายที่ล้างดินมา 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองหยดแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 นอร์มอล แอมโมเนียมออกซาลेट 10% และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 50 % อย่างละ 2-3 หยด นำไปต้มให้เดือด ถ้ามีแคลเซียมไอออนเหลืออยู่จะเกิด ตะกอนขาว หรือสารละลายขุ่น ต้องชะล้างต่อ
4. สารละลายที่ได้จากการกรอง และการชะล้างด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตด 1 นอร์มอล ใส่ในขวดวัดปริมาตร ทำให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ถ้าต้องการหา %BS ให้นำสารละลายที่ได้ไปวัดปริมาตรแคลเซียมและ แมกนีเซียม ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometers ที่ความยาวคลื่น 422 และ 285 นาโนเมตร และวัดปริมาณโพแทสเซียมและโซเดียม ด้วย Flame photometer ที่ความยาวคลื่น 383 และ 295 นาโนเมตร
5. ชะล้างสารละลายตัวอย่างดินต่อ ด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 นอร์มอล ครั้งละ 30 มิลลิลิตร ทำ 3-4 ครั้ง และล้างด้วยสารแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 นอร์มอล อีก 1 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยเอซิลแอลกอฮอล์ 95% ประมาณ 150-200 มิลลิลิตร จนไม่มีคลอไรด์เหลืออยู่ ทดสอบการล้างโดย แบ่งเอซิลแอลกอฮอล์ที่ผ่านการล้างดินครั้งสุดท้ายมา 10 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลองหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเทต 0.1 นอร์มอล 1-2 หยด สังเกตว่ามีตะกอนขาวของซิลเวอร์คลอไรด์หรือไม่ ถ้ามีต้องล้างต่อ
6. ทิ้งสารละลายที่ได้จากข้อ 5 และล้างตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10 % ครั้งละ 30 มิลลิลิตร ทำ 3 ครั้ง เพื่อให้ Na^+ แทนที่ NH_4 ในดินจนได้สารละลายดินประมาณ 100 มิลลิลิตร
7. เติมน้ำทรายดินที่กรองได้ใส่ในขวดเจลตาลท์ เติมหินพูมิช (Pumice stone) ลงไปเล็กน้อยเพื่อป้องกันการฟุ้งไหลล้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงไป 5-25 มิลลิลิตร เพื่อปรับให้สารละลายดินมีฤทธิ์เป็นเบสและ NH_4 เปลี่ยนเป็นแอมโมเนียได้ง่ายขณะกลั่น
9. นำสารละลายกรดบอริก 3% ปริมาตร 50 มิลลิลิตรใส่ในขวดชมพู ขนาด 125 มิลลิลิตร และหยดอินดิเคเตอร์ผสม 5 หยด นำไปกรองรับสารที่ได้จากการกลั่น
10. นำสารละลายที่ได้จากการกลั่น ไทเทรตกับไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์มอล ที่จุดยุติ สารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีชมพูม่วง
11. ทำแบลнк (Blank) โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10% จำนวน 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงไปในปริมาตรเท่ากับที่ใช้ในข้อ 8 ทำการกลั่น และไทเทรตเช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

การคำนวณ

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

เมื่อ A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลнк (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)

W = น้ำหนักแห้งมีหน่วยเป็นกรัมของตัวอย่างดิน (กรัม)

การคำนวณปริมาณร้อยละประจุบวกที่เป็นต่าง (%BS)

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

เมื่อ Ca = จำนวนมิลลิมูลของแคลเซียมต่อดิน 100 กรัม

Mg = จำนวนมิลลิมูลของแมกนีเซียมต่อดิน 100 กรัม

Na = จำนวนมิลลิมูลของโซเดียมต่อดิน 100 กรัม

K = จำนวนมิลลิมูลของโพแทสเซียมต่อดิน 100 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์หาการสูญเสียน้ำหนักหลังเผา; LOI

วิธีการทดลอง

ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต 2 กรัม ใส่คูซิเบลที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว จากนั้นนำไปเผา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก หลังเผา จดบันทึกผลและคำนวณ

การคำนวณ

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

การวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter, OM) โดยวิธี Walkley and Blank (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต ที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 0.2 มิลลิเมตร (80 mesh) หรือ 0.5 มิลลิเมตร (35 mesh) 0.2-2.0 กรัม ใส่ขวดชมพู ขนาด 250 มิลลิลิตร.
2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 1 นอร์มอล 10 มิลลิลิตร ลงในขวดชมพู
3. เติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 15 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ ประมาณ 1 นาที ตั้งทิ้งไว้จนสารละลายเย็นเท่าอุณหภูมิห้อง (หากพบว่าสารละลายดินตัวอย่างเป็นสีเขียวก่อนไทเทรต แสดงว่าดินตัวอย่างมีสารอินทรีย์อยู่มาก ควรทำการวิเคราะห์ใหม่ โดยชั่งน้ำหนักดินให้น้อยกว่าเดิม)
4. เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
5. หยดอินดิเคเตอร์ BDS 5 หยด สารละลายเปลี่ยนเป็นสีม่วงบนน้ำเงิน
6. ไทเทรตด้วยสารละลาย FAS ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จนสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียวใส
7. ทำ Blank โดยเริ่มทำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง ขั้นตอนี่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 (นอร์มอล)
 - B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับ Blank (มิลลิลิตร)
 - T = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร)
 - W = น้ำหนักดิน (กรัม)

วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen)

วิธีการทดลอง

1. ขั้นตอนการย่อย

ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมไดโครเมตซัลเฟต 2 กรัม ใส่ในขวดเจลาตาร์ทลเติมน้ำย่อย 100 มิลลิลิตร นำ Insert rack ที่มีหลอดตัวอย่าง ครบทุกช่อง วางบน Digestion block ให้ตรงกับช่อง Exhaust manifold สวมลงบนหลอดตัวอย่าง เปิดวาล์วน้ำ และเปิด Power switch ของเครื่องย่อยตั้งอุณหภูมิที่ 250 องศาเซลเซียส ย่อยเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมงจากนั้นปรับอุณหภูมิเป็น 380 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเกิดควันสีขาวของ SO_3 ให้ต้มต่อไปเรื่อยๆ จนได้สารละลายใส ปิดสวิตช์ และปล่อยให้เย็นเพื่อนำไปกลั่น

2. ขั้นตอนการกลั่น

นำตัวอย่างที่ผ่านการย่อยแล้วมาเติมฟีนอล์ฟทาลีน 3-4 หยด นำไปใส่เครื่องกลั่นที่ตั้งค่าเครื่องกลั่นให้เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โซเดียมไฮโอซัลเฟต 20 มิลลิลิตร และตั้งค่าให้เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้น เติม Indicating boric acid solution ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใน ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องกลั่นเพื่อดูดซับ $\text{NH}_3\text{-N}$ ตั้งค่าเครื่องให้กลั่น 4 นาที จากนั้นนำสารที่อยู่ในขวดรูปชมพู่ ไปไทเทรตกับกรดซัลฟิวริกที่หาความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว จดบันทึก

การคำนวณ

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

เมื่อ A = น้ำหนักดินตัวอย่าง (กรัม)

B = ปริมาตรของกรดที่ไทเทรตกับแบลนก์ (มิลลิลิตร)

Y = ปริมาตรของกรดที่ไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

X = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)

วิเคราะห์ปริมาณไนเตรท NO_3^- ; Brucine Method

วิธีการทดลอง

ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต 2 กรัม เทน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ลงขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีดินตัวอย่างหรือถ่านที่ชั่งมาแล้ว นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอน แบบลดความดัน จากนั้นนำส่วนใสมาวิเคราะห์หาไนเตรท โดยปิเปตตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ลงหลอดทดลองขนาด 30 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคลอไรด์ 30% 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vorex เติมกรด HCl 10 มิลลิลิตร (ระวังร้อน) เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vorex ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นจึงเติม Brucine-sulfanilic acid 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vorex อาจเกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีชมพูขึ้น สีที่เกิดขึ้นไม่มีผลกระทบกับการทดลอง จากนั้นนำไปต้มในอ่างต้มเป็นเวลา 30 นาที ที่ความร้อน 95 องศาเซลเซียส เมื่อครบกำหนดนำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัด UV ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ทำซ้ำ 3 ซ้ำ แบลนค์ และสารมาตรฐานทำการทดลองเช่นเดียวกับตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ (Chloride ion)

วิธีการทดลอง

ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต 5 กรัม ลงขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที กรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 จากนั้นส่วนใสมาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ โดยปิเปตส่วนใสมา 25 มิลลิลิตร เติมโพแทสเซียมไดโครเมต 5 หยด แล้วทำการไทเทรตกับซิลเวอร์ไนเตรท จนตัวอย่างเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นตะกอนแดงอิฐ

