

การชะลอการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินโดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต

TRANSPORT RETARDATION OF HEAVY METALS IN SOIL USING
PHOSPHATE FERTILIZER



ณัฐนันท์ รอดสา

NUTTANUN RODSA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-016-021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TRANSPORT RETARDATION OF HEAVY METALS IN SOIL USING
PHOSPHATE FERTILIZER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-SC-M-016-021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การชะลอการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินโดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐนันท์ รอดสา
รหัสประจำตัว	57605046
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนโลหะหนักในดินกำลังเป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงดำเนินการศึกษาถึงประสิทธิภาพของปุ๋ยฟอสเฟต ซึ่งได้แก่ หินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ปริมาณ 0, 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg ในการปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส เติบสารปรับเสถียรลงไปเป็นเวลานาน 1 เดือน จากนั้นทำการศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักโดยการสกัดตามลำดับชั้น 6 ชั้นตอน และศึกษาศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพ โดยการสกัดแบบชั้นตอนเดียว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหินฟอสเฟตช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรดต่างและความเข้มข้นทั้งหมดของแมงกานีสในดินแต่ไม่มีผลต่อความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและตะกั่วในดิน ปุ๋ยฟอสเฟตสามารถเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มที่ไม่เสถียรของโลหะหนักเป็นรูปฟอร์มที่เสถียรมากขึ้น การเติมหินฟอสเฟตปริมาณ 7,500 mgP/kg ลงในตัวอย่างดินจากจังหวัดระยองและนครปฐม จะช่วยลดการเคลื่อนที่ของโลหะทั้ง 3 ชนิดได้ดีที่สุด การปรับปรุงดินด้วยหินฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน และลดการดูดซึมโดยพืช การปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตจะส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนของโลหะหนักในดินได้ดีที่สุด รองลงมาคือ ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟตถือว่าเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส

คำสำคัญ: การชะลอการเคลื่อนที่, หินฟอสเฟต, ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต, โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต, โลหะหนัก, การปรับปรุงดิน

Thesis Title	Transport Retardation of Heavy Metals in Soil Using Phosphate Fertilizer
Student Name	Ms. Nuttanun Rodsa
Student ID	57605046
Degree	Master of Science
Department	Chemistry
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Chompoonut Chaiyaraksa

ABSTRACT

Contamination of heavy metals in soil is a major problem that causes damage to the environment. The research was carried out to study the efficiency of phosphate fertilizer, including phosphate rock, diammonium phosphate and monopotassium phosphate at 0, 2,500, 5,000 and 7,500 mgP/kg to stabilize lead, cadmium, and manganese contaminated soil. The stabilizers were applied for 1 month. The pH value, total concentration of heavy metals, a formation of heavy metals by 6 step sequential extraction and potential to enter the biological system by single step extraction were studied. The results showed that phosphate rock increased soil pH and the total concentration of manganese but did not affect the total concentration of cadmium and lead in the soil. Phosphate fertilizers could change the form of the unstable to a more stable forms of heavy metals. Addition of 7,500 mgP/kg of phosphate rock to soil samples from Rayong and Nakhon Pathom would be the best to reduce the mobility of all three metals. Soil improvement with rock phosphate and monopotassium phosphate had the potential to reduce the mobility of heavy metals in the soils and the metal absorption by plants. Application of rock phosphate resulted in the best exchange of heavy metals in the soil, followed by di-ammonium phosphate. Soil improvement with phosphate fertilizer was considered a good alternative for stabilizing soils contaminated with cadmium, lead, and manganese.

Keywords: transport retardation, phosphate rock, diammonium phosphate, monopotassium phosphate, heavy metals, soil-amendment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่งผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมนุช ไชยรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวก ให้ความช่วยเหลือ และอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาเคมี เจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษา และเจ้าหน้าที่ฝ่ายอาคาร คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือสำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และเครื่องมือต่างๆ ในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้าเป็นอย่างสูง ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

นางสาวณัฐนันท์ รอดสา

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฑ
คำย่อและสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 รูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน.....	4
2.1.1 รูปที่ละลายในสารละลายดิน (soluble form).....	4
2.1.2 รูปที่ถูกดูดซับในตำแหน่งผิวของอนุภาคคอลลอยด์ดิน (adsorbed form).....	4
2.1.3 รูปที่ตกตะกอน (precipitated form).....	4
2.1.4 รูปที่ถูกตรึงและจับกับสารแขวนลอยอื่นหรือแร่ในดิน (fixed, occluded form).....	4
2.1.5 รูปที่ถูกคลุกเคล้าเข้าสู่ระบบชีวภาพเป็นสารอินทรีย์ (organic form).....	5
2.2 ลักษณะในดิน.....	5
2.3 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกระจายตัวของโลหะหนักในดิน.....	6
2.4 แคตเมียม.....	6
2.5 ตะกั่ว.....	7
2.6 แมงกานีส.....	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 เทคโนโลยีการฟื้นฟูดิน.....	7
2.7.1 การปรับเสถียร (Solidification).....	8
2.7.2 กลไกการปรับเสถียร.....	9
2.7.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับเสถียร.....	10
2.8 สารปรับเสถียร (Stabilizer).....	10
2.8.1 สารที่ละลายน้ำได้ (Soluble Chemical).....	10
2.8.2 สารที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ (Insoluble Chemical).....	11
2.9 ปุ๋ยฟอสเฟต (Phosphate fertilizers).....	11
2.9.1 หินฟอสเฟต.....	11
2.9.2 ไคเอมโมเนียมฟอสเฟต.....	14
2.9.3 โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต.....	14
2.10 การตรึงฟอสเฟตของดิน.....	15
2.10.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการตรึงฟอสเฟตของดิน.....	16
2.11 การสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction).....	17
2.12 การสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step Extraction).....	18
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	21
3.1.1 อุปกรณ์.....	21
3.1.2 สารเคมี.....	22
3.2 ตัวอย่างดินและสารปรับปรุงดิน.....	24
3.2.1 แหล่งที่มาของตัวอย่างดิน.....	24
3.2.2 สารปรับปรุงดิน.....	24
3.3 การเตรียมตัวอย่างดินและสารปรับปรุงดิน.....	25
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการวิเคราะห์.....	25
3.3.2 การเตรียมตัวอย่างสารปรับปรุงดินสำหรับการวิเคราะห์.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดิน และสารปรับปรุงดิน.....	26
3.3.4 การเตรียมดินสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนโลหะหนัก.....	27
3.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการปรับเสถียร.....	28
3.5 การวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีส.....	28
3.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน.....	29
3.7 การวิเคราะห์ศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพของโลหะหนัก.....	30
3.7.1 การสกัดด้วยสารละลาย 0.05 M Ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA).....	30
3.7.2 การสกัดด้วยสารละลาย 1 M Ammonium acetate ($C_2H_3O_2NH_4$).....	30
3.7.3 การสกัดด้วยสารละลาย 0.005 M Diethylene triamine pentaacetic acid (DTPA).....	31
3.7.4 การสกัดด้วยสารละลาย 0.01 M Calcium Chloride ($CaCl_2$).....	31
3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	32
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดิน.....	32
4.1.1 ความชื้น.....	33
4.1.2 ความหนาแน่นรวม.....	34
4.1.3 ค่าความเป็นกรดต่างในดิน.....	34
4.1.4 ร้อยละของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน.....	34
4.1.5 ร้อยละของปริมาณอนินทรีย์วัตถุ.....	34
4.1.6 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	34
4.1.7 ลักษณะเนื้อดิน.....	35
4.1.8 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด.....	35
4.1.9 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์.....	35
4.1.10 ปริมาณโลหะหนักรวม.....	36
4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน.....	37
4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดิน.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดในดินนครปฐม.....	41
4.4.1 ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด.....	41
4.4.2 ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมด.....	42
4.4.3 ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมด.....	43
4.5 การศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดในดินระยอง.....	45
4.5.1 ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด.....	45
4.5.2 ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมด.....	45
4.5.3 ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมด.....	46
4.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดินนครปฐม.....	47
4.6.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียม.....	48
4.6.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่ว.....	51
4.6.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีส.....	53
4.7 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดินระยอง.....	55
4.7.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียม.....	55
4.7.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่ว.....	57
4.7.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีส.....	59
4.8 การศึกษาศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพของโลหะหนัก.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
เอกสารอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์ดินและสารปรับปรุงดิน.....	79
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีดินและสารปรับปรุงดินก่อนการ ปรับเสถียร.....	88
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินหลังการปรับเสถียร.....	100
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	132
ประวัติผู้เขียน.....	152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดิน.....	26
3.2 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน.....	27
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดิน.....	33
4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน.....	36
4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน.....	38
4.4 ค่าความเป็นกรดต่างในดินนครปฐมและระยอง.....	39
ข-1 ความชื้นของตัวอย่างดิน.....	88
ข-2 ความหนาแน่นรวมของดินตัวอย่าง.....	88
ข-3 ความเป็นกรดต่างของตัวอย่างดิน.....	89
ข-4 อินทรีย์วัตถุของดินตัวอย่าง.....	89
ข-5 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินตัวอย่าง.....	89
ข-6 อนินทรีย์วัตถุของตัวอย่างดิน.....	90
ข-7 ขนาดอนุภาคดินของดินตัวอย่าง.....	91
ข-8 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินตัวอย่าง.....	91
ข-9 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของดินตัวอย่าง.....	91
ข-10 ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดของดินตัวอย่าง.....	92
ข-11 ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดของดินตัวอย่าง.....	92
ข-12 ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดของดินตัวอย่าง.....	92
ข-13 ความชื้นของตัวอย่างสารปรับปรุงดิน.....	93
ข-14 ความเป็นกรดต่างของตัวอย่างสารปรับปรุงดิน.....	93
ข-15 อนินทรีย์วัตถุของตัวอย่างสารปรับปรุงดิน.....	94
ข-16 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของตัวอย่างสารปรับปรุงดิน.....	95
ข-17 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดของตัวอย่างสารปรับปรุงดิน.....	95
ข-18 ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดในตัวอย่างสารปรับปรุงดิน.....	96
ข-19 ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในตัวอย่างสารปรับปรุงดิน.....	96
ข-20 ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดในตัวอย่างสารปรับปรุงดิน.....	97
ค-1 ค่าความเป็นกรดต่างในดิน.....	100
ค-2 ความเข้มข้นโลหะหนักทั้งหมด (แคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส).....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-3 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมในดิน.....	105
ค-4 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่วในดิน.....	109
ค-5 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีสในดิน.....	113
ค-6 ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการเคลื่อนที่ (สกัดด้วย สารละลาย 0.05 M EDTA).....	116
ค-7 ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการแลกเปลี่ยน (สกัดด้วย สารละลาย 1 M NH_4OAc).....	120
ค-8 ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (สกัดด้วย สารละลาย 0.005 M DTPA).....	124
ค-9 ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (สกัดด้วย สารละลาย 0.01 M CaCl_2).....	128
ง-1 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการ เปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดินหลังจากการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดิน นครปฐม.....	132
ง-2 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการ เปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดินหลังจากการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดิน ระยอง.....	133
ง-3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการ เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในดินนครปฐมหลังการปรับปรุงด้วย ปุ๋ยฟอสเฟต.....	133
ง-4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการ เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของตะกั่วในดินนครปฐมหลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ย ฟอสเฟต.....	134
ง-5 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการ เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของแมงกานีสในดินนครปฐมหลังการปรับปรุงด้วย ปุ๋ยฟอสเฟต.....	134

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-6 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในดินระยองหลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	135
ง-7 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของตะกั่วในดินระยองหลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	135
ง-8 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของแมงกานีสในดินระยองหลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	136
ง-9 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมที่ไม่เสถียร หลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินนครปฐม.....	136
ง-10 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่วที่ไม่เสถียร หลังการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินนครปฐม.....	137
ง-11 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีสที่ไม่เสถียร หลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินนครปฐม.....	137
ง-12 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมที่ไม่เสถียร หลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินระยอง.....	138
ง-13 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่วที่ไม่เสถียร หลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินระยอง.....	138
ง-14 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีสที่ไม่เสถียร หลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินระยอง.....	139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-15 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพ การเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ย ฟอสเฟต.....	139
ง-16 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพ การเคลื่อนที่ของตะกั่วในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต	140
ง-17 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพ การเคลื่อนที่ของแมงกานีสในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ย ฟอสเฟต.....	140
ง-18 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพ การแลกเปลี่ยนของแคดเมียมในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ย ฟอสเฟต.....	141
ง-19 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพ การแลกเปลี่ยนของตะกั่วในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ย ฟอสเฟต.....	141
ง-20 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพ การแลกเปลี่ยนของแมงกานีสในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ย ฟอสเฟต.....	142
ง-21 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพ การดูดซึมโดยพืชของแคดเมียมในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ย ฟอสเฟต.....	142
ง-22 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพ การดูดซึมโดยพืชของตะกั่วในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ย ฟอสเฟต.....	143
ง-23 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพ การดูดซึมโดยพืชของแมงกานีสในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ย ฟอสเฟต.....	143
ง-24 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพ การดูดซึมโดยพืชของแคดเมียมในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ย ฟอสเฟต.....	144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-25 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของตะกั่วในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	144
ง-26 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของแมงกานีสในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	145
ง-27 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	145
ง-28 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการเคลื่อนที่ของตะกั่วในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต....	146
ง-29 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการเคลื่อนที่ของแมงกานีสในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	146
ง-30 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการแลกเปลี่ยนของแคดเมียมในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	147
ง-31 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการแลกเปลี่ยนของตะกั่วในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต	147
ง-32 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการแลกเปลี่ยนของแมงกานีสในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	148
ง-33 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของแคดเมียมในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	148
ง-34 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของตะกั่วในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-35 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของแมงกานีสในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	149
ง-36 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของแคดเมียมในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	150
ง-37 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของตะกั่วในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	150
ง-38 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของแมงกานีสในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.....	151

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ปุ๋ยหินฟอสเฟต จากขมรมเกษตรปลอดสารพิษ.....	24
3.2 ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ตราหัววัว-คันไถ.....	25
3.3 ปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ตรากระทิงลูกโลก.....	25
3.4 แผนภาพแสดงวิธีการสกัดโลหะหนักรูปฟอร์มต่างๆ ออกจากดินแบบลำดับขั้น.....	29
4.1 ตัวอย่างดินนครปฐม (Np).....	32
4.2 ตัวอย่างดินระยอง (Ry).....	32
4.3 หินฟอสเฟต (RP).....	37
4.4 ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP).....	37
4.5 ปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP).....	38
4.6 ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนลิแกนด์และการตรึงฟอสเฟตด้วย silicate clays.....	41
4.7 ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดในตัวอย่างดินนครปฐม ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	42
4.8 ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในตัวอย่างดินนครปฐม ภายหลังจากการปรับเสถียร..	43
4.9 ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดในตัวอย่างดินนครปฐม ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	44
4.10 ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดในตัวอย่างดินระยอง ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	45
4.11 ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในตัวอย่างดินระยอง ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	46
4.12 ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดในตัวอย่างดินระยอง ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	47
4.13 ร้อยละรูปฟอร์มของแคดเมียมในตัวอย่างดินนครปฐม ภายหลังจากการปรับเสถียร.	49
4.14 ร้อยละรูปฟอร์มของตะกั่วในตัวอย่างดินนครปฐม ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	51
4.15 ร้อยละรูปฟอร์มของแมงกานีสในตัวอย่างดินนครปฐม ภายหลังจากการปรับเสถียร.	54
4.16 ร้อยละรูปฟอร์มของแคดเมียมในตัวอย่างดินระยอง ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	56
4.17 ร้อยละรูปฟอร์มของตะกั่วในตัวอย่างดินระยอง ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	58
4.18 ร้อยละรูปฟอร์มของแมงกานีสในตัวอย่างดินระยอง ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	60
4.19 ความเข้มข้นของแคดเมียมในตัวอย่างดินนครปฐมที่สกัดด้วย 0.05 M EDTA, 1 M NH ₄ OAc, 0.005 M DTPA และ 0.01 M CaCl ₂ ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ความเข้มข้นของตะกั่วในตัวอย่างดินนครปฐมที่สกัดด้วย 0.05 M EDTA, 1 M NH ₄ OAc, 0.005 M DTPA และ 0.01 M CaCl ₂ ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	63
4.21 ความเข้มข้นของแมงกานีสในตัวอย่างดินนครปฐมที่สกัดด้วย 0.05 M EDTA, 1 M NH ₄ OAc, 0.005 M DTPA และ 0.01 M CaCl ₂ ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	64
4.22 ความเข้มข้นของแคดเมียมในตัวอย่างดินระยองที่สกัดด้วย 0.05 M EDTA, 1 M NH ₄ OAc, 0.005 M DTPA และ 0.01 M CaCl ₂ ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	65
4.23 ความเข้มข้นของตะกั่วในตัวอย่างดินระยองที่สกัดด้วย 0.05 M EDTA, 1 M NH ₄ OAc, 0.005 M DTPA และ 0.01 M CaCl ₂ ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	65
4.24 ความเข้มข้นของแมงกานีสในตัวอย่างดินระยองที่สกัดด้วย 0.05 M EDTA, 1 M NH ₄ OAc, 0.005 M DTPA และ 0.01 M CaCl ₂ ภายหลังจากการปรับเสถียร.....	66
ข-1 กราฟมาตรฐานของแคดเมียม.....	97
ข-2 กราฟมาตรฐานของตะกั่ว.....	98
ข-3 กราฟมาตรฐานของแมงกานีส.....	98
ข-4 กราฟมาตรฐานของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์.....	99
ข-5 กราฟมาตรฐานของฟอสฟอรัสทั้งหมด.....	99

คำย่อและสัญลักษณ์

AAS	เครื่อง Atomic absorption spectrophotometer
Avail. P	ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช
CEC	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก
g	กรัม
L	ลิตร
M	โมลาร์
mg/kg	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ml	มิลลิลิตร
OM	สารอินทรีย์
ppm	หนึ่งในล้านส่วน
Total N	ไนโตรเจนทั้งหมด
XRF	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์
°C	องศาเซลเซียส
%	เปอร์เซ็นต์
pH	พีเอช
ND	ไม่สามารถอ่านค่าได้ (Not detect)
N/A	ไม่มีข้อมูล (Not available)
RP	ปุ๋ยหินฟอสเฟต
DAP	ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต
MPP	ปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน เช่น กรณีการปนเปื้อนสารตะกั่วในลำห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี และแคดเมียมที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก (แสงโฉม, 2548) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อม โดยแหล่งที่มาของการปนเปื้อนโลหะหนักที่สำคัญ ได้แก่ การใช้สารเคมีในการเกษตร โรงถลุงแร่ และโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น (Sun *et al*, 2010) ซึ่งการประกอบการอุตสาหกรรมเหมืองแร่เป็นอีกหนึ่งสาเหตุสำคัญ นับตั้งแต่ขั้นตอนการระเบิดหิน การแต่งแร่ การประกอบโลหกรรม และยิ่งไปกว่านั้นยังมีการใช้สารเคมีที่เป็นพิษในปริมาณมากอีกด้วย โดยในพื้นที่รอบๆ กิจกรรมการทำเหมืองส่วนใหญ่จะพบการปนเปื้อนของโลหะหนักในดิน เช่น แคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส เป็นต้น และในบางพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของโลหะเหล่านี้สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ.2547) ถ้าโลหะหนักนี้มีการตกค้างและปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น แหล่งน้ำ ดิน อาหาร ฯลฯ จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนที่ได้รับสัมผัส อาจจะทำให้เข้าสู่ทางเดินหายใจ ทางน้ำและอาหารที่รับประทานเข้าไป หรือแม้แต่ทางผิวหนังก็ตาม (Mulligan *et al*, 2001) เนื่องด้วยการประกอบอาชีพของประชากรในจังหวัดพิจิตรมีอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก จึงมีโอกาสที่โลหะหนักดังกล่าวจะปนเปื้อนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร (Food chain) ได้โดยง่าย ส่งผลให้เกิดการสะสมในเนื้อเยื่อพืชและสัตว์ ซึ่งเมื่อเข้าสู่สิ่งมีชีวิตแล้ว จะไปรบกวนการทำงานของเซลล์ ซึ่งเทคนิคโดยทั่วไปของการฟื้นฟูดิน เช่น การขุดและขนไปกำจัดหรือบำบัด (Excavation) การแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากดิน (Soil washing) ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพ แต่มีค่าใช้จ่ายสูง งานวิจัยจึงมุ่งเน้นไปที่ทางเลือกของเทคนิคในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยมีการปรับเสถียรและการตรึงโลหะหนักในดิน ซึ่งถือเป็นทางเลือกที่ง่าย มีประสิทธิภาพสูง สามารถใช้ได้ในพื้นที่กว้าง และมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ (Huang *et al*, 2016) โดยสารปรับปรุงดินที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ปูนขาว ซึ่งสามารถลดความคล่องตัวในการดูดซึมโลหะต่างๆ ได้ (Pierzynski *et al*, 1993) แต่ข้อเสีย คือ สามารถตรึงโลหะได้ทีละน้อย ทำให้ส่งผลถึงระยะเวลาในการฟื้นฟู (Hamon *et al*, 2002) โดยสารปรับปรุงดินนั้นจะทำให้เกิดการจับกันทางเคมีและทำให้สารปนเปื้อนต่างๆ นั้นไม่สามารถเคลื่อนที่หรือแพร่กระจายออกไปได้ (Friesl-Hanl *et al*, 2009) ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้าได้ทำการศึกษาสารปรับปรุงดิน ได้แก่ limestone, phosphate rock, และ diammonium phosphate เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการลดความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะ แคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี พบว่า สามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้ดี (Basta *et al*, 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการปรับเสถียรซึ่งลดการเคลื่อนที่ของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีส โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก ได้แก่ ชนิดและปริมาณของสารปรับปรุงดิน (หินฟอสเฟต (RP), ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP), โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP)) ในแต่ละประเภทของดิน (ดินเหนียว, ดินร่วนเหนียวปนทราย) เพื่อเป็นแนวทางในการฟื้นฟูดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการปรับเสถียรตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสที่ปนเปื้อนในดินด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต
2. เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่มีผลต่อความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสที่ปนเปื้อนในดิน
3. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสที่ปนเปื้อนในดินทั้งก่อนและหลังการปรับเสถียรด้วยสารปรับปรุงดิน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เก็บตัวอย่างดินด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างแบบรวม (Composite) ตามวิธี Equal interval on diagonal lines จากจังหวัดนครปฐม (กลุ่มชุดดินที่ 7) และจากจังหวัดระยอง (กลุ่มชุดดินที่ 43) ที่ตั้งแต่ผิวดินจนถึงระดับความลึก 30 เซนติเมตรจากผิวดิน จากนั้นทำการเตรียมดินตัวอย่าง
2. การสังเคราะห์ดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยการเติมสารละลาย แคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสลงในดินข้อ 1. ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 50, 550 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 เดือน
3. ศึกษาสมบัติและองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างดิน โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ อันได้แก่ ความชื้นในดิน (Soil moisture) ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ค่าพีเอช (pH) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter, OM) ปริมาณอนินทรีย์วัตถุ (Mineral matter) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity, CEC) วิเคราะห์เนื้อดิน (Soil texture) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available phosphorus) ปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสในดิน (Total heavy metal)
4. ศึกษาสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีของสารปรับปรุงดิน (หินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต) โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ อันได้แก่ ความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Moisture) ค่าพีเอช (pH) ปริมาณอนินทรีย์วัตถุ (Mineral matter) ปริมาณฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ (Available phosphorus) ปริมาณฟอสเฟตทั้งหมด (Total phosphate) และปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก (Total heavy metal)

5. ผสมสารปรับปรุงดิน (หินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต) ที่ปริมาณสารปรับปรุงเท่ากับ 0, 2,500, 5,000 และ 7,500 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัมดินแห้ง บ่มที่อุณหภูมิห้อง

6. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินด้วยสารปรับปรุงดิน (หินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต) ซึ่งได้แก่ ปริมาณและชนิดของสารปรับปรุงดิน โดยเมื่อครบกำหนดการปรับเสถียรนาน 1 เดือน ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง ศึกษาความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสในตัวอย่างดินหลังจากทำการปรับปรุงด้วยสารปรับปรุงดิน โดยการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) และศึกษาศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีส โดยการสกัดดินด้วยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) ด้วยสารละลาย 1 M NH_4OAc เพื่อประเมินความสามารถในการแลกเปลี่ยนของโลหะหนัก, สารละลาย 0.05 M EDTA ใช้เพื่อประเมินศักยภาพการเคลื่อนที่ และสารละลาย 0.005 M DTPA, 0.01 M CaCl_2 เพื่อประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช จากนั้นวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหการปนเปื้อนของโลหะหนักชนิดอื่นได้
2. สามารถนำไปประยุกต์เพื่อใช้ในการแก้ปัญหการปนเปื้อนของโลหะหนักในพื้นที่ที่มีการเพาะปลูกจริง

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน

เมื่อโลหะหนักอยู่ในดิน โลหะหนักจะแพร่กระจายอยู่ในส่วนต่างๆ ของดินและอยู่ในรูปที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาวะและคุณสมบัติของดิน ซึ่งรูปฟอร์มที่พบอาจเป็นรูปใดรูปหนึ่งหรือหลายรูป ดังต่อไปนี้

2.1.1 รูปที่ละลายในสารละลายดิน (soluble form)

โลหะหนักที่อยู่ในรูปนี้ส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มที่มีการแพร่กระจายอยู่ในอนุภาคทราย (sand) และทรายแป้ง (silt) เนื่องจากอนุภาคของทรายและทรายแป้งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของดินเหนียว (clay) ทำให้สามารถละลายออกสู่สารละลายดินได้ง่ายและเคลื่อนที่ได้ดี

2.1.2 รูปที่ถูกดูดซับในตำแหน่งผิวของอนุภาคคอลลอยด์ดิน (adsorbed form)

โลหะหนักที่แพร่กระจายในส่วนนี้ จะมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคดินเหนียว ทำให้สามารถอยู่ได้ด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น การถูกดูดซับที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน เพราะอนุภาคของดินเหนียวนั้นมีทั้งประจุบวกและประจุลบ และการแลกเปลี่ยนไปเป็นส่วนหนึ่งของอนุภาคดินเหนียว โดยการเข้าไปแทนที่ในช่องว่าง นอกจากอนุภาคดินเหนียวซึ่งเป็นอนินทรีย์คอลลอยด์แล้ว ระบบคอลลอยด์ในดินยังมีอินทรีย์คอลลอยด์ ซึ่งได้แก่ อินทรีย์วัตถุที่มีขนาดเล็กจำพวกกรดอินทรีย์ กรดอะมิโน ฮิวมัส และโปรตีนอีกด้วย ซึ่งจัดว่าเป็นสารคอลลอยด์ที่มีความสามารถในการดูดซับไอออนสูงเช่นเดียวกับแร่ดินเหนียว โลหะหนักจึงสามารถจับกับอินทรีย์วัตถุเหล่านี้ได้ นอกจากนี้การดูดซับกับอินทรีย์วัตถุขนาดเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ดีเหล่านี้จะส่งผลทำให้โลหะหนักส่วนนี้สามารถละลายน้ำได้ดีตามไปด้วย

2.1.3 รูปที่ตกตะกอน (precipitated form)

โลหะหนักที่ละลายในสารละลายดินหรือถูกดูดซับอยู่ที่อนุภาคของดิน อาจมีการตกตะกอนกับออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียมและแมงกานีส เนื่องจากอะลูมิเนียมและเหล็กเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของดิน โอกาสที่โลหะหนักจะปะปนหรือเกิดสารประกอบกับออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียมและแมงกานีสจึงพบได้เสมอ ซึ่งการตกตะกอนในรูปนี้จะสัมพันธ์กับความเป็นกรดของดินและความเข้มข้นของสาร

2.1.4 รูปที่ถูกตรึงและจับกับสารแขวนลอยอื่นหรือแร่ในดิน (fixed, occluded form)

โลหะหนักที่อยู่ในรูปนี้เป็นรูปที่พบในดินที่มีกระบวนการสลายตัวของสารหรือแร่ปฐมภูมิด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์หรือเคมี โดยโครงสร้างเดิมจะยุบและเรียงตัวใหม่เกิดแร่ทุติยภูมิ ซึ่งในระหว่างที่มีการสลายตัวนั้น อะตอมของธาตุบางธาตุในโครงสร้างหลุดออกจากโครงสร้าง ทำให้อะตอมของ

โลหะหนักสามารถเข้าไปแทนที่ได้ หรือองค์ประกอบที่ละลายได้ถูกละลายและเคลื่อนย้ายออกไปแล้ว โลหะหนักจึงเข้ามาแทนที่ในโครงสร้าง ซึ่งถ้าโครงสร้างใหม่อ่อนแอกว่าโครงสร้างเดิม แร่เหล่านี้ก็จะสลายตัวและสร้างโครงสร้างใหม่จนกว่าจะได้โครงสร้างที่แข็งแรงกว่า

2.1.5 รูปที่ถูกคลุกเคล้าเข้าสู่ระบบชีวภาพเป็นสารอินทรีย์ (organic form)

โลหะหนักที่ถูกจับมักเกิดการเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ขนาดใหญ่หรืออยู่ในรูปคีเลตที่มีโครงสร้างใหญ่ที่แข็งแรงและมีความเสถียรมาก โดยโลหะหนักจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางหรือสะพานเชื่อมระหว่างสารอินทรีย์และอนุภาคดินเหนียว เกิดเป็นโครงสร้างที่มีเสถียรภาพ ส่งผลให้โลหะหนักเกิดการตกตะกอน

โลหะหนักในสองรูปแรก ได้แก่ soluble form และ adsorbed form ถือเป็นรูปที่เคลื่อนที่ได้ดีในดิน รวมทั้งพืชสามารถนำไปใช้ได้ง่าย ในขณะที่โลหะหนักที่พบในสามรูปหลังจัดเป็นรูปที่เคลื่อนย้ายและแพร่กระจายได้น้อยมาก (non-mobile) (ศุภมาศ, 2539 ; Kaasalainen *et al*, 2003 ; ชัชวพร, 2551)

2.2 ลักษณะในดิน

ธาตุโลหะหนักมีลักษณะโดยทั่วไป คือ เปลี่ยนแปลงวาเลนซ์อยู่เสมอ ในรูปไฮดรอกไซด์จะมีการละลายได้ต่ำ มีความสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้สูง ชอบทำปฏิกิริยากับพวกซิลิเกต และธาตุโลหะหนักบางตัวมีนิสัยคล้ายไอออนบวก

ปัจจัยที่กำหนดการเปลี่ยนแปลงธาตุโลหะหนักในดินนั้น ได้แก่ การดูดซับบนพื้นผิวอนุภาคดินเหนียวและฮิวมัส การเกิดสารเชิงซ้อนกับฮิวมัส เช่น การเกิดคีเลต (Chelation) กับฮิวมัส เป็นต้น การถูกดูดซับและตกตะกอนโดย Hydrated oxide ของ Fe, Al, Mn เป็นต้น และการเกิดสารประกอบที่ไม่ละลายใน Redox potential บางสภาวะ หรืออาจตกตะกอนกับคาร์บอเนต ฟอสเฟต และไฮดรอกซิล เป็นต้น

ลักษณะของธาตุโลหะหนักแต่ละธาตุ มีดังนี้

1 แมงกานีส การละลายได้ขึ้นอยู่กับสภาพกรด-ด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และ Redox potential ของดิน ในสภาพ pH 6.5 ขึ้นไป จะละลายให้พืชใช้ได้บ้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานะที่มีวาเลนซ์สูง (หรือในสภาพออกซิเดชัน) กล่าวโดยทั่วไปก็คือแมงกานีสจะถูกดินยึดไว้ในสภาพดินเป็นกลางถึงด่างและมีการระบายน้ำดี แมงกานีสในรูปคีเลตจะละลายได้ดี โดยความคงทนของคีเลตจะเป็นลำดับดังนี้ $Cu > Ni > Zn > Mn$ แต่อย่างไรก็ตาม หากมีเหล็กอยู่สูงก็จะแย่งแมงกานีสเกิดเหล็กคีเลตได้ก่อน เพราะเหล็กเกิดคีเลตได้ดีกว่าแมงกานีส อย่างไรก็ตามโอกาสการเกิดเหล็กคีเลตในสภาพดินระบายน้ำดีย่อมเกิดได้น้อย เพราะสภาพดังกล่าวเหล็กมีการละลายได้ดี

2 แคลเดียม จะละลายได้ดีในสภาพดินเป็นกรด ดังนั้นการใส่ปูนตลอดจนอินทรีย์วัตถุ Silicate clay Hydrated oxides Fe, Al จะสามารถลดการละลายได้ของแคลเดียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 ตะกั่ว ในดินโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถดูดกินได้ เพราะจะอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย นอกเสียจากดินสภาพกรดจัด ดังนั้นการใส่ปูนจึงลดตะกั่วในรูปที่พืชดูดกินได้เป็นอย่างมาก ตะกั่วส่วนใหญ่อยู่ในชั้นดินบนและมีการเคลื่อนย้ายลงสู่ดินชั้นล่างน้อยมาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2535)

2.3 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกระจายตัวของโลหะหนักในดิน

พีเอชดินเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมการเคลื่อนที่ของธาตุอาหารหรือสารมลพิษในดิน เมื่อดินอยู่ในสภาพที่เป็นกรด ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในดิน จะมีการแข่งขันกับโลหะหนักในดิน ส่งผลให้ดินมีความสามารถในการดูดซับแคตไอออน (ธาตุอาหารหรือโลหะหนัก) ต่ำลง และเป็นการเพิ่มการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก กลไกในการควบคุมความคงสภาพของโลหะหนักในดินด้วยวัสดุปูน เป็นการทำให้โลหะดังกล่าวตกตะกอนกับสารจำพวกคาร์บอเนตหรือหมู่ไฮดรอกซิล การใส่ปูนเพื่อบำบัดสิ่งปนเปื้อนจึงอาจกล่าวได้ว่าเป็นแนวทางการจัดการดินที่ง่าย สะดวกและมีต้นทุนต่ำในการควบคุมการเคลื่อนที่ของธาตุเหล่านั้น

รูปและพฤติกรรมของธาตุหลายชนิดในระบบดินถูกควบคุมด้วยสภาพรีดอกซ์ (ออกซิเดชัน-รีดักชัน) หรือกล่าวให้ง่ายคือพฤติกรรมของธาตุเหล่านี้ถูกควบคุมโดยสภาพการระบายน้ำของดิน ดินที่มีการระบายอากาศดีก็มักเกิดกระบวนการออกซิเดชัน ส่วนดินที่มีการระบายอากาศเลวก็มีโอกาสเกิดกระบวนการรีดักชัน โลหะหนักบางชนิด เช่น แคดเมียม (Cd) และปรอท (Pb) มีสภาพเคลื่อนที่ปานกลางในสภาพออกซิเดชัน แต่ในสภาพรีดักชันธาตุกลุ่มนี้จะมีสภาพการละลายต่ำหรืออยู่ในสถานะที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ เนื่องจากมักมีการรวมตัวกับธาตุซัลเฟอร์ (S) เกิดเป็นแร่ที่มีความเสถียรมากกว่าในสภาพออกซิเดชัน (วรชาติ, 2555)

2.4 แคดเมียม

แคดเมียมจะพบอยู่ร่วมกับสังกะสีเสมอ แต่ในสภาพดินเป็นกรดแคดเมียมมีสภาพเคลื่อนที่ดีกว่าสังกะสี และแคดเมียมมีรูปสารประกอบได้เช่นเดียวกับกลุ่มแคตไอออน Zn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} ในการสลายตัวของหินและแร่ แคดเมียมในดินอยู่ในสภาพละลายได้ง่ายโดยจะอยู่ในรูป Cd^{2+} เป็นส่วนใหญ่และอาจอยู่ในรูปไอออนเชิงซ้อน (Complex ion) และสารประกอบได้ดังนี้

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

แอนไอออน : $CdCl_3^-$, $CdCl_4^{2-}$, $Cd(OH)_3^-$, $Cd(OH)_4^{2-}$

สารประกอบ : CdO , $CdCO_3$

ปัจจัยสำคัญที่สุดในการควบคุมสภาพเคลื่อนที่ใต้ของแคดเมียมในดินคือ พีเอชและศักย์รีดอกซ์ ซึ่งดินที่มีศักย์รีดอกซ์สูง แคดเมียมจะอยู่ในรูปของสารประกอบ เช่น CdO หรือ $CdCO_3$ หรืออาจอยู่ร่วมกับฟอสเฟตได้เช่นเดียวกัน แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าพีเอชระหว่าง 4.5 ถึง 5.5 ขณะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในดินที่เป็นต่างแควดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ ซึ่งในสภาพดินเป็นกรดสภาพละลายได้ของแควดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (ศุภมาศ, 2539)