การคำนวณ

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

เมื่อ N = ความเข้มข้นของ AgNO_3 (นอร์มอล)

A = ปริมาตร AgNO_3 ที่ใช้ Sample (มิลลิลิตร)

B = Blank (มิลลิลิตร)

การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟต (PO_4^{3-})

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

- 1.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 0, 2, 4, 6, 8, 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- 1.2 เติม Vanadate-Molybdate reagent 10 มิลลิลิตร ในแต่ละขวดผสมให้เข้ากันและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 1.3 ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดสีอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำสารละลายแต่ละขวดมาวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การหาปริมาณฟอสเฟต

- 2.1 ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาดเล็กที่มีเศษกระเบื้อง (glass bead) เล็กน้อย
- 2.2 เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H₂SO₄) 1 มิลลิลิตร และกรดไนตริกเข้มข้น (conc. HNO₃) 5 มิลลิลิตร นำไปย่อยด้วยความร้อนในตู้ดูดควันจนได้สารละลายใสไม่มีสี จนเหลือปริมาณ 2-5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
- 2.3 กรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร
- 2.4 นำส่วนสารละลายใสที่กรองได้มาหยดฟีนอล์ฟทาลีน 1-2 หยด แล้วปรับพีเอชให้เป็นกลาง จนถึงจุดยุติด้วย 6N NaOH จะได้สารละลายสีชมพูอ่อน นำมาใสในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2.5 เติม Vanadate-Molybdate reagent 10 มิลลิลิตร ในแต่ละขวดผสมให้เข้ากันและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดสีอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำสารละลายแต่ละขวดมาวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร
- 2.6 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และเปลี่ยนจากตัวอย่างดินเป็นถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟต
- 2.7 อ่านค่าฟอสเฟตของตัวอย่างที่ได้เทียบจากกราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้น และหาค่าความเข้มข้นของฟอสเฟตในสารละลายที่ย่อยจากตัวอย่างดิน และตัวอย่างถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟต

การคำนวณ

$$T - \text{PO}_4^{3-} \text{ (mg/kg)} = \frac{P}{X}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ปริมาณซัลเฟต (Sulfate ion)

วิธีการทดลอง

ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซัลเฟต 5 กรัมลงขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที แล้วกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 จากนั้นนำส่วนใสมาวิเคราะห์หาซัลเฟต โดยปิเปตส่วนใสที่สกัดได้มา 5 มิลลิลิตร ลงขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริก 6 นอร์มอล 1 มิลลิลิตร เติมฟลักแบเรียมคลอไรด์ 0.5 กรัม จากนั้นเขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ 1 นาที เติมหัมอะคาเซีย 0.25% 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ 1 นาที จึงปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นวัดค่าความขุ่นภายในเวลา 5-30 นาที ด้วยเครื่องวัด UV ด้วยความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

ความเป็นกรดของดิน และการหาอลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Aluminium ion)

วิธีการทดลอง

1. การสกัดความเป็นกรด และ Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้
 - 1.1 ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซัลเฟต 5 กรัม เติม KCl เข้มข้น 1 นอร์มอล จำนวน 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดชมพู่ ปิดจุก
 - 1.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า นาน 10 นาที ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตั้งทิ้งไว้ หนึ่งคืน
 - 1.3 นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนติฟิวส์เป็นเวลา 10 นาที ที่ความเร็ว 2500 รอบต่อนาที ตูดส่วนใสด้านบน นำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ใช้ KCl 1 นอร์มอล ชะล้างได้
 - 1.4 นำสารที่ได้จากการกรองในข้อ 4 มาปรับปริมาตรด้วย KCl 1 นอร์มอล ให้ได้ 100 มิลลิลิตร
 - 1.5 นำสารละลายที่ได้แบ่งไปทำให้เกิดสีต่อไป และแบ่งไว้สำหรับหาความเป็นกรดที่แลกเปลี่ยนได้ โดยปิเปตมา 20 มิลลิลิตร และนำไปไทเทรตกับ NaOH 0.1 นอร์มอล ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว โดยใช้ ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ ถ้าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูตั้งแต่แรก แสดงว่าไม่เป็นดินเปรี้ยว มีความเป็นกรดน้อยมาก แต่ถ้าไม่มีสี เมื่อไทเทรตแล้วใช้ปริมาตรของ NaOH น้อยกว่า 5 มิลลิลิตร ให้ปิเปตสารละลายที่กรองได้เพิ่ม และไทเทรตต่อจนถึงจุดยุติสีชมพูอ่อนๆ
 - 1.6 ใช้สารละลาย KCl 1 นอร์มอล ทำแบลนด์ เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน และไทเทรตเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทำให้เกิดสี เพื่อหา Al^{3+}

- 2.1 แบ่งสารละลายจากการทดลองส่วนที่ 1 จำนวน 5 มิลลิลิตร หยดฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด กรณีไม่มีการเกิดสีชมพูหรือสถานะเป็นกรด ค่อยๆเติม KF เข้มข้น 1 นอร์มอล จำนวน 10 มิลลิลิตรทีละหยด สังเกตการเกิดสีชมพูถ้าเกิดสีชมพูให้หาปริมาณของ Al^{3+} ตามข้อ 4
- 2.2 จากข้อ 1 กรณีมีสีชมพูเกิดขึ้นตั้งแต่แรก ให้เติมกรด HCl 0.1 นอร์มอล 1-2 หยด ให้สีชมพูหายไปก่อน จึงเติม KF 1 นอร์มอล จำนวน 10 มิลลิลิตร ถ้าเกิดสีชมพูให้นำไปหาปริมาณ Al^{3+} ต่อตามข้อ 4 แต่ถ้าไม่เปลี่ยนแปลงไม่ต้องหาปริมาณอลูมิเนียมต่อ
- 2.3 ปิเปตสารละลายที่สกัดได้ 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2.4 เติมกรด HCl 1 นอร์มอล ปรับ pH อยู่ระหว่าง 2-3
- 2.5 ทำการทดลองเหมือนขั้นตอนการเตรียมสารมาตรฐาน และ กราฟมาตรฐานในข้อ 3-5

การคำนวณ

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

$$[NaOH, N] = \frac{[HCl] \times V_{HCl}}{V_{NaOH}}$$

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

เมื่อ N = ความเข้มข้นของ NaOH (นอร์มอล)

B = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต กับแบลงค์ (มิลลิลิตร)

S = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต กับตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร)

X = น้ำหนักเปียกของดิน (กรัม)

%M = ความชื้นของดิน (เปอร์เซ็นต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณอลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้

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

เมื่อ X = ค่าที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐานในหน่วย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

A = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่สกัดได้ (มิลลิลิตร)

D = น้ำหนักแห้งของดินตัวอย่าง (กรัม)

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างดินหรือถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟต 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลาย (Reagent A) กรดไนตริกเข้มข้นผสมกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ในอัตราส่วน 3:7 10 มิลลิลิตร
3. ปิดด้วยกระจกนาฬิกา แล้วนำไปย่อยบนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
4. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 5
5. ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 2-5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร
6. นำไประเหยเอากรดออกให้เหลือปริมาตร 1-3 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้เป็น 10 มิลลิลิตร
7. เก็บสารละลายไว้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพ
แม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต

ตารางที่ ข.1 การหาประเภทเนื้อดิน ของตัวอย่างดิน

ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย น้ำหนักดิน	อนุภาคดิน					ประเภทเนื้อ ดิน
		ค่าที่อ่านจาก ไฮโดรมิเตอร์		% Sand	% Clay	% Slit	
		40 วินาที	2 ชั่วโมง				
ตัวอย่าง ดิน	40.00	11.00	9.00	72.50	22.50	5.00	ดินร่วนเหนียว ปนทราย

ตารางที่ ข.2 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างดิน

ชนิดของตัวอย่าง	Moisture content			% Moisture content	ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	5.01	5.08	5.11	21.00	5.07	0.07
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	4.14	4.18	4.25		4.19	0.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 การหาค่าเฉลี่ยพีเอชเริ่มต้น และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต

ชนิดของตัวอย่าง	pH			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดิน	8.17	7.67	7.46	7.77	0.36
ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	3.68	3.63	3.69	3.67	0.04

ตารางที่ ข.4 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าการนำไฟฟ้า (Electric conductivity) ของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต

ชนิดของตัวอย่าง	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดิน	6.17	6.64	6.78	6.53	0.32
ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	10.60	9.77	9.69	10.02	0.50

ตารางที่ ข.5 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต

ชนิดของตัวอย่าง	CEC (cmol kg^{-1})			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดิน	8.60	7.80	7.80	8.07	0.46
ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	3.50	4.50	-	4.00	2.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (Loss of ignition) ของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย โซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต

ชนิดของตัวอย่าง	% LOL			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดิน	0.38	0.38	0.38	0.38	0.01
ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	2.79	3.32	3.45	3.19	0.35