2.5 ตะกั่ว

สินแร่ตะกั่วในธรรมชาติ เช่น กาลีนา เมื่อสลายตัวจะถูกออกซิไดส์อย่างช้าๆ ให้อยู่ในรูปคาร์บอเนตหรือถูกตรึงโดยแร่ดินเหนียว ออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม และอินทรีย์วัตถุ โดยทั่วไปตะกั่วอยู่ในรูป Pb^{2+} มากกว่า Pb^{4+} และมีลักษณะคล้ายกลุ่มโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (Alkaline earth) ดังนั้นจึงสามารถเข้าแทนที่ K, Ba, Sr และแม้แต่ Ca ในแร่และในตำแหน่งที่ไอออนของธาตุเหล่านี้ถูกดูดซับ ตะกั่วนับเป็นโลหะหนักที่มีสภาพเคลื่อนที่ได้น้อยที่สุดในดินที่พีเอชสูงตะกั่วจะตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ ฟอสเฟต หรือคาร์บอเนต หรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์และมีความเสถียรค่อนข้างมาก เมื่อดินเป็นกรดเพิ่มขึ้นทำให้สภาพละลายได้ของตะกั่วเพิ่มขึ้นได้บ้าง นอกจากนี้ปริมาณการสะสมตะกั่วในดินสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ดังนั้นดินที่มีตะกั่วปนเปื้อนอินทรีย์วัตถุในดินจึงเป็นแหล่งสะสมตะกั่วที่สำคัญ ตะกั่วอาจเกิดปฏิกิริยาแบบเมทิลเลชันได้เช่นกัน ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ทั้งแบบชีวภาพหรือเป็นปฏิกิริยาเคมีล้วนๆ

2.6 แมงกานีส

แมงกานีส (Manganese) เป็นธาตุโลหะมีสีชาวจเงิน แฉ่ง และเปราะ ธาตุแมงกานีสเกิดแพร่กระจายในชั้นเปลือกโลกประมาณร้อยละ 0.1 และเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับที่ 12 ในลักษณะเป็นสารประกอบร่วมกับธาตุอื่น สำหรับแร่แมงกานีสมีหลายชนิดด้วยกัน ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของออกไซด์ นอกจากนี้ยังเกิดในรูปของซัลไฟด์คาร์บอเนตและซิลิเกต ซึ่งมีปริมาณของธาตุแมงกานีสแตกต่างกันไป สำหรับแร่แมงกานีสที่มีธาตุแมงกานีสตั้งแต่ร้อยละ 32 ขึ้นไปประกอบด้วยแร่อะลาแบนด์ (Alabandite), แร่ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite), แร่บรอนด์ (Braunite), แร่ฮอสแมนไนต์ (Hausmannite), แร่แมงกาไนต์ (Manganite), แร่ไซโลมิเลน (Psilomelane), แร่โรโดโครไซต์ (Rhodochrosite) และแร่โรโดไนต์ (Rhodonite) แต่แร่แมงกานีสชนิดแร่ไพโรลูไซต์เป็นชนิดที่พบเกิดในธรรมชาติมากที่สุด (จำลอง, 2554)

2.7 เทคโนโลยีการฟื้นฟูดิน

เทคโนโลยีการบำบัดฟื้นฟูดินที่มีการปนเปื้อนสารเคมีหรือสารมลพิษนั้น สามารถที่จะทำได้ทั้งแบบ In-situ และ Ex-situ

In-situ remediation methods คือวิธีที่ใช้เทคโนโลยีในการฟื้นฟูบำบัดดินที่มีการปนเปื้อนโดยการบำบัดสารเคมีหรือสารมลพิษที่ปนเปื้อนในพื้นที่โดยไม่มีการเคลื่อนย้ายดินหรือขุดเอาดินไปบำบัดที่อื่น หากแต่สามารถทำการบำบัดได้ในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนได้เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ex-situ remediation methods คือวิธีตรงกันข้ามกับ In-situ โดยจะต้องมีการขุดเอาดินที่มีการปนเปื้อนขึ้นมาเพื่อที่จะนำไปบำบัด โดยสามารถที่จะบำบัดบนพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนหรือนำไปบำบัดที่สถานที่อื่นก็ได้ วิธี In-situ นั้นค่อนข้างที่จะใช้แพร่หลายมากกว่าวิธีแบบ Ex-situ เนื่องจากไม่ต้องเคลื่อนย้ายดินที่มีการปนเปื้อนของสารเคมีหรือสารมลพิษ ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการแพร่กระจายไปของสารเคมีหรือสารมลพิษเหล่านี้ไปยังบุคลากรที่ต้องทำงานในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนนี้ รวมถึงผู้คนที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียงอีกด้วย อีกทั้งวิธีแบบ In-situ นี้ยังมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าวิธีแบบ Ex-situ และในบางพื้นที่ที่จะต้องทำการบำบัดนั้นก็ไม่มีเส้นทางที่จะให้รถบรรทุกขนเอาดินที่มีการปนเปื้อนออกไปบำบัดยังสถานที่อื่นหรือพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนอาจจะไม่มีพื้นที่จำกัดโดยไม่สามารถที่จะขุดเอาดินที่มีการปนเปื้อนนั่นออกมาได้โดยง่าย

เทคโนโลยีในการฟื้นฟูบำบัด (Remediation technologies) เทคโนโลยีในการฟื้นฟูบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารเคมีหรือสารมลพิษนั้น นิยมใช้อยู่ 8 อย่างด้วยกัน ได้แก่ Soil vapor extraction, Soil washing, Solidification, Electrokinetic remediation, Phytoremediation, Thermal desorption, Vitrification, Bioremediation เป็นต้น

2.7.1 การปรับเสถียร (Solidification)

เทคโนโลยีนี้มีชื่ออื่นอีก เช่น Immobilization หรือ Fixation ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้การเติมหรือขั้นตอนต่างๆ ที่มีการทำให้เกิดการจับกันทางเคมี และทำให้สารปนเปื้อนต่างๆ นั้นไม่สามารถที่จะเคลื่อนย้ายหรือเคลื่อนที่หรือแพร่กระจายออกไปไหนได้

Solidification คือ กระบวนการทางกายภาพที่ทำให้วัสดุประเภทกึ่งของแข็งที่เมื่อได้รับการบำบัดฟื้นฟูแล้วจะอยู่ในรูปของของแข็ง (สภาวิศวกรรม, 2547) กล่าวคือเป็นการบำบัดดินที่ได้ปนเปื้อนโลหะหนักโดยวิธีการทำให้โลหะอยู่ในรูปที่มีความเสถียร ซึ่งมีความสามารถในการกระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้น้อยลง หรือทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ยาก อาจทำได้โดยการทำให้โลหะหนักตกตะกอนเป็นของแข็ง ซึ่งจะช่วยลดความสามารถในการกระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ หรือทำให้โลหะหนักนั้นมีค่าการละลายต่ำ เพื่อลดการกระจายตัวของโลหะหนักได้เช่นเดียวกัน กระบวนการลดการเคลื่อนย้ายของมลพิษที่ปนเปื้อนในดิน ทำโดยการเติมสารที่สามารถจับยึดโลหะได้ลงในดินที่มีการปนเปื้อน เพื่อทำให้เกิดการแข็งตัวและจับยึดเอาโลหะไว้ สารที่เติมลงไปอาจทำหน้าที่ในการจับโลหะหนักโดยอาศัยหลักการใดหลักการหนึ่งต่อไปนี้เป็นคือ ทำให้โลหะหนักอยู่ในสถานะของแข็งและมีความแข็งแรงมากขึ้น ลดความสามารถในการหลุดตัวของแข็ง ซึ่งหลุดตัวได้น้อยกว่าของเหลว และลดความสามารถในการไหลผ่านของของเหลว (กิตติวรรณ, 2547)

โดยวิธีนี้ไม่ได้เป็นวิธีที่ใช้แยกหรือกำจัดสารมลพิษออกจากดิน เหมือนกับวิธี Soil washing หรือไม่ได้เป็นวิธีที่ทำให้เกิดการลดลงของสารปนเปื้อน อย่างเช่น วิธี Bioremediation แต่วิธีการปรับเสถียรนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรนี้เป็นวิธีที่ใช้สำหรับจัดการหรือขัดขวาง (ทำให้หยุด) การแพร่กระจายไปของสารปนเปื้อนหรือ สารมลพิษที่อยู่ในดิน ในบางกรณีนั้นวิธีการนี้จะใช้ในขั้นตอนของการบำบัดขั้นต้นเพื่อลดความเข้มข้น ของสารมลพิษที่สามารถละลายได้ในชั้นดินเพื่อให้มีระดับที่อยู่ภายใต้ระดับบังคับของกฎหมาย โดย สามารถที่จะนำเอาดินที่ได้ผ่านการบำบัดนี้ไปฝังกลบในหลุมฝังกลบต่อไปได้

นอกจากนี้แล้ว วิธีนี้ยังสามารถที่ใช้บำบัดภายใต้การบำบัดแบบ Ex-situ และ In-situ ได้ด้วย และสามารถที่จะใช้บำบัดได้กับดินทุกประเภท ไม่ว่าจะเป็นดินเหนียว ดินโคลน หรือดินทราย มีข้อดี ได้แก่ มีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และสารที่ใช้เป็นตัว กระทำปฏิกริยานั้นมีราคาไม่สูงอีกด้วย สามารถนำไปประยุกต์ได้กับสารปนเปื้อนที่หลากหลาย รวมถึง สารประกอบอินทรีย์ และโลหะหนักต่างๆ สามารถนำไปใช้บำบัดได้กับดินทุกประเภท เป็นวิธีที่มี อุปกรณ์เครื่องมือรองรับการบำบัดและเป็นวิธีที่ง่ายต่อการปฏิบัติ รวมทั้งมีอัตราการบำบัดพื้นฟูที่ ออกมาได้สูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น (สภาวิศวกร, 2547)

2.7.2 กลไกการปรับเสถียร

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารมลพิษจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกายภาพและทาง เคมี ดังนี้

2.7.2.1 การดูดซับ กระบวนการนี้มักพบในการใช้สารปรับเสถียรที่มีคุณสมบัติในการ ช่วยเพิ่มความจุในการดูดซับที่ผิวของตัวกลาง ทำให้สามารถดูดซับไอออน (เช่น แคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง) ได้มากและแข็งแรงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าในกระบวนการดูดซับนั้นอาจจะมี กระบวนการรีดอกซ์และกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารร่วมอยู่ด้วย

2.7.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน กระบวนการนี้จะแตกต่างกันกับการดูดซับ คือ จะมี การแลกเปลี่ยนหรือการแทนที่ของไอออนที่มีประจุเหมือนกันระหว่างสารปรับเสถียรและสารมลพิษ ทำให้การชะละลายของสารมลพิษลดลง หรือการเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีความสามารถในการละลาย ลดลงหรือมีความเสถียรเพิ่มขึ้น

2.7.2.3 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน กระบวนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจะเกิดขึ้น จากการเปลี่ยนคู่หรือจำนวนโคออร์ดิเนชัน การรวมตัวของไอออนบวกกับโมเลกุลหรือกับไอออนลบที่มี อิเล็กตรอนคู่อิสระ ซึ่งอาจเป็นการรวมตัวด้วยแรงทางไฟฟ้า (Electrostatic) หรือพันธะโคเวเลนต์ (Covalent) โดยการรวมตัวแบบสารประกอบเชิงซ้อนกับองค์ประกอบต่างๆ ในดิน จะทำให้สมบัติเดิม ของสารมลพิษเปลี่ยนไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ความเป็นพิษมากขึ้นหรือน้อยลงนั้นขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารที่ชักนำให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

2.7.2.4 การตกตะกอน จะเป็นกระบวนการขั้นสุดท้ายในกลไกการปรับเสถียร ซึ่ง นับว่าเป็นเป้าหมายสำคัญของกระบวนการปรับเสถียร เนื่องจากการตกตะกอนจะเป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึง ความเสถียรของสารมลพิษได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้การตกตะกอนอาจจะไม่เกิดขึ้นในทุกๆ กระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับเสถียร เนื่องจากการที่สารมลพิษจะเกิดการตกตะกอนได้นั้นจะต้องประกอบด้วยองค์ประกอบหลายๆ ส่วน ไม่ว่าจะเป็นระดับความเข้มข้นของสารมลพิษ และสภาวะต่างๆ ของดิน เช่น พีเอช ศักย์ไฟฟ้า กิจกรรมของจุลินทรีย์ ในสภาวะสมดุลการตกตะกอนจะเกิดขึ้นได้เมื่อสารนั้นมีความอิมัตว์อย่างยิ่งยวด ดังนั้นการปรับเสถียรจึงเป็นการช่วยให้ดินมีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนของสารมลพิษโดยการเพิ่มระดับความเข้มข้นของสาร (สารปรับเสถียร) ที่จะสามารถชักนำให้สารมลพิษตกตะกอนได้

2.7.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับเสถียร

2.7.3.1 พีเอช ซึ่งมีผลต่อการปรับเสถียรโลหะใน 2 ลักษณะ คือ พีเอชมีผลต่อรูปฟอร์มและความเสถียรของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นภายหลังการปรับเสถียร โดยโลหะแต่ละชนิดจะมีความเสถียรต่อพีเอชที่ต่างกัน และพีเอชมีผลต่อการละลายของโลหะและสารปรับเสถียร

2.7.3.2 คุณสมบัติของดิน เช่น อินทรีย์วัตถุ กิจกรรมของจุลินทรีย์ หรือศักย์รีดอกซ์ของดิน จะมีผลต่อประสิทธิภาพของการปรับเสถียร

2.7.3.3 สารปรับเสถียร คุณสมบัติและปริมาณของสารปรับเสถียรมีผลต่อประสิทธิภาพการปรับเสถียรในหลายลักษณะ เช่น ความเหมาะสมและเฉพาะเจาะจงกับโลหะ ความสามารถในการละลายและการเข้าทำปฏิกิริยาของสารปรับเสถียร เป็นต้น

2.7.3.4 โลหะชนิดอื่นๆ ที่ปนเปื้อนในดิน เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติและความเฉพาะเจาะจงกับสารปรับเสถียรไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อมีโลหะมากกว่าหนึ่งชนิดรวมอยู่ในกระบวนการเดียวกัน จึงอาจก่อให้เกิดภาวะแข่งขันอันเนื่องมาจากคุณสมบัติและความเฉพาะเจาะจงกับสารปรับเสถียรไม่เท่ากัน (ชัชวพร, 2551)

2.8 สารปรับเสถียร (Stabilizer)

การปรับเสถียรหรือการตรึงโลหะหนักในดินทำได้โดยการใส่สารลงไปจับโลหะหนัก เพื่อยับยั้งการเคลื่อนที่จากดินสู่สิ่งแวดล้อม สารที่ทำหน้าที่จับโลหะหนัก เรียกว่า สารปรับเสถียร (Stabilizer) สารปรับเสถียรมี 2 ประเภท ดังนี้

2.8.1 สารที่ละลายน้ำได้ (Soluble Chemical) ได้แก่ สารเคมี และปุ๋ยบางชนิด เช่น ปุ๋ยฟอสเฟต วิธีการปรับเสถียรทำได้โดยใส่สารเคมีลงในดินจนอิมัตว์ สารจะผ่านเข้าไปในดินอย่างรวดเร็วทางผิวหน้าดิน หรือพ่นทีละปริมาณน้อยๆ ให้ไหลผ่านหน้าดินอย่างอิสระ ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการปรับเสถียรของสารประเภทนี้ ได้แก่ อัตราการไหลของสาร ซึ่งมีผลกับเวลาที่ดินจะสัมผัสกับสารปรับเสถียร ปริมาณสารปรับเสถียร และปริมาณอากาศภายในดินในช่วงเวลาการบำบัด ข้อจำกัดที่สำคัญของสารปรับเสถียรกลุ่มนี้คือ สารเคมีที่ใช้บางตัว อาจเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมหรืออาจมีราคาแพงเกินไปไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการบำบัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 สารที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ (Insoluble Chemical) เช่น แร่ดินเหนียว สารซีโอไลต์ เป็นต้น

การปรับเสถียรโลหะหนักในพื้นที่ปนเปื้อน มีการดำเนินการที่ประสบความสำเร็จโดยการเติมวัสดุธรรมชาติ เช่น แร่ดินเหนียว ดินเบนโทไนต์ สารสังเคราะห์ เช่น สารซีโอไลต์ ปุ๋ยบางชนิด และวัสดุที่เหลือใช้ เช่น ถ้ำลอยลงในดิน นอกจากนี้ยังจำแนกตามความสามารถในการดูดซับ ซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่มดังนี้

1 ตัวเติมที่มีค่าการดูดซับสูง (Strongly adsorbing) เมื่อเติมลงไปแล้วจะไม่ผ่านดินไปสู่ชั้นน้ำใต้ดิน โลหะหนักในดินจะถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนหรือเกิดคีเลตคอมเพล็กซ์กับสารตัวเติม และจะไม่เกิดไฮโดรไลซิสในสภาวะต่างๆ ในดิน เช่น pH ต่ำ การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า (Eh) อีกทั้งยังต้องทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน ดังนั้นจึงไม่มีการปลดปล่อยโลหะหนักจากสารตัวเติมในระยะเวลาดำเนินการ อย่างน้อย 2-3 ปี ที่สำคัญสารตัวเติมนั้นจะต้องไม่เป็นสารที่อันตราย และไม่เป็นสารตั้งต้นที่จะนำไปสู่การปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

2 ตัวเติมที่มีค่าการดูดซับต่ำ (Weakly adsorbing) โลหะหนักในดินจะถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนหรือเกิดคีเลตคอมเพล็กซ์กับสารตัวเติมในโครงสร้างดิน แต่สารประกอบที่เกิดขึ้นมีไม่มากพอ จึงยังพบการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักในดิน แต่ในส่วนที่เกิดเป็นสารประกอบเมื่อตกตะกอนแล้วจะมีค่าการละลายต่ำภายใต้สภาวะต่างๆ ในดินเช่นเดียวกับสารตัวเติมที่มีค่าการดูดซับสูง (กิตติวรรณ, 2547)

2.9 ปุ๋ยฟอสเฟต (Phosphate fertilizers)

ปุ๋ยฟอสเฟต (Phosphate fertilizers) หรือปุ๋ยฟอสฟอรัส (Phosphorus fertilizers) คือปุ๋ยที่ให้ธาตุฟอสฟอรัสและธาตุนี้อยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต เช่น ไดแอมโมเนียมฟอสเฟตและปุ๋ยอื่นๆ สำหรับฟอสเฟต คือแอนไอออนของกรดฟอสฟอริกหรือเกลือฟอสเฟตต่างๆ (ยงยุทธ, 2554)

ธาตุอาหารพืชที่มีอยู่ในปุ๋ยฟอสฟอรัสทุกชนิดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ Phosphorus pentoxide (P_2O_5) และตามทางปฏิบัติที่นิยมกันธาตุฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในปุ๋ยต่างๆ มักจะบอกว่าเป็นรูป P_2O_5 และการรับประกันปุ๋ยฟอสฟอรัสรับประกันถึงเปอร์เซ็นต์ของ P_2O_5

ปุ๋ยฟอสเฟตที่ขายกันอยู่ในท้องตลาดก็ได้ใช้หลักเกณฑ์ดังกล่าวนี้เขียนรับประกันปริมาณธาตุในปุ๋ยฟอสเฟตไว้ให้ทราบเสมอโดยการบอกปริมาณ Available P_2O_5 ว่ามีอยู่ในปุ๋ยนั้นๆ เป็นจำนวนกี่เปอร์เซ็นต์ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2535)

2.9.1 หินฟอสเฟต

แร่ (Mineral) ที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบเรียกว่า อะพาไทต์ เกิดขึ้นจากการเย็นตัวและตกผลึกเป็น Molten magma ซึ่งเป็นสารประกอบของแคลเซียมและฟอสเฟตแต่มีพวก $CaCl_2$ และ CaF_2 เจือปนอยู่ในแร่ นั้น แร่อะพาไทต์นั้นมีอยู่ 5 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ Carbonate apatite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) $_3$ • CaCO_3 , Fluorapatite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) $_3$ • CaF_2 , Chloroapatite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) $_3$ • CaCl_2 , Hydroxy apatite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) $_3$ • $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และ Sulfateapatite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) $_3$ • CaSO_4

แร่พวกนี้อยู่ในรูปของผลึก (Crystalline) แต่ที่พบกันในแหล่งแร่ใหญ่ๆ ทั่วโลกและนำมาใช้ทำเป็นปุ๋ยฟอสเฟตนั้นก็จะเป็นแร่พวกฟอสเฟตที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ทว่าอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous form) และจะมีสิ่งเจือปนอื่นๆ ผสมอยู่มาก สินแร่เหล่านี้จะพบอยู่ในสภาพแข็งเป็นหินหรือก้อนคล้ายๆ ก้อนกรวดหรืออ่อนคล้ายๆ ดินก็ได้ ถ้าอยู่ในสภาพแข็งเป็นหินก็เรียกว่า หินฟอสเฟตหรือ Boulder phosphate ถ้าเป็นก้อนๆ เรียกว่า Pebble phosphate ถ้าอยู่ในสภาพอ่อนๆ คล้ายดินก็เรียกว่า Soft phosphate สำหรับคำว่าหินฟอสเฟตที่ใช้กันอยู่ในเวลานี้เป็นชื่อเรียกสินแร่พวกฟอสเฟตทั่วไปเท่านั้น โดยไม่จำกัดว่าฟอสเฟตอยู่ในสภาพไหน การเกิดขึ้นของแหล่งแร่ฟอสเฟตนั้นอาจเกิดขึ้นได้จาก 3 กระบวนการคือ

1 Residual phosphate เป็นแหล่งแร่ที่เกิดขึ้นโดยการผุพังของหินปูนที่มีฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบอยู่ เมื่อ CaCO_3 สลายตัวไปหมดแล้วก็จะเหลือแคลเซียมฟอสเฟตตกค้างอยู่เป็นชั้นหนา

2 Replacement phosphate เป็นแหล่งแร่ฟอสเฟตที่เกิดขึ้นจากการที่หินปูน (CaCO_3) ที่อยู่ในทะเลทำปฏิกิริยากับน้ำทะเลที่มีฟอสเฟตไอออนอยู่มากๆ แล้วกลายเป็นแคลเซียมฟอสเฟต ฟอสเฟตไอออนเหล่านี้ก็อาจจะมาจาก Guanos (อุจจาระของค้างคาวที่ทับถมกันเป็นล้านๆ ปี) หรือมาจากแหล่งที่เป็นอินทรีย์วัตถุต่างๆ

3 Sedimentary phosphate deposit ฟอสเฟตที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอนทับถมของตะกอนที่เป็น Phosphate compound จนเป็นชั้นหนาและเรียงซับซ้อนอยู่กับชั้นของหินปูนและหินดินดาน ตะกอนที่เป็น Phosphate compound นี้่นักธรณีวิทยานี้เชื่อกันว่ามีกำเนิดมาจากสิ่งมีชีวิตเป็นส่วนใหญ่ (Organic origin) สิ่งมีชีวิตนี้อาจจะเป็นสัตว์และพืชที่อยู่ในทะเลและได้สะสมธาตุ P จากทะเลไว้มากและเวลาตายไปก็จะตกลงกันทะเลทับถมกันจนกลายเป็นแหล่งแร่ฟอสเฟต

องค์ประกอบของหินฟอสเฟตที่พบในท้องตลาดไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับแหล่งเกิดของมัน แต่โดยทั่วๆ ไปแล้วจะมี P_2O_5 ระหว่าง 30 ถึง 40% (คิดเป็น P ประมาณ 13-17%) การมีฟลูออรีนในหินฟอสเฟตมีความสำคัญมากเกี่ยวกับความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสต่อพืช ถ้ามีฟลูออรีนมากขึ้นเท่าใดก็ยิ่งทำให้หินฟอสเฟตคงตัวและจะสลายตัวให้ฟอสเฟตไอออนมากยิ่งขึ้นเท่านั้น จึงทำให้ยากต่อพืชที่จะนำเอาไปใช้เป็นประโยชน์

ปุ๋ยหินฟอสเฟตนี้เหมาะสำหรับใช้กับดินที่เป็นกรดมากกว่าดินที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในหินฟอสเฟตนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคของหินฟอสเฟตด้วย กล่าวคือถ้าหินฟอสเฟต เมื่อนำมาบดให้มีอนุภาคขนาดเล็ก ละเอียดมากเท่าใดความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในหินฟอสเฟตจะมีมากยิ่งขึ้นเท่านั้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2535)

แหล่งหินฟอสเฟตในประเทศไทย พบหินฟอสเฟตในจังหวัดร้อยเอ็ด กาญจนบุรี ลำพูน เพชรบุรี และราชบุรี มีฟอสฟอรัสทั้งหมดระหว่าง 10-40% P_2O_5 และฟอสฟอรัสที่ละลายในแอมโมเนียมซิเตรตเป็นกลางระหว่าง 1.5-10.3% P_2O_5 นอกจากนี้ยังมีหินฟอสเฟตที่เกิดจากมูลเอ็กสาร์นเป็นเอ็กสาร์นที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่างขาว (Guano phosphate rock) ตามถ้ำในจังหวัดกาญจนบุรี ราชบุรี พังงา และกระบี่ ซึ่งมีฟอสฟอรัสทั้งหมด 19-26%P₂O₅ และฟอสฟอรัสที่ละลายในแอมโมเนียมซิเตรตเป็นกลาง 9.0-23.9%P₂O₅ สำหรับปุ๋ยหินฟอสเฟตที่จำหน่ายในประเทศไทย กรมวิชาการเกษตรประกาศเมื่อ พ.ศ. 2550 ว่าต้องมีปริมาณธาตุอาหารรับรองตั้งแต่ร้อยละ 3 ของน้ำหนักสุทธิของปุ๋ยเคมี มีปริมาณฟอสเฟตทั้งหมดไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 ของน้ำหนักสุทธิของปุ๋ยเคมี และมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 ของน้ำหนักสุทธิของปุ๋ยเคมี (ยงยุทธ, 2554)

2.9.1.1 การละลายของหินฟอสเฟต

เมื่อมีอนุภาคคาร์บอนเตเข้าแทนที่อนุภาคฟอสเฟตในโครงสร้างแร่อะพาไทต์ การละลายได้ตลอดจนความว่องไวต่อปฏิกิริยาหรืออัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาสูงขึ้น และความว่องไวต่อปฏิกิริยาของปุ๋ยก็สัมพันธ์กับประสิทธิภาพใช้ฟอสฟอรัสของพืชด้วย ดังนั้นจึงอาจประเมินคุณค่าของปุ๋ยหินฟอสเฟตด้วยการทดสอบการละลาย (Dissolution) ในห้องปฏิบัติการ

2.9.1.2 อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ต่อศักยภาพในการใช้หินฟอสเฟต

ประโยชน์ที่พืชจะได้รับจากการใช้หินฟอสเฟตนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะของหินฟอสเฟตแล้วยังขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านดินอีกด้วย สำหรับสมบัติของดินที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของหินฟอสเฟต ได้แก่ ค่า pH ความเป็นประโยชน์ของฟอสเฟตดั้งเดิมของดิน อำนาจการตรึงฟอสฟอรัส ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ความชื้นและอุณหภูมิดิน เป็นต้น

ขนาดอนุภาคปุ๋ย มีผลต่อการละลายของหินฟอสเฟตในดินอย่างมาก กล่าวคือปุ๋ยที่มีความละเอียดมากขึ้นจนมีขนาด 150 ไมโครเมตร (ผ่านตะแกรง 100 เมช) ความเป็นประโยชน์ต่อพืชก็สูงขึ้นตามลำดับ

สมบัติของดิน กล่าวคือ หินฟอสเฟตเหมาะที่จะใช้ในพื้นที่ 1) เป็นกรด 2) แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำ และ 3) ฟอสฟอรัสในสารละลายดินต่ำ เนื่องจากสภาพทั้งสามนี้มีอยู่ในดินกรดโดยทั่วไป ดังนั้นการใช้หินฟอสเฟตในดินกรดจึงให้ผลดี โดยปกติมักแนะนำให้ใช้หินฟอสเฟตโดยตรงในดินที่มีค่า pH 5.5 หรือต่ำกว่านี้ สำหรับหินฟอสเฟตที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยานั้นต้องใช้กับดินที่มีค่า pH ต่ำกว่า 5.5 เท่านั้น จึงจะมีการละลายออกมาได้ ส่วนหินฟอสเฟตที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีอาจใช้ได้กับดินที่มีค่า pH 6.5 แต่ถ้าค่า pH ต่ำลงการละลายของปุ๋ยนี้ก็ยิ่งขึ้น

อินทรีย์วัตถุในดินมีส่วนช่วยให้หินฟอสเฟตละลายได้มากขึ้น เนื่องจากแอนไอออนพวกซิเตรตและออกซาเลต ซึ่งได้จากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ ทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับแคลเซียมไอออน ทำให้แคลเซียมในสารละลายดินลดลง เป็นสภาพที่ส่งเสริมการละลายของหินฟอสเฟต (ยงยุทธ, 2554)

2.9.2 ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต

ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (Diammonium phosphate, DAP) ผลิตได้จากปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียมกับกรดฟอสฟอริก เกลือบรสิทุทธ์ มี 21.214%N และ 53.709%P₂O₅ (23.454%P)



สำหรับปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตมี 2 แบบคือ

1. ปุ๋ยรูปผลึก (Crystalline form) มีไนโตรเจนทั้งหมดและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำกว่า เกลือบรสิทุทธ์เล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสิ่งเจือปน ปุ๋ยประเภทนี้เหมาะสำหรับใช้ทางใบ
2. ปุ๋ยชนิดเม็ด (Granular fertilizer) โดยทั่วไปมีสูตร 18-46-0 เหมาะสำหรับให้พืชทางดิน (ยงยุทธ, 2554)

ปุ๋ยแอมโมเนียมฟอสเฟตละลายน้ำได้ดีและมีผลตกค้าง ทำให้ดินเป็นกรดเพราะว่าปุ๋ยมีแอมโมเนียมอยู่ด้วย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2535)

ปุ๋ยที่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อใส่ในดินที่มีความชื้นเพียงพอ ปุ๋ยก็จะละลายและแตกตัวเป็นไอออน ดังนั้นเมื่อปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตในดินที่มีความชื้นเพียงพอ ปุ๋ยจะละลายและแตกตัวดังนี้



เมื่อปุ๋ยแพร่ไปในดินจะไม่ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของดินเปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากดินมีภาวะบัฟเฟอร์ รากพืชดูดแอมโมเนียมและฟอสเฟตไอออนไปใช้ประโยชน์ และฟอสเฟตไอออนถูกดินตรึงไว้ (ยงยุทธ, 2554)

2.9.3 โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต

โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (KH₂PO₄) หรือ MPP เป็นปุ๋ยที่มีศักยภาพสูงในการเกษตร เนื่องจากมีฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมรูปที่เป็นประโยชน์ค่อนข้างสูง กล่าวคือ โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีเกรด 0-52-34 ลักษณะเด่นของปุ๋ยนี้มีสองประการ คือ มีสมบัติทางกายภาพดี และสารประกอบฟอสเฟตแตกตัวง่าย จึงเป็นประโยชน์ต่อพืชได้เร็วกว่าโมโนแคลเซียมฟอสเฟต (ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต)

เนื่องจากสารละลายของ MPP เป็นกรด และไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออนยังแตกตัวได้ไฮโดรเจนไอออนอีก จึงอาจเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

1. แอมโมเนียชัน (Ammoniation) เมื่อทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียม
2. MPP ที่หลอมและสูญเสียน้ำจะเปลี่ยนเป็นโพแทสเซียมเมตาฟอสเฟต (KPO₃)
3. เมื่อทำให้เป็นกลางด้วย KOH หรือ K₂CO₃ จะได้ไดโพแทสเซียมฟอสเฟต (K₂HPO₄)

สำหรับโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นปุ๋ยที่ละลายน้ำง่าย เมื่อใส่ในดินที่มีความชื้นเพียงพอ ปุ๋ยจะแตกตัวได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพแทสเซียมไอออนที่เพิ่มขึ้นในสารละลายดินอย่างมากเมื่อใส่ปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตนั้น ย่อมกระทบกับสมดุลของธาตุอื่นที่มีอยู่เดิมในดิน กล่าวคือโพแทสเซียมไอออนในสารละลายดินปริมาณ มากจะเคลื่อนย้ายมาดูดซับที่ผิวของคอลลอยด์ดิน ทำให้ปริมาณของส่วนที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้โพแทสเซียมไอออนจากปุ๋ยบางส่วนยังถูกแร่ดินเหนียวตรึงไว้อีกด้วย (ยงยุทธ, 2554)

2.10 การตรึงฟอสเฟตของดิน

ดินตรึงฟอสเฟตได้หลายขบวนการด้วยกัน โดยแบ่งชนิดของขบวนการออกได้ 3 ชนิด คือ

1 ขบวนการดูดซับอยู่ตามผิว (Adsorption reaction) อนุภาคของดินที่มีขนาดเล็กที่อยู่ในสภาพของคอลลอยด์ เช่น พวกแร่ดินเหนียวต่างๆ อินทรีย์วัตถุและและออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม มีประจุไฟฟ้าแฝงอยู่และไอออนฟอสเฟตก็มีประจุไฟฟ้าแฝงอยู่ ดังนั้นจึงสามารถจะดูดยึดกันได้ ถ้าแรงดูดยึดกันคือแรง Van der Waal's force ก็จะเป็นการดูดซับที่เรียกว่า Physical adsorption ซึ่งจะมีผลทำให้ไอออนฟอสเฟตร่วมอัดตัว (Condensation) อยู่รอบๆ พื้นผิวของคอลลอยด์เท่านั้น โครงสร้างของคอลลอยด์ไม่มีอะไรเปลี่ยนแปลง แต่ถ้าไอออนฟอสเฟตจับตัวสารคอลลอยด์ด้วย Chemical bond หรือการจับตัวกันด้วยแขนของไอออนบวกต่อไอออนลบทำให้เกิดโมเลกุลของสารขึ้น ก็เป็นการดูดซับแบบ Chemical adsorption ซึ่งก็อาจจะเกิดขึ้นได้เพราะสารคอลลอยด์เหล่านี้มี Hydroxyl และ silicate group ซึ่งอาจจะหลุดออกไปเหลือตำแหน่งที่จะต้องทำให้สมดุลด้วยไอออนลบ ไอออนฟอสเฟตก็อาจจะเข้ามาอยู่ในตำแหน่งนี้ได้ จึงก่อให้เกิดการจับตัวกันด้วย chemical bond ซึ่งปริมาณของฟอสเฟตที่ถูกดูดซับด้วยวิธี Chemical adsorption นี้ โดยทั่วไปมักจะต่ำกว่าด้วยวิธี Physical adsorption เพราะตำแหน่งที่ไอออนฟอสเฟตเข้าจับตัวกับคอลลอยด์มีจำกัด

2 ขบวนการแทนที่ด้วยไอออนที่มีขนาดไอออนเท่ากัน (Isomorphous replacement reaction) ไอออนฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่โดยรอบพื้นผิวของแร่ดินเหนียว จะค่อยๆ เคลื่อนตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกต่อผลึกของ Clay colloid ไอออนฟอสเฟตบางไอออนจะค่อยๆ เปลี่ยนสภาพจากที่ถูกดูดซับ เป็นการเข้าแทนที่ไอออนลบของผลึก (เช่น Hydroxyl, Silicate) แล้วไอออนฟอสเฟตจะจับตัวกับคอลลอยด์ด้วย Chemical bond เดิมทีเดียวเมื่อคอลลอยด์ยังมี Hydroxyl (ขนาดเล็กเท่าไอออนฟอสเฟต) หรือ Silicate group (ขนาดใกล้เคียงกับไอออนฟอสเฟต) รวมอยู่ในโครงสร้างของมันนั้น สภาพของโครงสร้างและผลึก จะคงอยู่ในรูปร่างที่คงที่ แต่เมื่อไอออนฟอสเฟตเข้ามาแทนที่ Hydroxyl หรือ Silicate โครงสร้างของผลึกจะไม่คงที่อยู่เหมือนเดิม เพราะขนาดของไอออนฟอสเฟตกับอนุโมลที่มันแทนที่ไม่เท่ากัน เมื่อเป็นเช่นนี้ผลึกของ Clay colloid ที่มีไอออนฟอสเฟตอยู่ด้วย ก็ต้องจัดเรียงตัวเสียใหม่ เพื่อให้ได้โครงสร้างและรูปร่างของผลึกที่คงที่ไอออนฟอสเฟตก็จะถูกจับติดแน่น เป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวใหม่อย่างถาวร ดังนั้นฟอสเฟตจำนวนนี้ ก็จะถูกตรึงโดยไม่มีโอกาสหลุดออกมาอยู่ในสารละลายดินอีก (นอกเสียจากแร่ดินเหนียวชนิดใหม่นี้ จะถูกทำให้สลายตัว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 ขบวนการแตกตัวแล้วทำปฏิกิริยา (Double decomposition) สารประกอบฟอสเฟตที่ละลายได้ดี จะละลายและแตกตัวให้ออออนฟอสเฟตและไอออนบวกอื่นๆ ในดินมีสารประกอบต่างๆ เช่น เหล็กออกไซด์ เหล็กไฮดรอกไซด์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนต เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม สารประกอบเหล่านี้จะละลายและแตกตัวให้ออออนบวกต่างๆ เช่น ไอออนบวกเหล็ก ไอออนบวกอะลูมิเนียม ไอออนบวกแคลเซียม ไอออนบวกแมกนีเซียม อยู่ในสารละลายดิน และเมื่อไอออนฟอสเฟตกับไอออนบวกเหล่านี้พบกันจะทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็นสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายยากยิ่งขึ้น เช่น เกิดเป็นเหล็กฟอสเฟต อะลูมิเนียมฟอสเฟต แคลเซียมฟอสเฟต และสารประกอบที่มีสูตรโมเลกุลสลับซับซ้อนยิ่งขึ้น เมื่อเกิดสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายยากยิ่งขึ้นจึงเป็นการตรึงฟอสเฟต ขบวนการแตกตัวแล้วทำปฏิกิริยานี้ ก่อให้เกิดการตรึงฟอสเฟตตลอดเวลาอย่างช้าๆ ไม่ว่าดินจะมีความเป็นกรดเป็นด่างระดับใด เพราะสารประกอบฟอสเฟตกับสารประกอบอื่นๆ สัมผัสกันตลอดเวลา เมื่อใดที่มีการแตกตัวให้ออออนฟอสเฟตออกมาพบกับไอออนบวกที่แตกตัวออกมา และมีปริมาณเกินกว่าค่าผลคูณของสารประกอบที่ละลายยากชนิดนั้นๆ ก็จะเป็นสารประกอบฟอสเฟตชนิดนั้นที่ละลายยากทันที แต่ปริมาณของการตรึงฟอสเฟตด้วยขบวนการนี้ต่ำมาก เมื่อเทียบกับขบวนการดูดซับอยู่ตามผิวของอนุภาคดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2535)

2.10.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการตรึงฟอสเฟตของดิน

ดินแต่ละชนิดมีความจุในการตรึงฟอสเฟตแตกต่างกันไป สำหรับดินที่มีความจุในการตรึงฟอสเฟตสูงก็จะมีปริมาณฟอสเฟตในสารละลายดินต่ำมาก ปัจจัยที่มีผลต่อการตรึงฟอสเฟต มีดังนี้

1 ปริมาณดินเหนียว ในบรรดาดินที่มีค่า pH และชนิดของแร่ในดินใกล้เคียงกันแล้ว ดินที่มีปริมาณดินเหนียวสูงกว่าจะตรึงฟอสเฟตได้มาก และปลดปล่อยฟอสเฟตออกมาได้ยากกว่า

2 ชนิดของแร่ดินเหนียว แร่ดินเหนียวบางชนิดมีความจุในการตรึงฟอสเฟตสูงกว่าชนิดอื่น อาจเรียงลำดับแร่ดินเหนียวและแร่อื่นๆ ในดิน ที่มีความจุในการตรึงฟอสเฟตจากต่ำไปหาสูงดังนี้ แร่ดินเหนียวชนิด 2:1 < แร่ดินเหนียวชนิด 1:1 < ผลึกแร่คาร์บอเนต < ผลึกออกไซด์ของอะลูมิเนียม เหล็กและแมงกานีสออกไซด์ของอะลูมิเนียม < เหล็กและแมงกานีสแบบอสัณฐานและ อัลโลเฟน เป็นต้น

3 ค่า pH โดยทั่วไปการตรึงฟอสเฟตจะมากในดินที่มีค่า pH ต่ำมากและสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อค่า pH ของดินเพิ่มจาก 5.0 หรือต่ำกว่านั้น ขึ้นไปเป็น 6.0 เหล็กและอะลูมิเนียมฟอสเฟตจะละลายได้มากขึ้น ในทำนองเดียวกันเมื่อค่า pH ของดินลดจาก 8.0 หรือสูงกว่านั้น ลงไปเป็น 6.0 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตก็ละลายได้มากขึ้น ดังนั้นการตรึงฟอสเฟตในดินจะต่ำที่สุดเมื่อดินมีค่า pH 6.0-7.0

4 อินทรีย์วัตถุ โดยปกติอินทรีย์วัตถุในดินไม่ตรึงฟอสเฟต แต่ช่วยลดการตรึงฟอสเฟตดังนี้ 1) โมเลกุลขนาดใหญ่ของสารฮิวมิกเกาะกับผิวดินเหนียวและไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม ป้องกันไม่ให้ฟอสเฟตไอออนในสารละลายดินเข้าถึงและทำปฏิกิริยาจนเกิดการตรึง 2) กรดอินทรีย์จากการสลายของอินทรีย์วัตถุ สามารถแตกตัวเป็นแอนไอออนอินทรีย์ แล้วเข้าไปจับกับประจุบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของผิวแร่ และหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของไฮดรอกไซด์ เป็นการแย่งที่และกีดกันไม่ให้อนุมูลฟอสเฟตเข้าไปเกาะและถูกตรึงในที่สุด และ 3) กรดอินทรีย์และกรดฮิวมิกในดินบางชนิดทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับเหล็กและอะลูมิเนียมไอออนได้คีเลตที่มีเสถียรภาพ เหล็กและอะลูมิเนียมส่วนนั้นจึงหมดโอกาสที่จะตรึงฟอสเฟต ด้วยเหตุนี้อินทรีย์วัตถุในดินจึงมีบทบาทสำคัญมากในเรื่องลดการตรึงฟอสเฟต (ยงยุทธ, 2554)

2.11 การสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction)

การสกัดแบบลำดับขั้นเป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการศึกษารูปฟอร์มและปริมาณของโลหะในดิน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเลือกสารเคมีที่เหมาะสมในการสกัดแต่ละลำดับของการสกัดและปริมาณของโลหะที่ออกมาในแต่ละขั้นจะสามารถนำไปทำนายพฤติกรรมของโลหะที่เป็นพิษในสภาวะแวดล้อมต่างๆ นอกจากนี้ยังจะทำให้เข้าใจเคมีของดินที่สัมพันธ์ระหว่างโลหะและชนิดของดินมากยิ่งขึ้นอีกด้วย ประสิทธิภาพของการสกัดแบบลำดับขั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ คือการเลือกหรือเรียงลำดับการใช้สารสกัดที่เหมาะสมในแต่ละส่วนหรือขั้นตอนของการสกัด ระดับความแรงของสารสกัดที่ต้องเพิ่มขึ้นในแต่ละลำดับขั้นเพื่อจะได้สามารถสกัดโลหะที่อยู่ในรูปต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและลดการปนเปื้อนระหว่างขั้น ระยะเวลาของการสกัดแต่ละขั้นเพื่อให้เพียงพอสำหรับการเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังรวมไปถึงความเข้มข้นของสารสกัด อัตราส่วนของสารสกัดและตัวอย่าง พีเอชและอุณหภูมิ (Shiowatana *et al.*, 2001) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการดั้งเดิมของ Tessier *et al.* (1979) เป็นวิธีการในการศึกษาการกระจายตัวของรูปฟอร์มของโลหะหนักในดินตัวอย่าง ซึ่งมีการแบ่งรูปฟอร์มของโลหะหนัก ดังนี้

ขั้นที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ (Water soluble fraction)

ขั้นที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction) จะอยู่ในไอออนที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที สารสกัดที่ใช้จึงมีความรุนแรงน้อย

ขั้นที่ 3 รูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอเนต (Carbonate bound fraction) จะอยู่ในรูปที่สร้างพันธะในดินอย่างหลวมๆ จึงมีโอกาที่จะละลายน้ำได้ง่ายและเป็นประโยชน์ต่อพืชได้

ขั้นที่ 4 รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (Fe-Mn oxide bound fraction) จะละลายได้ยากกว่า ส่วนใหญ่จะเคลือบที่ผิวของเม็ดดินหรือผิวของแร่ เมื่อเกิดการบวมการตกตะกอน, การดูดซับ การสร้างตัวหรือการแลกเปลี่ยนประจุ ก็จะทำให้รูปนี้มีโอกาสที่จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้

ขั้นที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic bound fraction) สันนิษฐานได้ว่า มีลักษณะเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในดินเป็นเวลานานและเมื่อผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปหรือกระบวนการย่อยสลาย จะทำให้ธาตุเหล่านี้มีความเป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น

ชั้นที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ (Residual fraction) เป็นรูปที่อยู่ในโครงสร้างของหินและแร่ที่สะสมอยู่ในดิน ความเป็นประโยชน์ในรูปนี้อยู่ในระดับต่ำมากและต้องใช้ระยะเวลาในการพองสลายตัว (วีร์ ภัทร์, 2557)

2.12 การสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step Extraction)

การใช้ในการประเมินศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพเพื่อประเมินมลพิษในดิน (Manouchehri et al., 2014) ซึ่งเป็นการทำนายถึงโอกาสที่โลหะหนักนั้นมีโอกาสที่จะกระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ โดยใช้สารละลายในการสกัดโลหะหนัก เช่น 0.05 M Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), 0.005 M Diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA), 0.01 M Calcium chloride (CaCl_2) และ 1 M Ammonium acetate (NH_4OAc) เป็นต้น ซึ่งสารละลายแต่ละชนิดจะใช้ในการทำนายความเข้มข้นของโลหะหนักที่เข้าสู่ชีวภาพในด้านที่แตกต่างกัน ดังนี้ สารละลาย 0.05 M EDTA ใช้เพื่อประเมินศักยภาพในการเคลื่อนที่ (mobility), สารละลาย 1 M NH_4OAc เพื่อประเมินศักยภาพในการแลกเปลี่ยน (exchangeability) อันเนื่องมาจากโลหะหนักในส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้เหล่านี้ได้รับการยอมรับว่ามีความเสี่ยงสูงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดิน (Polic et al., 1994), และสารละลาย 0.005 M DTPA, 0.01 M CaCl_2 เพื่อประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (phytoavailability) ของโลหะหนักในดิน (Tica et al., 2011) โดยที่พืชจะทำการตอบสนองต่อโลหะหนักเฉพาะในส่วนที่เรียกว่า phytoavailability เท่านั้น อีกทั้งสารละลายแต่ละชนิดมีความสามารถในการสกัดความเข้มข้นของโลหะหนักได้แตกต่างกันในการสกัดรูปฟอร์มของโลหะหนักมีรายละเอียด ดังนี้ สารละลาย EDTA สามารถสกัดโลหะหนักในรูปฟอร์มที่ละลายได้ รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ รูปที่จับอยู่กับคาร์บอเนต บางส่วนของรูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ และบางส่วนของรูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน (Chang et al., 2014), สารละลาย DTPA สามารถสกัดโลหะหนักในรูปฟอร์มที่ละลายได้ รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ และบางส่วนของรูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน สารละลาย NH_4OAc สามารถสกัดโลหะหนักในรูปฟอร์มที่ละลายได้ และรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ และสารละลาย CaCl_2 สามารถสกัดโลหะหนักในรูปฟอร์มที่ละลายได้ เท่านั้น (Zhang et al., 2010)

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chen et al. (2007) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของฟอสเฟตในการตรึงโลหะในดิน โดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ธรรมชาติ (HA) หินฟอสเฟต (PR) ทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) ในการลดการดูดซึมแคดเมียม (Cd), ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ในดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักสังเคราะห์สามระดับดังนี้ T0 (ไม่มีโลหะ), T1 (Cd/Pb/Zn:0.6/100/66 mg/kg) และ T2 (Cd/Pb/Zn:1.5/300/200 mg/kg) สารประกอบฟอสเฟตถูกนำไปใช้ที่ 2,500 mgP/kg soil

การตรึงและการดูดซึมแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสีได้รับการพิจารณาโดยการดูดซึมของพืช เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(*Brassica campestris* L.) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการสกัดลำดับชั้น ผลการศึกษาพบว่า HA ดึงกว่าวัสดุอื่นๆ ทั้งหมดสำหรับลดการดูดซึมตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมใน ส่วนเหนือดินของพืชที่ลดลง 34.6-53.3% สำหรับตะกั่ว 31.2-47.3% สำหรับสังกะสี และ 39.1-42.4% สำหรับแคดเมียม ตามลำดับเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ผลของการสกัดลำดับชั้นชี้ให้เห็นว่าการ ปรับปรุงฟอสเฟตเปลี่ยนแปลงฟอร์มที่สำคัญของดินที่มีตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม จาก exchangeable (EX), organic bound (OC), carbonate bound (CB), amorphous Fe and Al oxides-bound (OX) ไปเป็น RES fraction ผลโดยรวมของฟอสเฟตที่แตกต่างกันในการดูดซึมตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมของพืชมีดังนี้: HA>PR>DAP>TSP การศึกษาพบว่าประสบความสำเร็จในการ ปรับปรุงด้วย HA และ PR ซึ่งสามารถลดการดูดซึมและเพิ่มความมั่นคงทางธรณีเคมีของดินที่ปนเปื้อน ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมอย่างมีนัยสำคัญ

Yan *et al.* (2015) ศึกษาประเมินประสิทธิภาพของปุ๋ยฟอสเฟต 4 ชนิด ได้แก่ diammonium phosphate (DAP), potassium phosphate monobasic (MPP), calcium superphosphateon (SSP) และ calcium phosphate tribasic (TCP) ที่มีต่อความสามารถในการเข้าสู่ระบบชีวภาพของ แคดเมียมในดินที่ปนเปื้อน ประสิทธิภาพในการตรึงถูกประเมินด้วยสองเกณฑ์ ได้แก่ การลดลงของ ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ทำการสกัดด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) และการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมโดยการสกัดแบบลำดับชั้น ผลการทดลองพบว่า หลังจากการปรับเสถียร 50 วันพบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปรับปรุงด้วย DAP, MPP, SSP และ TCP ลดลงจาก 42.64 mg/kg (ในชุดควบคุม) เป็น 23.86, 21.86, 33.89 และ 35.59 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการตรึง ดังนี้ MPP>DAP>SSP>TCP จากการประเมินรูปฟอร์มของ แคดเมียมจากการสกัดแบบลำดับชั้น พบว่ารูปฟอร์มที่ละลายได้ของแคดเมียมในดินที่ผ่านการ ปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง TCP นั้นลดลงอย่างมาก นอกจากนี้การลดลงดังกล่าวยัง เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของรูปฟอร์มที่มีความเสถียรมากขึ้นของแคดเมียม นั่นคือรูปฟอร์มที่ยึดเกาะ กับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์

Zhang *et al.* (2015) ศึกษาประสิทธิภาพการปรับเสถียรที่เหมาะสมสำหรับดินที่ปนเปื้อน ตะกั่วในโรงงานผลิตแบตเตอรี่ โดยมีการใช้สารปรับปรุง 12 ชนิดในการตรึงตะกั่วในดิน ผลการ ทดลองชี้ให้เห็นว่า 3 การปรับปรุง ได้แก่ KH_2PO_4 (KP), KH_2PO_4 :oyster shell power = 1:1 และ KH_2PO_4 :sintered magnesia = 1:1 มีประสิทธิภาพในการบำบัด ซึ่งจะนำไปสู่การลดลงของตะกั่วที่ สกัดได้ (92%) ขณะที่รูปฟอร์มที่ละลายได้ของตะกั่วลดลง 41-46% และรูปฟอร์มส่วนที่เหลือของ ตะกั่วเพิ่มขึ้น 16-25 เท่า ผลการศึกษาพบว่า KP, SPP และ KPM สามารถลดประสิทธิภาพการเข้าสู่ ระบบชีวภาพของตะกั่วได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Huang *et al.* (2016) ทำการศึกษาผลของ bone meal (BM), phosphate rock (PR), oxalic acid-activated phosphate rock (APR), super phosphate (SP) และ calcium carbonate (CC) กับดินที่ปนเปื้อน เพื่อประเมินผลของสารปรับปรุงฟอสเฟตและแคลเซียม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนเนตในการตรึง Pb, Cu และ Cd ผลการศึกษาพบว่าค่าความเป็นกรดต่างของดินที่ผ่านการปรับปรุงมีค่าเพิ่มขึ้น 1.3-2.7 หน่วย ยกเว้น SP ที่ลดลงมากที่สุดคือ 0.5 หน่วย เมื่อเทียบกับการควบคุมพบว่าทุกการปรับปรุงด้วยฟอสเฟตและแคลเซียมคาร์บอนเนตที่เพิ่มเข้าไปในดินที่ปนเปื้อนจะช่วยเพิ่มรูปฟอร์มของโลหะส่วนที่ละลายและการปรับปรุงด้วย APR, PR, BM และ CC ช่วยลดปริมาณโลหะในรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนและที่จับกับคาร์บอนเนตได้มาก PR และ APR มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรึง Pb, Cu และ Cd ในดิน

Sun *et al.* (2016) ทำการประเมินประสิทธิภาพของ sepiolite, bentonit และ phosphate ในการตรึงแคดเมียม (Cd) ที่ปนเปื้อนในดิน โดยศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพ การสกัดแบบลำดับชั้น การเจริญเติบโตของพืช ความเข้มข้นของแคดเมียม เอนไซม์ในดินและกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ผลการสกัดแบบลำดับชั้นแสดงให้เห็นว่ารูปฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ของแคดเมียมในดินส่วนใหญ่เปลี่ยนเป็นรูปฟอร์มที่จับกับคาร์บอนเนต ซึ่งความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปฟอร์มที่ละลายน้ำได้และรูปฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนได้จะลดลงเมื่อทำการปรับปรุงด้วย sepiolite, bentonite และ phosphate ซึ่งลดลงประมาณ 13.2% -69.2% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งการปรับปรุงนี้นำไปสู่การลดความเข้มข้นของแคดเมียมในราก ลำต้น ใบ เมล็ดข้าว และเปลือกข้าว ลดลง 16.2-54.5%, 16.6-42.8%, 19.6-59.6%, 5.0-68.2% และ 6.2-20.4 % ตามลำดับ โดยการปรับปรุงดินนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นสำหรับการปรับปรุงดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม

Seshadri *et al.* (2017) ศึกษาดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักผสม ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) โดยใช้สารประกอบฟอสเฟต (P) ในการตรึงโลหะเหล่านี้ อย่างไรก็ตามการวิจัยได้นำ diammonium (DAP), Sechura (SPR), Christmas Island (CPR) และ natural phosphate rocks (PR) มาทดสอบการตรึงโลหะ Cd, Pb และ Zn ในดินช่วงระยะรากของพืช ซึ่งผลจากการเติมสารประกอบฟอสเฟตทำให้เกิดการตรึง Cd, Pb และ Zn เท่ากับ 1.56-76.2%, 3.21-83.56% และ 2.31-74.6% ตามลำดับ ซึ่ง SPR ส่งผลทำให้การชะของโลหะ Cd, Pb และ Zn มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ DAP เพิ่มความเข้มข้นของการชะโลหะหนัก อีกทั้ง SPR ยังลดการสะสมทางชีวภาพของ Cd, Pb และ Zn ในไส้เดือนดิน ซึ่งเท่ากับ 7.13-23.4% และ 14.3-54.6% เมื่อเทียบกับไส้เดือนดินในชุดการปรับปรุงด้วย DAP และชุดควบคุม ตามลำดับ การทดสอบการเข้าสู่ระบบชีวภาพของ Cd, Pb และ Zn พบว่า Pb และ Zn มีความคงตัวในระยะยาวสูงกว่า Cd ซึ่งเป็นผลมาจากการตรึงของสารประกอบฟอสเฟตที่แตกต่างกัน โดยเกิดขึ้นระหว่างสารประกอบฟอสเฟตกับโลหะ จากลักษณะการละลายของสารประกอบฟอสเฟตและลักษณะของสารประกอบฟอสเฟต-โลหะที่เกิดขึ้น ดังนั้น Pb และ Zn ที่ตรึงด้วยสารประกอบฟอสเฟต เป็นทางเลือกของการฟื้นฟูดินในระยะยาวที่มีประสิทธิภาพสำหรับดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) รุ่น GBC 932 บริษัท GBC Scientific Equipment PTY ประเทศออสเตรเลีย
2. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrophotometer) รุ่น SRS 3400 บริษัท Siemens ประเทศเยอรมนี
3. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) รุ่น Genesys 10S บริษัท Thermo Scientific UV-Vis ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องย่อยเจสท์คาล (Kjedahl digestion unit) รุ่น K-424 บริษัท B'U'CHI ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
5. เครื่องกลั่นไนโตรเจน (Distillation) รุ่น B-323 บริษัท B'U'CHI ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
6. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Vacuum filter set) รุ่น B-169 บริษัท B'U'CHI ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
7. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Centaur 2 บริษัท Sanyo ประเทศญี่ปุ่น
8. เครื่องเขย่าแนวนอน (Orbital Skaker) บริษัท Gallenkamp ประเทศอังกฤษ
9. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น C860 บริษัท Consort ประเทศเบลเยียม
10. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum pump) รุ่น Aspirator A-3s บริษัท Eyela ประเทศญี่ปุ่น
11. แท่งแก้วสำหรับคนแบบ plunger
12. เครื่องชั่งละเอียดแบบ 4 ตำแหน่ง (Digital balance) รุ่น AUX 220 บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
13. ตู้อบแบบอากาศร้อน รุ่น ISOTEMP บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
14. เทอร์โมมิเตอร์
15. ตะแกรงร่อนขนาด 10 และ 20 เมช
16. กระดาษกรอง Whatman GF/C เบอร์ 1 และเบอร์ 42
17. ครกบดดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. แผ่นกระดาษกรองเมมเบรน Whatman ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
19. ไมโครปิเปต ขนาด 10-100 และ 100-1000 ไมโครลิตร รุ่น Pipet – Lite XLS+ บริษัท Metter Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา
20. ไมโครปิเปต ขนาด 1000-10000 ไมโครลิตร รุ่น Nichipet EX บริษัท Nichiryo ประเทศญี่ปุ่น
21. เซลล์พลาสติกชนิดที่มีด้านใส 2 ด้าน
22. แผ่นให้ความร้อน (Hot plate) รุ่น Fisher Stirring and Hotplate บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
23. โถดูดความชื้น (Dessicator)
24. ไฮโดรมิเตอร์มาตรฐาน ASTM NO. 1.152 H
25. หลอดเซนติฟิวส์ที่ทำจากโพลีโพรพิลีน (Centrifuge tube)
26. เครื่องแก้วและอุปกรณ์พลาสติกสำหรับห้องปฏิบัติการ

3.1.2 สารเคมี

1. ปุ๋ยหินฟอสเฟต (0-3-0) Fertilizer Grade จากชมรมเกษตรปลอดสารพิษ
2. ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ((NH₄)₂HPO₄, DAP, 18-46-0) Fertilizer Grade ตราหัววัว-คันไถ
3. ปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (KH₂PO₄, MPP, 0-52-34) Fertilizer Grade ตรากระทิงลูกโลก
4. กรดไดเอธิลีนไตรเอมีน เพนทราอะซิติก (C₁₄H₂₃N₃O₁₀, DTPA) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
5. กรดอะซิติก (CH₃COOH) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
6. กรดไนตริกเข้มข้น (HNO₃) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
7. กรดฟอสฟอริกเข้มข้น (H₃PO₄) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
8. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc. H₂SO₄) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
9. กรดแอสคอร์บิก (C₆H₈O₆) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
10. กรดบอริก (H₃BO₃) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
11. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
12. กรดออกซาลิก ((COOH)₂•2H₂O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
13. แคดเมียมไนเตรท (Cd(NO₃)₂•4H₂O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
14. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂•2H₂O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
15. ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO₃) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
16. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
18. โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต ((NaPO₃)₆) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
19. โซเดียมไฮโปคลอไรด์ (NaOCl) AR Grade บริษัท Ajax Chemicals ประเทศออสเตรเลีย
20. โซเดียมเตตระโบเรต (Na₂B₄O₇•10H₂O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
21. โซเดียมอะซิเตท (CH₃COONa•3H₂O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
22. ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH₂PO₄•3H₂O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
23. ไตรเอทานอลามีน ((CH₂OHCH₂)₃N) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
24. แบเรียมคลอไรด์ (BaCl₂•2H₂O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
25. โบโรเมคิลซอลกรีน AR Grade บริษัท Acros Organic ประเทศเบลเยียม
26. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
27. โพแทสเซียมไดโครเมต (K₂Cr₂O₇) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
28. เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Fe(NH₄)₂(SO₄)₂•6H₂O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
29. เมทิลเรด AR Grade บริษัท S.D. Finechem ประเทศสหรัฐอเมริกา
30. แมงกานีสไนเตรท เตตระไฮเดรต (Mn(NO₃)₂•4H₂O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
31. เลดไนเตรต (Pb(NO₃)₂) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
32. สารละลายออร์โทไฟฟีนไนโตรลีน อินดิเคเตอร์ AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
33. เอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) 95% AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
34. แอมโมเนียมอะซิเตรท (NH₄OAc) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
35. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH₄Cl) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
36. แอมโมเนียมออกซาเลท ((COONH₄)₂•H₂O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
37. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH₄OH) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
38. แอมโมเนียมโมลิบเดต ((NH₄)₆Mo₇O₂₄•4H₂O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
39. แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH₄F) AR Grade บริษัท BDH Chemical ประเทศสหรัฐอเมริกา
40. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาร์เทรท (KOOCC(CHOH)₂COOSbO•1/2H₂O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

41. ไอโซโพรพิวแอลกอฮอล์ (C_3H_8O) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
42. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
43. ไฮดรอกซาลามีนไฮโดรคลอไรด์ ($NH_2OH \cdot HCl$) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

3.2 ตัวอย่างดินและสารปรับปรุงดิน

3.2.1 แหล่งที่มาของตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลองทำการเก็บรวบรวมจากพื้นที่ 2 แห่ง ทำการเก็บตัวอย่างดินตั้งแต่ผิวดินจนถึงระดับความลึก 30 เซนติเมตร โดยการเก็บตัวอย่างแบบผสมรวม ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างจากหลายๆ จุดและนำมาผสมกัน เพื่อใช้เป็นตัวแทนของตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินร่วนเหนียวบนทรายที่ใช้ในการทดลอง ทำการเก็บตัวอย่างดินจากตำบลชุมแสง อำเภอวังจันทร์ จังหวัดระยอง โดยอยู่ตำแหน่งละติจูดที่ $12^{\circ}57'22.7''N$ และลองติจูดที่ $101^{\circ}32'12.2''E$ ทำการเก็บตัวอย่างดินวันที่ 25 กรกฎาคม 2558 และตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดลอง ทำการเก็บตัวอย่างดินจากตำบลลาดจินดา อำเภอสามพราณ จังหวัดนครปฐม โดยอยู่ตำแหน่งละติจูดที่ $13^{\circ}42'46.2''N$ และลองติจูดที่ $100^{\circ}09'25.5''E$ ทำการเก็บตัวอย่างดินวันที่ 26 กรกฎาคม 2558 ซึ่งพื้นที่ทั้ง 2 แห่งที่ทำการเก็บตัวอย่างดินเป็นพื้นที่รกร้าง ไม่มีกิจกรรมการใช้พื้นที่

3.2.2 สารปรับปรุงดิน

สารปรับปรุงดินที่ใช้ในการทดลองเป็นกลุ่มปุ๋ยฟอสเฟต มีดังนี้

3.2.2.1 หินฟอสเฟต (0-3-0) Fertilizer grade มีปริมาณธาตุอาหารรับรอง ดังนี้ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0%, ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ 3%, ปริมาณโพแทสเซียมในรูปที่ละลายน้ำได้ 0%



รูปที่ 3.1 ปุ๋ยหินฟอสเฟต จากชมรมเกษตรปลอดสารพิษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2 ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ((NH₄)₂HPO₄, DAP, 18-46-0) Fertilizer grade มีปริมาณธาตุอาหารรับรอง ดังนี้ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 18%, ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ 46%, ปริมาณโพแทสเซียมในรูปที่ละลายน้ำได้ 0%



รูปที่ 3.2 ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ตราหัววัว-คันไถ

3.2.2.3 โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (KH₂PO₄, MPP, 0-52-34) Fertilizer grade มีปริมาณธาตุอาหารรับรอง ดังนี้ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0%, ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ 52%, ปริมาณโพแทสเซียมในรูปที่ละลายน้ำได้ 34%



รูปที่ 3.3 ปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ตรากระทิงลูกโลก

3.3 การเตรียมตัวอย่างดินและสารปรับปรุงดิน

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการวิเคราะห์

นำตัวอย่างดินทั้ง 2 แห่ง ได้แก่ ดินร่วนเหนียวปนทรายจากจังหวัดระยอง และดินเหนียวจากจังหวัดนครปฐม ทำการเลือกเศษหิน เศษหญ้าขนาดใหญ่ออก ผึ่งแดดจนแห้ง จากนั้นจึงนำมาบดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครกบดดิน และร่อนดินด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร (Mesh no. 10) จากนั้นแยกเก็บดินแต่ละชนิดในถุงพลาสติกพร้อมทั้งติดฉลาก เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างสารปรับปรุงดินสำหรับการวิเคราะห์

นำตัวอย่างสารปรับปรุงดินทั้งหมดประมาณ 1 กิโลกรัม เทใส่ถุงพลาสติกและคลุกเคล้าให้เข้ากันดี เทสารปรับปรุงลงบนแผ่นพลาสติกที่สะอาด คลุกเคล้าให้เข้ากันดีอีกครั้ง จากนั้นพูนกองสารปรับปรุงดินให้เป็นรูปกรวย ใช้ไม้ตัดกองตัวอย่างสารปรับปรุงดินเป็น 4 ส่วนเท่าๆ กัน นำตัวอย่างสารปรับปรุงดิน 1 ส่วนมาบดให้ละเอียดด้วยครก และร่อนด้วยตะแกรงขนาด 850 ไมโครเมตรหรือ Mesh no. 20 (เป็นวิธีการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยเคมีเพื่อการวิเคราะห์) จากนั้นแยกเก็บตัวอย่างสารปรับปรุงดินแต่ละชนิดในถุงพลาสติกพร้อมทั้งติดฉลาก เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

3.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดิน และสารปรับปรุงดิน

การนำตัวอย่างดินและสารปรับปรุงดินมาทำการทดลอง ต้องทำการวิเคราะห์เบื้องต้นถึงคุณสมบัติของตัวอย่างดินและตัวอย่างสารปรับปรุงดิน เพื่อศึกษาถึงผลประสิทธิภาพของสารปรับปรุงดินแต่ละชนิดต่อการชะลอการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 โดยทุกการทดลองดำเนินการ 3 ซ้ำ

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดิน

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
Moisture	Gravimetric method
Bulk density	Gravimetric method
pH	pH meter / 1:2 (soil : water)
Organic matter	Walkley and Black method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
Mineral matter	X-ray fluorescence spectrometry (XRF)
Cation exchange capacity	Ammonium saturation method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
Soil texture	Kjeldahl method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
Total nitrogen	Bray II method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
Available phosphorus	Acid Digestion/Atomic absorption spectrophotometer
Total heavy metal	(AAS) SW-846 Method 3050B (US.EPA, 1996)

หมายเหตุ รายละเอียดการวิเคราะห์อยู่ในภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
Moisture	Gravimetric method
pH	pH meter
Mineral matter	X-ray fluorescence spectrometry (XRF)
Available phosphorus	Bray II method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
Total phosphorus	Spectrophotometric molybdovanado phosphate method (กรมวิชาการเกษตร, 2551)
Total heavy metal	Acid Digestion/Atomic absorption spectrophotometer (AAS) SW-846 Method 3050B (US.EPA, 1996)

หมายเหตุ รายละเอียดการวิเคราะห์อยู่ในภาคผนวก ก

3.3.4 การเตรียมดินสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

นำตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียวจากจังหวัดนครปฐม และดินร่วนเหนียวปนทรายจังหวัดระยอง ชนิดละ 6 กิโลกรัม มาทำการสังเคราะห์โลหะหนักในดิน เพื่อจำลองการปนเปื้อนของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสในดิน โดยการเติมสารละลายตะกั่ว ($Pb(NO_3)_2$), แคดเมียม ($Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) และแมงกานีส ($Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้

1. ระดับความเข้มข้นแคดเมียม เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง
2. ระดับความเข้มข้นตะกั่ว เท่ากับ 550 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง
3. ระดับความเข้มข้นแมงกานีส เท่ากับ 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง

สารละลายโลหะแต่ละชนิดถูกผสมและคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างดินที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 เดือน เพื่อให้ไอออนของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส ยึดจับกับดินแน่นเพียงพอที่จะสะท้อนถึงสภาพการยึดเกาะของโลหะในดินที่มีการปนเปื้อนจริง (ในระหว่างการบ่มทำการคลุกเคล้าอย่างสม่ำเสมอ) จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 228.8, 283.3 และ 403.1 nm ตามลำดับ

ซึ่งระดับความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสดังกล่าวที่ใช้สังเคราะห์ดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก เป็นค่าระดับความเข้มข้นที่สูงเกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่กำหนด โดยกำหนดให้ตัวอย่างดินจากจังหวัดนครปฐมที่ปนเปื้อนตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีส แทนด้วยอักษรย่อ Np ส่วนตัวอย่างดินจากจังหวัดระยองที่ปนเปื้อนตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีส แทนด้วยอักษรย่อ Ry

3.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการปรับเสถียร

ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ ปริมาณและชนิดของสารปรับปรุงดิน

1. นำดิน Np จากข้อ 3.3.4 ทั้งหมด 2 กิโลกรัมใส่ลงในภาชนะพลาสติก ใบละ 500 กรัม เพื่อผสมกับหินฟอสเฟต (RP) ที่ปริมาณ 0, 2,500, 5,000 และ 7,500 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัมดินแห้ง ทำเช่นเดียวกันนี้โดยการเปลี่ยนชนิดของสารปรับปรุงดินเป็นไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP) ตามลำดับ ทำการผสมคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันและเติมน้ำกลั่นจนอิ่มตัวด้วยน้ำ

2. ทำการปรับเสถียรที่อุณหภูมิห้องนาน 1 เดือน (ในระหว่างการปรับเสถียรทำการคลุกเคล้าให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอ)

3. เมื่อครบกำหนดตามระยะเวลา 1 เดือน นำดินที่ผ่านการปรับเสถียรไปทำการวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดต่าง, วิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีส ด้วยวิธี Acid digestion, ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสในดินโดยการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) และศึกษาศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีส โดยการสกัดดินด้วยกระบวนการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) จากนั้นทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

4. การทดลองดำเนินการ 3 ซ้ำ ตามวิธีข้างต้น

5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 โดยการเปลี่ยนชนิดของดินเป็นดินระยอง (Ry)

3.5 การวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีส

1. ชั่งตัวอย่างดินหรือสารปรับปรุงดิน 1 กรัมผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร และ 850 ไมโครเมตร ตามลำดับ เติมสารละลาย HNO_3 เข้มข้น ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นทำการ digest เป็นเวลา 15 นาที

2. เติมสารละลาย HNO_3 เข้มข้น ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และทำการ digest เป็นเวลา 30 นาที ถ้าเนื้อสารละลายมีไอสีส้มอมน้ำตาลให้เติมสารละลาย HNO_3 เข้มข้น ครั้งละ 5 มิลลิลิตร จนกว่าจะไม่มีไอสีส้มอมน้ำตาล จากนั้นทำการ digest ต่อจนสารละลายเหลือ 5 มิลลิลิตรหรือประมาณ 2 ชั่วโมง

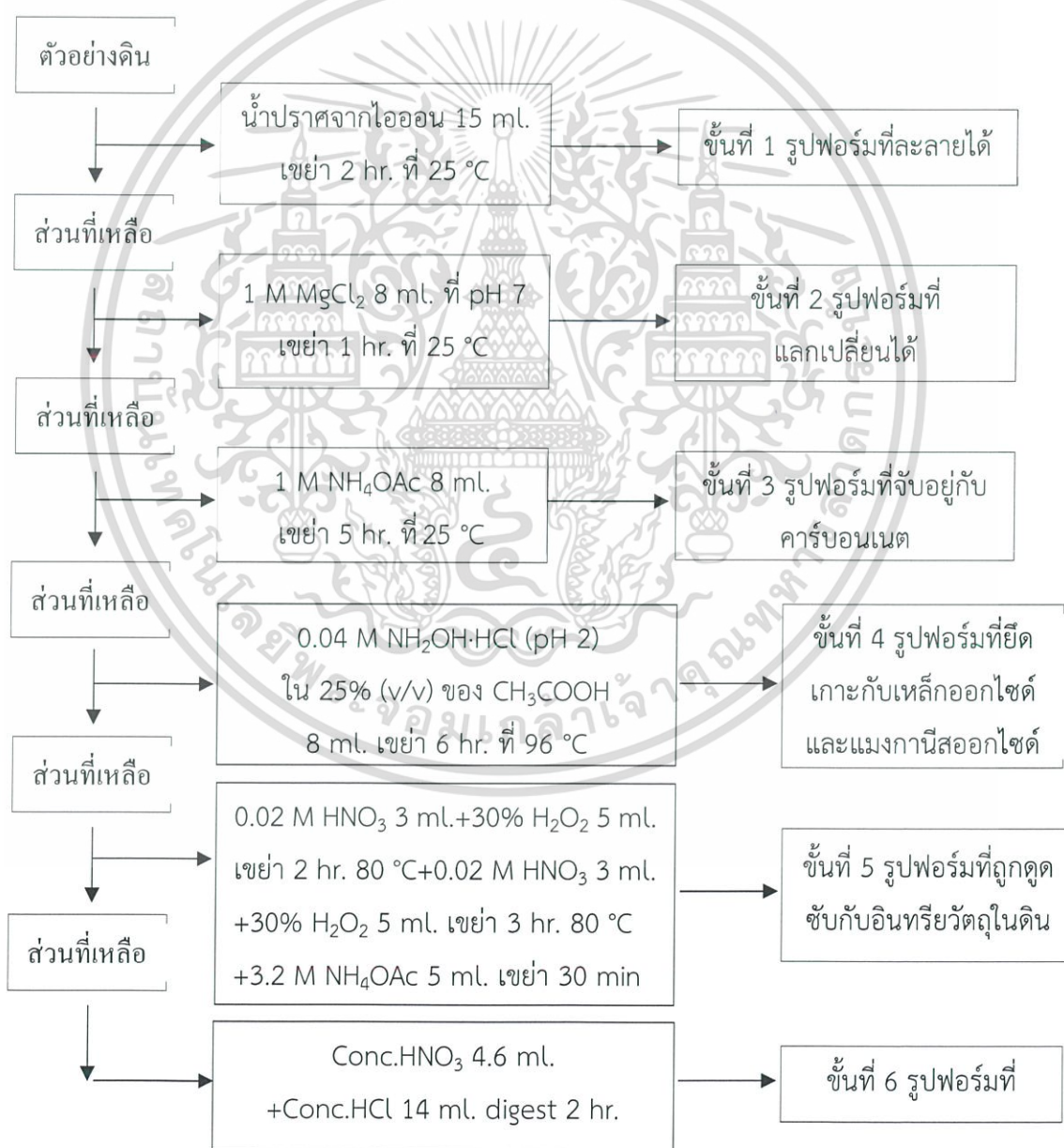
3. เติมน้ำปราศจากไอออน 2 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 มิลลิลิตร โดยการเติมทีละ 1 มิลลิลิตร จนกว่าจะไม่เกิดฟอง (เติมไม่เกิน 10 มิลลิลิตร)