ตารางที่ ข.7 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต

ชนิดของตัวอย่าง	% organic matter			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดิน	3.83	3.41	3.39	3.54	0.25
ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	10.51	10.71	17.70	12.97	4.09

ตารางที่ ข.8 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไนโตรเจนของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต

ชนิดของตัวอย่าง	% TKN		ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
ดิน	62.20	85.50	73.85	16.47
ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟต	15.52	7.76	11.64	5.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณไนเตรทของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต

ชนิดของตัวอย่าง	NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดิน	11.02	10.90	10.37	10.76	0.40
ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต	14.05	14.05	14.10	14.07	0.03

ตารางที่ ข.10 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคลอไรด์ของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต

ชนิดของตัวอย่าง	Cl ⁻ (mg L ⁻¹)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดิน	2.3256	3.4884	2.3256	2.7132	0.67
ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต	6.9767	6.9767	6.9767	6.9767	0.00

ตารางที่ ข.11 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณฟอสเฟตของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต

ชนิดของตัวอย่าง	PO ₄ ³⁻ (mg kg ⁻¹)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดิน	12.55	12.18	12.78	12.51	0.30
ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต	17.47	16.98	16.81	17.09	0.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณซัลเฟตของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต

ชนิดของตัวอย่าง	SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดิน	34.26	48.61	52.96	45.28	9.79
ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต	2.96	6.43	4.7	4.7	1.74

ตารางที่ ข.13 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณอลูมิเนียมของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต

ชนิดของตัวอย่าง	Al (mg kg ⁻¹)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดิน	ND	ND	ND	ND	ND
ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ ND (NOT Detected) = ไม่พบค่าอลูมิเนียม

ตารางที่ ข.14 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณแร่ธาตุต่างๆของตัวอย่างดิน และถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต

ชนิดของตัวอย่าง	Major Element				ค่าเฉลี่ย	SD
	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cd ²⁺		
ดิน	658.00	0.878	80.00	0.085	246.32	325.58
ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟต	14.30	0.41	15.80	0.59	10.17	8.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
เกณฑ์มาตรฐานต่างๆในดิน

ตารางที่ ค.1 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
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	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 เกณฑ์จำแนกความเหมาะสมของดินสำหรับพืชเศรษฐกิจ (กองสำรวจดิน และจำแนกดิน, 2541)

1.ความเป็นกรดเบส (pH)

ระดับความเป็นกรดเบส	ช่วง pH
กรดรุนแรงมาก (ultra acid)	< 3.5
กรดจัดมาก (extremely acid)	3.5-4.4
กรดแก่มาก (very strongly acid)	4.5-4.4
กรดแก่ (strongly acid)	4.5-5.0
กรดปานกลาง (moderately acid)	5.1-5.5
กรดเล็กน้อย (slightly acid)	5.6-6.0
เป็นกลาง (neutral)	6.1-6.5
ด่างเล็กน้อย (slightly alkaline)	6.6-7.3
ด่างปานกลาง (moderately acid)	7.4-7.8
ด่างแก่ (strongly alkaline)	7.9-8.4
ด่างแก่มาก (very strongly alkaline)	8.5-9.0

2. ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (Electrical conductivity; EC) ของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ที่ 25 องศาเซลเซียส

dS m ⁻¹	ระดับความเค็ม	ความสัมพันธ์กับพืช
0-2	ไม่เค็ม	ไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช
2-4	เค็มน้อยมาก	อาจจะมีผลกระทบต่อผลผลิตของพืชที่มีความไวต่อความเค็ม
4-8	เค็มปานกลาง	เป็นอุปสรรคต่อพืชหลายชนิด
8-16	เค็มจัด	เป็นอุปสรรคต่อพืชส่วนมาก เฉพาะพืชทนเค็มที่เติบโตได้
>16	เค็มจัดมาก	เป็นอันตรายต่อพืชทุกชนิด ยกเว้นพืชบางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ

ระดับ	CEC (cmol kg ⁻¹)
ต่ำมาก	< 3.0
ต่ำ	3.0-5.0
ค่อนข้างต่ำ	5.0-10.0
ปานกลาง	10.0-15.0
ค่อนข้างสูง	15.0-20.0
สูง	20.0-30.0
สูงมาก	> 30.0

ตารางที่ ค.3 พระราชบัญญัติส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

			Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

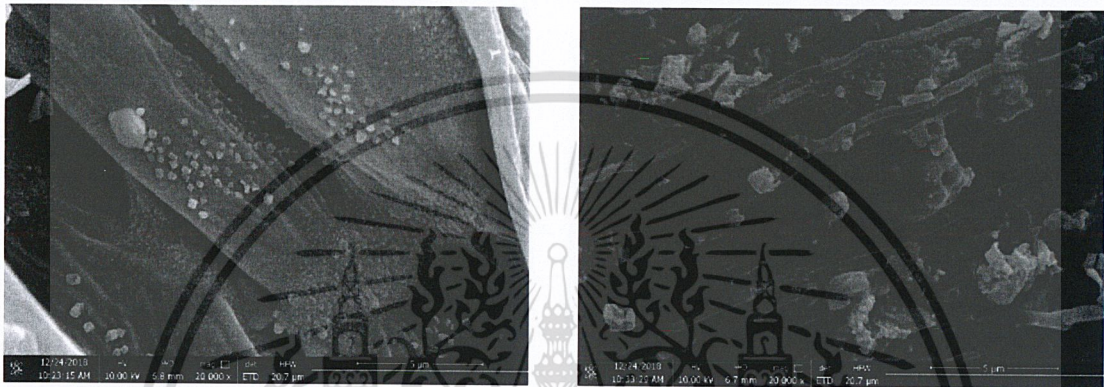
			Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
8) ซีลีเนียม (Selenium)	"	ต้องไม่เกิน 390	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธี Atomic Absorption, Gaseous Hydride หรือวิธี Atomic Absorption, Borohydride Reduction หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ

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

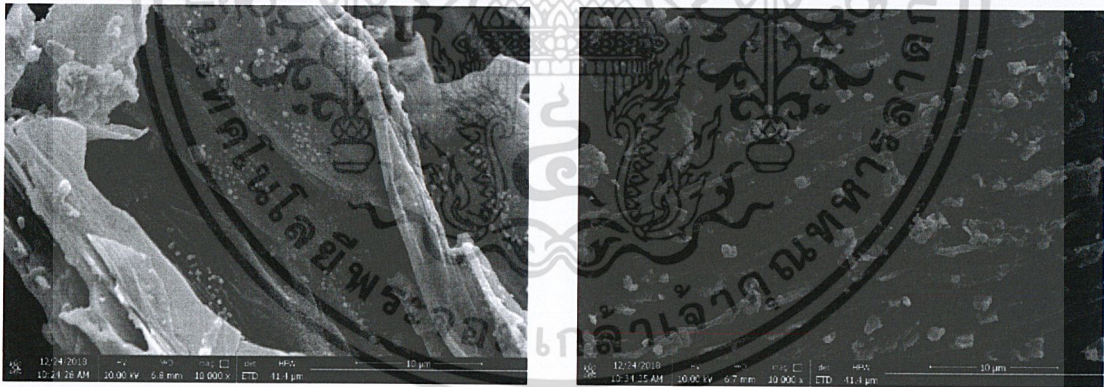
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาหาขนาดอนุภาคของวัสดุดูดซับ
โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

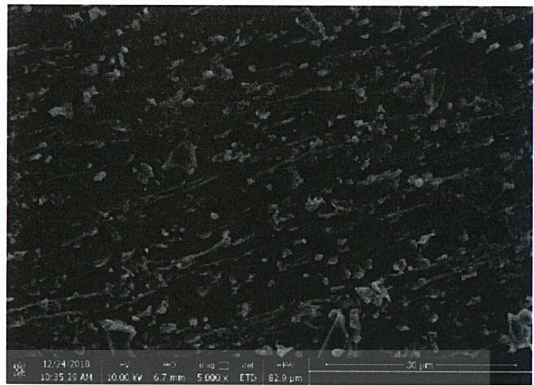
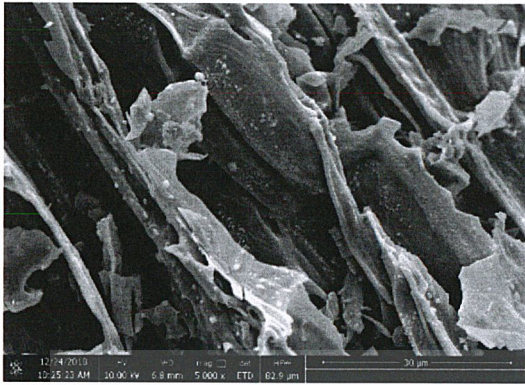


(a)