4. ทำการ digest ต่อจนสารละลายเหลือ 5 มิลลิลิตรหรือประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลาย HCl เข้มข้น ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และทำการ digest ต่อเป็นเวลา 15 นาที

5. กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (Whatman ขนาดความเป็นรูพรุน $2.5 \mu\text{m}$) และเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ ตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสในสารละลายที่สกัดได้ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ

3.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน

วิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีส เพื่อจำแนกรูปฟอร์มของโลหะหนัก ในตัวอย่างดิน โดยการสกัดตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) โดยอ้างอิง ตามวิธีของ Tessier *et al.* (1979) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงวิธีการสกัดโลหะหนักรูปฟอร์มต่างๆ ออกจากดินแบบลำดับขั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสกัดตัวอย่างดินในแต่ละขั้นตอนจะต้องทำการล้างดิน เพื่อที่จะสกัดในขั้นตอนต่อไป ซึ่งมีวิธีการดังนี้ โดยนำดินที่เหลือจากการเก็บสารละลายส่วนใส เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่าและนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้อนุภาคดินมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เก็บสารละลายส่วนใส และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปสกัดในขั้นตอนต่อไป

โดยที่สารละลายส่วนใสที่สกัดได้ในแต่ละขั้นตอน นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ

3.7 การวิเคราะห์ศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพของโลหะหนัก

นำดินที่ผ่านการปรับเสถียรแล้วครบตามระยะเวลาที่กำหนดมาทำการวิเคราะห์ด้วยการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-step extraction) เพื่อประเมินศักยภาพของการเข้าสู่ระบบชีวภาพของ ตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสในดิน โดยการสกัดด้วยสารละลาย 1 M NH_4OAc เพื่อประเมินศักยภาพการแลกเปลี่ยนได้ของโลหะหนัก (exchangeability), สารละลาย 0.05 M EDTA ใช้เพื่อประเมินศักยภาพการเคลื่อนที่ (mobility) และสารละลาย 0.005 M DTPA, 0.01 M CaCl_2 เพื่อประเมินศักยภาพการดูดซึมด้วยพืช (phytoavailability) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.7.1 การสกัดด้วยสารละลาย 0.05 M Ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA)

ซั่งตัวอย่างดิน 0.8 กรัมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เติมสารละลาย EDTA ความเข้มข้น 0.05 M ที่ pH 7.50 ± 0.05 ปริมาตร 80 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 48 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที ทำการกรองสารละลายส่วนใสด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (Whatman ขนาดความเป็นรูพรุน $2.5 \mu\text{m}$) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ

3.7.2 การสกัดด้วยสารละลาย 1 M Ammonium acetate ($\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2\text{NH}_4$)

ซั่งตัวอย่างดิน 5 กรัมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เติมสารละลาย ammonium acetate ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่ pH 7 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 1 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ทำการกรองสารละลายส่วนใสด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (Whatman ขนาดความเป็นรูพรุน $2.5 \mu\text{m}$) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ

3.7.3 การสกัดด้วยสารละลาย 0.005 M Diethylene triamine pentaacetic acid (DTPA)

ซึ่งตัวอย่างดิน 10 กรัม ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เติมสารละลาย DTPA ความเข้มข้น 0.005 M ปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาทีในอุณหภูมิห้อง ทำการกรองสารละลายส่วนใสด้วยกระดาษกรอง (Whatman ขนาดความป็นรูพรุน 2.5 μm) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ

3.7.4 การสกัดด้วยสารละลาย 0.01 M Calcium Chloride (CaCl_2)

ซึ่งตัวอย่างดิน 5 กรัม ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เติมสารละลาย CaCl_2 ความเข้มข้น 0.01 M ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่ pH 5.30 - 6.00 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 3 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที จากนั้นปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาทีด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงนาน 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ทำการกรองสารละลายส่วนใสด้วยกระดาษกรอง (Whatman ขนาดความป็นรูพรุน 2.5 μm) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีสในสารละลายที่สกัดได้จากดินตัวอย่างด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ

3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลแบบ two - way โดยใช้โปรแกรม MINITAB version 16 ทดสอบความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบภายในชุดการทดลองและระหว่างชุดการทดลองทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต

บทที่ 4

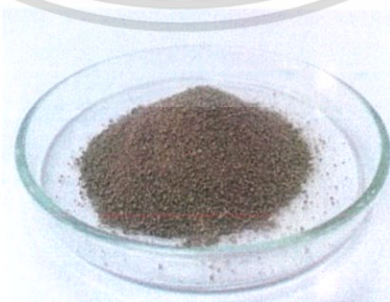
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการปรับเสถียรของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้ปุ๋ยกลุ่มฟอสเฟตเป็นสารปรับเสถียร เพื่อชะลอและลดปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสในการแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดิน ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก และศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต (RP), ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP)

4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดิน

โดยตัวอย่างดินที่จำลองการปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส ได้แก่ ดินเหนียวจากจังหวัดนครปฐม และดินร่วนเหนียวปนทรายจากจังหวัดระยอง ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.2 ซึ่งก่อนที่จะนำตัวอย่างดินมาทำการศึกษาการปรับเสถียรโลหะหนัก จะมีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิดก่อน แสดงดังตารางที่ 4.1

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างดินนครปฐม (Np)



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างดินระยอง (Ry)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดิน (Mean \pm S.D.)

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์		
	ดินนครปฐม (Np)	ดินระยอง (Ry)	
Moisture (%)	30.75 \pm 1.23	10.80 \pm 0.30	
Bulk density (g/cm ³)	1.44 \pm 0.08	1.88 \pm 0.06	
pH / 1:2 (soil : water)	7.06 \pm 0.03	3.20 \pm 0.01	
Organic matter (%)	4.51 \pm 0.03	3.50 \pm 0.15	
Mineral matter % SiO ₂	89.4	94.6	
Cation exchange capacity (meq/100 g)	29.36 \pm 0.32	2.80 \pm 0.53	
Soil texture	% Sand	29.95	66.89
	% Silt	18.41	4.53
	% Clay	51.64	28.58
Soil texture	Clay	Sandy clay loam	
Total nitrogen (%)	0.0024 \pm 0.002	0.0024 \pm 0.002	
Available phosphorus (mg/kg)	4.07 \pm 0.49	0.61 \pm 0.08	
Total heavy metal (mg/kg)	Cd	1.10 \pm 0.20	0.03 \pm 0.06
	Pb	42.86 \pm 1.08	22.17 \pm 1.51
	Mn	1,056.30 \pm 58.78	35.34 \pm 1.99

*รายละเอียดในภาคผนวก ข

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดินเปรียบเทียบคุณภาพดินตามเกณฑ์ของกรมพัฒนาที่ดิน (2547) พบว่า ตัวอย่างดินทั้ง 2 มีคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นที่แตกต่างกัน ดังนี้

4.1.1 ความชื้น

ในทางปฐพีวิทยากระบวนการผุพังและกระบวนการเกิดชั้นดิน รวมทั้งการใช้ที่ดินในด้านอื่น นอกเหนือจากการเกษตรส่วนใหญ่ ล้วนแล้วแต่มีน้ำเข้าไปเกี่ยวข้องเป็นปัจจัยสำคัญ จากการวิเคราะห์พบว่า ตัวอย่างดินนครปฐม (Np) มีความชื้นในดินเฉลี่ยสูงถึง 30.75 \pm 1.23 % ซึ่งสูงกว่าดินระยอง (Ry) โดยที่ดินระยองมีความชื้นในดินเฉลี่ย เท่ากับ 10.80 \pm 0.30 % เนื่องจากดินต่างชนิดกัน จะมีขนาด การกระจายตัวและความต่อเนื่องของช่องว่างในดินที่แตกต่างกัน ทำให้แรงดึงน้ำในดินต่างกัน ด้วย โดยทั่วไปดินเนื้อละเอียดจะมีความจุน้ำได้มากกว่าดินเนื้อหยาบ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

4.1.2 ความหนาแน่นรวม

ในดินจะมีความหนาแน่นรวมแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน เนื้อดิน และโครงสร้างของดิน โดยทั่วไปค่าความหนาแน่นรวมของดินบนที่มีเนื้อดินเป็นดินเหนียว ดินร่วนปนเหนียว และดินร่วนปนทรายแป้ง มีค่าอยู่ในช่วง $1.20-1.80 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่าตัวอย่างดินนครปฐมมีความหนาแน่นรวม เท่ากับ $1.44 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$ ส่วนตัวอย่างดินระยองมีความหนาแน่นรวม เท่ากับ $1.88 \pm 0.06 \text{ g/cm}^3$ โดยตัวอย่างดินระยองจัดอยู่ในเกณฑ์ความหนาแน่นรวมของดินวิกฤตที่มีผลต่อการซอมโซของรากพืช (ดินทราย $> 1.6 - 1.8 \text{ g/cm}^3$) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

4.1.3 ค่าความเป็นกรดต่างในดิน

ค่าความเป็นกรดต่างของดินเป็นดัชนีหนึ่งที่ใช้มากที่สุดในการตรวจวัดคุณสมบัติทางเคมีของดิน เนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างของดินสามารถใช้ในการทำนายคุณสมบัติทางเคมีอื่นๆ ของดิน เป็นดัชนีที่ใช้ชี้วัดสถานะของธาตุต่างๆ ในดิน (พัชรี, 2552) จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ยของตัวอย่างดินนครปฐมที่ใช้ในการศึกษา คือ 7.06 ± 0.03 ส่วนตัวอย่างดินระยองมีค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ยเท่ากับ 3.20 ± 0.01 ซึ่งจัดระดับความรุนแรงของความเป็นกรดต่างของดินอยู่ในระดับเป็นกลาง (neutral : pH 6.6-7.3) และระดับกรดรุนแรงมากที่สุด (ultra acid : pH < 3.5) ตามลำดับ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

4.1.4 ร้อยละของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเป็นอินทรีย์สารทุกชนิดที่มีอยู่ในดิน ซึ่งได้จากซากพืช ซากสัตว์ และสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อาศัยอยู่ในดิน สลายตัวทับถมอยู่ในดิน อินทรีย์วัตถุในดินประกอบด้วยอินทรีย์สารหลายชนิดและเมื่อสลายตัวโดยจุลินทรีย์ถึงขั้นสุดท้ายจะได้ฮิวมัส (humus) ซึ่งเป็นของแข็งที่มีอนุภาคละเอียดมาก มีบทบาทสำคัญคือ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง สามารถดูดซับน้ำได้ดี และมีบทบาทสำคัญต่อการยึดเกาะกันเป็นเม็ดของอนุภาคดิน (พัชรี, 2552) จากการวิเคราะห์พบว่าในตัวอย่างดินนครปฐมมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินคิดเป็นร้อยละ 4.51 ± 0.03 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ระดับสูงมาก (ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ > 4.5) ส่วนตัวอย่างดินระยองพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินคิดเป็นร้อยละ 3.50 ± 0.15 ซึ่งจัดว่าอยู่ในระดับค่อนข้างสูง (ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 2.5-3.5) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

4.1.5 ร้อยละของปริมาณอนินทรีย์วัตถุ

จากการวิเคราะห์ พบว่า ในตัวอย่างดินนครปฐมและระยองมีร้อยละปริมาณอนินทรีย์วัตถุในดินส่วนใหญ่เป็น SiO_2 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 89.4 และ 94.6 ตามลำดับ

4.1.6 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

ดินทั่วไปมีประจุสุทธิเป็นลบ ทำให้ดินสามารถดูดซับประจุตรงข้าม ซึ่งได้แก่ ประจุบวกต่างๆ ไว้รอบพื้นผิวอนุภาคด้วยจำนวนสมมูลที่เท่ากัน ประจุบวกที่ถูกดูดซับนี้สามารถแลกเปลี่ยนที่กับประจุบวกที่เป็นบวกที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บวกอื่นๆ ได้ (พัชรี, 2552) จากการวิเคราะห์ พบว่าตัวอย่างดินนครปฐมมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก เท่ากับ 29.36 ± 0.32 meq/100 g ซึ่งจัดอยู่ในระดับสูง (ค่า CEC : 20.0-30.0) ส่วนตัวอย่างดินระยองมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก เท่ากับ 2.80 ± 0.53 meq/100 g โดยที่จัดอยู่ในระดับต่ำมาก (ค่า CEC < 3.0) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) ซึ่งดินที่มี CEC สูงจะมีความสามารถในการกักเก็บประจุบวกได้มากกว่า รวมทั้งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของดิน เช่น ค่าความเป็นกรดต่างของดิน ตลอดจนมีความสามารถในการต้านทานการชะล้างได้ดีกว่าดินที่มี CEC ต่ำ

ค่า CEC ของดินได้รับอิทธิพลจากชนิดและปริมาณแร่ดินเหนียว ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ตลอดจนค่าความเป็นกรดต่างของดิน อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่แลกเปลี่ยนประจุบวกได้บนพื้นผิวอนุภาคดินจะมีความเกี่ยวข้องกับอินทรีย์วัตถุในดินมากกว่าแร่ดินเหนียว เนื่องจากอินทรีย์วัตถุซึ่งมีประจุลบสุทธิมากกว่าแร่ดินเหนียวเป็นอย่างมาก จึงมีค่า CEC สูงกว่ามากด้วย (พัชรี, 2552)

4.1.7 ลักษณะเนื้อดิน

เป็นการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคดิน โดยการหาสัดส่วนของกลุ่มขนาดอนุภาคดินเหนียว (clay) กลุ่มขนาดอนุภาคทรายแป้ง (silt) และกลุ่มขนาดอนุภาคทราย (sand) จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น พบว่า ดินนครปฐมมีร้อยละของ Sand, Silt และ Clay เท่ากับ 29.95, 18.41 และ 51.64 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบอัตราส่วนร้อยละกับไดอะแกรมสามเหลี่ยมแรงประเกศเนื้อดินตามระบบของกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา พบว่าจัดอยู่ในเนื้อดินประเภทดินเหนียว ส่วนตัวอย่างดินระยองมีร้อยละของ Sand, Silt และ Clay เท่ากับ 66.89, 4.53 และ 28.58 ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในเนื้อดินประเภทดินร่วนเหนียวปนทราย (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

4.1.8 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินอาจจะเป็นเรื่องที่ยาก จากการที่ไม่ทราบรูปของไนโตรเจนและมีปริมาณน้อย ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินส่วนใหญ่มีประมาณ < 0.02% (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) เมื่อวิเคราะห์ดินนครปฐมและดินระยอง พบว่ามีร้อยละของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด เท่ากันคือ 0.0024 ± 0.002

4.1.9 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารพืชธาตุหนึ่งที่พืชต้องการในปริมาณมาก และจะมีอยู่ในดินต่ำมาก โดยมีค่าเฉลี่ยเพียง 0.06% ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินอยู่ในรูปอนุมูลฟอสเฟต คือ $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} ซึ่งได้จากกระบวนการแปรสภาพของอินทรีย์วัตถุ และจากการละลายของสารประกอบฟอสเฟตต่างๆ ในดิน ออกมาอยู่ในสารละลายดิน ซึ่งอยู่ในสภาพสมดุลกัน โดยผลการวิเคราะห์ดินนครปฐมและระยอง พบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 4.07 ± 0.49 mg/kg และ 0.61 ± 0.08 mg/kg ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวอย่างดินนครปฐมและดินระยองเบื้องต้น พบว่าสอดคล้องตามลักษณะตามกลุ่มชุดดินที่ 7 และ 43 ตามลำดับ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548) โดยมีรายละเอียดดังนี้ ลักษณะของกลุ่มชุดดินที่ 7 มีเนื้อดินเป็นดินเหนียว ดินร่วนเหนียว ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง หรือดินร่วน สีน้ำตาล สีน้ำตาลเข้มหรือสีเข้มของน้ำตาลปนเทา มีจุดประสีน้ำตาลแก่ และสีแดงปนเหลือง เป็นกรดเล็กน้อยถึงด่างเล็กน้อย (pH 6.5-7.5) มีความอุดมสมบูรณ์อยู่ในระดับปานกลาง ส่วนลักษณะของกลุ่มชุดดินที่ 43 มีเนื้อดินเป็นดินทราย ปนดินร่วน หรือดินทราย สีพื้นเป็นสีเข้มของสีน้ำตาลปนเทา ปฏิกริยาดินเป็นกรดเล็กน้อยถึงกรดรุนแรงมาก (pH 4.5-6.5) ดินมีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติต่ำ

4.1.10 ปริมาณโลหะหนักรวม

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของดินนครปฐม ทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสทั้งหมด พบว่ามีปริมาณ เท่ากับ 1.10 ± 0.20 , 42.86 ± 1.08 และ $1,056.30 \pm 58.78$ mg/kg ตามลำดับ ส่วนดินระยอง พบว่ามีปริมาณแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสทั้งหมด เท่ากับ 0.03 ± 0.06 , 22.17 ± 1.51 และ 35.34 ± 1.99 mg/kg ตามลำดับ

เนื่องจากผลการวิเคราะห์ปริมาณของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสเบื้องต้นในตัวอย่างดินนครปฐมและดินระยองมีปริมาณน้อย ทำให้ดินตัวอย่างยังไม่จัดอยู่ในเกณฑ์ที่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพดิน จึงต้องทำการสังเคราะห์ดินเพื่อให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยมีระดับความเข้มข้นแคดเมียม, ตะกั่ว และแมงกานีส เท่ากับ 50, 550 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งระดับความเข้มข้นดังกล่าวเป็นค่าระดับความเข้มข้นที่สูงเกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ที่กำหนดไว้ว่าความเข้มข้นแคดเมียม, ตะกั่ว และแมงกานีส ต้องไม่เกิน 37, 400 และ 1,800 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยผู้วิจัยทำการสังเคราะห์ดินโดยการเติมและผสมสารละลายแคดเมียม, ตะกั่ว และแมงกานีสเข้าไปในดิน ตั้งทิ้งไว้นาน 1 เดือน จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักรวม ดังแสดงผลในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน (Mean \pm S.D.)

ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (mg/kg)	ดินนครปฐม (Np)	ดินระยอง (Ry)
แคดเมียม	52.50 ± 1.00	51.30 ± 2.14
ตะกั่ว	594.44 ± 8.29	574.69 ± 13.70
แมงกานีส	$3,044.53 \pm 153.62$	$2,066.58 \pm 43.39$

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน พบว่าในตัวอย่างดินนครปฐมมีความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส เท่ากับ 52.50 ± 1.00 , 594.44 ± 8.29 และ $3,044.53 \pm 153.62$ mg/kg ตามลำดับ ส่วนในตัวอย่างดินระยองมีความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตะกั่ว และแมงกานีส เท่ากับ 51.30 ± 2.14 , 574.69 ± 13.70 และ $2,066.58 \pm 43.39$ mg/kg ตามลำดับ ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นความเข้มข้นของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสในดินเริ่มต้นที่มีการปนเปื้อนและถือว่าอยู่ในระดับความเข้มข้นที่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม

4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน

การจะนำปุ๋ยฟอสเฟตทั้ง 3 ชนิด ซึ่งได้แก่ หินฟอสเฟต (RP), ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP) มาใช้ในการทดลองเพื่อปรับเสถียรแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสที่ปนเปื้อนในดินนั้นจะต้องทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของปุ๋ยฟอสเฟตก่อนที่จะศึกษาประสิทธิภาพในการปรับเสถียรของโลหะหนักในดิน โดยแสดงดังตารางที่ 4.3

ลักษณะทางกายภาพของหินฟอสเฟต (RP) ที่สังเกตเห็นได้ จะเป็นผงละเอียด สีน้ำตาลอมแดง (รูปที่ 4.3) ส่วนปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) จะมีลักษณะเป็นปุ๋ยเม็ดกลม ขนาดเล็ก สีน้ำตาลอมเหลือง (รูปที่ 4.4) และลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP) จะมีลักษณะเป็นผง เกล็ดหยาบๆ สีขาว ไม่มีสิ่งเจือปน (รูปที่ 4.5)



รูปที่ 4.3 หินฟอสเฟต (RP)

รูปที่ 4.4 ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP)

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน (Mean \pm S.D.)

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์			
	หินฟอสเฟต (RP)	ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP)	โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP)	
Moisture (%)	2.68 \pm 0.09	3.85 \pm 0.25	0.17 \pm 0.02	
pH	8.77 \pm 0.08	7.00 \pm 0.03	4.15 \pm 0.02	
Mineral matter	% Al ₂ O ₃	27.7	-	
	% SiO ₂	34.9	-	
	% P ₂ O ₅	8.19	82.6	98.2
	% SO ₃	-	15.2	-
	% CaO	25.3	0.535	-
Available phosphorus (g/kg)	0.11 \pm 0.02	375.36 \pm 67.88	456.52 \pm 35.31	
Total phosphate (g/kg)	20.70 \pm 0.99	394.46 \pm 17.40	456.93 \pm 15.46	
Total heavy metal (mg/kg)	Cd	7.17 \pm 0.26	4.45 \pm 0.12	2.93 \pm 0.15
	Pb	189.88 \pm 0.37	10.03 \pm 0.78	17.58 \pm 0.27
	Mn	8,788.83 \pm 71.13	473.85 \pm 15.47	3.10 \pm 0.28

*รายละเอียดในภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดิน

จากการดำเนินการปรับเสถียรในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสด้วยปุ๋ยฟอสเฟต เป็นเวลา 1 เดือน เมื่อครบกำหนดจึงทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดินภายหลังจากการปรับเสถียร

ตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นกรดต่างในดินนครปฐมและระยอง (Mean \pm S.D.)

ประเภทสารปรับปรุงดิน	ปริมาณ (mgP/kg)	สัญลักษณ์	ค่า pH	
			ดินนครปฐม	ดินระยอง
ไม่ผสม (ชุดควบคุม)	0	CK	6.78 \pm 0.04	3.60 \pm 0.01
หินฟอสเฟต	2,500	RP1	6.72 \pm 0.04	6.13 \pm 0.05
	5,000	RP2	6.73 \pm 0.02	6.27 \pm 0.06
	7,500	RP3	6.78 \pm 0.04	6.54 \pm 0.04
ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	2,500	DAP1	6.90 \pm 0.04	5.36 \pm 0.02
	5,000	DAP2	6.91 \pm 0.02	6.41 \pm 0.01
	7,500	DAP3	6.90 \pm 0.01	7.01 \pm 0.01
โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต	2,500	MPP1	6.89 \pm 0.01	4.29 \pm 0.01
	5,000	MPP2	6.87 \pm 0.01	4.78 \pm 0.02
	7,500	MPP3	6.90 \pm 0.01	5.20 \pm 0.01

*รายละเอียดในภาคผนวก ค

เนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างของดินถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน เมื่อดินอยู่ในสภาพที่เป็นกรด ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในดิน จะมีการแข่งขันกับโลหะหนัก ส่งผลให้ดินมีความสามารถในการดูดซับประจุบวกอย่างโลหะหนักต่ำลงและเป็นการเพิ่มการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน (วรชาติ, 2555) ค่าความเป็นกรดต่างของดินนครปฐมในชุดควบคุมเท่ากับ 6.78 \pm 0.04 ซึ่งจัดว่าเป็นกลาง แต่เมื่อปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตปริมาณ 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg มีค่าความเป็นกรดต่างในดิน เท่ากับ 6.72 \pm 0.04, 6.73 \pm 0.02 และ 6.78 \pm 0.04 ตามลำดับ ซึ่งดินยังคงอยู่ในสภาพเป็นกลาง และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่าความเป็นกรดต่างในดินแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Basta *et al.* (2000) ที่ศึกษาถึงการเติมหินฟอสเฟต (ปริมาณ 100 g/kg) ลงในดินจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความเป็นกรดต่างของดิน ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความเป็นกรดต่างในดินปกติ

ส่วนหลังจากการปรับปรุงดินด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต พบว่าค่าความเป็นกรดต่างมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณตั้งแต่ 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg โดยมีค่าความเป็นกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

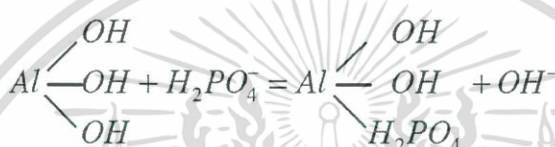
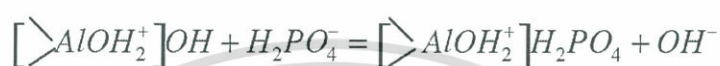
ต่างเท่ากับ 6.90 ± 0.04 , 6.91 ± 0.02 และ 6.90 ± 0.01 ตามลำดับ ส่งผลให้ดินยังคงอยู่ในสภาพเป็นกลางและจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่าความเป็นกรดต่างในดินมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมสารปรับปรุงดิน ส่วนในการปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีค่าความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารปรับปรุงดิน ซึ่งเท่ากับ 6.89 ± 0.01 , 6.87 ± 0.01 และ 6.90 ± 0.01 ตามลำดับ ดินอยู่ในสภาวะเป็นกลาง จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ค่าความเป็นกรดต่างในดินที่ปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตนั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดินนครปฐมให้สูงขึ้นภายหลังการปรับเสถียร

ส่วนตัวอย่างดินระยองในชุดควบคุมมีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3.60 ± 0.01 ซึ่งจัดว่าเป็นกรดรุนแรงมาก แต่เมื่อปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตที่ปริมาณ 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg พบว่าค่าความเป็นกรดต่างของดินเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเท่ากับ 6.13 ± 0.05 , 6.27 ± 0.06 และ 6.54 ± 0.04 ตามลำดับ ทำให้ดินอยู่ในสภาพเป็นกรดเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang *et al.* (2016) ที่ศึกษาถึงการเติมหินฟอสเฟตจะส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อันเนื่องมาจากหินฟอสเฟตนั้นสามารถมี liming value โดยที่ liming action สามารถเกิดขึ้นผ่านกระบวนการ 2 ขั้นตอน ได้แก่ 1) หินฟอสเฟตส่วนใหญ่จะมี free calcium carbonate (CaCO_3) ซึ่งทำหน้าที่เป็น liming agent 2) การละลายของหินฟอสเฟตในดินที่เป็นกรด จะช่วยลดความเป็นกรดของดินได้ (Seshadri *et al.*, 2017) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดต่างในดินหลังจากการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ส่วนการปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตทำให้ค่าความเป็นกรดต่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งเท่ากับ 5.36 ± 0.02 , 6.41 ± 0.01 และ 7.01 ± 0.01 ตามลำดับ ส่งผลให้ดินอยู่ในสภาพเป็นกรดจัดจนถึงเป็นกลาง ส่วนค่าความเป็นกรดต่างของดินที่ปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเท่ากับ 4.29 ± 0.01 , 4.78 ± 0.02 และ 5.20 ± 0.01 ตามลำดับ ทำให้ดินอยู่ในสภาพเป็นกรดรุนแรงมากจนถึงเป็นกรดจัด เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hamon *et al.* (2002) ที่ทำการปรับปรุงดินด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างในดินเพิ่มสูงขึ้น และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า สารปรับปรุงทั้ง 3 ชนิดทำให้ค่าความเป็นกรดต่างในดินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม กล่าวคือหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีผลต่อการเพิ่มค่าความเป็นกรดต่างในดินระยองภายหลังจากการปรับเสถียร

ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดต่างในดินหลังจากการเติมปุ๋ยฟอสเฟตนั้น เกิดจากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ โดยเป็นกลไกระหว่าง hydroxyl groups ซึ่ง coordinated กับประจุบวกของโลหะหนัก (เช่น Fe และ Al) ที่ถูกแทนที่ด้วยไอออนฟอสเฟต กลไกการแลกเปลี่ยนนี้ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับ Fe และ Al-oxyhydroxides ดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากการปลดปล่อยไอออน OH^- จะเป็นการเพิ่มค่าความเป็นกรดต่างในดิน (Siebers, 2009) โดยผลจากการเติมปุ๋ยฟอสเฟตจะมีต่อค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกรดต่างในดินนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ของดิน รวมทั้งธรรมชาติของสารประกอบฟอสเฟตด้วย (Havlin *et al*, 1999) กล่าวคือ หลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต ในตัวอย่างดินนครปฐมมีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดินน้อยกว่าดินระยอง อันเนื่องมาจากความเป็นบัฟเฟอร์ของดินที่สูงกว่า ย่อมมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของดิน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินนครปฐมเบื้องต้นที่สูงกว่าในดินระยอง จึงส่งผลให้ดินระยองมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดินอยู่ในช่วงกว้างกว่าดินนครปฐม



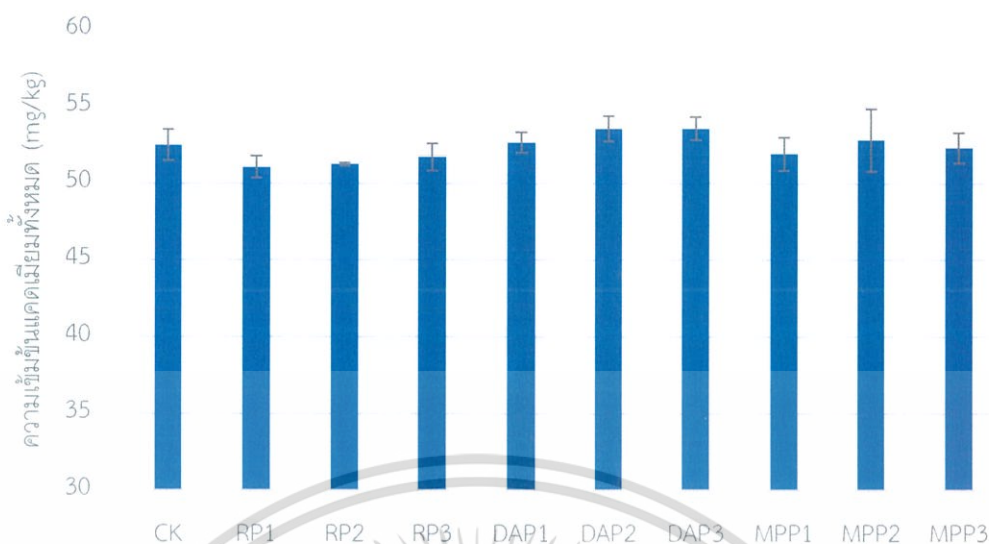
รูปที่ 4.6 ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนลิแกนด์และการตรึงฟอสเฟตด้วย silicate clays (Siebers, 2009)

4.4 การศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดในดินนครปฐม

เมื่อทำการปรับปรุงดินนครปฐมที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยหินฟอสเฟต (RP) ไโดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP) เป็นระยะเวลา 1 เดือน จากนั้นทำการศึกษาปริมาณโลหะหนักทั้งหมด ซึ่งได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณโลหะหนักทั้งหมดหลังจากการปรับปรุงดิน

4.4.1 ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าชุดควบคุมของดินนครปฐม (CK) มีความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดเท่ากับ 52.50 ± 1.00 mg/kg เมื่อทำการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตที่ปริมาณ 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg มีความเข้มข้นแคดเมียมทั้งหมดเท่ากับ 51.07 ± 0.71 , 51.25 ± 0.10 และ 51.70 ± 0.90 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับชุดควบคุม และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความเข้มข้นแคดเมียมที่ปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม



รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดในตัวอย่างดินนครปฐม ภายหลังจากการปรับเสถียร

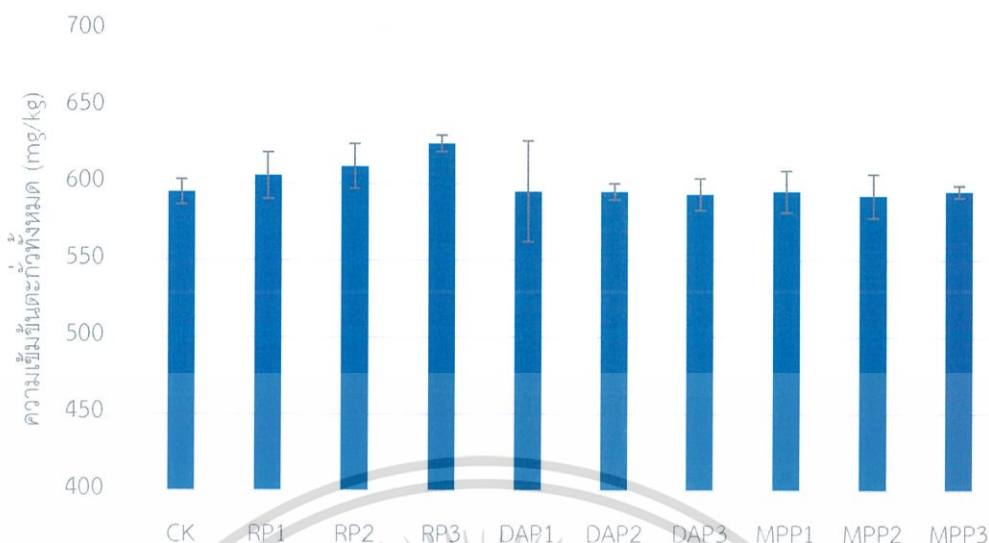
ในส่วนที่มีการปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตปริมาณ 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg ความเข้มข้นแคดเมียมทั้งหมดเท่ากับ 52.67 ± 0.67 , 53.56 ± 0.82 และ 53.57 ± 0.75 mg/kg ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดที่ปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตแตกต่างกันไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมการปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 51.92 ± 1.07 , 52.82 ± 2.04 และ 52.31 ± 0.99 mg/kg ที่ปริมาณโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดแตกต่างกันไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Siebers. (2009) ที่ศึกษาถึงการเติมปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตไม่ทำให้ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงดินด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตนั้น ไม่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมในดินภายหลังจากการปรับปรุง ดินจึงไม่ได้รับผลกระทบจากปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตที่ใช้

4.4.2 ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมด

หลังจากการปรับปรุงเป็นเวลา 1 เดือน ในชุดควบคุมมีความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดเท่ากับ 594.44 ± 8.29 mg/kg โดยการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตเมื่อเทียบกับชุดควบคุมความเข้มข้นตะกั่วทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยซึ่งเท่ากับ 605.02 ± 15.25 , 611.32 ± 14.56 และ 626.11 ± 5.44 mg/kg ที่ปริมาณสารปรับปรุง 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg ตามลำดับ (รูปที่ 4.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



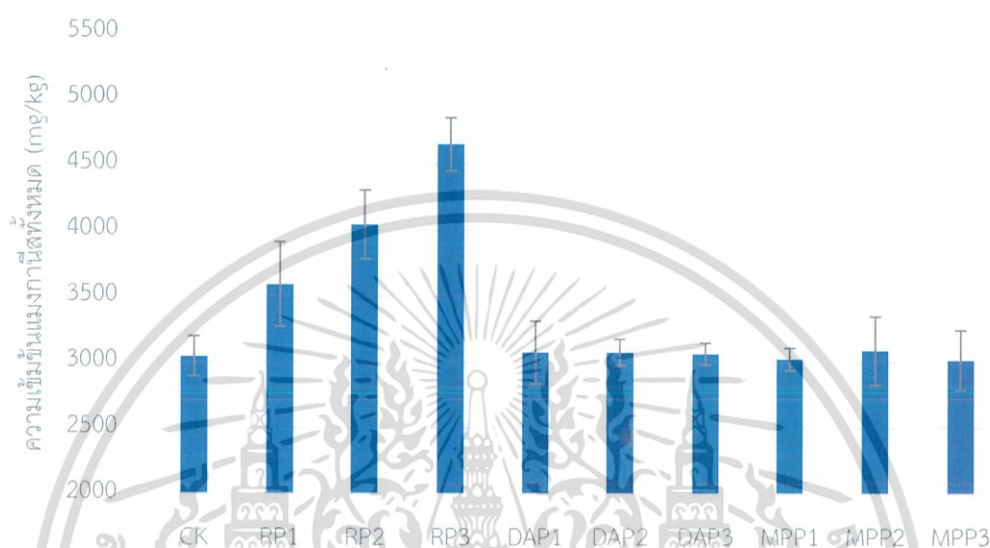
รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในตัวอย่างดินนครปฐม ภายหลังจากการปรับเสถียร

ในขณะที่การปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีความเข้มข้นทั้งหมดของตะกั่วใกล้เคียงกับชุดควบคุม โดยที่การปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตที่ปริมาณ 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg มีความเข้มข้นตะกั่วทั้งหมดเท่ากับ 594.87 ± 32.85 , 594.84 ± 5.33 และ 592.86 ± 10.47 mg/kg ตามลำดับ ส่วนการปรับปรุงที่ใช้โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีความเข้มข้นทั้งหมดของตะกั่วเท่ากับ 594.73 ± 13.72 , 592.02 ± 14.36 และ 594.78 ± 3.97 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติเทียบกับชุดควบคุมพบว่าความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดที่ปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟตไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตะกั่วภายหลังจากการปรับปรุงหรือจะกล่าวได้ว่าดินไม่ได้รับผลกระทบจากปริมาณการใช้ปุ๋ยฟอสเฟต