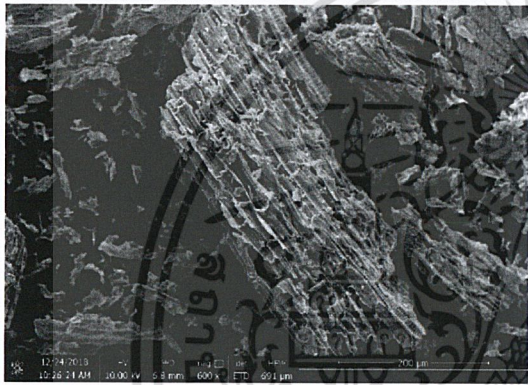


(b)

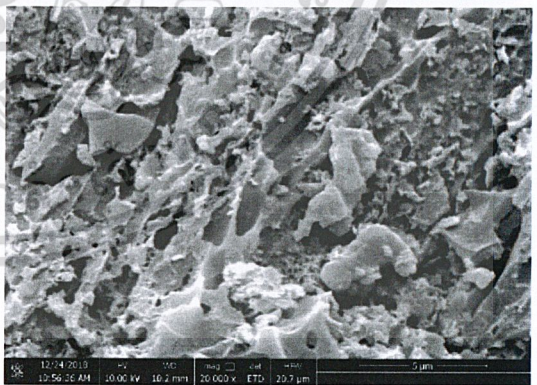
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

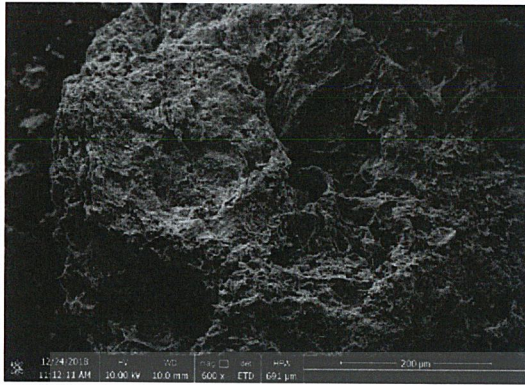


(d)

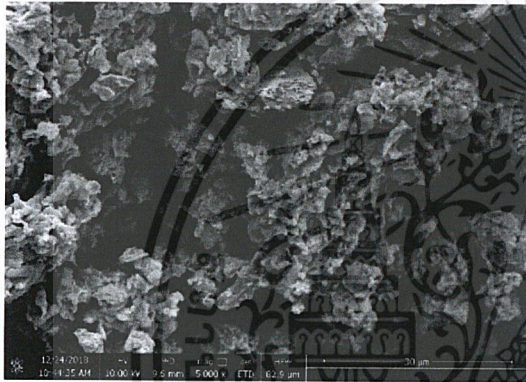


(e)

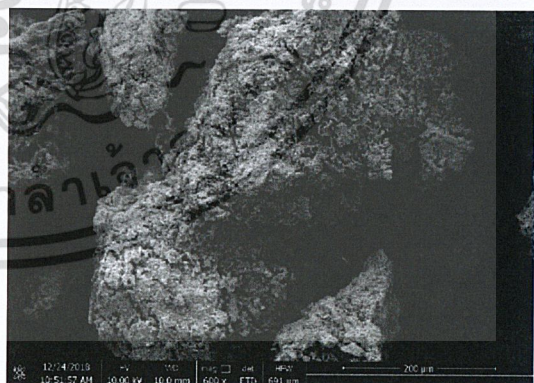
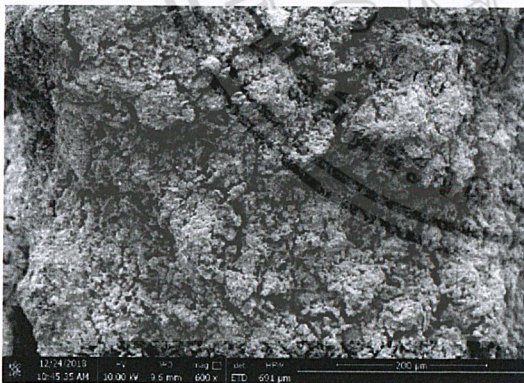
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(f)

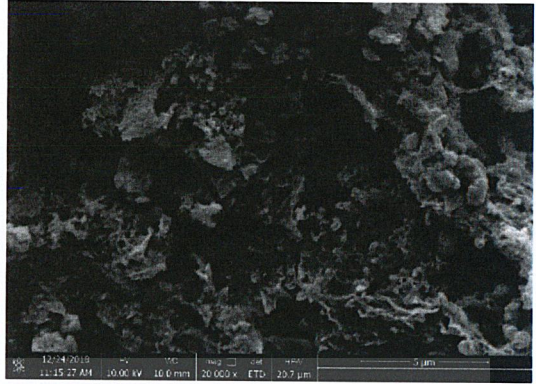
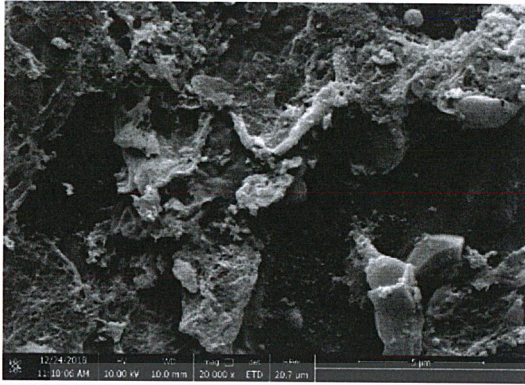


(g)

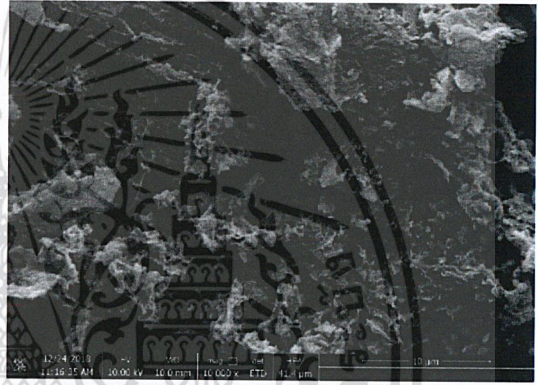
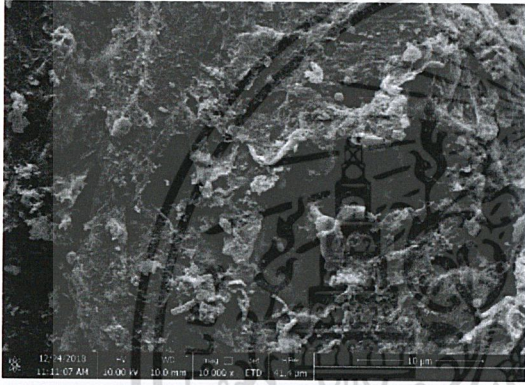


(h)

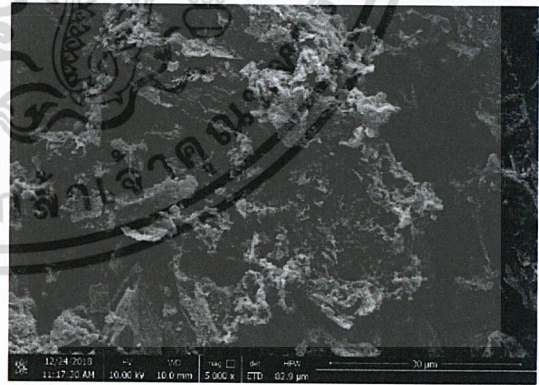
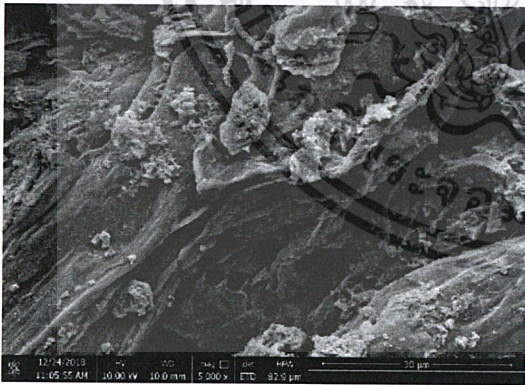
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(i)