4.4.3 ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมด

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าชุดควบคุมที่ไม่ผสมสารปรับปรุงดินมีความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดเท่ากับ $3,044.53 \pm 153.62$ mg/kg แต่หลังจากการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ความเข้มข้นทั้งหมดของแมงกานีสมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนตามการเพิ่มของปริมาณสารปรับปรุงจาก 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg ซึ่งมีความเข้มข้นทั้งหมดของแมงกานีสเท่ากับ $3,589.83 \pm 321.31$, $4,044.72 \pm 260.80$ และ $4,654.34 \pm 203.15$ mg/kg ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแมงกานีสแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งจะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแมงกานีสเบื้องต้นที่สูงในหินฟอสเฟต ($8,788.83 \pm 71.13$ mg/kg) ดังตารางที่ 4.3 ส่งผลให้ภายหลังจากการปรับปรุงมีความ

เข้มข้นของแมงกานีสสูงตามไปด้วย อันเนื่องมาจากหินฟอสเฟตนั้นเป็นสินแร่ตามธรรมชาติที่มีแคลเซียมฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบที่สำคัญและมีธาตุอื่นๆ ปนอยู่ในปริมาณแตกต่างกัน เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม เหล็ก และแมงกานีส เป็นต้น ปริมาณแมงกานีสที่สูงอาจส่งผลถึงการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)



รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดในตัวอย่างดินนครปฐม ภายหลังจากการปรับเสถียร

ส่วนการปรับปรุงด้วยโดแอมโมเนียมฟอสเฟตทำให้ความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากชุดควบคุม โดยเมื่อเพิ่มปริมาณจาก 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg มีความเข้มข้นแมงกานีสอยู่ในช่วง 3,063.07 - 3,074.27 mg/kg และจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแมงกานีสที่ปรับปรุงด้วยโดแอมโมเนียมฟอสเฟตแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

จากการปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg มีความเข้มข้นของแมงกานีสเท่ากับ $3,022.07 \pm 86.87$, $3,089.29 \pm 259.97$ และ $3,016.40 \pm 227.52$ mg/kg ตามลำดับ ซึ่งความเข้มข้นแมงกานีสสูงขึ้นเล็กน้อย อันเนื่องมาจากความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดที่อยู่ในปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตก่อนที่จะนำมาปรับปรุง (3.10 ± 0.28 mg/kg) ดังตารางที่ 4.3 และจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแมงกานีสที่ปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

จึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยหินฟอสเฟตจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแมงกานีสในดินเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่าดินนั้นจะได้รับผลกระทบจากการใช้หินฟอสเฟตในปริมาณที่ต่างกัน รวมทั้งยังเป็นการเพิ่มปริมาณการปนเปื้อนของ

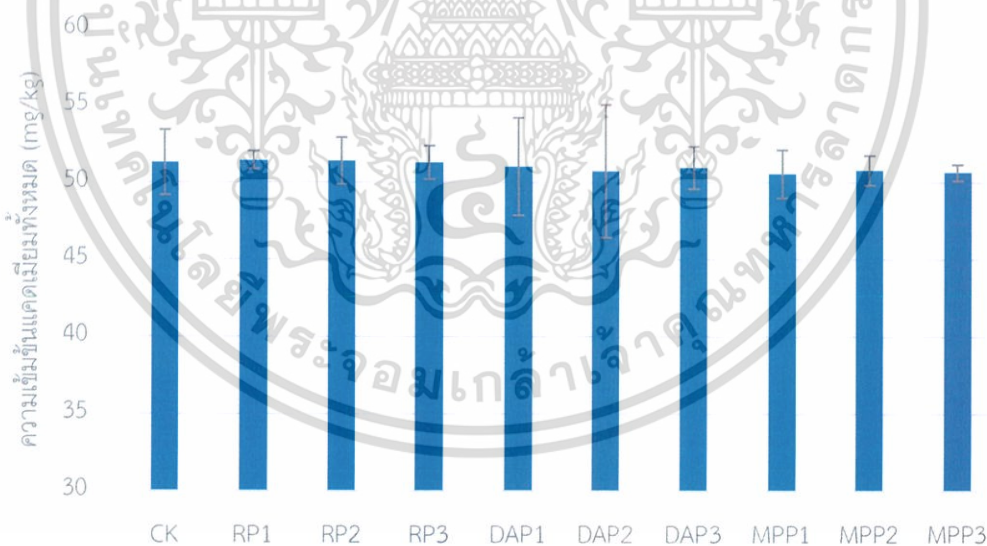
แมงกานีสในดินอีกด้วย ในขณะที่การปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตไม่ทำให้ปริมาณแมงกานีสทั้งหมดในดินเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

4.5 การศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดในดินระยอง

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมด ซึ่งได้แก่ แคดเมียม, ตะกั่ว และแมงกานีสในดินหลังจากการปรับปรุงดินด้วยหินฟอสเฟต (RP) ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP) ในตัวอย่างดินระยองที่ทำการปรับเสถียรเป็นระยะเวลา 1 เดือน ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.12

4.5.1 ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมด

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าในชุดควบคุมความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดในดินเท่ากับ 51.30 ± 2.14 mg/kg และทุกการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต ซึ่งได้แก่ หินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดในดินใกล้เคียงกัน โดยจะมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 50.58 - 51.46 mg/kg และจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าในแต่ละชุดการทดลองที่ปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตนั้น ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม กล่าวคือการปรับปรุงดินด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตนั้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดในดิน



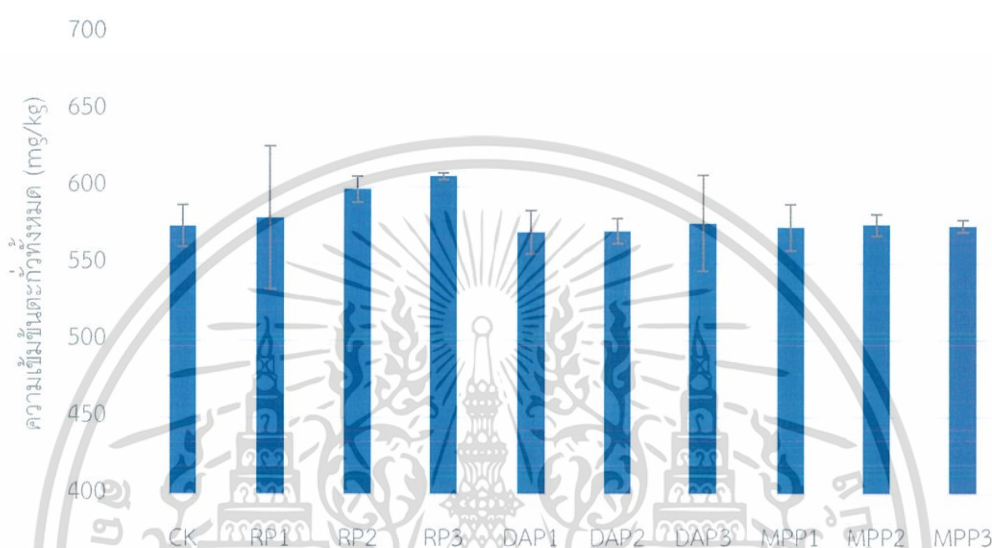
รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดในตัวอย่างดินระยอง หลังจากการปรับเสถียร

4.5.2 ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมด

ชุดควบคุมมีความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในดินเท่ากับ 574.69 ± 13.70 mg/kg ส่วนที่ปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต จะมีความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

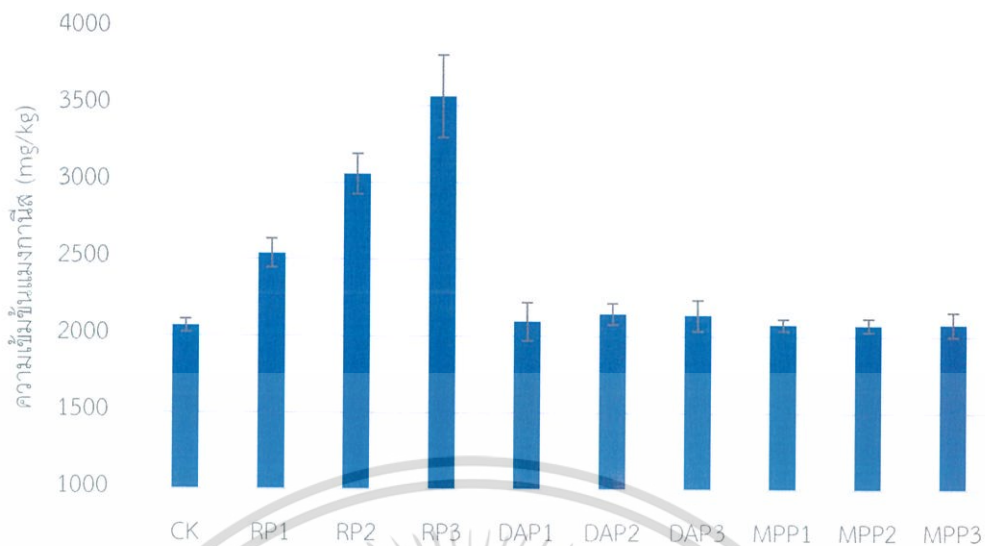
ของตะกั่วทั้งหมดอยู่ในช่วง 570.66 - 607.03 mg/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในทุกการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตนั้นแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม แสดงว่าการปรับปรุงดินที่ปนเปื้อนด้วยปุ๋ยฟอสเฟตทั้ง 3 ชนิดนั้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในดินหรืออาจจะกล่าวได้ว่าดินไม่ได้รับผลกระทบจากปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตที่ใช้



รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในตัวอย่างดินระยอง หลังจากการปรับเสถียร

4.5.3 ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมด

จากรูปที่ 4.12 ชุดควบคุมมีความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดเท่ากับ $2,066.58 \pm 43.39$ mg/kg แต่เมื่อทำการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตพบว่าความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามการเพิ่มปริมาณหินฟอสเฟตที่ปริมาณ 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg ซึ่งเท่ากับ $2,538.40 \pm 94.27$, $3,054.07 \pm 131.98$ และ $3,560.54 \pm 269.09$ mg/kg ตามลำดับ โดยจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า เมื่อเทียบกับชุดควบคุมการปรับปรุงดินด้วยหินฟอสเฟตมีผลต่อความเข้มข้นทั้งหมดของแมงกานีสในดินอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณแมงกานีสทั้งหมดที่พบในหินฟอสเฟตที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของสารปรับปรุงดิน (ตารางที่ 4.3) จึงทำให้เมื่อนำหินฟอสเฟตมาทำการปรับปรุงดินจะส่งผลถึงปริมาณแมงกานีสทั้งหมดในดินที่เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดในตัวอย่างดินระยอง ภายหลังจากการปรับเสถียร

ในการปรับปรุงด้วยโดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตนั้นมีความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดในดินมีค่าใกล้เคียงกับในชุดควบคุม ซึ่งมีค่าประมาณ 2,096.21 - 2,146.73 mg/kg และ 2,075.55 - 2,080.54 mg/kg ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดแตกต่างกันอย่างไม่นัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

จึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงดินที่ปนเปื้อนด้วยโดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตนั้นไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมด ในทางตรงกันข้ามการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตมีผลต่อความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดในดิน ซึ่งจะกล่าวได้ว่าดินจะได้รับผลกระทบจากการใช้หินฟอสเฟต

4.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดินนครปฐม

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส เพื่อจำแนกรูปฟอร์มของโลหะหนักทั้งก่อนและหลังการปรับเสถียรด้วยปุ๋ยฟอสเฟตทำการศึกษาตามลำดับขั้น 6 ขั้นตอน (Six-step sequential extraction) โดยอ้างอิงตามวิธีของ Tessier *et al.* (1979) ซึ่งโลหะหนักในดินสามารถแบ่งออกเป็น 6 รูปฟอร์มดังนี้

ส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ (Water soluble fraction, F1)

ส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction, F2) จะอยู่ในไอออนที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที สารสกัดที่ใช้จึงมีความรุนแรงน้อย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

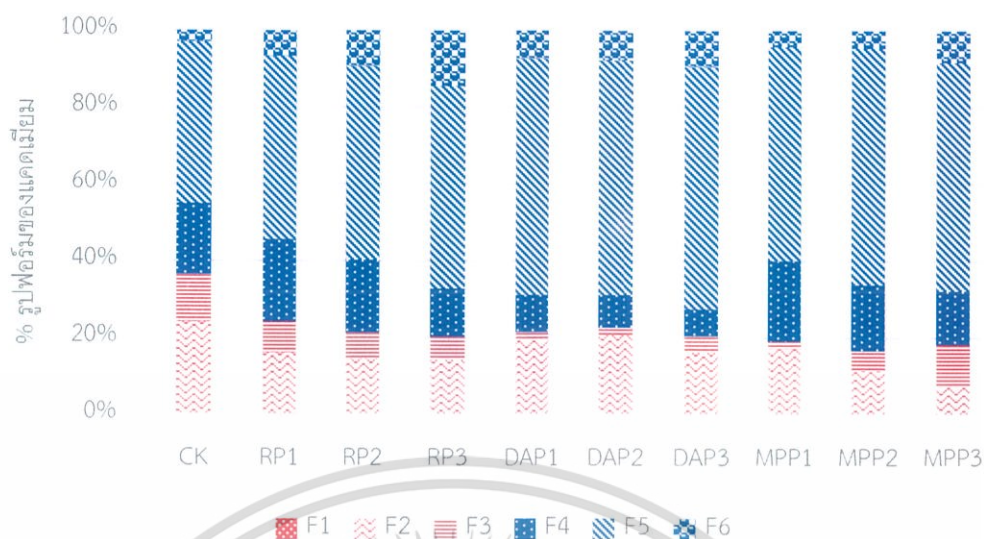
ส่วนที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic bound fraction, F5) สันนิษฐานได้ว่ามีลักษณะเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในดินเป็นเวลานานและเมื่อผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปหรือกระบวนการย่อยสลาย จะทำให้ธาตุเหล่านี้มีความเป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น

ส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ (Residual fraction, F6) เป็นรูปที่อยู่ในโครงสร้างของหินและแร่ที่สะสมอยู่ในดิน ความเป็นประโยชน์ในรูปนี้อยู่ในระดับต่ำมากและต้องใช้ระยะเวลาในการผุพังสลายตัว

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

4.6.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียม

จากรูปที่ 4.13 ภายหลังจากการปรับเสถียรด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมนอโพแทสเซียมฟอสเฟต จึงทำการวิเคราะห์รูปฟอร์มของแคดเมียมในดินด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น 6 ขั้นตอน



รูปที่ 4.13 ร้อยละรูปร่างของแคดเมียมในตัวอย่างดินนครปฐม ภายหลังจากการปรับเสถียร (F1 : รูปที่ละลายได้, F2 : รูปที่แลกเปลี่ยนได้, F3 : รูปที่จับอยู่กับคาร์บอนेट, F4 : รูปที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์, F5 : รูปที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน, F6 : รูปที่เหลือ)

จากรูปพบว่ารูปร่างของแคดเมียมในชุดควบคุม ส่วนใหญ่จะพบใน 3 รูปร่างหลัก ซึ่งพบมากที่สุดคือส่วนที่ 5 รูปร่างที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดินสูงถึงร้อยละ 42.14 ของรูปร่างแคดเมียมทั้งหมดในดิน รองมาคือส่วนที่ 2 รูปร่างที่แลกเปลี่ยนได้ และส่วนที่ 4 รูปร่างที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 24.01 และ 18.53 ของรูปร่างแคดเมียมทั้งหมด ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kabata-Pendias *et al.* (2000) ศึกษาถึงแคดเมียมส่วนใหญ่ในดินจะอยู่ในรูปร่างที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้และรูปร่างที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน และจากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดินนครปฐมมีสัดส่วนของดินเหนียว (Clay fraction) และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic matter) จัดอยู่ในเกณฑ์สูง ซึ่งดินเหนียวนั้นมีขนาดอนุภาคเล็ก ละเอียด รูปทรงแบน มีพื้นที่ผิวมาก มีประจุลบที่ผิวสูง (คณาจารย์ ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ส่งผลให้ตัวอย่างดินนครปฐมนั้นสามารถดูดซับแคดเมียมได้มาก เช่นเดียวกับอินทรีย์วัตถุซึ่งถือว่าเป็นตัวดูดซับปฐมภูมิในดิน (Primary sorbent) เพราะมีประจุลบเป็นชั้นๆ อยู่ที่ผิวของอนุภาคดิน ส่งผลให้อินทรีย์วัตถุนั้นสามารถดูดซับไอออนบวกอย่างแคดเมียมได้ดี ทำให้แคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินเกิดการชะละลายได้น้อยดังที่พบน้อยมากในส่วนที่ 1 คือรูปร่างที่ละลายได้ของชุดควบคุม

ในขณะที่หลังจากการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต พบ 3 รูปร่างหลักของแคดเมียมในดิน ได้แก่ ส่วนที่ 5 รูปร่างที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน ส่วนที่ 2 รูปร่างที่แลกเปลี่ยนได้ และส่วนที่ 4 รูปร่างที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ เช่นเดียวกับที่พบในชุดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ถึงความเสถียรของรูปฟอร์มแคดเมียม ในชุดควบคุมมีรูปฟอร์มแคดเมียมที่ไม่เสถียร (Non - stable form, F1-F3) และรูปฟอร์มที่เสถียร (Stable form, F4-F6) เท่ากับร้อยละ 36.42 และ 63.58 ของรูปฟอร์มแคดเมียมทั้งหมด ตามลำดับ ซึ่งมีทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Kashem *et al.* (2007) ศึกษาถึงรูปฟอร์มของแคดเมียมที่ไม่เสถียรจะมีประมาณร้อยละ 22-64 ของรูปฟอร์มแคดเมียมทั้งหมด จากรูปจะเห็นได้ชัดเมื่อทำการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตที่ 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg ทำให้รูปฟอร์มแคดเมียมที่ไม่เสถียรลดลง เหลือเพียงร้อยละ 23.73, 21.25 และ 20.22 ของรูปฟอร์มแคดเมียมทั้งหมด ตามลำดับ ในขณะที่การปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตมีรูปฟอร์มแคดเมียมที่ไม่เสถียรเท่ากับร้อยละ 21.42, 22.69 และ 20.55 ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกับการศึกษาของ McGowen *et al.* (2001) ซึ่งทำการปรับเสถียรโดยใช้ไดแอมโมเนียมฟอสเฟตปริมาณ 2,300 mgP/kg พบว่ามีประสิทธิภาพในการตรึงแคดเมียมและตะกั่วในดินเนื่องจากสามารถลดความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่วที่สกัดได้ โดยเกิดการตกตะกอนของโลหะฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้น้อยอย่างเช่น $Cd_3(PO_4)_2$ ที่สามารถควบคุมการละลายของแคดเมียมในดินที่ปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ส่วนการปรับปรุงด้วยด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีรูปฟอร์มแคดเมียมที่ไม่เสถียร คิดเป็นร้อยละ 19.07, 16.63 และ 18.23 ของรูปฟอร์มแคดเมียมทั้งหมดตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่ารูปฟอร์มแคดเมียมที่ไม่เสถียรจากการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตนั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม จึงสรุปได้ว่าสารปรับปรุงดินทั้ง 3 ชนิดมีผลต่อการลดลงของรูปฟอร์มแคดเมียมที่ไม่เสถียรภายหลังจากการปรับปรุง

ซึ่งการปรับปรุงที่ทำให้รูปฟอร์มแคดเมียมที่ไม่เสถียรนั้นน้อยที่สุด คือโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ 5,000, 7,500 และ 2,500 mgP/kg ซึ่งเท่ากับร้อยละ 16.63, 18.23 และ 19.07 ของรูปฟอร์มแคดเมียมทั้งหมด ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าการปรับปรุงที่ปริมาณ 5,000 mgP/kg แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปฟอร์มแคดเมียมที่ไม่เสถียร จึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ 5,000 mgP/kg ส่งผลทำให้ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ไม่เสถียรมีค่าน้อยและเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kede *et al.* (2014) ที่ศึกษาถึงการใช้ปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตสามารถลดความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนที่ไม่เสถียรมากที่สุดและยังเพิ่มรูปฟอร์มที่เสถียรอีกด้วย โดยที่กลไกของการตรึงโลหะหนักในดินหรือการเพิ่มรูปฟอร์มที่เสถียรโดยใช้สารประกอบฟอสเฟตจะประกอบด้วย 1) การดูดซับโลหะหนักโดยตรง 2) การที่สารประกอบฟอสเฟตเหนียวทำให้เกิดการดูดซับ 3) การตกตะกอนเป็นโลหะฟอสเฟต (Seshadri *et al.*, 2017)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเติมปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรึงแคดเมียมในดิน ซึ่งมีกลไกหลักคือ กลไกการตกตะกอนในรูปของโลหะฟอสเฟตที่มีความเสถียรและมีค่าการละลายต่ำ อันเนื่องมาจากปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นปุ๋ยที่สามารถละลายน้ำได้ง่าย

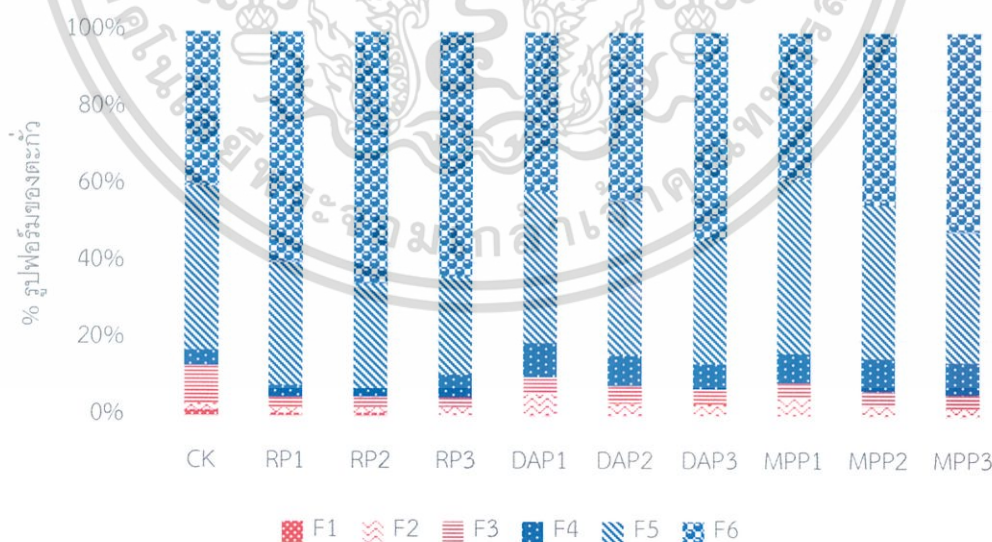


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อในดินมีน้ำหรือมีความชื้นปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตจะละลาย ดังสมการที่ 1 (Zhang *et al*, 2015) จากนั้นจะเกิดการตกตะกอนระหว่างแคดเมียมกับฟอสเฟตอยู่ในรูป $Cd_3(PO_4)_2$ อีกทั้งการปรับปรุงนั้นยังช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรดต่างในดิน โดยที่สูงที่สุดคือ 6.90 แต่ก็ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนของแคดเมียมไฮดรอกไซด์ $Cd(OH)_2$ ที่มีความสามารถในการละลายต่ำ ซึ่งการตกตะกอนนั้นจะเริ่มที่ช่วงความเป็นกรดต่าง 8.0-9.5 (Bolan *et al*, 2003) ในขณะที่ยังสามารถเกิดกลไกการดูดซับแคดเมียมจากการเหนี่ยวนำของสารประกอบฟอสเฟตได้อีกด้วย อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดต่างภายหลังจากการปรับปรุงซึ่งจะทำให้ประจุที่ผิวของดินเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อความสามารถในการตรึงโลหะหนักอย่างแคดเมียมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Adriano, 2001)

4.6.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่ว

จากรูปที่ 4.14 รูปฟอร์มของตะกั่วในชุดควบคุมพบมากที่สุดคือส่วนที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน รองมาคือส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลื่อ คิดเป็นร้อยละ 42.78 และ 40.03 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสิทธิชัย (2558) ศึกษาดินที่มีการปนเปื้อนจะพบตะกั่วอยู่ในรูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดินเป็นส่วนใหญ่และสูงถึงร้อยละ 40 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด จากรูปยังพบความเข้มข้นของตะกั่วที่น้อยที่สุดในส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ เพียงร้อยละ 1.64 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด ซึ่งมีทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Anjan *et al*. 2012 ศึกษาถึงความเข้มข้นของตะกั่วในรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้มีประมาณร้อยละ 0.02 - 7.5 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด อันเนื่องมาจากตะกั่วถือเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่เคลื่อนที่ได้น้อยมากในดิน ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่มีความเสถียร (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)



รูปที่ 4.14 ร้อยละรูปฟอร์มของตะกั่วในตัวอย่างดินนครปฐม ภายหลังจากการปรับเสถียร (F1 : รูปที่ละลายได้, F2 : รูปที่แลกเปลี่ยนได้, F3 : รูปที่จับอยู่กับคาร์บอน, F4 : รูปที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์, F5 : รูปที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน, F6 : รูปที่เหลื่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการปรับเสถียรด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต พบว่าในทุกการปรับปรุงความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ มีแนวโน้มสูงขึ้น โดยที่ตะกั่วที่อยู่ในรูปนี้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแร่ pyromorphite ซึ่งถือว่าเป็นรูปฟอร์มที่เสถียรที่สุด เนื่องจากการเกิดพันธะที่แข็งแรงในโครงผลึกของแร่ (Fuentes *et al*, 2008)

จากการวิเคราะห์ถึงความเสถียรของรูปฟอร์มตะกั่ว ในชุดควบคุมมีรูปฟอร์มของตะกั่วที่ไม่เสถียรร้อยละ 13.18 ส่วนรูปฟอร์มที่เสถียรเท่ากับร้อยละ 86.82 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kashem *et al*. 2007 ทำการศึกษารูปฟอร์มของตะกั่วในดินที่ไม่เสถียรมีประมาณร้อยละ 2-23 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด ในขณะที่ทำการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตมีรูปฟอร์มตะกั่วที่ไม่เสถียรร้อยละ 4.83-5.08 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด ส่วนการปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต คิดเป็นร้อยละ 7.27-10.26 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด และการปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ซึ่งเท่ากับร้อยละ 5.78-8.90 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด โดยจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า การปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตทั้ง 3 ชนิดมีผลต่อรูปฟอร์มของตะกั่วที่ไม่เสถียรอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม กล่าวคือสารปรับปรุงดินทั้ง 3 ชนิดมีผลต่อการลดลงของรูปฟอร์มตะกั่วที่ไม่เสถียร

ในขณะที่สารปรับปรุงที่ทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วในรูปที่ไม่เสถียรมีค่าน้อยที่สุด คือหินฟอสเฟต และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า การใช้หินฟอสเฟตที่ปริมาณ 7,500 mgP/kg มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อความเข้มข้นของตะกั่วในรูปที่ไม่เสถียร จึงเลือกใช้หินฟอสเฟตที่ 7,500 mgP/kg ซึ่งเหมาะสมต่อการปรับเสถียรตะกั่วโดยสามารถลดการเคลื่อนที่ของตะกั่วในดินนครปฐมได้ดี เนื่องจากหินฟอสเฟตถือเป็นปุ๋ยฟอสเฟตชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการละลายต่ำ ($K_{sp} 10^{-57.0}$) (Knox *et al*, 2006) และมีส่วนประกอบของแร่อะพาไทต์ (apatite) เป็นส่วนสำคัญ (Fayiga *et al*, 2006) ซึ่งหลักๆ จะประกอบไปด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) (Birnith *et al*, 2001) โดยกลไกหลักในการตรึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน คือการตกตะกอนในรูปตะกั่วฟอสเฟตและการดูดซับหรือการแลกเปลี่ยนไอออน (Selim *et al*, 2015)

กลไกการตกตะกอนจะเกิดขึ้นโดยที่ตะกั่วจะถูกตรึงอยู่ในรูปแร่ pyromorphite ($Pb_5(PO_4)_3X$) เมื่อ $X=F, Cl, Br, OH$ ซึ่งมีค่าการละลายต่ำ เท่ากับ $10^{-71.6}$, $10^{-84.4}$, $10^{-78.1}$ และ $10^{-76.8}$ ตามลำดับ (Miretzky *et al*, 2008) และโดยส่วนใหญ่แล้วตะกั่วจะถูกตรึงให้อยู่ในรูป hydroxypyromorphite ซึ่งเริ่มต้นจากการละลายของ hydroxyapatite ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) และตามด้วยการตกตะกอนเป็น hydroxypyromorphite ($Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) (Ma *et al*, 1993) ดังแสดงในสมการที่ 2 และ 3



ในขณะเดียวกันจะเกิดกลไกการดูดซับหรือการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักกับหินฟอสเฟต ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Ca^{2+} ในหินฟอสเฟตกับไอออนของ Pb^{2+} ในสารละลายดิน ดังสมการที่ 4

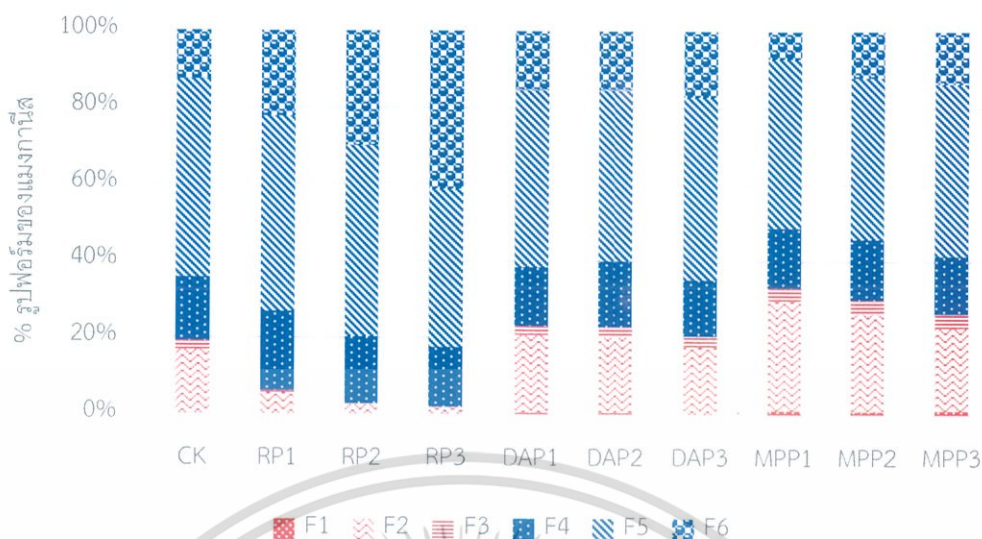
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(Takeuchi and Arai, 1990) ซึ่งในโครงสร้างของหินฟอสเฟตนั้นมีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากแคลเซียมไอออนในโครงสร้างสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ง่ายกับไอออนอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง divalent ions เช่น Pb, Cd, และ Mn เป็นต้น (Zeng *et al*, 2017) โดยที่ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากรัศมีไอออนของ Pb^{2+} (120 pm) ที่ใกล้เคียงกับรัศมีไอออนของ Ca^{2+} (อยู่ในช่วง 90-130 pm) ซึ่ง LeGeros and LeGeros (1984) ได้อธิบายไว้ว่าไอออนบวกที่มีรัศมีไอออนใกล้เคียงกับรัศมีไอออนของ Ca^{2+} จะมีโอกาสรวมอยู่ในโครงสร้างของหินฟอสเฟตมากกว่า ไอออนที่มีรัศมีไอออนขนาดใหญ่ ดังนั้นตะกั่วมีความเป็นไปได้สูงที่จะถูกรวมเข้าไปในโครงสร้างของหินฟอสเฟตโดยการแทนที่ isomorphic อาจกล่าวได้ว่าตะกั่วสามารถแทนที่แคลเซียมในโครงสร้างของ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ และตรึงอยู่ในรูปของ $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (Miretzky *et al*, 2008) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหินฟอสเฟตไม่เพียงแต่สามารถให้ฟอสเฟตเพื่อตกตะกอนเป็นตะกั่วฟอสเฟต แต่ยังให้ Ca^{2+} เพื่อแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งมีความสำคัญในการปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว (Ma *et al*, 1993)

4.6.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีส

จากรูปที่ 4.15 ในชุดควบคุมมีรูปฟอร์มของแมงกานีส 3 รูปฟอร์มที่พบมาก ได้แก่ ส่วนที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน รองมาคือส่วนที่ 4 รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ และส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งเป็นร้อยละ 51.67, 16.63 และ 16.48 ของรูปฟอร์มแมงกานีสทั้งหมด ตามลำดับ หลังจากการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ความเข้มข้นของแมงกานีสในส่วนที่ 6 เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนซึ่งถือว่าเป็นแนวโน้มที่ดีของการปรับเสถียร เนื่องจากส่วนที่ 6 นั้นเป็นรูปฟอร์มที่มีความเสถียรสูงสุดในขณะที่การปรับปรุงด้วยไคเอมโมเนียมฟอสเฟต โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีความเข้มข้นของแมงกานีสส่วนใหญ่ในส่วนที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดินเช่นเดียวกับชุดควบคุม



รูปที่ 4.15 ร้อยละรูปฟอร์มของแมงกานีสในตัวอย่างดินนครปฐม ภายหลังจากการปรับเสถียร (F1 : รูปที่ละลายได้, F2 : รูปที่แลกเปลี่ยนได้, F3 : รูปที่จับอยู่กับคาร์บอนेट, F4 : รูปที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์, F5 : รูปที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน, F6 : รูปที่เหลือน)

จากการวิเคราะห์ถึงความเสถียรของรูปฟอร์มแมงกานีส ในชุดควบคุมมีรูปฟอร์มของแมงกานีสที่ไม่เสถียรและเสถียร คิดเป็นร้อยละ 18.99 และ 81.01 ของรูปฟอร์มแมงกานีสทั้งหมด ตามลำดับ เมื่อทำการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตพบว่า มีรูปฟอร์มของแมงกานีสที่ไม่เสถียรลดลงอย่างชัดเจนเหลือเพียงร้อยละ 1.86-6.06 ของรูปฟอร์มแมงกานีสทั้งหมด แต่ในทางตรงกันข้ามการปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตกลับทำให้รูปฟอร์มที่ไม่เสถียรของแมงกานีสเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 18.99 (ชุดควบคุม) เป็นร้อยละ 20.54-22.98 ของรูปฟอร์มแมงกานีสทั้งหมด และเป็นไปในแนวทางเดียวกับการปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตซึ่งก็ส่งผลให้รูปฟอร์มของแมงกานีสที่ไม่เสถียรเพิ่มขึ้นเช่นกัน หรือคิดเป็นร้อยละ 26.40-33.21 ของรูปฟอร์มแมงกานีสทั้งหมด จึงไม่เป็นผลดีต่อการปรับเสถียรแมงกานีสที่ปนเปื้อนในดิน เนื่องจากจะยิ่งเป็นการเพิ่มการแพร่กระจายของแมงกานีสสู่ตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ต่อไป ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าปุ๋ยฟอสเฟตทั้ง 3 ชนิดมีผลต่อรูปฟอร์มของแมงกานีสที่ไม่เสถียรอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่การปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตนั้นทำให้รูปฟอร์มที่ไม่เสถียรของแมงกานีสน้อยที่สุดและจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าการใช้ปริมาณของหินฟอสเฟตที่ 5,000 และ 7,500 mgP/kg แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ จึงถือว่าหินฟอสเฟตที่ 5,000 mgP/kg เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการตรึงแมงกานีสที่ปนเปื้อนในดินและใช้หินฟอสเฟตในปริมาณน้อยอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Seaman *et al.* (2001) ศึกษาถึงการเติมหินฟอสเฟตนั้นมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของแมงกานีสในรูปฟอร์มที่ไม่เสถียรซึ่งทำการวิเคราะห์ผลจากการสกัดลำดับชั้น โดยรูปแบบของการปรับเสถียรแมงกานีสสามารถอธิบายได้จากกลไกการตกตะกอนและกลไกการดูดซับหรือการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นหลัก ซึ่งการศึกษาของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Suzuki *et al.* (1982) ยังสนับสนุนถึงกลไกของการปรับเสถียรแมงกานีสนั้นไม่เพียงแต่จะมีผลของการตกตะกอนเท่านั้น แต่ยังมีปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนบวกของโลหะหนักในสารละลายดินกับไอออนของ Ca^{2+} ในหินฟอสเฟต ซึ่งปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักกับหินฟอสเฟต แสดงดังสมการที่ 5



(Zeng *et al.*, 2017) เมื่อ M คือไอออนของโลหะหนัก (Mn^{2+})