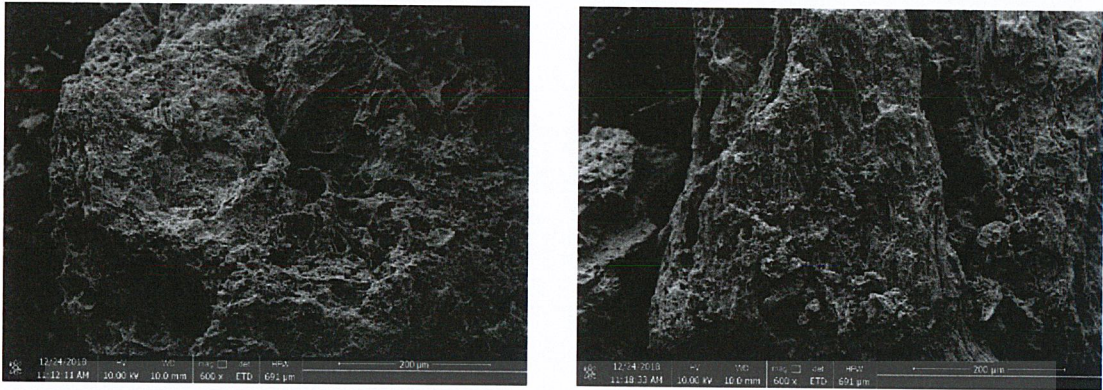


(j)



(k)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(l)

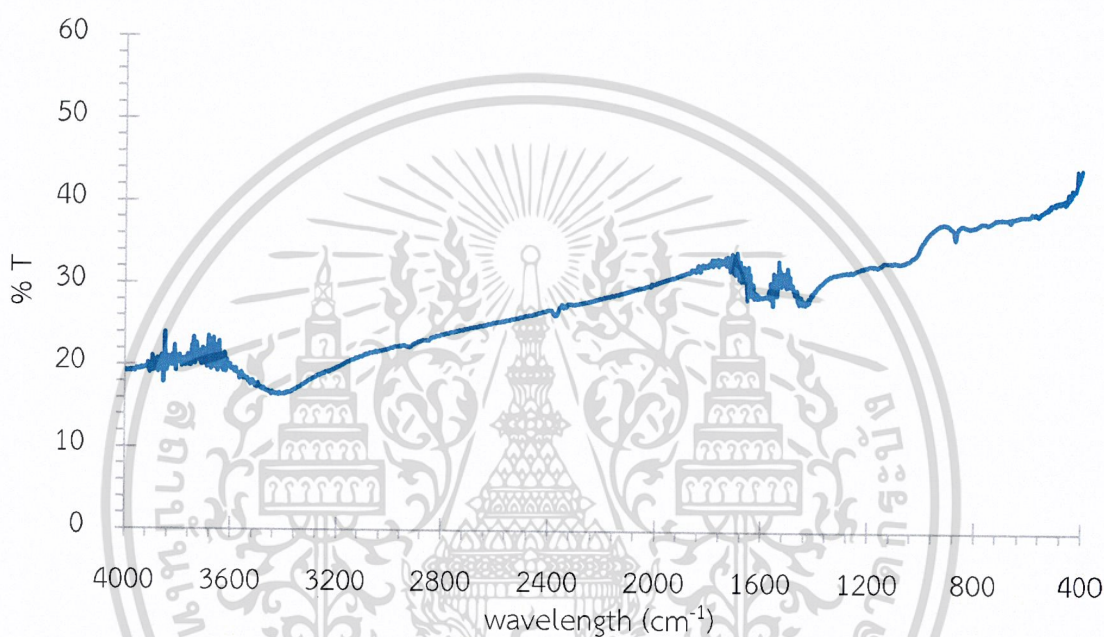
รูปที่ ง.1 ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา

- (a) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 20000 เท่า
- (b) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 10000 เท่า
- (c) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 5000 เท่า
- (d) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 600 เท่า
- (e) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็ก กำลังขยาย 20000 เท่า
- (f) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็ก กำลังขยาย 10000 เท่า
- (g) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็ก กำลังขยาย 5000 เท่า
- (h) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็ก กำลังขยาย 600 เท่า
- (i) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดซิลซิลเฟต กำลังขยาย 20000 เท่า
- (j) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดซิลซิลเฟต กำลังขยาย 10000 เท่า
- (k) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดซิลซิลเฟต กำลังขยาย 5000 เท่า
- (l) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดซิลซิลเฟต กำลังขยาย 600 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

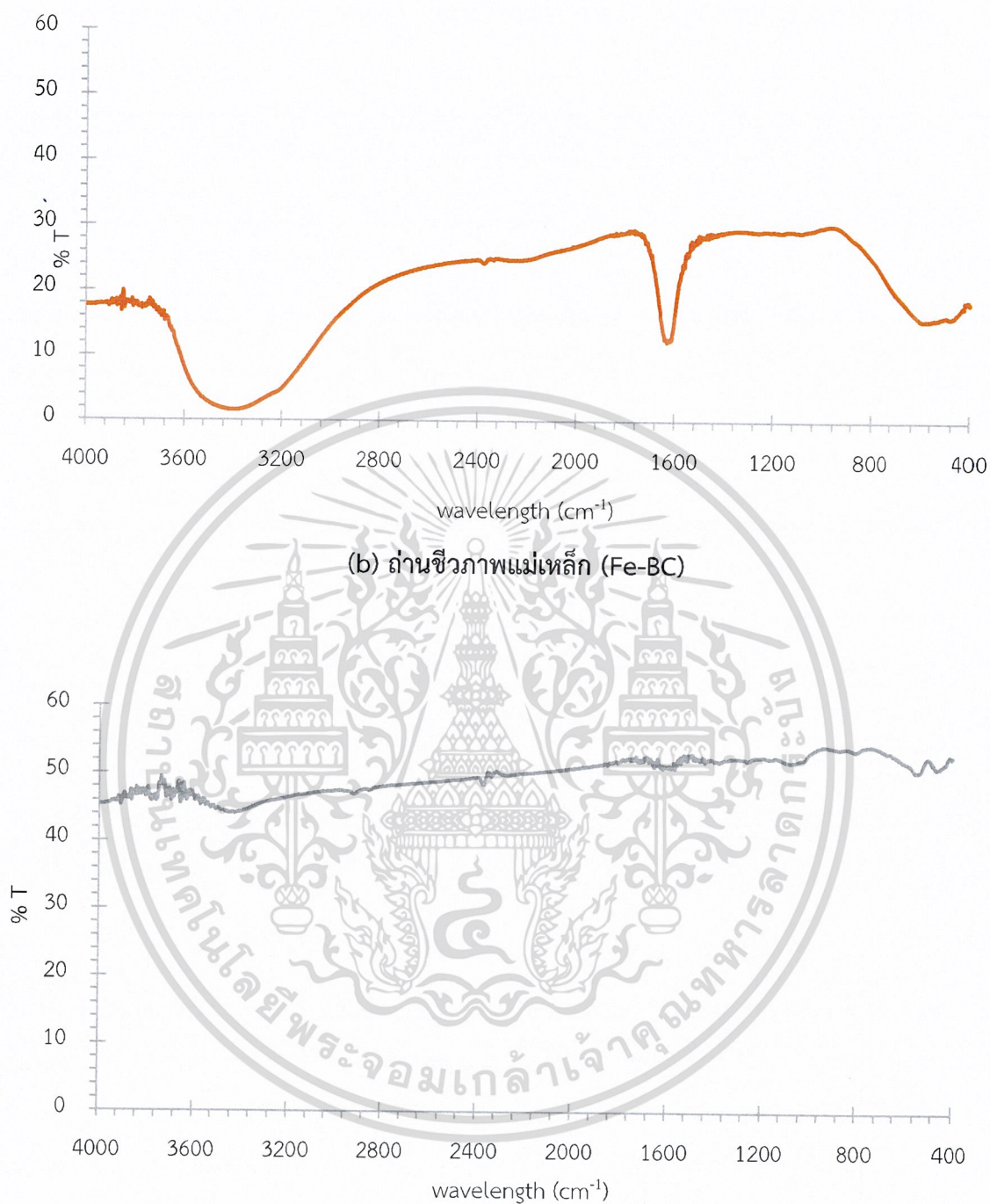
ภาคผนวก จ

ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุดูดซับ
โดยใช้ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)



(a) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา (BC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.1 สเปกตรัมของผักตบชวา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

Acid Neutralization capability (ANC)

ตารางที่ ฉ.1 แสดงปริมาณกรด-เบสที่เติมกับค่า pH

ค่าความเป็นกรด-เบส ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโคโคซิเลตเฟต				ปริมาณ กรด-เบส (meq/g)
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
12.00	12.00	12.06	12.02	18.60
12.00	11.99	12.05	12.01	18.40
11.99	11.99	12.05	12.01	18.20
11.99	11.98	12.05	12.01	18.00
11.98	11.98	12.04	12.00	17.80
11.97	11.97	12.04	11.99	17.60
11.97	11.97	12.03	11.99	17.40
11.96	11.96	12.03	11.98	17.20
11.96	11.95	12.02	11.98	17.00
11.95	11.94	12.02	11.97	16.80
11.95	11.93	12.01	11.96	16.60
11.94	11.92	12.01	11.96	16.40
11.93	11.92	12.00	11.95	16.20
11.92	11.91	11.99	11.94	16.00
11.91	11.90	11.99	11.93	15.80
11.90	11.89	11.99	11.93	15.60
11.89	11.88	11.98	11.92	15.40
11.88	11.87	11.98	11.91	15.20
11.88	11.87	11.97	11.91	15.00
11.87	11.86	11.97	11.90	14.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.86	11.86	11.96	11.89	14.60
11.85	11.85	11.95	11.88	14.40
11.85	11.83	11.94	11.87	14.20
11.84	11.80	11.93	11.86	14.00
11.83	11.79	11.92	11.85	13.80
11.82	11.78	11.91	11.84	13.60
11.80	11.77	11.90	11.82	13.40
11.79	11.76	11.90	11.82	13.20
11.79	11.72	11.90	11.80	13.00
11.78	11.69	11.89	11.79	12.80
11.78	11.66	11.88	11.77	12.60
11.75	11.65	11.87	11.76	12.40
11.74	11.63	11.86	11.74	12.20
11.73	11.61	11.85	11.73	12.00
11.73	11.60	11.84	11.72	11.80
11.72	11.58	11.84	11.71	11.60
11.71	11.56	11.83	11.70	11.40
11.69	11.54	11.82	11.68	11.20
11.68	11.52	11.80	11.67	11.00
11.67	11.50	11.80	11.66	10.80
11.66	11.48	11.78	11.64	10.60
11.65	11.46	11.77	11.63	10.40
11.64	11.44	11.76	11.61	10.20
11.62	11.42	11.74	11.59	10.00
11.61	11.39	11.73	11.58	09.80
11.60	11.35	11.72	11.56	09.60
11.58	11.33	11.71	11.54	09.40
11.57	11.31	11.70	11.53	09.20
11.54	11.28	11.69	11.50	09.00
11.53	11.26	11.68	11.49	08.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.51	11.24	11.67	11.47	08.60
11.49	11.22	11.65	11.45	08.40
11.47	11.19	11.64	11.43	08.20
11.45	11.17	11.62	11.41	08.00
11.43	11.15	11.61	11.40	07.80
11.42	11.13	11.60	11.38	07.60
11.39	11.11	11.58	11.36	07.40
11.36	11.09	11.57	11.34	07.20
11.34	11.07	11.55	11.32	07.00
11.32	11.05	11.53	11.30	06.80
11.29	11.02	11.52	11.28	06.60
11.27	10.99	11.50	11.25	06.40
11.23	10.97	11.48	11.23	06.20
11.21	10.94	11.46	11.20	06.00
11.18	10.91	11.45	11.18	05.80
11.15	10.88	11.43	11.15	05.60
11.04	10.85	11.43	11.11	05.40
11.00	10.81	11.37	11.06	05.20
10.96	10.77	11.34	11.02	05.00
10.90	10.74	11.30	10.98	04.80
10.84	10.72	11.27	10.94	04.60
10.75	10.66	11.23	10.88	04.40
10.72	10.62	11.20	10.85	04.20
10.62	10.57	11.15	10.78	04.00
10.53	10.53	11.12	10.73	03.80
10.41	10.48	11.07	10.65	03.60
10.27	10.42	11.04	10.58	03.40
10.25	10.42	10.98	10.55	03.20
10.20	10.36	10.92	10.49	03.00
10.18	10.28	10.85	10.44	02.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เสถียรได้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่มีอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยนโยบายด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.16	10.17	10.77	10.37	02.60
10.12	10.06	10.68	10.29	02.40
10.09	9.88	10.58	10.18	02.20
10.05	9.62	10.43	10.03	02.00
9.82	9.17	10.27	9.75	01.80
9.23	9.09	10.00	9.44	01.60
5.79	6.93	8.55	7.09	01.40
5.70	5.25	6.62	5.86	01.20
3.65	3.01	3.61	3.42	01.00
2.60	2.84	3.07	2.84	00.80
2.55	2.73	2.77	2.68	00.60
2.50	2.59	2.60	2.56	00.40
2.48	2.57	2.57	2.54	00.20
2.46	2.55	2.52	2.51	00.00
2.45	2.53	2.49	2.49	-00.20
2.44	2.52	2.47	2.48	-00.40
2.42	2.50	2.46	2.46	-00.60
2.40	2.49	2.44	2.44	-00.80
2.38	2.48	2.41	2.42	-01.00
2.36	2.45	2.40	2.40	-01.20
2.34	2.43	2.35	2.37	-01.40
2.33	2.41	2.33	2.36	-01.60
2.32	2.38	2.30	2.33	-01.80
2.30	2.36	2.27	2.31	-02.00
2.28	2.34	2.25	2.29	-02.20
2.26	2.33	2.24	2.28	-02.40
2.26	2.31	2.23	2.27	-02.60
2.25	2.29	2.21	2.25	-02.80
2.23	2.28	2.19	2.23	-03.00
2.22	2.27	2.18	2.22	-03.20

ช่วง pH 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.21	2.26	2.16	2.21	-03.40
2.20	2.24	2.14	2.19	-03.60
2.19	2.22	2.12	2.18	-03.80
2.18	2.21	2.10	2.16	-04.00
2.18	2.20	2.08	2.15	-04.20
2.17	2.19	2.07	2.14	-04.40
2.15	2.18	2.06	2.13	-04.60
2.14	2.17	2.05	2.12	-04.80
2.14	2.16	2.04	2.11	-05.00
2.13	2.14	2.03	2.10	-05.20
2.12	2.13	2.02	2.09	-05.40
2.11	2.12	2.01	2.08	-05.60
2.10	2.11	2.00	2.07	-05.80
2.09	2.10	2.00	2.06	-06.00
2.08	2.09	1.99	2.05	-06.20
2.07	2.08	1.98	2.04	-06.40
2.06	2.07	1.97	2.03	-06.60
2.05	2.06	1.96	2.02	-06.80
2.05	2.05	1.95	2.02	-07.00
2.04	2.04	1.94	2.01	-07.20
2.03	2.03	1.93	2.00	-07.40
2.02	2.02	1.91	1.98	-07.60
2.01	2.01	1.90	1.97	-07.80
2.01	2.00	1.90	1.97	-08.00
2.00	1.99	1.89	1.96	-08.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าความสามารถในการสะเทินกรด (Acid neutralization capability; ANC)

ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟต

pH 3.65 ปริมาณกรดที่เติม $(1.00/1.0000) \times 1000 = 1000.00 \text{ meq/kg}$

pH 3.01 ปริมาณกรดที่เติม $(1.00/1.0000) \times 1000 = 1000.00 \text{ meq/kg}$

pH 3.61 ปริมาณกรดที่เติม $(1.00/1.0000) \times 1000 = 1000.00 \text{ meq/kg}$

ปริมาณกรดที่เติมเฉลี่ย 1000.00 meq/kg



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

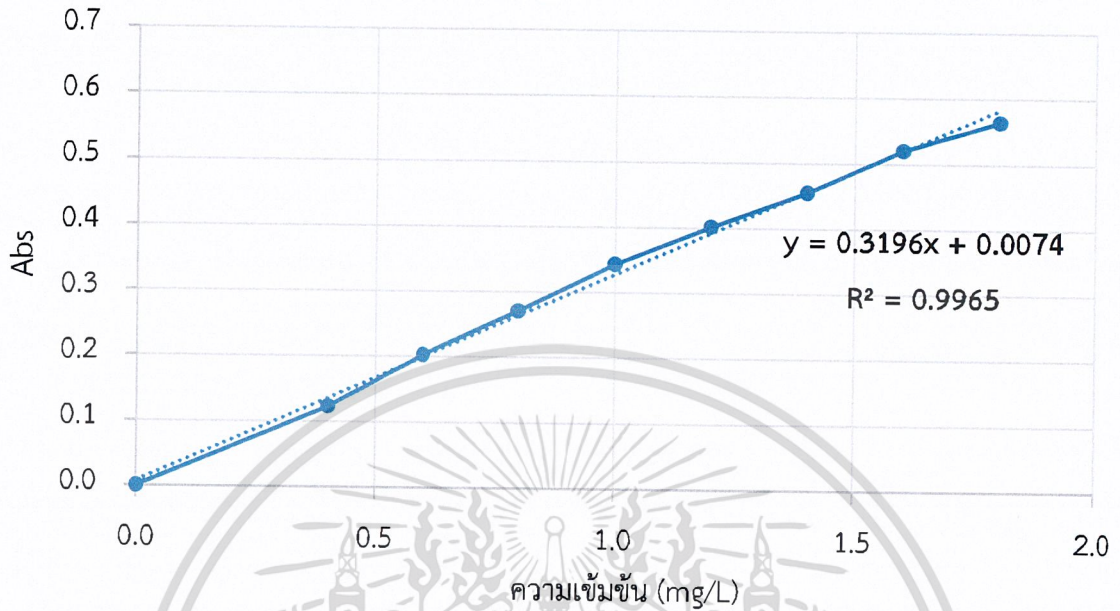
วิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก และผลการศึกษาผล ต่อประสิทธิภาพของการลดการเคลื่อนที่ของโลหะ