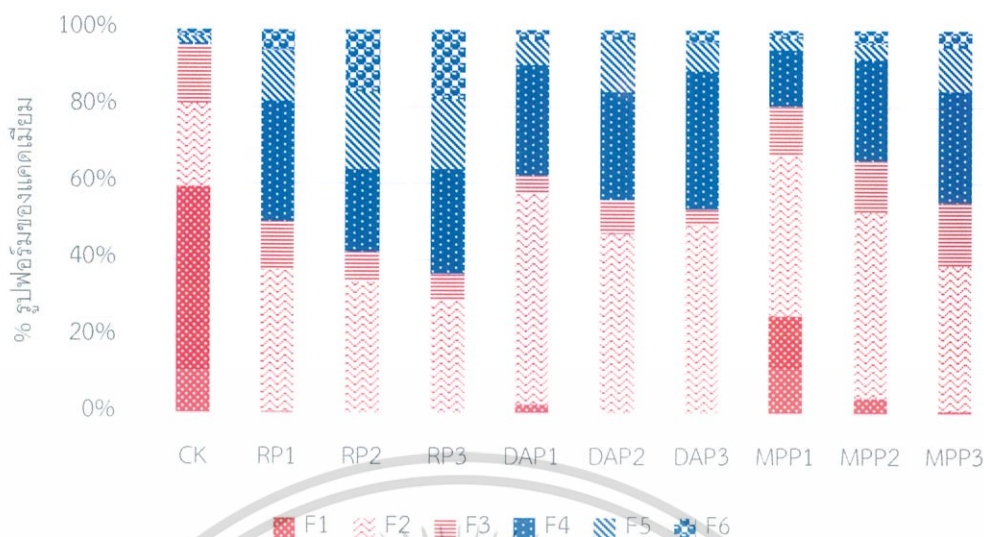
ด้วยเหตุที่รัศมีไอออนของแมงกานีส (70 pm) มีขนาดเล็ก จึงสามารถแทนที่ Ca^{2+} ในโครงสร้างของหินฟอสเฟตได้เป็นอย่างดี ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแมงกานีสที่ปนเปื้อนในดิน ซึ่งการที่หินฟอสเฟตนั้นมีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับเสถียรแมงกานีสในดินนั้น อาจเนื่องมาจากการใช้ปริมาณของหินฟอสเฟตที่สูง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้อาจเกิดมาจากความเสถียรของแมงกานีสในตัวอย่างหินฟอสเฟตเอง

4.7 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดินระยอง

จากการปรับเสถียรแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสที่ปนเปื้อนในตัวอย่างดินระยอง โดยใช้หินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg ซึ่งใช้ระยะเวลาในการปรับเสถียร 1 เดือน เมื่อครบกำหนดทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน

4.7.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียม

จากรูปที่ 4.16 ในชุดควบคุมมีรูปฟอร์มของแคดเมียมในดินที่พบสูงสุดคือส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ สูงถึงร้อยละ 59.15 ของรูปฟอร์มแคดเมียมทั้งหมด รองลงมาคือส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ และส่วนที่ 3 รูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอเนต ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 21.76 และ 15.09 ของรูปฟอร์มแคดเมียมทั้งหมด ตามลำดับ โดยมีทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Chen *et al.* 2007 ทำการศึกษาดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมและยังไม่มีมีการปรับปรุงด้วยสารประกอบฟอสเฟต แคดเมียมส่วนใหญ่จะอยู่ในส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้และส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ และตามด้วยส่วนที่ 3, 4, 5 และ 6 หรือรูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอเนต, รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์, รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน และรูปฟอร์มที่เหลือ ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ร้อยละรูปฟอร์มของแคตเมียมในตัวอย่างดินระยอง ภายหลังจากการปรับเสถียร (F1 : รูปที่ละลายได้, F2 : รูปที่แตกเปลี่ยนได้, F3 : รูปที่จับอยู่กับคาร์บอนेट, F4 : รูปที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์, F5 : รูปที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน, F6 : รูปที่เหลือ)

ในการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตส่วนใหญ่จะพบรูปฟอร์มของแคตเมียมในดิน คือส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แตกเปลี่ยนได้ และส่วนที่พบน้อยที่สุด คือส่วนที่ 1 รูปที่ละลายได้ หรือคิดเป็นร้อยละ 0 - 0.47 ของรูปฟอร์มแคตเมียมทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mignardi *et al.* (2012) ศึกษาการปรับปรุงดินที่ปนเปื้อนแคตเมียมด้วยหินฟอสเฟตซึ่งสามารถลดความเข้มข้นของแคตเมียมที่ละลายน้ำได้ถึงร้อยละ 92-99 ของแคตเมียมทั้งหมดในดิน และจากรูปที่ 4.16 จะสังเกตถึงการเพิ่มขึ้นของแคตเมียมในส่วนที่ 5 และ 6 (รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดินและรูปฟอร์มที่เหลือ) ซึ่งมีทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Huang *et al.* (2016) ศึกษาถึงภายหลังจากการเติมหินฟอสเฟตจะทำให้ความเข้มข้นของแคตเมียมในส่วนที่ 6 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ส่วนที่ 5 ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ความเข้มข้นของแคตเมียมในส่วนที่ 3 (รูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอนेट) ลดลง สิ่งเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าแคตเมียมส่วนใหญ่เปลี่ยนฟอร์มจากรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายไปสู่รูปที่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น

สำหรับการปรับปรุงด้วยโดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ส่วนใหญ่จะพบรูปฟอร์มของแคตเมียมในดินคือ ส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แตกเปลี่ยนได้ รองลงมาคือส่วนที่ 4 รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมภายหลังจากการปรับปรุงแคตเมียมในส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ลดลงอย่างมาก จากร้อยละ 59.15 (ชุดควบคุม) ลดลงเหลือร้อยละ 0-2.32 และ 0.81-25.40 ของรูปฟอร์มแคตเมียมทั้งหมดที่ปรับปรุงด้วยโดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของแคตเมียมในส่วนที่ 4, 5 และ 6 (รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์, รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับอินทรีย์วัตถุในดิน และรูปฟอร์มที่ละลาย) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทั้ง 2 ชนิดของสารปรับปรุง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yan *et al.* (2015) ศึกษาการใช้ไดแอมโมเนียมฟอสเฟตในการปรับเสถียรแคดเมียมในดินที่มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินทราย พบว่าไดแอมโมเนียมฟอสเฟตมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปฟอร์มแคดเมียมจากรูปฟอร์มที่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายไปสู่รูปฟอร์มที่เสถียรมากขึ้น

จากการวิเคราะห์ความเสถียรของรูปฟอร์ม ในชุดควบคุมแคดเมียมเกือบทั้งหมดจะอยู่ในรูปฟอร์มที่ไม่เสถียรสูงถึงร้อยละ 96 ของรูปฟอร์มแคดเมียมทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sungur *et al.* (2014) ทำการศึกษาแคดเมียมในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปฟอร์มที่สามารถเคลื่อนที่ได้ และสูงกว่ารูปฟอร์มที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้

รูปฟอร์มของแคดเมียมที่ไม่เสถียรหลังจากปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเท่ากับร้อยละ 36.36 - 50.04, 52.83 - 62.07 และ 55.13 - 80.18 ของรูปฟอร์มแคดเมียมทั้งหมด ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า สารปรับปรุงดินทั้ง 3 ชนิดมีผลต่อรูปฟอร์มของแคดเมียมที่ไม่เสถียรอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งสารปรับปรุงดินที่ทำให้มีร้อยละรูปฟอร์มของแคดเมียมที่ไม่เสถียรน้อยที่สุด คือ หินฟอสเฟตที่ปริมาณ 7,500, 5,000 และ 2,500 mgP/kg โดยคิดเป็นร้อยละ 36.36, 41.87 และ 50.04 ของรูปฟอร์มแคดเมียมทั้งหมด ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบหินฟอสเฟตที่ปริมาณ 7,500 และ 5,000 mgP/kg กับร้อยละรูปฟอร์มของแคดเมียมที่ไม่เสถียร พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าการปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมโดยใช้หินฟอสเฟตที่ 5,000 mgP/kg เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมได้

โดยที่การปรับเสถียรของแคดเมียมในดินจะถูกควบคุมโดยกลไกหลัก คือการตกตะกอนและการดูดซับหรือการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งกลไกของการตกตะกอนของแคดเมียมกับหินฟอสเฟต แสดงดังสมการที่ 6 และ 7 (Xu *et al.*, 1994) เกิดเป็นสารประกอบที่มีความเสถียรมากขึ้น



กลไกการดูดซับหรือการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น จะเกิดขึ้นจากการแทนที่ Ca^{2+} ในโครงสร้างของหินฟอสเฟต ซึ่งถือว่าเป็นอีกกลไกที่มีความสำคัญในการอธิบายถึงความเสถียรของแคดเมียม ดังแสดงในสมการที่ 8 ซึ่งรัศมีไอออนของ Cd^{2+} (100 pm) ในสารละลายดิน ใกล้เคียงกับรัศมีไอออนของ Ca^{2+} (90-130 pm) จึงมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนกับ Ca^{2+} ในโครงสร้างของหินฟอสเฟตได้ เกิดเป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรมากขึ้น

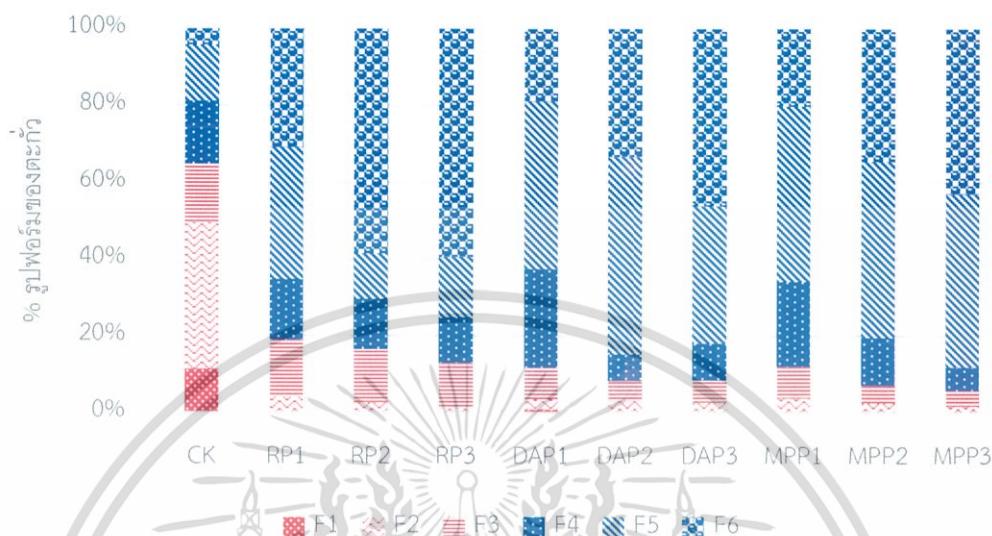


4.7.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่ว

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า ในชุดควบคุมพบรูปฟอร์มของตะกั่ว 3 รูปฟอร์มหลัก ได้แก่ ส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ พบสูงที่สุดถึงร้อยละ 49.36 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด รองมาเป็นส่วนที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ และส่วนที่ 3 รูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 16.41 และ 15.18 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ร้อยละรูปฟอร์มของตะกั่วในตัวอย่างดินระยอง หลังจากการปรับเสถียร (F1 : รูปที่ละลายได้, F2 : รูปที่แลกเปลี่ยนได้, F3 : รูปที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต, F4 : รูปที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์, F5 : รูปที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน, F6 : รูปที่เหลือ)

สำหรับการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตมีรูปฟอร์มของตะกั่วในส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือเป็นส่วนใหญ่ และพบรูปฟอร์มของตะกั่วในส่วนของ 1 และ 2 เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang *et al.* (2016) ศึกษาการปรับเสถียรด้วยหินฟอสเฟต ส่งผลทำให้รูปฟอร์มของตะกั่วในส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ และส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงจนกระทั่งไม่สามารถพบได้ ในขณะที่ส่วนที่ 6 (รูปฟอร์มที่เหลือ) เพิ่มขึ้นอย่างมาก

ส่วนการปรับปรุงด้วยโดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต จะมีรูปฟอร์มของตะกั่วส่วนใหญ่อยู่ในส่วนที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน และส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ส่วนรูปฟอร์มของตะกั่วในส่วนที่ 1, 2 และ 3 นั้นมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lambert *et al.* (1997) ศึกษาการใช้สารปรับปรุงโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตกับดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ส่งผลทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (จาก 7,807 เป็น 19,821 mg/kg)

จากการวิเคราะห์ความเสถียรของรูปฟอร์มตะกั่วในดิน พบว่ารูปฟอร์มของตะกั่วที่ไม่เสถียรในชุดควบคุมมีถึงร้อยละ 64.78 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2015) ทำการศึกษาดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว (CEC = 11.9 meq/kg) และยังไม่มีการเติมสารปรับปรุงฟอสเฟต จะพบรูปฟอร์มของตะกั่วอยู่ในรูปที่ไม่เสถียรคิดเป็นร้อยละ 49 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด ซึ่งต่ำกว่าที่พบใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินระยอง (CEC = 2.8 meq/100g) อันเนื่องมาจากเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าดินที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกต่ำ จะส่งผลทำให้โลหะหนักละลายออกมาได้มากกว่าดินที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงเมื่อทำการสกัด (Irshad *et al*, 2014) จึงไม่แปลกที่ดินระยองจะมีร้อยละของตะกั่วในส่วนที่ไม่เสถียรมากกว่า เนื่องจากมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกต่ำกว่านั่นเอง และเมื่อทำการปรับเสถียรด้วยหินฟอสเฟต ไคแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ทำให้รูปฟอร์มของตะกั่วที่ไม่เสถียรลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยคิดเป็นร้อยละ 12.94-18.90, 8.22-11.68 และ 5.77-12.05 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมดตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟตทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละรูปฟอร์มของตะกั่วที่ไม่เสถียรเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

โดยเราจะพบว่า สารปรับปรุงที่ทำให้รูปฟอร์มของตะกั่วที่ไม่เสถียรลดลงมากที่สุดคือ โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ 5,000 และ 7,500 mgP/kg ซึ่งเหลือเพียงร้อยละ 7.03 และ 5.77 ของรูปฟอร์มตะกั่วทั้งหมด ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าการใช้โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ 5,000 mgP/kg เหมาะสมที่สุดในการตรึงตะกั่วในดิน หรือสามารถกล่าวได้ว่ามีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของตะกั่วในดิน

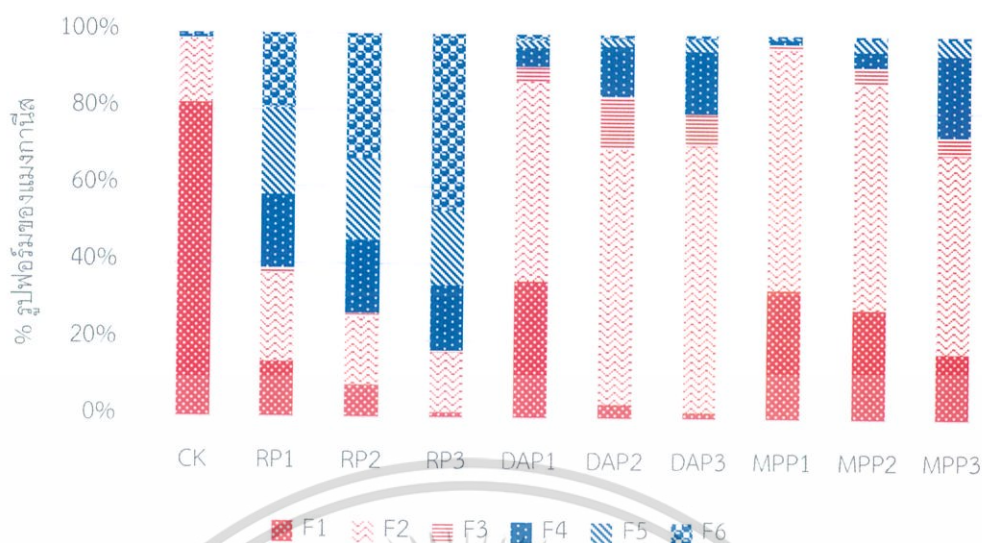
ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาการตรึงตะกั่วในดินโดยใช้โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตนั้น กลไกหลักคือการตกตะกอนของโลหะฟอสเฟต ตะกั่วจะเกิดการตกตะกอนกับฟอสเฟตเกิดเป็นแร่ pyromorphite $[(Pb_5(PO_4)_3)Cl]$ ที่มีความเสถียรสูง โดยจะเริ่มจากการละลายของโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตดังสมการที่ 9 และเกิดการตกตะกอนดังสมการที่ 10



ซึ่งถือว่ามีส่วนสำคัญในการตรึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน (Zhang *et al*, 2015)

4.7.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีส

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า ชุดควบคุมมีรูปฟอร์มของแมงกานีสสูงที่สุดในส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ ซึ่งสูงถึงร้อยละ 81.76 ของรูปฟอร์มแมงกานีสทั้งหมด รองมาคือส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ คิดเป็นร้อยละ 16.65 ของรูปฟอร์มแมงกานีสทั้งหมด



รูปที่ 4.18 ร้อยละรูปฟอร์มของแมงกานีสในตัวอย่างดินระยอง ภายหลังจากการปรับเสถียร (F1 : รูปที่ละลายได้, F2 : รูปที่แลกเปลี่ยนได้, F3 : รูปที่จับอยู่กับคาร์บอนेट, F4 : รูปที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์, F5 : รูปที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน, F6 : รูปที่เหลือ)

เมื่อทำการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตจะพบรูปฟอร์มของแมงกานีสส่วนใหญ่คือส่วนที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือนี้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นชัดเจน ซึ่งแทบจะไม่พบรูปฟอร์มนี้ในชุดควบคุม ในขณะที่ส่วนที่ 4 และ 5 ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในทางกลับกันความเข้มข้นของแมงกานีสในส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายได้ มีแนวโน้มลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

เมื่อเทียบกับชุดควบคุมการปรับปรุงด้วยโดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของแมงกานีสในส่วนที่ 1 ลดลง เหลือเพียงร้อยละ 1.80-35.77 และ 17.45-33.82 ของรูปฟอร์มแมงกานีสทั้งหมด ตามลำดับ และส่วนใหญ่จะพบรูปฟอร์มของแมงกานีสในดินอยู่ในส่วนที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งสูงถึงร้อยละ 52.10-69.26 และ 51.62-62.45 ของรูปฟอร์มแมงกานีสทั้งหมด ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ความเสถียรของรูปฟอร์มแมงกานีสในดิน โดยรูปฟอร์มของแมงกานีสเกือบทั้งหมดในชุดควบคุมเป็นรูปฟอร์มที่ไม่เสถียร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 98.67 ของรูปฟอร์มแมงกานีสทั้งหมด ในการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต โดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ร้อยละรูปฟอร์มที่ไม่เสถียรของแมงกานีสมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเท่ากับ 17.43-38.81, 79.37-91.53 และ 73.75-97.78 ของรูปฟอร์มแมงกานีสทั้งหมด ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต การปรับปรุงด้วยโดแอมโมเนียมฟอสเฟตที่ 5,000 และ 7,500 mgP/kg และการปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ 7,500 mgP/kg มีผลต่อรูปฟอร์มของแมงกานีสที่ไม่เสถียรอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่หินฟอสเฟตนั้นส่งผลทำให้ร้อยละรูปฟอร์มของแมงกานีสที่ไม่เสถียรลดลงมากที่สุด และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าหินฟอสเฟตที่ปริมาณ 7,500 mgP/kg มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปฟอร์มที่ไม่เสถียรของแมงกานีส จึงสรุปได้ว่าการปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนแมงกานีสโดยใช้หินฟอสเฟตที่ปริมาณ 7,500 mgP/kg มีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแมงกานีสที่ปนเปื้อนในตัวอย่างดินระยอง โดยจะเกิดกลไกการตกตะกอนและกลไกการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีสในตัวอย่างดินนครปฐม (หัวข้อ 4.6.3)

ซึ่งจากการวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสในตัวอย่างดินนครปฐมและตัวอย่างดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต พบว่าส่วนใหญ่มีการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดินจากส่วนที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายน้ำได้ไปยังส่วนที่ 5 รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน อันเนื่องมาจากการละลายและแตกตัวของหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตภายหลังจากการปรับเสถียร จะส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรดต่างในดินเพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าความเป็นกรดต่างในดินเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ความสามารถในการละลายของโลหะหนักนั้นลดลง จึงพบร้อยละของรูปฟอร์มโลหะหนักในส่วนที่ 1 รูปที่ละลายน้ำได้น้อยลงภายหลังจากการปรับเสถียร และเนื่องจากการละลายและแตกตัวของปุ๋ยฟอสเฟต จะมีการปลดปล่อยแคดไอออน อย่างเช่น K^+ , NH_4^+ และ Ca^{2+} เป็นต้น ซึ่งถือว่าเป็น Polyvalent cation โดยที่ Polyvalent cation ถือเป็นตัวยึดเกาะระหว่างสารอิวมิกซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของอินทรีย์วัตถุในดินกับอนุภาคดิน เกิดการยึดเกาะได้ดีขึ้นทำให้ระบบดินมีความแข็งแรงมากขึ้นส่งผลต่อรูปฟอร์มของโลหะหนักในส่วนที่ 5 รูปที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

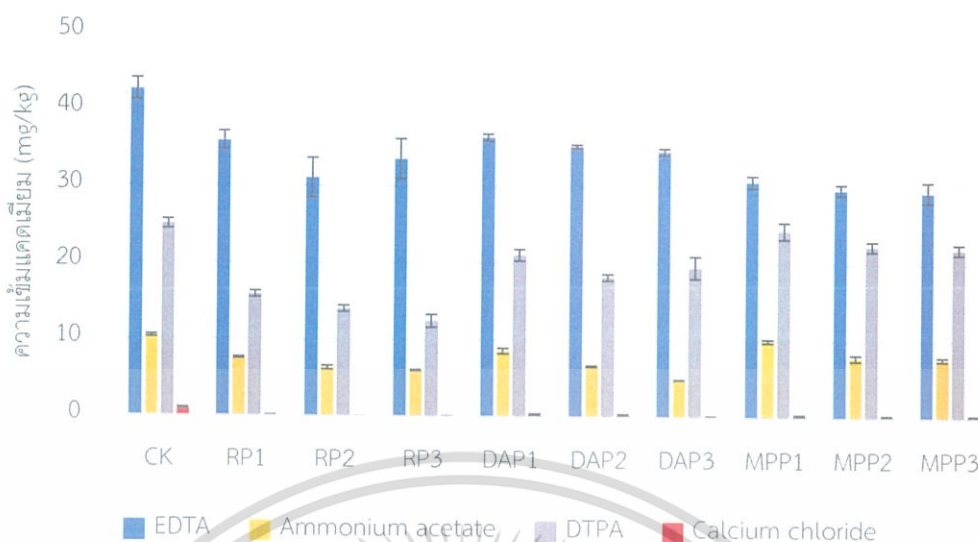
โดยรวมจะเห็นได้ว่าหินฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตนั้น มีความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสที่ปนเปื้อนในดินนครปฐมและระยองเป็นอย่างดี ซึ่งสามารถสรุปกลไกหลักในการปรับเสถียรได้ดังนี้ การปรับเสถียรโลหะหนักด้วยหินฟอสเฟต มีกลไกหลักๆ คือการตกตะกอนระหว่างโลหะหนักกับฟอสเฟต และกลไกการดูดซับหรือการแลกเปลี่ยนไอออน ระหว่างไอออนของโลหะหนักกับไอออนของแคลเซียมในโครงสร้างของหินฟอสเฟต ส่วนการปรับเสถียรโลหะหนักด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ซึ่งมีกลไกหลักคือการตกตะกอนของโลหะหนักกับฟอสเฟต อย่างไรก็ตามการใช้หินฟอสเฟตในการปรับเสถียรโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน อาจช่วยลดความเสี่ยงของการเกิด Eutrophication จากการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตที่มีความสามารถในการละลายสูงอย่างโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (Hettiarachchi *et al*, 2001) เนื่องจากปริมาณส่วนเกินของสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้จะทำให้เกิด Eutrophication ในแหล่งน้ำได้ (Seshadri *et al*, 2017)

จากการสังเกตจะเห็นได้ว่า ตัวอย่างดินระยองมีรูปฟอร์มของโลหะหนักในส่วนที่ไม่เสถียรสูงกว่าตัวอย่างดินนครปฐม อันเนื่องมาจากปัจจัยด้านคุณสมบัติดิน เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง ลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อดิน และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่มีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน โดยโลหะหนักจะเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าความเป็นกรดต่างต่ำ ลักษณะเนื้อดินหยาบ และปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของดินระยองทั้งสิ้น ตรงกันข้ามกับดินนครปฐมที่มีค่าความเป็นกรดต่างเป็นกลาง ลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียวซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็ก ประจุลบที่ผิวสูง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าดินเนื้อหยาบ อีกทั้งปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินสูง ซึ่งส่วนใหญ่สารอินทรีย์จะอยู่ในรูปที่มีประจุจึงสามารถดูดซับโลหะหนักได้เป็นอย่างดี จึงทำให้โลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินนครปฐมอยู่ในรูปที่เสถียรมากกว่าดินระยอง

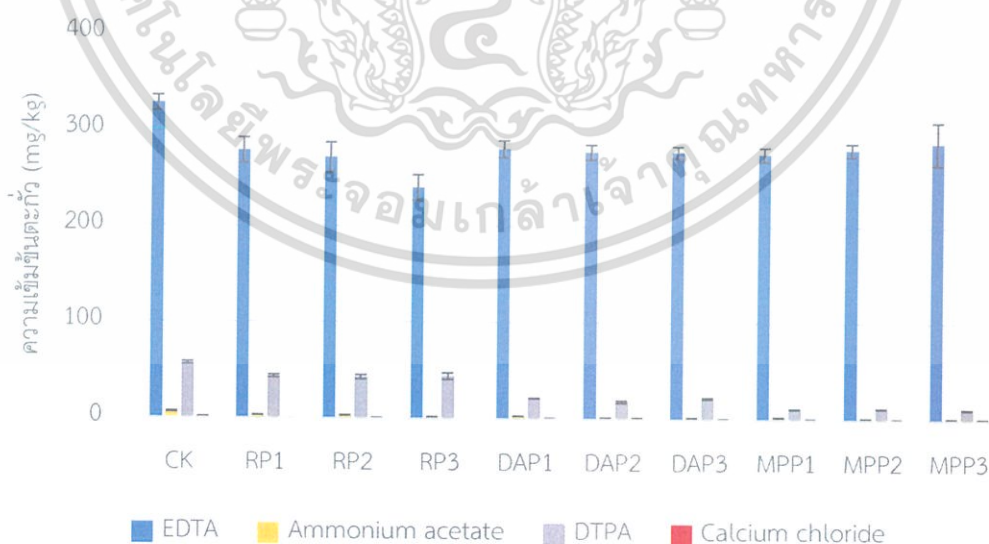
4.8 การศึกษาศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพของโลหะหนัก

เนื่องจากกระบวนการปรับเสถียรโลหะหนักในดินเป็นกลไกที่มีความซับซ้อนและเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ารูปร่างของโลหะหนักในดินไม่ได้มีความสัมพันธ์กับ organisms ในลักษณะเดียวกัน จึงมีการคำนึงถึงศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพเพื่อการประเมินมลพิษในดิน (Manouchehri et al., 2014) ในการศึกษาจึงใช้วิธีการสกัดแบบ single step extraction เพื่อใช้ประเมินผลด้านสิ่งแวดล้อมของการปรับเสถียรในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส ด้วยหินฟอสเฟต ไคโอแมมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ระยะเวลาในการปรับเสถียร 1 เดือน โดยสารสกัดที่ใช้ ได้แก่ 0.05 M Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), 0.005 M Diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA), 0.01 M Calcium chloride (CaCl_2) และ 1 M Ammonium acetate (NH_4OAc) ซึ่งสารละลายที่ใช้ในการสกัดแต่ละชนิดจะใช้ในการประเมินศักยภาพของโลหะหนักในดินกับการเข้าสู่ชีวภาพในด้านที่ต่างกันดังนี้ สารละลาย 0.05 M EDTA ใช้เพื่อประเมินศักยภาพในการเคลื่อนที่ (mobility), สารละลาย 1 M NH_4OAc เพื่อประเมินศักยภาพในการแลกเปลี่ยน (exchangeability), และสารละลาย 0.005 M DTPA, 0.01 M CaCl_2 เพื่อประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (phytoavailability) ของโลหะหนักในดิน (Tica et al, 2011)



รูปที่ 4.19 ความเข้มข้นของแคลเซียมในตัวอย่างดินนครปฐมที่สกัดด้วย 0.05 M EDTA, 1 M NH_4OAc , 0.005 M DTPA และ 0.01 M CaCl_2 ภายหลังจากการปรับเสถียร

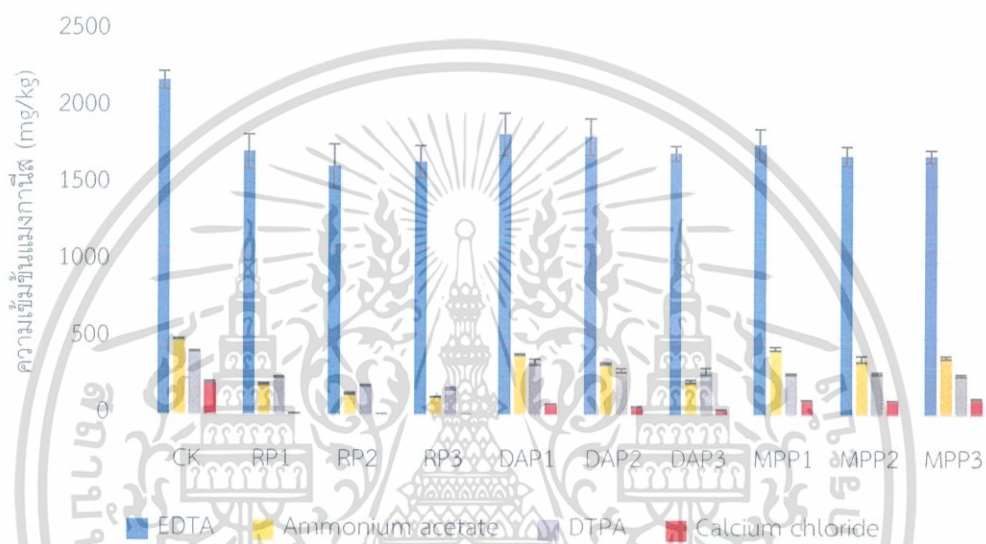
จากรูปที่ 4.19 ที่สังเกตเห็นได้ในส่วนของการปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่สามารถลดความเข้มข้นของแคลเซียมมากที่สุดจากการสกัดด้วยสารละลาย EDTA โดยจะสะท้อนถึงการมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของแคลเซียมในดิน และจากการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียมที่สกัดได้ด้วยสารละลาย DTPA มีค่าน้อย ซึ่งแสดงถึงการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตนั้นสามารถลดศักยภาพการดูดซึมแคลเซียมของพืชได้ดี



รูปที่ 4.20 ความเข้มข้นของตะกั่วในตัวอย่างดินนครปฐมที่สกัดด้วย 0.05 M EDTA, 1 M NH_4OAc , 0.005 M DTPA และ 0.01 M CaCl_2 ภายหลังจากการปรับเสถียร

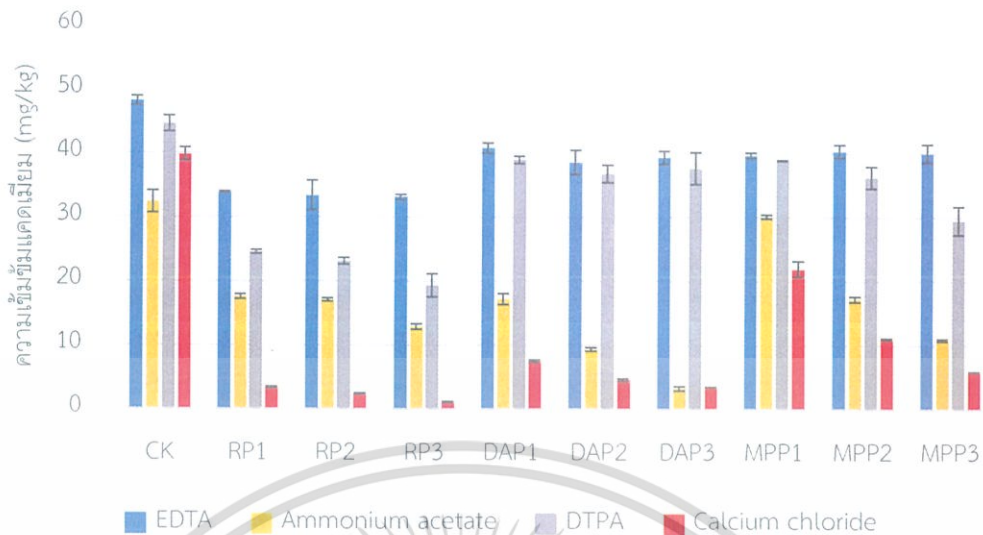
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของตะกั่วในตัวอย่างดินนครปฐมสูงที่สุดพบในการสกัดด้วยสารละลาย EDTA โดยที่การปรับปรุงดินด้วยหินฟอสเฟตนั้นทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วมีแนวโน้มลดลงมากกว่าการปรับปรุงอื่นๆ ซึ่งหมายความว่าหินฟอสเฟตมีความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของตะกั่วได้เป็นอย่างดี สำหรับสกัดด้วยสารละลาย DTPA ในการปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ทำให้ความเข้มข้นตะกั่วที่สกัดได้ต่ำที่สุด ซึ่งหมายความว่า การปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตสามารถลดศักยภาพในการดูดซึมตะกั่วโดยพืช



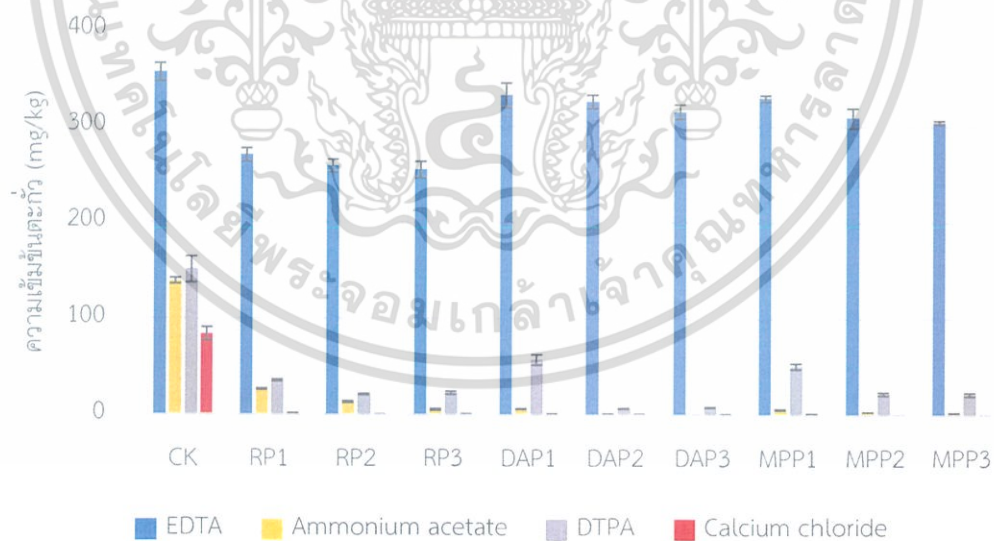
รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นของแมงกานีสในตัวอย่างดินนครปฐมที่สกัดด้วย 0.05 M EDTA, 1 M NH_4OAc , 0.005 M DTPA และ 0.01 M CaCl_2 หลังจากการปรับเสถียร

ในส่วนของการสกัดด้วยสารละลาย EDTA, NH_4OAc , DTPA และ CaCl_2 พบว่าความเข้มข้นของแมงกานีสมีแนวโน้มลดลงมากที่สุดหลังจากการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ซึ่งต่ำกว่าการปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต โดยแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตที่มีศักยภาพในการลดการเคลื่อนที่ การแลกเปลี่ยน และการดูดซึมโดยพืชของแมงกานีสในดิน



รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของแคลเซียมในตัวอย่างดินระยองที่สกัดด้วย 0.05 M EDTA, 1 M NH_4OAc , 0.005 M DTPA และ 0.01 M CaCl_2 หลังจากการปรับเสถียร

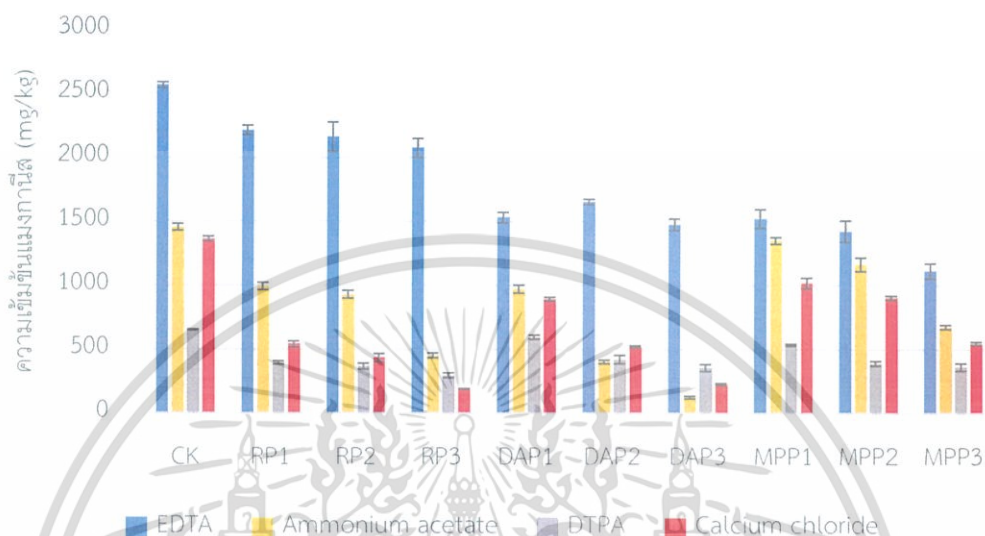
จากรูปที่ 4.22 การปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตนั้น สามารถลดความเข้มข้นของแคลเซียมในส่วนที่สกัดด้วยสารละลาย EDTA, DTPA และ CaCl_2 ได้มากที่สุด ซึ่งหมายถึงการที่หินฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการลดศักยภาพการเคลื่อนที่และการดูดซึมโดยพืชของแคลเซียมในตัวอย่างดินระยองได้ดี