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปค
โทโฟโตมิเตอร์ (AAS)

ชนิดตัวอย่าง	สารละลายมาตรฐานแคดเมียม (Cd)	
	ความเข้มข้น(mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
แบลงค์	0.00	0.0000
Cd 1	0.40	0.1226
Cd 2	0.60	0.2026
Cd 3	0.80	0.2705
Cd 4	1.00	0.3432
Cd 5	1.20	0.4013
Cd 6	1.40	0.4549
Cd 7	1.60	0.5199
Cd 8	1.80	0.5640

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟมาตรฐานแคดเมียม



รูปที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Abs) กับ ความเข้มข้น (mg/L) ของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม

1. การวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก (แคดเมียม)

ตารางที่ ข.2 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความเข้มข้นของแคดเมียมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

ชนิดตัวอย่าง	ค่าที่วัดได้จาก AAS (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
SDS/Fe-Bc	0.042	0.038	0.043	0.041	0.003
ดิน	0.017	0.020	0.017	0.018	0.002
ดินผสมแคดเมียม	0.557	0.622	0.651	0.610	0.048

2. ศึกษาปริมาณการเคลื่อนที่ของแคดเมียม ด้วยวิธี Singel-Step Extraction

ตารางที่ ข.3 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความเข้มข้นของแคดเมียมที่สกัดด้วย

สารละลาย DTPA จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

ชนิดตัวอย่าง	ค่าที่วัดได้จาก AAS (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดินผสมถ่าน 0 %	0.092	0.137	0.139	0.138	0.001
ดินผสมถ่าน 0.5 %	0.129	0.127	0.170	0.128	0.001
ดินผสมถ่าน 1 %	0.132	0.136	0.131	0.133	0.003
ดินผสมถ่าน 2 %	0.146	0.154	0.151	0.150	0.004
ดินผสมถ่าน 5 %	0.201	0.202	0.198	0.200	0.002

ตารางที่ ข.4 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความเข้มข้นของแคดเมียมที่สกัดด้วย

สารละลาย CaCl_2 จากการวิเคราะห์ด้วย AAS

ชนิดตัวอย่าง	ค่าที่วัดได้จาก AAS (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดินผสมถ่าน 0 %	1.713	1.714	1.720	1.716	0.004
ดินผสมถ่าน 0.5 %	1.765	1.760	1.756	1.760	0.005
ดินผสมถ่าน 1 %	1.804	1.799	1.801	1.801	0.003
ดินผสมถ่าน 2 %	1.812	1.809	1.809	1.810	0.002
ดินผสมถ่าน 5 %	1.811	1.815	1.816	1.814	0.003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความเข้มข้นของแคดเมียมที่สกัดด้วย สารละลาย EDTA จากการวิเคราะห์ด้วย AAS

ชนิดตัวอย่าง	ค่าที่วัดได้จาก AAS (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดินผสมถ่าน 0 %	1.656	1.736	1.734	1.735	0.001
ดินผสมถ่าน 0.5 %	1.778	1.763	1.760	1.767	0.010
ดินผสมถ่าน 1 %	1.860	1.864	1.693	1.862	0.003
ดินผสมถ่าน 2 %	1.791	1.799	1.805	1.798	0.007
ดินผสมถ่าน 5 %	1.800	1.806	1.961	1.803	0.004

ตารางที่ ข.6 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความเข้มข้นของแคดเมียมที่สกัดด้วย สารละลาย NH_4OAc จากการวิเคราะห์ด้วย AAS

ชนิดตัวอย่าง	ค่าที่วัดได้จาก AAS (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ดินผสมถ่าน 0 %	1.458	1.408	1.409	1.409	0.001
ดินผสมถ่าน 0.5 %	1.419	1.422	1.420	1.420	0.002
ดินผสมถ่าน 1 %	1.415	1.412	1.494	1.414	0.002
ดินผสมถ่าน 2 %	1.450	1.461	1.378	1.456	0.008
ดินผสมถ่าน 5 %	1.282	1.280	1.354	1.281	0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแคดเมียม โดยการสกัดด้วยวิธี Singel-Step Extraction จาก การวิเคราะห์ด้วย AAS

ชนิดตัวอย่าง	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้จาก AAS (mg/L)			
	DTPA	CaCl ₂	EDTA	NH ₄ OAc
ดินผสมถ่าน 0 %	0.138	1.7157	1.735	1.409
ดินผสมถ่าน 0.5 %	0.128	1.7603	1.767	1.420
ดินผสมถ่าน 1 %	0.133	1.8013	1.862	1.414
ดินผสมถ่าน 2 %	0.150	1.8100	1.798	1.456
ดินผสมถ่าน 5 %	0.200	1.8140	1.803	1.220

ตารางที่ ข.8 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยสารละลาย DTPA

ชนิดตัวอย่าง	ปริมาณ Cd (mg)	ค่าที่วัดได้ (mg/L)	Cd ที่สกัดได้ (mg/L)	Cd ที่สกัดได้ (%)	Cd ที่เหลือ ในตัวอย่าง (mg/L)	Cd ที่เหลือ ในตัวอย่าง (%)
ดินผสมถ่าน 0 %	0.50	0.1380	0.0028	0.55	0.4972	99.45
ดินผสมถ่าน 0.5 %	0.50	0.1280	0.0026	0.51	0.4974	99.49
ดินผสมถ่าน 1 %	0.50	0.1330	0.0027	0.53	0.4973	99.47
ดินผสมถ่าน 2 %	0.50	0.1503	0.0030	0.60	0.4970	99.40
ดินผสมถ่าน 5 %	0.50	0.2003	0.0040	0.80	0.4960	99.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยสารละลาย CaCl_2

ชนิดตัวอย่าง	ปริมาณ Cd (mg)	ค่าที่วัดได้ (mg/L)	Cd ที่สกัดได้ (mg/L)	Cd ที่สกัดได้ (%)	Cd ที่เหลือในตัวอย่าง (mg/L)	Cd ที่เหลือในตัวอย่าง (%)
ดินผสมถ่าน 0 %	0.25	1.7157	0.0343	13.73	0.2157	86.27
ดินผสมถ่าน 0.5 %	0.25	1.7603	0.0352	14.08	0.2148	85.92
ดินผสมถ่าน 1 %	0.25	1.8013	0.0360	14.41	0.2140	85.59
ดินผสมถ่าน 2 %	0.25	1.8100	0.0362	14.48	0.2138	85.52
ดินผสมถ่าน 5 %	0.25	1.8140	0.0363	14.51	0.2137	85.49

ตารางที่ ข.10 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยสารละลาย EDTA

ชนิดตัวอย่าง	ปริมาณ Cd (mg)	ค่าที่วัดได้ (mg/L)	Cd ที่สกัดได้ (mg/L)	Cd ที่สกัดได้ (%)	Cd ที่เหลือในตัวอย่าง (mg/L)	Cd ที่เหลือในตัวอย่าง (%)
ดินผสมถ่าน 0 %	0.04	1.8030	0.0361	90.15	0.0039	9.85
ดินผสมถ่าน 0.5 %	0.04	1.7670	0.0353	88.35	0.0047	11.65
ดินผสมถ่าน 1 %	0.04	1.8620	0.0372	93.10	0.0028	6.90
ดินผสมถ่าน 2 %	0.04	1.7983	0.0360	89.92	0.0040	10.08
ดินผสมถ่าน 5 %	0.04	1.7350	0.0347	86.75	0.0053	13.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

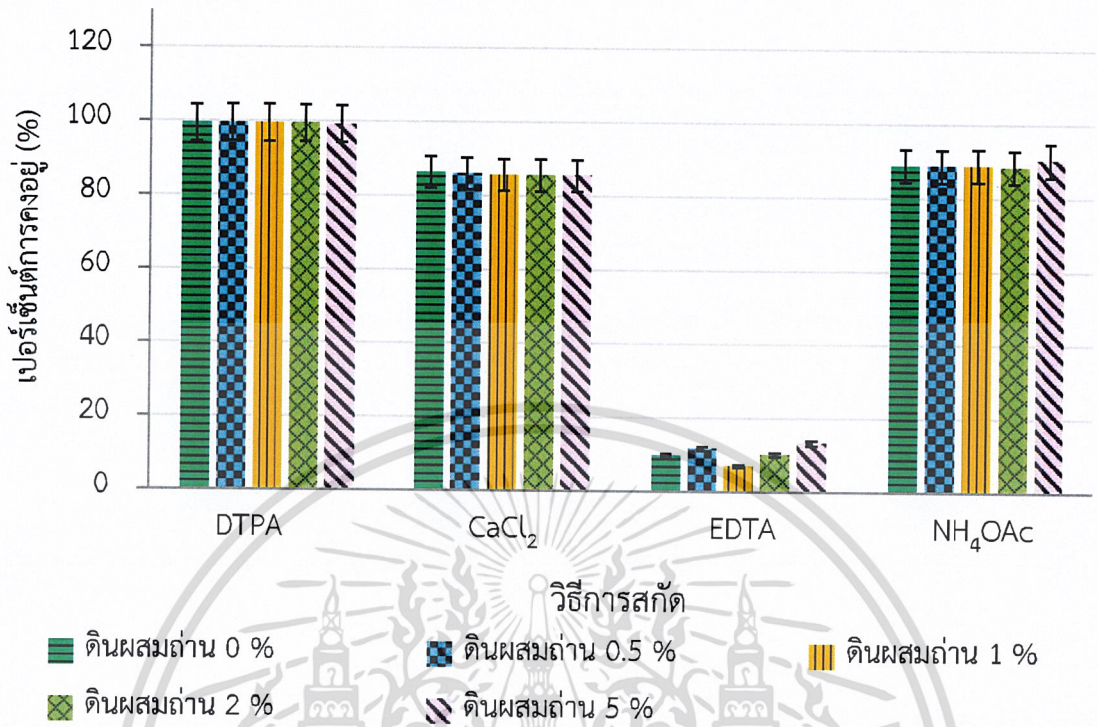
ตารางที่ ข.11 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยสารละลาย NH_4OAc

ชนิดตัวอย่าง	ปริมาณ Cd (mg)	ค่าที่วัดได้ (mg/L)	Cd ที่สกัดได้ (mg/L)	Cd ที่สกัดได้ (%)	Cd ที่เหลือในตัวอย่าง (mg/L)	Cd ที่เหลือในตัวอย่าง (%)
ดินผสมถ่าน 0 %	0.25	1.4085	0.0282	11.27	0.2218	88.73
ดินผสมถ่าน 0.5 %	0.25	1.4203	0.0284	11.36	0.2216	88.64
ดินผสมถ่าน 1 %	0.25	1.4135	0.0283	11.31	0.2217	88.69
ดินผสมถ่าน 2 %	0.25	1.4555	0.0291	11.64	0.2209	88.36
ดินผสมถ่าน 5 %	0.25	1.2200	0.0244	9.76	0.2256	90.24

ตารางที่ ข.12 การหาเปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของแคดเมียมที่สกัดด้วยวิธี Singel-Step Extraction

ชนิดตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การคงอยู่ (%)			
	DTPA	CaCl_2	EDTA	NH_4OAc
ดินผสมถ่าน 0 %	99.45	86.27	9.85	88.73
ดินผสมถ่าน 0.5 %	99.49	85.92	11.65	88.64
ดินผสมถ่าน 1 %	99.47	85.59	6.90	88.69
ดินผสมถ่าน 2 %	99.40	85.52	10.08	88.36
ดินผสมถ่าน 5 %	99.20	85.49	13.25	90.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงอยู่ของแคดเมียม (%) กับ วิธีการสกัด Singel-Step Extraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการศึกษาการเปลี่ยนรูปฟอร์มของแคดเมียม ด้วยวิธี Six-step sequential extraction ตารางที่ ข.13 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความเข้มข้นของแคดเมียมที่สกัดด้วยวิธี Six-step sequential extraction จากการวิเคราะห์ด้วย AAS ของดินผสมถ่าน 0%

ลำดับขั้นตอน	ค่าที่วัดได้จาก AAS (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ส่วนที่ 1	0.0240	0.0190	0.0230	0.0220	0.0026
ส่วนที่ 2	0.2610	0.2620	0.2600	0.2610	0.0010
ส่วนที่ 3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ส่วนที่ 4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ส่วนที่ 5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ส่วนที่ 6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ข.14 การหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความเข้มข้นของแคดเมียมที่สกัดด้วยวิธี Six-step sequential extraction จากการวิเคราะห์ด้วย AAS ของดินผสมถ่าน5%

ลำดับขั้นตอน	ค่าที่วัดได้จาก AAS (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ส่วนที่ 1	0.026	0.025	0.024	0.026	0.001
ส่วนที่ 2	0.238	0.240	0.239	0.239	0.001
ส่วนที่ 3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ส่วนที่ 4	0.034	0.031	0.035	0.033	0.002
ส่วนที่ 5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ส่วนที่ 6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

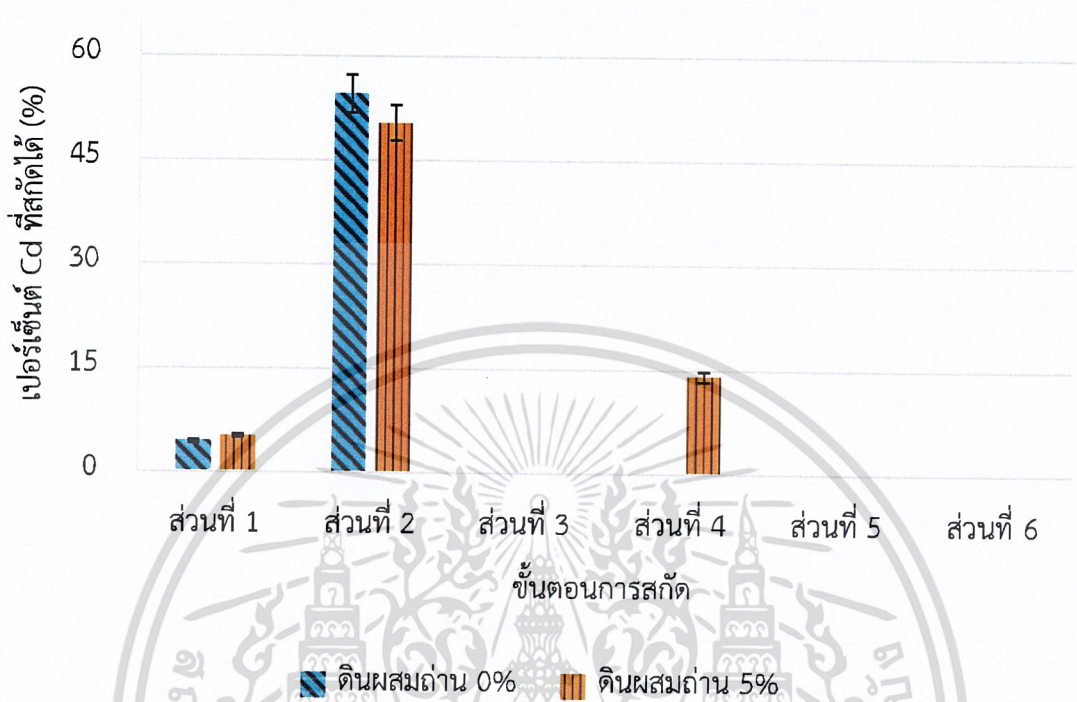
ตารางที่ ข.15 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยวิธี Six-step sequential extraction ของดินผสมถ่าน 0%

ลำดับขั้นตอน	ปริมาณ Cd (mg)	ค่าที่วัดได้ (mg/L)	Cd ที่สกัดได้ (mg/L)	Cd ที่สกัดได้ (%)	Cd ที่เหลือในตัวอย่าง (mg/L)	Cd ที่เหลือในตัวอย่าง (%)
ส่วนที่ 1	0.050	0.0220	0.00220	4.40	0.0478	95.60
ส่วนที่ 2	0.048	0.2610	0.02610	54.60	0.0217	43.40
ส่วนที่ 3	0.022	0.0000	0.00000	0.00	0.0217	43.40
ส่วนที่ 4	0.022	0.0000	0.00000	0.00	0.0217	43.40
ส่วนที่ 5	0.022	0.0000	0.00000	0.00	0.0217	43.40
ส่วนที่ 6	0.022	0.0000	0.00000	0.00	0.0217	43.40

ตารางที่ ข.16 การหาความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด จากการสกัดด้วยวิธี Six-step sequential extraction ของดินผสมถ่าน 5%

ลำดับขั้นตอน	ปริมาณ Cd (mg)	ค่าที่วัดได้ (mg/L)	Cd ที่สกัดได้ (mg/L)	Cd ที่สกัดได้ (%)	Cd ที่เหลือในตัวอย่าง (mg/L)	Cd ที่เหลือในตัวอย่าง (%)
ส่วนที่ 1	0.050	0.026	0.0026	5.20	0.0474	94.80
ส่วนที่ 2	0.047	0.239	0.2390	50.42	0.0235	47.00
ส่วนที่ 3	0.024	0.000	0.0000	0.00	0.0235	47.00
ส่วนที่ 4	0.024	0.033	0.0330	14.04	0.0202	40.40
ส่วนที่ 5	0.020	0.000	0.0000	0.00	0.0202	40.40
ส่วนที่ 6	0.020	0.000	0.0000	0.00	0.0202	40.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์แคดเมียมทั้งหมดที่สกัดได้ (%) กับ ขั้นตอนการสกัดวิธี Six-step sequential extraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้