รูปที่ 4.23 ความเข้มข้นของตะกั่วในตัวอย่างดินระยองที่สกัดด้วย 0.05 M EDTA, 1 M NH_4OAc , 0.005 M DTPA และ 0.01 M CaCl_2 หลังจากการปรับเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าสารปรับปรุงที่มีผลต่อความเข้มข้นของตะกั่วจากการสกัดด้วยสารละลาย EDTA ที่ทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วที่สกัดได้น้อยที่สุด คือหินฟอสเฟต กล่าวคือการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตนั้นสามารถลดศักยภาพการเคลื่อนที่ของตะกั่วในดินได้ดีที่สุด



รูปที่ 4.24 ความเข้มข้นของแมงกานีสในตัวอย่างดินระยองที่สกัดด้วย 0.05 M EDTA, 1 M NH_4OAc , 0.005 M DTPA และ 0.01 M CaCl_2 ภายหลังจากการปรับเสถียร

จากรูปที่ชัดเจนคือการลดลงของความเข้มข้นของแมงกานีสที่สกัดด้วยสารละลาย EDTA โดยการปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ซึ่งถือได้ว่ามีความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของแมงกานีสในตัวอย่างดินระยองได้ดีที่สุด

โดยรวมจะเห็นได้ว่าสารละลายมีความสามารถในการสกัดความเข้มข้นของโลหะหนัก (แคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส) ได้แตกต่างกัน โดยที่สารละลาย EDTA มีความสามารถสูงสุดในการสกัดโลหะหนัก รองมาคือ DTPA, NH_4OAc และ CaCl_2 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากความสามารถที่แตกต่างกันในการสกัดรูปฟอร์มของโลหะหนักในแต่ละสารสกัดมีดังนี้

1. สารละลาย EDTA สามารถสกัดโลหะหนักในรูปฟอร์มที่ละลายได้ รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ รูปที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต บางส่วนของรูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ และบางส่วนของรูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน (Chang *et al*, 2014)

2. สารละลาย DTPA สามารถสกัดโลหะหนักในรูปฟอร์มที่ละลายได้ รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ และบางส่วนของรูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน

3. ส่วน NH_4OAc สามารถสกัดโลหะหนักในรูปฟอร์มที่ละลายได้และรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้

4. สารสกัด CaCl_2 สามารถสกัดโลหะหนักในรูปฟอร์มที่ละลายได้เท่านั้น (Zhang *et al*, 2010) ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่สกัดได้แตกต่างกันตามชนิดของสารสกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างเช่นที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนจากความเข้มข้นของตะกั่วในตัวอย่างดินนครปฐมและระยอง (รูปที่ 4.20 และ 4.23) ซึ่งตะกั่วที่นั่นถือเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่เคลื่อนที่ได้ยากในดิน จึงทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วที่สกัดได้ในแต่ละสารละลายมีค่าค่อนข้างน้อย ในขณะที่สารละลาย EDTA สามารถสกัดความเข้มข้นของตะกั่วได้สูงสุด เนื่องมาจากความเป็น Chelating agent ที่มีความแข็งแรงและไม่เฉพาะเจาะจง ทำให้สามารถสกัดส่วนที่คงตัวและไม่คงตัวของรูปฟอร์มโลหะหนักในดินได้ (Chang *et al*, 2014) จึงส่งผลให้สารละลาย EDTA สามารถสกัดตะกั่วได้สูงกว่าสารละลายอื่นๆ สำหรับสารละลาย CaCl_2 เป็นสารสกัดที่มีความสามารถในการสกัดตะกั่วต่ำที่สุด เนื่องมาจากสารสกัดเป็น neutral salts ที่มีความรุนแรงน้อย รวมทั้งความเสถียรของตะกั่วและคุณสมบัติของดินอีกด้วย จึงทำให้พบความเข้มข้นของตะกั่วต่ำมากหรือจนกระทั่งไม่สามารถพบได้จากการสกัดด้วยสารละลาย CaCl_2

จากรูปที่ 4.19-4.24 ทั้งตัวอย่างดินนครปฐมและดินระยองในชุดควบคุม พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสมีค่าสูง และเมื่อทำการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต ซึ่งได้แก่ หินฟอสเฟต ไโดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ปริมาณ 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg ส่งผลให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ทำการสกัดด้วยสารละลาย EDTA, NH_4OAc , DTPA และ CaCl_2 มีแนวโน้มลดลงหลังจากการปรับปรุง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tica *et al.* (2011) ภายหลังจากทำการปรับปรุงด้วยสารประกอบฟอสเฟต ซึ่งส่งผลให้ความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่วที่สกัดด้วยสารละลาย NH_4OAc , DTPA และ CaCl_2 มีความเข้มข้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากการประเมินศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพของโลหะหนักถือได้ว่าเป็นการคาดการณ์กระบวนการที่ทำให้เกิดการ remobilization ของโลหะหนักภายหลังจากการปรับเสถียรด้วยปุ๋ยฟอสเฟต โดยการสกัดตามฟังก์ชันของโลหะหนัก พบว่าจากการสกัดด้วยสารละลาย EDTA ที่ใช้ในการประเมินการเคลื่อนที่ของโลหะหนักนั้น แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของตะกั่วจะลดลงเมื่อทำการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ซึ่งถือได้ว่ามีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของตะกั่วได้ดีทั้งในตัวอย่างดินนครปฐมและดินระยอง อีกทั้งยังพบว่าหินฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตนั้น มีความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมและแมงกานีสในตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิดเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกันในการเปรียบเทียบกับกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักที่ใช้วิธีการสกัดแบบ six step extraction ในส่วนที่ 1-3 ซึ่งได้แก่ รูปฟอร์มที่ละลายได้ รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ และรูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต ซึ่งถือว่าเป็นส่วนที่ไม่เสถียรและสามารถเคลื่อนที่ได้ผ่านตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยจากการศึกษาพบว่า การปรับปรุงดินด้วยหินฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและยังครอบคลุมในการปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสในตัวอย่างดินนครปฐมและระยอง

ความสามารถที่พืชจะดูดซึมโลหะหนักจากดินที่มีการปนเปื้อนนั้น พืชจะทำการตอบสนองต่อโลหะหนักเฉพาะในส่วนที่เรียกว่า phytoavailability เท่านั้น โดยจากการศึกษาจะใช้สารละลาย DTPA และ CaCl_2 ในการประเมินศักยภาพการดูดซึมโลหะของพืชทดแทนการปลูกพืชจริง จากการศึกษาครั้งนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงดินด้วยหินฟอสเฟต มีผลในการลดความเข้มข้นของแคดเมียมและแมงกานีสในส่วนที่พืชสามารถดูดซึมได้สูงสุดในตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิด ในขณะที่ตะกั่ว การปรับปรุงด้วยโดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการดูดซึมตะกั่วของพืช

ในส่วนของการประเมินศักยภาพในการแลกเปลี่ยนของโลหะหนักในดิน ซึ่งส่วนนี้ก็คือว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมเช่นกัน อันเนื่องมาจากโลหะหนักในส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้เหล่านี้ได้รับการยอมรับว่ามีความเสี่ยงสูงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดิน (Polic *et al*, 1994) ซึ่งจะใช้สารละลาย NH_4OAc ในการประเมินการแลกเปลี่ยนของโลหะหนักภายหลังจากการปรับปรุง พบว่าการปรับปรุงด้วยโดแอมโมเนียมฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการลดการแลกเปลี่ยนของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสได้ดีที่สุดในทั้ง 2 ตัวอย่างดิน

เมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส ที่สกัดด้วยสารละลาย EDTA, NH_4OAc , DTPA และ CaCl_2 ในดินระยองมีความเข้มข้นของโลหะหนักที่สกัดได้สูงกว่าในดินนครปฐม อันเนื่องมาจากในดินระยองมีค่าความเป็นกรดต่างต่ำ ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินต่ำ และลักษณะเนื้อดินมีส่วนประกอบของอนุภาคทรายสูงถึงร้อยละ 66.89 จึงเป็นสาเหตุทำให้โลหะหนักเข้าถึงสารละลายที่ใช้สกัดสูงกว่าในดินนครปฐม ซึ่งค่าความเป็นกรดต่างในดินถือเป็นตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับและความสามารถในการตรึงโลหะหนัก ส่วนปริมาณอินทรีย์วัตถุซึ่งมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน โดยโลหะหนักมีแนวโน้มที่จะถูกตรึงในดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง (Pinto *et al*, 2015) อย่างดินนครปฐม

โดยที่การประเมินศักยภาพในด้านต่างๆ นี้ ไม่ว่าจะเป็นในด้านเคลื่อนที่ ด้านการแลกเปลี่ยนได้ของโลหะหนัก และในด้านความสามารถในการดูดซึมโลหะหนักด้วยพืช ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นการประเมินถึงศักยภาพของการเข้าสู่ระบบชีวภาพของโลหะหนักในดินทั้งสิ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการปรับปรุงดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสทั้งในตัวอย่างดินนครปฐม และตัวอย่างดินระยองด้วยหินฟอสเฟตนั้น สามารถลดความเข้มข้นของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสที่มีโอกาสที่จะกระจายเข้าสู่ระบบชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการปรับเสถียรแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสที่ปนเปื้อนในตัวอย่างดินนครปฐมและระยอง ซึ่งทำการปรับเสถียรด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ปริมาณ 2,500, 5,000 และ 7,500 mgP/kg โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ชนิดและปริมาณของสารปรับปรุงดิน เมื่อครบกำหนดการปรับเสถียร 1 เดือน ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดิน ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมด ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนัก รวมทั้งศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพของโลหะหนัก จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

ตัวอย่างดินนครปฐมและระยองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่ตำบลลาดจินดา อำเภอสสามพราน จังหวัดนครปฐม และจากตำบลชุมแสง อำเภอวังจันทร์ จังหวัดระยอง โดยมีลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ดังนี้ มีค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 7.06 ± 0.03 และ 3.20 ± 0.01 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินคิดเป็นร้อยละ 4.51 ± 0.03 และ 3.50 ± 0.15 มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก เท่ากับ 29.36 ± 0.32 และ 2.80 ± 0.53 meq/100 g โดยลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียวและดินร่วนเหนียวปนทราย ตามลำดับ

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดิน พบว่าไดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรดต่างในดินให้เพิ่มสูงขึ้นสำหรับตัวอย่างดินนครปฐม ส่วนตัวอย่างดินระยองปุ๋ยฟอสเฟตทั้ง 3 ชนิดส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างในดินเพิ่มขึ้น

การศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมด ทั้งในตัวอย่างดินนครปฐมและระยอง พบว่า ไดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตไม่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก กล่าวคือดินจะไม่ได้รับผลกระทบจากปริมาณการปรับปรุงด้วยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตและโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต เช่นเดียวกับหินฟอสเฟตที่ไม่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและตะกั่ว แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของแมงกานีส ทำให้เป็นการเพิ่มปริมาณการปนเปื้อนแมงกานีสในดินให้สูงขึ้น

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของโลหะหนักในดินทั้งก่อนและหลังการปรับเสถียร พบว่ารูปฟอร์มของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสในดินเปลี่ยนแปลงไปภายหลังจากการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต โดยรูปฟอร์มที่ไม่เสถียรอย่างรูปฟอร์มที่ละลายได้ รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ และรูปฟอร์มที่จับอยู่กับคาร์บอนนั้นลดลง ในขณะที่รูปฟอร์มที่เสถียรอย่างรูปฟอร์มที่ยึดเกาะกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ รูปฟอร์มที่ถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุในดิน และรูปฟอร์มที่เหลือนั้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งถือว่ามีความสามารถในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน ในตัวอย่างดินนครปฐมการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตทั้ง 3 ชนิดมีผลต่อการลดรูปฟอร์มที่ไม่เสถียรของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสทั้งสิ้น ซึ่งการปรับปรุงด้วยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ 5,000 mgP/kg สามารถลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมได้เป็นอย่างดี โดยที่ความเข้มข้นส่วนที่ไม่เสถียรเหลือเพียงร้อยละ 16.63 (ชุดควบคุมร้อยละ 36.42) และการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตที่ 7,500 และ 5,000 mgP/kg ถือว่ามีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของตะกั่วและแมงกานีสได้สูงสุด ตามลำดับ (ซึ่งลดส่วนที่ไม่เสถียรของตะกั่วจากร้อยละ 13.18 เหลือ 4.83, แมงกานีสจากร้อยละ 18.9 เหลือเพียง 2.71) การปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในตัวอย่างดินระยองมีผลต่อการลดรูปฟอร์มที่ไม่เสถียรของโลหะหนักเช่นกัน โดยการปรับปรุงด้วยหินฟอสเฟตที่ 5,000 และ 7,500 mgP/kg มีความสามารถในการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมและแมงกานีส ตามลำดับ (การลดรูปฟอร์มที่ไม่เสถียรของแคดเมียมจากชุดควบคุมร้อยละ 96 เหลือ 41.87, แมงกานีสจากร้อยละ 98.67 เหลือเพียง 17.43) และสารปรับปรุงที่สามารถลดการเคลื่อนที่ของตะกั่วในดินได้มากที่สุดคือโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ 5,000 mgP/kg สามารถลดความเข้มข้นของตะกั่วที่ไม่เสถียรจากชุดควบคุมร้อยละ 64.78 ลดลงเหลือ 7.03

จากการประเมินศักยภาพการเข้าสู่ระบบชีวภาพของโลหะหนัก ซึ่งได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีสทั้งในตัวอย่างดินนครปฐมและระยองเมื่อทำการปรับปรุงดินด้วยหินฟอสเฟตนั้น มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดศักยภาพของการเข้าสู่ระบบชีวภาพของแคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเสถียรและรูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน เมื่อสภาวะแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม รวมทั้งความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์จากดินภายหลังจากการปรับเสถียรแล้ว
2. ควรศึกษาในสภาวะและพื้นที่ที่มีปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักจริง และโลหะหนักชนิดอื่นๆ ต่อไป
3. ควรมีการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงกลไกของการปรับเสถียรในแต่ละช่วงเวลา

เอกสารอ้างอิง

[Online]. Available : <http://www.dgr.go.th/newproject/53/FinalReport.pdf>.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. 2554. โครงการศึกษาการปนเปื้อนและการวางเครือข่ายฝักระวังการปนเปื้อนของสารพิษในแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่อำเภอทับคล้อ อำเภอวังทรายพูน จังหวัดพิจิตร และอำเภอวังโป่ง จังหวัดเพชรบูรณ์.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. รายงานการจัดการทรัพยากรดินเพื่อการปลูกพืชเศรษฐกิจหลักตามกลุ่มชุดดิน ดินบนพื้นที่ราบต่ำ. เล่มที่.1 กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาที่ดินกระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. รายงานการจัดการทรัพยากรดินเพื่อการปลูกพืชเศรษฐกิจหลักตามกลุ่มชุดดิน ดินบนพื้นที่ดอน. เล่มที่.2 กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาที่ดินกระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2557. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : วิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2557. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. เล่มที่ 2. กรุงเทพฯ : วิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน.

กรมวิชาการเกษตร. 2551. คู่มือวิเคราะห์ปุ๋ยเคมี. กรุงเทพฯ : สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กรมวิชาการเกษตร. 2555. การเก็บตัวอย่างดินเพื่อการวิเคราะห์. กรุงเทพฯ : กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. หน้า 4.

กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์. 2553. ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม 2. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

กิตติวรรณ กิจปกรณสันติ, ภาวิไล ส่งแสง และอรวรรณ บุญเพชรแก้ว. 2547. “การปรับเสถียรแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต.” โครงการงานพิเศษสาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2535. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จำลอง ปินตาวงศ์, อานนท์ นนทโส และสถาพร กาวินทร. 2554. แนวทางการบริหารจัดการทรัพยากรแร่แมงกานีส. กรุงเทพฯ : สำนักทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชัชวพร ยิ่งสมบัติ. 2551. “การปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พัชรี อธิจินดาจจร. 2552. **คู่มือการวิเคราะห์ดินทางเคมี**. พิมพ์ครั้งที่ 2. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ยงยุทธ โอสถสกา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และชวลิต ธงประยูร. 2554. **ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ยศเวท สิริจามร, ปรรารถนา เผือกวิไล และณิมนารักษ์ อยู่คงแก้ว. 2560. “ศักยภาพในการดูดซับและสะสมโลหะหนักของพืชล้มลุกชนิดเด่น บริเวณพื้นที่รอบเหมืองแร่ทองคำ จังหวัดพิจิตร.” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 25(1) : 110-123.
- วราชาติ วิศวะพิพัฒน์. 2555. “เทคโนโลยีการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวัสดุฟอสเฟต.” *แก่นเกษตร*. 2555 : 373-378.
- วีรภัทร์ ทองอนันต์. 2557. “การเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะที่สกัดได้ในดินในนาข้าวที่ทำการสกัดด้วยวิธีที่เลือก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2539. **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สภาวิศวกร. 2547. **ระบบฟื้นฟูสภาพดิน**. [Online]. Available : <http://www.coe.or.th/coe-2/Download/Articles/ENV/CH8.pdf>.
- สิทธิชัย อินทร์ปานม. 2558. “รูปของโลหะหนักตามความเข้มข้นของโลหะหนักในดินที่สกัดด้วยวิธี sequential extraction.” วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตร ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- แสงโสม เกิดคล้าย และศิรินุช ชื่นอินมณู. 2548. **พิษจากสารโลหะหนัก**. [Online]. Available : www.boe.moph.go.th/Annual/Annual48/Part1/47Heavy%20metal%20poisoning.doc
- Adriano, D. C. 2001. “Arsenic.” *Trace elements in terrestrial environments*. 219-261.
- Basta, N. T., and McGowen, S. L. 2004. “Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil.” *Environmental pollution*. 127(1) : 73-82.
- Basta, N. , McGowen, S. , and Gradwohl, R. 2000. “Remediation of smelter-contaminated soils by chemical immobilization.” In *Mining, Forest, & Land Restoration Symposium/ Workshop, Rocky Mountain Chapter of the Water Environment Federation*. 16-20.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Birnith C. 2011. **Mining of Phosphate Rock and Treatment of the Waste.** [Online]. Available : http://web.cecs.pdx.edu/~fishw/WQC_Pset05-7.pdf
- Bolan, N. S., Adriano, D. C., Duraisamy, P., Mani, A., and Arulmozhiselvan, K. 2003. "Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. I. Effect of phosphate addition." *Plant and soil*. 250(1) : 83-94.
- Chang, Y. T., Hseu, Z. Y., and Zehetner, F. 2014. "Evaluation of phytoavailability of heavy metals to Chinese cabbage (*Brassica chinensis* L.) in rural soils." *The Scientific World Journal*.
- Chen, S., Xu, M., Ma, Y., and Yang, J. 2007. "Evaluation of different phosphate amendments on availability of metals in contaminated soil." *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 67(2) : 278-285.
- Fayiga, A. O., and Ma, L. Q. 2006. "Using phosphate rock to immobilize metals in soil and increase arsenic uptake by hyperaccumulator *Pteris vittata*." *Science of the Total Environment*. 359(1) : 17-25.
- Friesl-Hanl, W., Platzer, K., Horak, O., and Gerzabek, M. H. 2009. "Immobilising of Cd, Pb, and Zn contaminated arable soils close to a former Pb/ Zn smelter: a field study in Austria over 5 years." *Environmental geochemistry and health*. 31(5) : 581-594.
- Fuentes, A., Lloréns, M., Sáez, J., Aguilar, M. I., Ortuño, J. F., and Meseguer, V. F. 2008. "Comparative study of six different sludges by sequential speciation of heavy metals." *Bioresource technology*. 99(3) : 517-525.
- Hamon, R. E., McLaughlin, M. J., and Cozens, G. 2002. "Mechanisms of attenuation of metal availability in in situ remediation treatments" *Environmental Science and Technology*. 36(18) : 3991-3996.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., and Nelson, W. L. 1999. "Soil fertility and fertilizers." *An introduction to nutrient management*. 515 : 97-141.
- Hettiarachchi, G. M., Pierzynski, G. M., and Ransom, M. D. 2001. "In situ stabilization of soil lead using phosphorus." *Journal of Environmental Quality*. 30(4) : 1214-1221.
- Huang, G., Su, X., Rizwan, M. S., Zhu, Y., and Hu, H. 2016. "Chemical immobilization of Pb, Cu, and Cd by phosphate materials and calcium carbonate in contaminated soils." *Environmental Science and Pollution Research*. 23(16) : 16845-16856.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Irshad, M., Khan, R. U., Jadoon, S., Hassan, A., and Eneji, A. E. 2014. "Effect of phosphate rock on the solubility of heavy metals in soils saturated with industrial wastewater." *Canadian Journal of Soil Science*. 94(4) : 543-549.
- Kaasalainen, M., and Yli-Halla, M. 2003. "Use of sequential extraction to assess metal partitioning in soils." *Environmental Pollution*. 126(2) : 225-233.
- Kabata Pendias, A. and Pendias, H. 2000. **Trace elements in soils and plants**. Baton Rouge : CRC press.
- Kashem, M. A., Singh, B. R., Kondo, T., Huq, S. I., and Kawai, S. 2007. "Comparison of extractability of Cd, Cu, Pb and Zn with sequential extraction in contaminated and non-contaminated soils." *International Journal of Environmental Science & Technology*. 4(2) : 169-176.
- Kede, M. L. F., Correia, F. V., Conceição, P. F., Junior, S. F. S., Marques, M., Moreira, J. C., and Pérez, D. V. 2014. "Evaluation of mobility, bioavailability and toxicity of Pb and Cd in contaminated soil using TCLP, BCR and earthworms." *International journal of environmental research and public health*. 11(11) : 11528-11540.
- Knox, A. S., Kaplan, D. I., and Paller, M. H. 2006. "Phosphate sources and their suitability for remediation of contaminated soils." *Science of the Total Environment*. 357(1) : 271-279.
- Lambert, M., Pierzynski, G., and Hettiarachchi, G. 1997. "The use of phosphorus in sequestration of lead and cadmium in a smelter slag." *Hazardous Waste Research*.
- LeGeros, R. Z., and Legeros, J. P. 1984. "Phosphate minerals in human tissues." *Phosphate minerals*. 45 : 351-385.
- Ma, Q. Y., Traina, S. J., Logan, T. J., and Ryan, J. A. 1993. "In situ lead immobilization by apatite." *Environmental Science & Technology*. 27(9) : 1803-1810.
- 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.
- McGowen, S. L., Basta, N. T., and Brown, G. O. 2001. "Use of diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter-contaminated soil." *Journal of Environmental Quality*. 30(2) : 493-500.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Mignardi, S., Corami, A., and Ferrini, V. 2012. "Evaluation of the effectiveness of phosphate treatment for the remediation of mine waste soils contaminated with Cd, Cu, Pb, and Zn." *Chemosphere*. 86(4) : 354-360.
- Miretzky, P., and Fernandez-Cirelli, A. 2008. "Phosphates for Pb immobilization in soils: a review." *Environmental Chemistry Letters*. 6(3) : 121-133.
- Mulligan, C. N., Yong, R. N., and Gibbs, B. F. 2001. "Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation." *Engineering geology*. 60(1) : 193-207.
- Nina Siebers. 2009. "Effects of phosphate addition on immobilization and phytoavailability of Cd in soil and the chemical form and translocation of Cd within rice plants." Degree of Master of Science Program in Environmental Managem (Interdisciplinary Program) Graduate School Chulalongkorn University.
- Pierzynski, G. M., and Schwab, A. P. 1993. "Bioavailability of zinc, cadmium, and lead in a metal-contaminated alluvial soil." *Journal of Environmental Quality*. 22(2) : 247-254.
- Pinto, E., Almeida, A. A., and Ferreira, I. M. 2015. "Assessment of metal (loid) s phytoavailability in intensive agricultural soils by the application of single extractions to rhizosphere soil." *Ecotoxicology and environmental safety*. 113 : 418-424.
- Polić, P., and Pfendt, P. 1994. "Alluvial aquifer contamination: Exchangeable heavy metals and factors affecting their spatial distribution." *Water, Air, and Soil Pollution*. 74(1-2) : 155-167.
- Seaman, J. C., Arey, J. S., and Bertsch, P. M. 2001. "Immobilization of nickel and other metals in contaminated sediments by hydroxyapatite addition." *Journal of Environmental Quality*. 30(2) : 460-469.
- Selim, H. M. 2015. **Phosphate in Soils: Interaction with Micronutrients, Radionuclides and Heavy Metals**. Vol. 2 Florida : CRC Press.
- Seshadri, B., Bolan, N. S., Choppala, G., Kunhikrishnan, A., Sanderson, P., Wang, H., ... and Kim, K. 2017. "Potential value of phosphate compounds in enhancing immobilization and reducing bioavailability of mixed heavy metal contaminants in shooting range soil." *Chemosphere*. 184 : 197-206.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Shiowatana, J., Tantidanai, N., Nookabkaew, S., and Nacapricha, D. 2001. "A flow system for the determination of metal speciation in soil by sequential extraction." *Environment international*. 26(5) : 381-387.
- Sun, Y., Zhou, Q., Xie, X., and Liu, R. 2010. "Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China." *Journal of hazardous materials*. 174(1) : 455-462.
- Sungur, A., Soylak, M., and Ozcan, H. 2014. "Investigation of heavy metal mobility and availability by the BCR sequential extraction procedure: relationship between soil properties and heavy metals availability." *Chemical Speciation & Bioavailability*. 26(4) : 219-230.
- Suzuki, T., Hatsushika, T., and Miyake, M. 1982. "Synthetic hydroxyapatites as inorganic cation exchangers." *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*. 78(12) : 3605-3611.
- Takeuchi, Y., and Arai, H. 1990. "Removal of coexisting Pb^{2+} , Cu^{2+} and Cd^{2+} ions from water by addition of hydroxyapatite powder." *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 23(1) : 75-80.
- Tessier, A., Campbell, P. G., and Bisson, M. 1979. "Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals." *Analytical chemistry*. 51(7) : 844-851.
- Tica, D., Udovic, M., and Lestan, D. 2011. "Immobilization of potentially toxic metals using different soil amendments." *Chemosphere*. 85(4) : 577-583.
- US. EPA. 1996. **Acid Digestion of sediments, Sludges and Soil / SW-846 Method 3050b**. [Online]. Available : www.epa.gov/sw-846/pdfs/3050b.pdf.
- Xu, Y., & Schwartz, F. W. (1994). "Lead immobilization by hydroxyapatite in aqueous solutions." *Journal of Contaminant Hydrology*. 15(3) : 187-206.
- Yan, Y., Zhou, Y. Q., and Liang, C. H. 2015. "Evaluation of phosphate fertilizers for the immobilization of Cd in contaminated soils." *PloS one*. 10(4) : 124-132.
- Zeng, G., Wan, J., Huang, D., Hu, L., Huang, C., Cheng, M., and Jiang, D. 2017. "Precipitation, adsorption and rhizosphere effect: The mechanisms for Phosphate-induced Pb immobilization in soils A review." *Journal of Hazardous Materials*. 339 : 354-367.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Zhang, M. K., Liu, Z. Y., and Wang, H. 2010. "Use of single extraction methods to predict bioavailability of heavy metals in polluted soils to rice." *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 41(7) : 820-831.
- Zhang, Z., Guo, G., Teng, Y., Wang, J., Rhee, J. S., Wang, S., and Li, F. 2015. "Screening and assessment of solidification/stabilization amendments suitable for soils of lead-acid battery contaminated site." *Journal of hazardous materials*. 288 : 140-146.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์ดินและสารปรับปรุงดิน

ก.1 การเก็บตัวอย่างดิน (ปรับใช้จาก กรมวิชาการเกษตร, 2555)

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

ใช้เป็นตัวแทนของดิน

ก.2 การเตรียมตัวอย่างดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

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

ก.3 การเตรียมตัวอย่างสารปรับปรุงดิน (กรมวิชาการเกษตร, 2551)

1. นำตัวอย่างที่ได้รับทั้งหมดประมาณ 1 กิโลกรัม เทใส่ถุงพลาสติกเขย่าและคลุกเคล้าให้เข้ากันดี
2. เทตัวอย่างทั้งหมดใส่เครื่องแบ่งตัวอย่างปุ๋ยขนาดเล็ก (Riffle) และแบ่งออกเป็น 4 ส่วนๆ ละเท่าๆกัน ในกรณีที่ไม่มี Riffle ให้เทตัวอย่างบนกระดาษแผ่นใหญ่ที่สะอาด หรือเทใส่ภาชนะขนาดใหญ่ที่เตรียมไว้ คลุกเคล้าให้เข้ากันดีอีกครั้ง พูนให้เป็นรูปกรวยใช้ไม้หรือถาดอีกใบหนึ่ง ตบปลายกรวยให้ราบลง ตัดกองตัวอย่างปุ๋ยเป็น 4 ส่วน เท่าๆ กัน

3. นำตัวอย่างปุ๋ยส่วนที่ 1 ไปบดด้วยเครื่องบดตัวอย่างให้มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 20 เมช ในการบดตัวอย่างต้องบดให้หมดไม่ให้มีตัวอย่างค้างอยู่ในเครื่องบด เทตัวอย่างที่บดแล้วใส่ถุงพลาสติก ชีบ ไล่อากาศออกให้หมด และปิดถุงให้สนิท เขียนป้ายบ่งชี้ตัวอย่างวิเคราะห์

4. นำส่วนที่ 2 สำหรับหา ความชื้น ส่วนที่ 3 สำหรับวิเคราะห์หาขนาด และส่วนที่ 4 ใส่ขวดปิดฝาสนิท เก็บไว้สำหรับอ้างอิง หรือ เมื่อมีการร้องเรียน ติดป้ายบ่งชี้ตัวอย่าง วัน เวลา ที่แบ่งตัวอย่าง

ก.4 การวิเคราะห์หาความชื้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

1. ชั่งบีกเกอร์ขนาด 250 ml
2. นำตัวอย่างดินมาชั่ง 50 g (บันทึกน้ำหนักเปียก) ใส่บีกเกอร์
3. นำไปอบที่ 105-110°C เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งได้น้ำหนักดินคงที่ ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์
4. นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง
5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

$$\text{ความชื้น \%} = \frac{(\text{น้ำหนักดินตัวอย่างก่อนอบ}-\text{น้ำหนักดินตัวอย่างหลังอบ})}{\text{น้ำหนักดินตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

ก.5 ความหนาแน่นรวมของดิน (Soil Bulk Density)

1. เก็บดินตัวอย่างโดยใช้กระบอกละหะเจาะลงไปดินตามความลึกที่ต้องการ แล้วปาดหน้าดินทั้งสองด้านของกระบอกละให้เรียบพอดีกับปากกระบอกละด้วยมีดปาดดิน

2. ชั่งน้ำหนักของกระบอกละที่มีดินบรรจุ ($W_{sw} + W_a$) การชั่งน้ำหนักในขั้นนี้เพื่อประโยชน์ในการหาความชื้นของดิน

3. นำกระบอกละหะที่มีดินบรรจุอยู่เข้าตู้อบซึ่งมีอุณหภูมิ 105°C จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ ก่อนชั่งน้ำหนักควรปล่อยให้ดินและกระบอกละเย็นลงก่อน ($W_s + W_a$) ในเดซิเคเตอร์

4. ชั่งน้ำหนักของกระบอกละหะเปล่า (W_a) พร้อมทั้งวัดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวของกระบอกละ แล้วคำนวณหาปริมาตรภายในของกระบอกละ (V_s)

การคำนวณ

$$\text{ความหนาแน่นรวมของดิน } P_b = \frac{(W_s + W_a) - W_a}{V_s}$$

ก.6 การวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 10 g ใส่ลงในบีกเกอร์ ขนาด 100 ml.
2. เติมน้ำกลั่นลงไป 50 ml ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากันหลายๆ ครั้ง ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที
3. นำสารละลายดินไปวัด pH ด้วยเครื่องวัด pH โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 7 และ pH 4 ปรับเครื่องวัด pH ก่อนวัดตัวอย่าง

ก.7 การวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter, OM) โดยวิธี Walkley and Blank (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

1. ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.2 มม. (80 mesh) หรือ 0.5 มม. (32 Mesh) โดยชั่งดินในช่วง 0.2-2.0 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 ml
2. บีบอัดสารละลาย $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1 N 10 ml ลงในขวดรูปชมพู่ แกว่งเบาๆ
3. เติมน้ำ H_2SO_4 เข้มข้น 15 ml โดยเร็วและแกว่งขวดรูปชมพู่ ประมาณ 1 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที (ถ้าพบว่าสารละลายดินตัวอย่างเป็นสีเขียวก่อนไทเทรต แสดงว่ามีสารอินทรีย์อยู่มาก ควรทำการวิเคราะห์ใหม่ โดยชั่งน้ำหนักดินให้น้อยกว่าเดิม)
4. เติมน้ำกลั่น 50 ml ทิ้งไว้ให้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

6. ไทเทรตสารละลายด้วย FAS ที่หาความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว จนสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียวใส (ใช้ BDS เป็นอินดิเคเตอร์) หรือเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง (ใช้ O-phenanthroline เป็นอินดิเคเตอร์)

7. ทำ blank ซึ่งไม่มีตัวอย่างดิน แต่เติมสารเคมีต่างๆ เหมือนกัน และทำควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน ใช้เป็น Method Blank

การคำนวณ

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

N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมต (นอร์มัล)

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับ blank (ml)

T = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (ml)

W = น้ำหนักดิน (g)

ก.8 การเตรียมตัวอย่างดินวิเคราะห์ X-ray Fluorescence (XRF)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 0.5g และชั่งกรดบอริก (H_3BO_3) 4.5 g บันทึกรับน้ำหนักทั้งหมด
2. ผสมตัวอย่างกับกรดบอริกให้เข้ากัน โดยใช้เครื่องผสมของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
3. นำตัวอย่างอัดเม็ด และส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล.

ก.9 การหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity, CEC) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 5-10 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 ml เติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 1 N ลงไป ประมาณ 60 ml ปิดจุก เขย่าให้เข้ากันทิ้งไว้ค้างคืน
2. กรองด้วยระบบสุญญากาศ
3. ชะล้างตัวอย่างดินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 1 N จนกระทั่งไม่มีแคลเซียม (Ca) เหลืออยู่ (ทดสอบได้โดยนำสารละลายส่วนที่ล้างดินแล้วมา 10 ml ใส่หลอดทดลองหยดแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N 2-3 หยด แอมโมเนียมออกซาลาเลท 10 % และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 50% ไปทำให้เดือด ถ้ามีแคลเซียมเหลืออยู่จะเกิดตะกอนหรือสารละลายจะขุ่น)
4. ชะดินตัวอย่างต่อ ด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N 4 ครั้ง และล้างด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 N อีก 1 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 95% ประมาณ 150-200 ml จนไม่มีคลอไรด์เหลืออยู่ (ทดสอบโดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$ 0.1 N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปรับสารละลายดินที่ได้จาก ข้อ 4 ทิ้งไปและล้างตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (acidified NaCl) 10% เพื่อให้ Na^+ ไล่ที่หรือแทนที่ NH_4^+ ในดินจนได้สารละลายดินประมาณ 225 ml

6. เทสารละลายดินที่กรองได้ใส่ในขวดกลั่น (Micro Kjeldahl tube)

7. นำสารละลายดินที่ได้ไปกลั่นเพื่อไล่ NH_4^+ ออกมาโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงไป 25 ml เพื่อให้สารละลายเป็นด่าง แอมโมเนียมที่กลั่นได้จะถูกจับไว้ด้วยสารละลายกรดบอริก 3% 50 ml

8. นำสารละลายที่ได้จากการกลั่น หยดอินดิเคเตอร์ผสม 5 หยด ทำให้เห็นสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียว แล้วไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 N จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงที่จุดยุติ

9. กลั่น blank และไทเทรตเช่นเดียวกับตัวอย่าง

การคำนวณ

$$\text{CEC} = [(A-B) N \times 100] / X$$

A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (ml)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับ blank

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)

X = น้ำหนักเป็นกรัมของตัวอย่างดิน

ก.10 การหาขนาดของอนุภาคดิน (Particle size analysis) (กรองแก้ว, 2553)

1. การปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

1.1 เทสารละลายคัลลอน จำนวน 100 ml ลงในกระบอกตวงปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 L ผสมให้ทั่วด้วยแท่งแก้วคนแบบ plunger ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่ (อยู่ในช่วง 20-25°C)

1.2 ค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในสารละลายอย่างระมัดระวัง อ่านค่าจากสเกลที่รอยเว้าบนของของเหลวที่ล้อมรอบไฮโดรมิเตอร์

2. การอ่านค่าจากสารละลายแขวนลอย

2.1 ชั่งดินที่ผึ่งและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 mesh แล้ว 40 g (ถ้าเป็นดินทรายร่วนหรือทรายใช้ 100 g) ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 ml เติมสารละลายคัลลอน 100 ml และน้ำกลั่นประมาณ 300 ml ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน

2.2 นำสารแขวนลอยดินที่เตรียมไว้ มาควนด้วยเครื่องควนแม่เหล็กประมาณ 5 นาที แล้วเทลงกระบอกตวงขนาด 1 L

2.3 ปรับปริมาตรสารในข้อ 2.2 ด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 L ทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.4 จุ่มแท่งแก้วคนแบบ plunger แบบขึ้น-ลง เบาๆ เพื่อให้เกิดการผสมกันทั่วทั้งกระบอกตวง (ให้หมุนขึ้น-ลงแบบเกลียวสว่าน 2-3 รอบ)
- 2.5 บันทึกเวลาเมื่อคนเสร็จ ถ้าที่ผิวของสารแขวนลอยมีฟอง เติมเอมัลลิกอกซอล 1 หยด
- 2.6 ค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงอย่างระมัดระวังในสารแขวนลอย และอ่านค่าสเกลเหมือนเดิม
- 2.7 เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาที หลังจากการกวนผสมค่าที่อ่านได้ต้องหักลบจากค่าที่อ่านได้จากการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์
- 2.8 ค่อยๆ ดึงไฮโดรมิเตอร์ขึ้นอย่างระมัดระวังเมื่ออ่านเสร็จ ล้างและเช็ดให้แห้ง
- 2.9 เมื่อครบ 2 ชั่วโมง ให้อ่านค่าไฮโดรมิเตอร์อีกครั้งโดยทำเหมือนเดิม

การคำนวณ

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

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

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

ก.11 การวิเคราะห์ไนโตรเจนในดินทั้งหมด (Total Nitrogen) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 0.5-2.0 g ใส่ใน Micro Kjeldahl tube
2. เติมสารเร่งปฏิกิริยาประมาณ 1 g ($K_2SO_4 : CuSO_4 : Se ; 100 : 10 : 1$) และเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 ml
3. นำไปย่อยด้วยเตาย่อย (Digestion System) ในระยะแรกใช้ไฟอ่อนๆ แล้วเพิ่มไฟให้แรงขึ้น
4. Digest จนสีของเหลวใน Kjeldahl flask เริ่มใส เคี้ยวต่อไปอีกประมาณ 20-30 นาที จึงยกออกมาจากเตา digest แล้วปล่อยให้เย็น
5. รินน้ำกลั่นประมาณ 10 ml ลงไปรอบๆ ก้นหลอดของ Micro Kjeldahl flask เขย่าของผสมให้เข้ากัน ปล่อยให้เย็นอีกครั้งหนึ่ง แล้วเทใส่ volumetric flask ขนาด 100 ml เขย่าของเหลวให้เข้ากัน ปล่อยให้เย็นดินตกตะกอน เพื่อนำของเหลวใสข้างบนไปกลั่น
6. เตรียม blank ตามวิธีการข้อ 2 ถึงข้อ 5 โดยไม่มีตัวอย่างดิน
7. เปลี่ยนเครื่องกลั่นและล้างเครื่องกลั่น 1 ครั้ง ด้วยการกลั่นน้ำกลั่น
8. นำตัวอย่างในข้อ 5 มาเข้าเครื่องกลั่น กำหนดให้เติมน้ำกลั่น 50 ml และ NaOH 40% 25 ml กลั่นประมาณ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. เติมกรดบอริก 4% 25 ml ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 ml หยด mixed indicator ประมาณ 6-7 หยด สารละลายจะมีสีม่วงแดง นำไปกรองรับการกลั่นจากข้อ 8 สารละลายนี้จะเปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีเขียว และรองรับจนได้สารละลายในขวดรูปชมพู่ประมาณ 150 ml

10. ไทเทรตสารละลายที่ได้จากการกลั่นในข้อ 9 กับกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (HCl) 0.1 N จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงแดง

11. กลั่น Blank และไทเทรต เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

คำนวณ

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

A = น้ำหนักดินตัวอย่าง (g)

B = มิลลิลิตรของ standard HCl ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง Blank

Y = มิลลิลิตรของ standard HCl ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง

X = ความเข้มข้นของ HCl

1.4 = น้ำหนักสมมูล (equivalent weight) ของไนโตรเจน

ก.12 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (avail. P) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

1. สารเคมี

1.1 สารละลายสกัด Bray II (0.03 N NH_4F 0.1 N HCl) ละลายแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (ammonium fluoride, NH_4F) 11.02g ในน้ำกลั่น 8 L เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl) ลงไป 86 ml แล้วปรับให้มีปริมาณ 10 L ปรับ pH ให้อยู่ระหว่าง 1.5-1.6

1.2 Stock solution (Reagent A : Sulfuric-molybdate-tartrate solution) ละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (ammonium molybdate, $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$) 50 g ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 2L เติมน้ำกลั่น 200 ml คนให้ละลายหลังจากนั้น ละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาร์เทรต (antimony potassiumtartrate, $\text{KSbO}_3 \cdot \text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$) 1.213 g ในน้ำกลั่น 50 ml (ถ้าไม่ละลายนำไปอุ่นแต่ต้องไม่เกิน 60°C) เมื่อละลายเข้ากันดีแล้ว เทใส่ในบีกเกอร์ที่ใส่แอมโมเนียมโมลิบเดต คนให้เข้ากันอีกครั้ง ค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) 700 ml ทิ้งไว้ให้เย็น เทลงในขวด Volumetric flask ขนาด 1L แล้วทำให้มีปริมาตร 1 L ด้วยน้ำกลั่น เทเก็บไว้ในขวดสีน้ำตาลและเก็บไว้ในที่มืดและเย็น สารละลายเก็บไว้ได้นาน 6 เดือน

1.3 สารละลาย develop สี (Working solution, Reagent B) ละลาย ascorbic acid 1.76 g ในน้ำกลั่นประมาณ 1,600 ml เติมสารละลาย ข้อ 1.2 ลงไป 40 ml ทำให้มีปริมาตร 2L ด้วยน้ำกลั่น ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง จึงนำมาใช้ สารละลายนี้เก็บได้ไม่เกิน 24 ชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องเตรียมใหม่ทุกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 50 mg/L ละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate, KH_2PO_4 ที่อบให้แห้งที่ 40°C นาน 2 ชั่วโมง) 0.2195 g ในน้ำกลั่น ปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดซัลฟิวริก 1-2 หยด ปรับปริมาตรให้เป็น 1L

1.5 นำสารละลายมาตรฐาน ข้อ 1.4 มาทำ standard set ให้มีความเข้มข้น 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 15 mg/L ด้วยสารละลายสกัด

2. วิธีทำ

2.1 ชั่งตัวอย่างดิน 1 g ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 ml

2.2 เติมน้ำยาสกัด Bray II 10 ml เขย่า 1 นาที กรองโดยใช้เครื่องกรองลดความดัน

2.3 ปิเปตสารละลายที่สกัดได้ในข้อ 2.2 อัตราส่วน 1 ต่อ Working solution 16

ส่วน (เท่ากับ 17 เท่า) ลงในหลอดแก้ว ทิ้งไว้ 30 นาที นำไปอ่านค่าความเข้มข้น ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 820 nm

2.4 ทำ Blank และชุดของสารละลายมาตรฐาน (standard set) เช่นเดียวกับข้อ 2.3

วิธีคำนวณ

$$\text{ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (P)} = \frac{B \times \text{df (sample)} \times R}{A \times \text{df (standard)}} \text{ mg/kg}$$

A = น้ำหนักของตัวอย่างดิน (g)

B = สารละลายสกัด (ml)

R = ค่าที่อ่านได้ เมื่อวัดค่าเทียบกับ standard set (ppm)

df = อัตราส่วนการเจือจาง (dilution factor) (เท่า)

ก.13 การวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตทั้งหมด

1. การเตรียม Reagent

1.1 กรดผสม $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4$ อัตรา 1:1 ทำการผสม 69 - 70% HNO_3 กับ 69 - 70% HClO_4 ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร

1.2 Molybdovanadate reagent

1.2.1 ชั่ง Ammonium molybdate จำนวน 40 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำร้อน (น้ำกลั่น) ปริมาณ 400 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันทิ้งไว้ให้เย็น

1.2.2 ชั่ง Ammonium metavanadate ปริมาณ 2 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมน้ำร้อน (น้ำกลั่น) ปริมาณ 300 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นเติม 69 - 70% HClO_4 ปริมาณ 450 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันทิ้งไว้ให้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 ค่อยๆ รินผสมสารละลาย Ammonium molybdate (ข้อ 2.2.1) ลงในสารละลาย Ammonium metavanafate (ข้อ 2.2.2) ใน Volumetric flask ขนาด 2000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายสีเหลืองอ่อนเขย่าให้เข้ากัน ละลายเก็บไว้ในขวดแก้วสีชา

2 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

2.1 สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (Standard P) 1000 ppm ซึ่ง KH_2PO_4 ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 2 ชั่วโมง จำนวน 1.0984 กรัม ใส่ใน Volumetric flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเขย่าให้เข้ากัน

2.2 สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 100 ppm ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 1000 ppm ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ Volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2.3 สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ppm (Working Standard)

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 100 ppm ปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิลิตร ใส่ Volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร

3 การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

3.1 ชั่งตัวอย่างปุ๋ยจำนวน 0.3xxx-0.5xxx กรัมใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 125 มิลลิลิตร หรือใส่ Digestion tube

3.2 เติมกรดผสม $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4$ ปริมาณ 20 มิลลิลิตร นำไปย่อยบน Hot plate หรือ Digestion block ที่อุณหภูมิไม่เกิน 220°C ย่อยจนมีควันสีขาวเกิดขึ้นเหนือสารละลายหรือสารละลายมีลักษณะสรใส ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 30-40 นาที จากนั้นยกลงจาก Hot plate หรือ Digestion block ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

3.3 ถ่ายสารละลายตัวอย่าง และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นใส่ Volumetric flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน ในกรณีที่เป็นสารละลายมีตะกอนช้อนนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1

4 วิเคราะห์

4.1 ปิเปตสารละลายตัวอย่างตามปริมาณ P_2O_5 ดังนี้

4.1.1 ตัวอย่างที่มี $\text{P}_2\text{O}_5 \leq 10\%$: ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 5 มิลลิลิตรใส่ใน Volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร

4.1.2 ตัวอย่าง P_2O_5 11-23% : ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 2 มิลลิลิตร ใส่ใน Volumetric flask ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม Molybdovanadate reagent ในอัตราส่วน 1:10 ของปริมาตร Volumetric flask ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากันและทิ้งไว้ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 นำ Working standard 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ppm เติม Molybdovanadate reagent ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากันและทิ้งไว้ 30 นาที

4.1.4 นำสารละลายตัวอย่าง (ข้อ 4.1) และ Working standard (ข้อ 4.2) ไปวัดความเข้มของสี ด้วย Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร บันทึกค่า Absorbance (A) หรือ Transmittance (%T)

4.1.5 หาความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของสารละลายตัวอย่างกับกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและ ค่า A หรือ %T ของ Working standard (Standard curve)

คำนวณ

$$\%P = \frac{\text{ppm P from standard curve} \times \text{dilution factor} \times 100}{\text{wt of sample (g)} \times 10^6}$$

$$\%P_2O_5 = \frac{\%P \times [(2 \times \text{Atomic wt. of P}) + (5 \times \text{Atomic wt. of O})]}{2 \times \text{Atomic wt. of P}}$$

ก.14 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน (SW-846 Method 3050B (US.EPA, 1996))

1. สารเคมี

1.1 กรดไนตริกเข้มข้น (conc. HNO₃)

1.2 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. H₂SO₄)

1.3 กรดเปอร์คลอริกเข้มข้น (conc. HClO₄)

(เตรียมสารละลายย่อยสลาย Tri acid โดยใช้อัตราส่วน HNO₃: H₂SO₄: HClO₄ เท่ากับ 5:1:1)

2. วิธีการ

2.1 ชั่งตัวอย่างดิน 0.5 g ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 ml

2.2 เติมสารละลายกรด Tri acid ลงไป 20 ml

2.3 นำไปย่อยบนเตาให้ความร้อนโดยเริ่มที่อุณหภูมิประมาณ 80-100 °C จนกระทั่งควันสีน้ำตาลหมดไป

2.4 ทิ้งไว้ให้เย็น และถ่ายสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2.5 กรองผ่าน syringe filter 0.45 micron เก็บสารละลายไว้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีดินและสารปรับปรุงดิน

ก่อนการปรับเสถียร

ตารางที่ ข-1 ความชื้นของตัวอย่างดิน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ความชื้น		
		น้ำหนักเปียก (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	ความชื้น (%)
ดินนครปฐม (Np)	1	2.0400	1.4400	29.41
	2	2.0000	1.3800	31.00
	3	2.0100	1.3700	31.84
ดินระยอง (Ry)	1	2.0100	1.8000	10.45
	2	2.0100	1.7900	10.95
	3	2.0000	1.7800	11.00

ตารางที่ ข-2 ความหนาแน่นรวมของดินตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ความหนาแน่นรวม		
		น้ำหนักดิน (g)	V ทรงกระบอก(cm ³)	ความหนาแน่น(g/cm ³)
ดินนครปฐม (Np)	1	170.84	123.09	1.39
	2	188.33	123.09	1.53
	3	172.69	123.09	1.40
ดินระยอง (Ry)	1	230.39	123.09	1.87
	2	224.11	123.09	1.82
	3	238.08	123.09	1.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ความเป็นกรดต่างของตัวอย่างดิน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ค่าความเป็นกรดต่าง	
		น้ำหนักแห้ง (g)	ค่า pH
ดินนครปฐม (Np)	1	20.0008	7.04
	2	20.0017	7.06
	3	20.0032	7.09
ดินระยอง (Ry)	1	20.0005	3.19
	2	20.0012	3.2
	3	20.0009	3.2

ตารางที่ ข-4 อินทรีย์วัตถุของดินตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	อินทรีย์วัตถุ		OM (%)
			ปริมาตร FAS (ml)		
			Blank	ตัวอย่าง	
ดินนครปฐม (Np)	1	1.0002	20.40	6.70	4.51
	2	1.0005	20.40	6.80	4.48
	3	1.0002	20.40	6.60	4.54
ดินระยอง (Ry)	1	1.0001	20.40	9.50	3.59
	2	1.0010	20.40	10.30	3.32
	3	1.0000	20.40	9.50	3.59

หมายเหตุ : ความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS เท่ากับ 0.4902 N

ตารางที่ ข-5 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก		CEC (cmol/kg)
			ปริมาตร HCl (ml)		
			Blank	ตัวอย่าง	
ดินนครปฐม (Np)	1	5.0010	0.20	14.30	29.64
	2	5.0004	0.20	14.20	29.43
	3	5.0014	0.20	14.00	29.00
ดินระยอง (Ry)	1	5.0008	0.20	1.30	2.31
	2	5.0000	0.20	1.50	2.73
	3	5.0000	0.20	1.80	3.36

หมายเหตุ : ความเข้มข้นที่แน่นอนของ HCl เท่ากับ 0.1051 N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 อนินทรีย์วัตถุของตัวอย่างดิน

ธาตุ	ตัวอย่างดิน		สารประกอบ	ตัวอย่างดิน	
	นครปฐม (Np)	ระยอง (Ry)		นครปฐม (Np)	ระยอง (Ry)
O	51.00	51.90	Na ₂ O	-	-
Na	-	-	MgO	3.20	-
Mg	1.93	44.20	Al ₂ O ₃	-	-
Al	-	-	SiO ₂	89.40	94.60
Si	41.80	-	P ₂ O ₅	-	-
P	-	-	SO ₃	-	-
S	-	-	K ₂ O	-	0.49
K	-	0.41	CaO	3.28	-
Ca	2.35	-	TiO ₂	1.78	0.80
Ti	1.07	0.48	MnO	1.54	-
Mn	1.20	-	Fe ₂ O ₃	-	-
Fe	-	-	Cr ₂ O ₃	-	2.98
Cu	0.20	0.18	CoO	-	0.05
Zn	-	-	NiO	-	-
Ni	-	-	CuO	0.25	0.22
Cr	-	2.04	ZnO	-	-
Co	-	0.04	Rb ₂ O	-	-
Zr	-	-	Y ₂ O ₃	-	-
Hf	0.15	-	ZrO ₂	-	-
W	-	0.71	SrO	-	-
Rb	-	-	BaO	-	-
Sr	-	-	HfO ₂	0.18	-
Ba	-	-	WO ₃	-	0.90
Y	-	-			

หมายเหตุ : - คือ not detected

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 ขนาดอนุภาคดินของดินตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย น้ำหนัก ดิน (g)	ขนาดอนุภาคดิน					ประเภทเนื้อดิน
		ค่าที่อ่านจากไฮโดรมิเตอร์		% Sand	% Clay	% Silt	
		40 วินาที	2 ชั่วโมง				
ดิน นครปฐม (Np)	50.0006	32.00	23.00	29.95	51.64	18.41	ดินเหนียว
ดิน ระยอง (Ry)	50.0006	27.00	23.00	66.89	28.58	4.53	ดินร่วนเหนียว ปนทราย

ตารางที่ ข-8 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	ไนโตรเจนทั้งหมด		Total N (%)
			ปริมาตร HCl (ml)		
			Blank	ตัวอย่าง	
ดินนครปฐม (Np)	1	5.0041	0.05	0.10	0.0014
	2	5.0008	0.05	0.10	0.0014
	3	5.0021	0.05	0.20	0.0043
ดินระยอง (Ry)	1	5.0007	0.05	0.10	0.0014
	2	5.0007	0.05	0.10	0.0014
	3	5.0001	0.05	0.20	0.0043

หมายเหตุ : ความเข้มข้นที่แน่นอนของ HCl เท่ากับ 0.1033 N

ตารางที่ ข-9 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของดินตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์	
			ความเข้มข้นจากกราฟ (ppm, mg/L)	Avail. P (mg/kg)
ดินนครปฐม (Np)	1	5.0001	1.6010	4.48
	2	5.0006	1.2580	3.52
	3	5.0014	1.5010	4.20
ดินระยอง (Ry)	1	5.0007	0.1880	0.53
	2	5.0016	0.2440	0.68
	3	5.0005	0.2270	0.64

หมายเหตุ : ปริมาตรสารละลายสกัด เท่ากับ 7 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-10 ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดของดินตัวอย่าง

ตัวอย่างดิน	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม		
			ความเข้มข้นจาก AAS (mg/L)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินนครปฐม (Np)	1	0.9987	0.013	1	1.30
	2	0.9968	0.011	1	1.10
	3	0.9980	0.009	1	0.90
ดินระยอง (Ry)	1	1.0070	ND.	1	ND.
	2	1.0019	ND.	1	ND.
	3	1.0046	0.001	1	0.10

หมายเหตุ : ND. คือ not detected

ตารางที่ ข-11 ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดของดินตัวอย่าง

ตัวอย่างดิน	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	ตะกั่ว		
			ความเข้มข้นจาก AAS (mg/L)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินนครปฐม (Np)	1	0.9987	0.416	1	41.65
	2	0.9968	0.436	1	43.74
	3	0.9980	0.431	1	43.19
ดินระยอง (Ry)	1	1.0070	0.234	1	23.24
	2	1.0019	0.256	1	25.55
	3	1.0046	0.212	1	21.10

ตารางที่ ข-12 ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดของดินตัวอย่าง

ตัวอย่างดิน	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แมงกานีส		
			ความเข้มข้นจาก AAS (mg/L)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินนครปฐม (Np)	1	0.9987	0.500	20	1001.30
	2	0.9968	0.523	20	1049.36
	3	0.9980	0.558	20	1118.24
ดินระยอง (Ry)	1	1.0070	0.367	1	36.44
	2	1.0019	0.366	1	36.53
	3	1.0046	0.332	1	33.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-13 ความชื้นของตัวอย่างสารปรับปรุงดิน

ตัวอย่างสารปรับปรุงดิน	ครั้งที่	ความชื้น		
		น้ำหนักเปียก (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	ความชื้น (%)
หินฟอสเฟต (RP)	1	2.0026	1.9475	2.75
	2	2.0014	1.9470	2.72
	3	2.0080	1.9561	2.58
ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP)	1	2.0225	1.9477	3.70
	2	2.0106	1.9359	3.72
	3	2.0134	1.9302	4.13
โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP)	1	2.0177	2.0140	0.18
	2	2.0533	2.0495	0.19
	3	2.0250	2.0220	0.15

ตารางที่ ข-14 ความเป็นกรดต่างของตัวอย่างสารปรับปรุงดิน

ตัวอย่างสารปรับปรุงดิน	ครั้งที่	ค่าความเป็นกรดต่าง	
		น้ำหนักแห้ง (g)	ค่า pH
หินฟอสเฟต (RP)	1	10.0781	8.86
	2	10.0781	8.75
	3	10.0781	8.70
ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP)	1	10.0217	7.03
	2	10.0217	7.00
	3	10.0217	6.98
โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP)	1	10.0077	4.13
	2	10.0077	4.15
	3	10.0077	4.16

หมายเหตุ : อัตราส่วน 1:2 (soil : water)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-15 อนินทรีย์วัตถุของตัวอย่างสารปรับปรุงดิน

ธาตุ	ตัวอย่างสารปรับปรุง			สารประกอบ	ตัวอย่างสารปรับปรุง		
	RP	DAP	MPP		RP	DAP	MPP
O	44.80	56.30	55.80	Na ₂ O	-	-	1.20
Na	-	-	0.89	MgO	0.70	0.46	-
Mg	0.42	0.28	-	Al ₂ O ₃	27.70	-	-
Al	14.60	-	-	SiO ₂	34.90	-	-
Si	16.30	-	-	P ₂ O ₅	8.19	82.60	98.20
P	3.57	36.00	42.90	SO ₃	-	15.20	-
S	-	6.11	-	K ₂ O	0.39	-	-
K	0.32	-	-	CaO	25.30	0.54	-
Ca	18.10	0.38	-	TiO ₂	2.20	-	-
Ti	1.32	-	-	MnO	-	0.93	-
Mn	-	0.72	-	Fe ₂ O ₃	-	-	0.26
Fe	-	-	0.18	Cr ₂ O ₃	-	-	-
Cu	0.19	0.11	0.14	CoO	-	-	-
Zn	0.18	-	-	NiO	-	-	-
Ni	-	-	-	CuO	0.23	0.14	0.18
Cr	-	-	-	ZnO	0.23	-	-
Co	-	-	-	Rb ₂ O	-	-	-
Zr	0.11	-	-	Y ₂ O ₃	-	-	-
Hf	-	-	-	ZrO ₂	0.15	-	-
W	-	-	-	SrO	-	-	-
Rb	-	-	-	BaO	-	-	-
Sr	-	-	-	HfO ₂	-	-	-
Ba	-	-	-	WO ₃	-	-	-
Y	-	-	-				

หมายเหตุ :- คือ not detected

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-16 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของตัวอย่างสารปรับปรุงดิน

ตัวอย่างสารปรับปรุงดิน	ครั้งที่	ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์			
		น้ำหนักแห้ง (g)	ความเข้มข้นจากกราฟ (ppm, mg/L)	Avail. P (mg/kg)	Avail. P (g/kg)
หินฟอสเฟต (RP)	1	1.0079	0.123	138.90	0.14
	2	1.0004	0.085	96.00	0.10
	3	1.0015	0.091	103.80	0.10
ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP)	1	1.0030	0.689	358923.20	358.92
	2	1.0025	0.581	317207.00	317.21
	3	1.0179	0.831	449946.00	449.95
โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP)	1	1.1045	0.888	420099.60	420.10
	2	1.0477	0.933	490598.60	490.60
	3	1.0286	0.857	458876.10	458.88

หมายเหตุ : ปริมาตรสารละลายสกัด เท่ากับ 20 ml

ตารางที่ ข-17 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดของตัวอย่างสารปรับปรุงดิน

ตัวอย่างสารปรับปรุงดิน	ครั้งที่	ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด			
		น้ำหนักแห้ง (g)	ความเข้มข้นจากกราฟ (ppm, mg/L)	Total P (mg/kg)	Total P (g/kg)
หินฟอสเฟต (RP)	1	0.3206	0.069	19572.70	19.57
	2	0.3013	0.070	21125.10	21.13
	3	0.3057	0.072	21409.80	21.41
ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP)	1	0.3019	0.535	402741.00	402.74
	2	0.3027	0.541	406177.70	406.18
	3	0.3077	0.507	374471.90	374.47
โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP)	1	0.0380	0.625	461201.30	461.20
	2	0.3230	0.625	439783.30	439.78
	3	0.3038	0.628	469799.20	469.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-18 ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดในตัวอย่างสารปรับปรุงดิน

ตัวอย่างดินสาร ปรับปรุงดิน	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม		
			ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
หินฟอสเฟต (RP)	1	1.0182	0.074	1	7.27
	2	1.0025	0.069	1	6.88
	3	1.0036	0.074	1	7.37
ไดแอมโมเนียม ฟอสเฟต (DAP)	1	0.9073	0.041	1	4.52
	2	0.9065	0.039	1	4.30
	3	0.9076	0.041	1	4.52
โมโนโพแทสเซียม ฟอสเฟต (MPP)	1	1.0020	0.031	1	3.09
	2	1.0014	0.028	1	2.80
	3	1.0003	0.029	1	2.90

ตารางที่ ข-19 ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในตัวอย่างสารปรับปรุงดิน

ตัวอย่างดินสาร ปรับปรุงดิน	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	ตะกั่ว		
			ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
หินฟอสเฟต (RP)	1	1.0182	1.936	1	190.14
	2	1.0025	2.114	1	210.87
	3	1.0036	1.903	1	189.62
ไดแอมโมเนียม ฟอสเฟต (DAP)	1	0.9073	0.086	1	9.48
	2	0.9065	0.070	1	7.72
	3	0.9076	0.096	1	10.58
โมโนโพแทสเซียม ฟอสเฟต (MPP)	1	1.0020	0.194	1	19.36
	2	1.0014	0.178	1	17.78
	3	1.0003	0.174	1	17.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-20 ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดในตัวอย่างสารปรับปรุงดิน

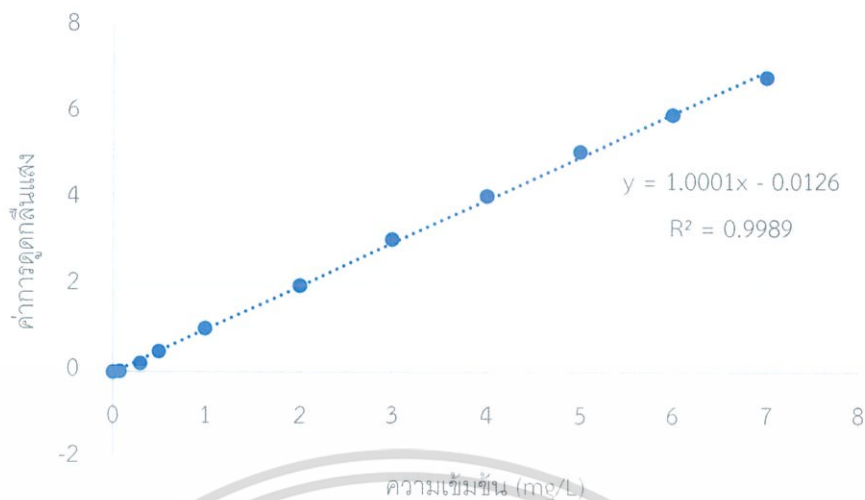
ตัวอย่างดินสาร ปรับปรุงดิน	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แมงกานีส		
			ความเข้มข้นจาก AAS (mg/L)	เงื้อมจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
หินฟอสเฟต (RP)	1	1.0182	0.900	100	8839.13
	2	1.0025	0.911	100	9087.28
	3	1.0036	0.877	100	8738.54
ไดแอมโมเนียม ฟอสเฟต (DAP)	1	0.9073	0.042	100	462.91
	2	0.9065	0.038	100	419.19
	3	0.9076	0.044	100	484.80
โมโนโพแทสเซียม ฟอสเฟต (MPP)	1	1.0020	0.114	1	11.38
	2	1.0014	0.033	1	3.30
	3	1.0003	0.029	1	2.90

กราฟมาตรฐาน

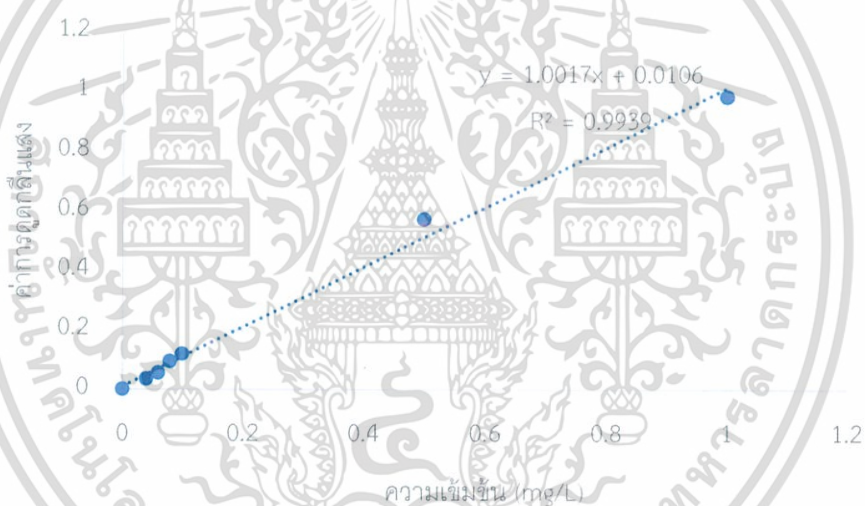


รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานของแคดเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

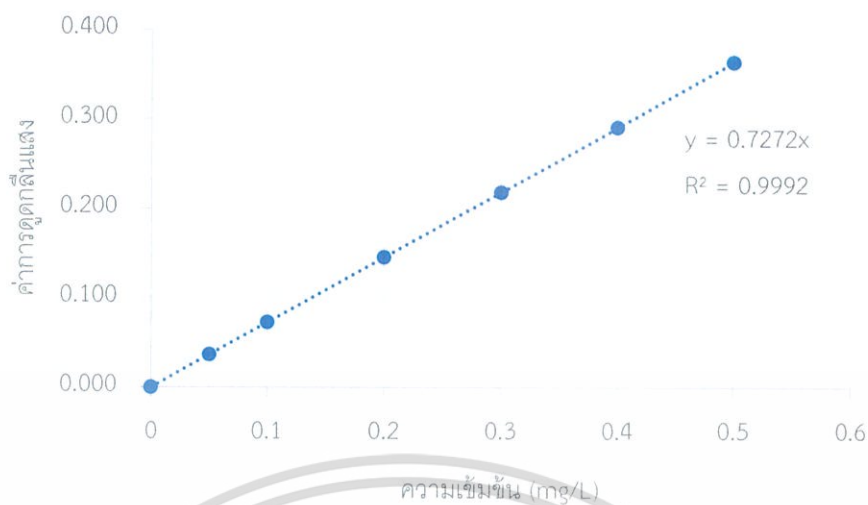


รูปที่ ข-2 กราฟมาตรฐานของตะกั่ว



รูปที่ ข-3 กราฟมาตรฐานของแมงกานีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-4 กราฟมาตรฐานของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์



รูปที่ ข-5 กราฟมาตรฐานของฟอสฟอรัสทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินหลังการปรับเสถียร

ตารางที่ ค-1 ค่าความเป็นกรดต่างในดิน

ตัวอย่างดิน	สารปรับปรุงดิน	ปริมาณ	สัญลักษณ์	น้ำหนักแห้ง (g)	ครั้งที่			
					1	2	3	
ดินนครปฐม (Np)	ชุดควบคุม ()	0	CK	10.0938	6.81	6.74	6.79	
	หินฟอสเฟต	2,500	RP1	10.0935	6.72	6.75	6.68	
		5,000	RP2	10.0318	6.75	6.71	6.72	
		7,500	RP3	10.0930	6.78	6.82	6.74	
	ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	2,500	DAP1	10.0882	6.90	6.93	6.86	
		5,000	DAP2	10.0670	6.91	6.92	6.89	
		7,500	DAP3	10.0416	6.90	6.90	6.91	
	โมโนโพแทสเซียม ฟอสเฟต	2,500	MPP1	10.0422	6.89	6.88	6.89	
		5,000	MPP2	10.0533	6.87	6.88	6.87	
		7,500	MPP3	10.0311	6.90	6.90	6.91	
	ดินระยอง (Ry)	ชุดควบคุม	0	CK	10.1723	3.59	3.59	3.61
		หินฟอสเฟต	2,500	RP1	10.0532	6.13	6.18	6.09
5,000			RP2	10.0914	6.27	6.32	6.21	
7,500			RP3	10.0553	6.55	6.57	6.50	
ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต		2,500	DAP1	10.0701	5.36	5.35	5.38	
		5,000	DAP2	10.0342	6.40	6.41	6.41	
		7,500	DAP3	10.0806	7.02	7.01	7.01	
โมโนโพแทสเซียม ฟอสเฟต		2,500	MPP1	10.0517	4.29	4.28	4.30	
		5,000	MPP2	10.1205	4.77	4.76	4.80	
		7,500	MPP3	10.0495	5.21	5.20	5.20	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 ความเข้มข้นโลหะหนักทั้งหมด (แคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินนครปฐม (Np)	CK	1	0.9464	0.487	1	51.46	5.570	1	588.55	0.586	50	3095.94
		2	0.9454	0.497	1	52.57	5.586	1	590.86	0.543	50	2871.80
		3	0.9334	0.499	1	53.46	5.637	1	603.92	0.591	50	3165.85
	RP1	1	0.9471	0.491	1	51.84	5.895	1	622.43	0.691	50	3647.98
		2	0.9515	0.480	1	50.45	5.652	1	594.01	0.738	50	3878.09
		3	0.9527	0.485	1	50.91	5.703	1	598.61	0.618	50	3243.41
	RP2	1	0.9539	0.488	1	51.16	5.979	1	626.80	0.828	50	4340.08
		2	0.9542	0.489	1	51.25	5.705	1	597.88	0.734	50	3846.15
		3	0.9562	0.491	1	51.35	5.826	1	609.29	0.755	50	3947.92
	RP3	1	0.9437	0.483	1	51.18	5.959	1	631.45	0.901	50	4773.76
		2	0.9367	0.494	1	52.74	5.813	1	620.58	0.828	50	4419.77
		3	0.9435	0.483	1	51.19	5.909	1	626.29	0.900	50	4769.48
	DAP1	1	0.9354	0.491	1	52.49	5.723	1	611.82	0.618	50	3303.40
		2	0.9307	0.497	1	53.40	5.731	1	615.77	0.526	50	2825.83
		3	0.9289	0.484	1	52.10	5.174	1	557.00	0.574	50	3089.68

ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ความเข้มข้นโลหะหนักทั้งหมด (แคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
	DAP2	1	0.9318	0.491	1	52.69	5.600	1	600.99	0.592	50	3176.65
		2	0.9358	0.502	1	53.64	5.536	1	591.58	0.556	50	2970.72
		3	0.9332	0.507	1	54.33	5.524	1	591.94	0.574	50	3075.44
	DAP3	1	0.9267	0.502	1	54.17	5.387	1	581.31	0.558	50	3010.68
		2	0.9255	0.488	1	52.73	5.569	1	601.73	0.585	50	3160.45
		3	0.9294	0.500	1	53.80	5.535	1	595.55	0.561	50	3018.08
	MPP1	1	0.9633	0.489	1	50.76	5.871	1	609.47	0.563	50	2922.25
		2	0.9597	0.500	1	52.10	5.685	1	592.37	0.588	50	3063.46
		3	0.9625	0.509	1	52.88	5.605	1	582.34	0.593	50	3080.52
MPP2	1	0.9281	0.501	1	53.98	5.420	1	583.99	0.587	50	3162.37	
	2	0.9259	0.500	1	54.00	5.635	1	608.60	0.612	50	3304.89	
	3	0.9373	0.473	1	50.46	5.469	1	583.48	0.525	50	2800.60	
MPP3	1	0.9273	0.488	1	52.63	5.501	1	593.23	0.608	50	3278.33	
	2	0.9266	0.492	1	53.10	5.553	1	599.29	0.538	50	2903.09	
	3	0.9258	0.474	1	51.20	5.479	1	591.81	0.531	50	2867.79	

ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ความเข้มข้นโลหะหนักทั้งหมด (แคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินระยอง (Ry)	CK	1	0.9379	0.499	1	53.20	5.460	1	582.15	0.379	50	2020.47
		2	0.9399	0.486	1	51.71	5.480	1	583.04	0.396	50	2106.61
		3	0.9553	0.468	1	48.99	5.339	1	558.88	0.396	50	2072.65
	RP1	1	0.9557	0.497	1	52.00	5.104	1	534.06	0.492	50	2574.03
		2	0.9484	0.489	1	51.56	5.494	1	579.29	0.495	50	2609.66
		3	0.9562	0.486	1	50.83	5.997	1	627.17	0.465	50	2431.50
	RP2	1	0.9410	0.482	1	51.22	5.675	1	603.08	0.592	50	3145.59
		2	0.9422	0.500	1	53.07	5.692	1	604.12	0.547	50	2902.78
		3	0.9522	0.476	1	49.99	5.607	1	588.85	0.593	50	3113.84
	RP3	1	0.9491	0.475	1	50.05	5.737	1	604.47	0.647	50	3408.49
		2	0.9506	0.493	1	51.86	5.778	1	607.83	0.736	50	3871.24
		3	0.9627	0.501	1	52.04	5.861	1	608.81	0.655	50	3401.89
	DAP1	1	0.9250	0.439	1	47.46	5.127	1	554.27	0.400	50	2162.16
		2	0.9249	0.482	1	52.11	5.367	1	580.28	0.402	50	2173.21
		3	0.9241	0.495	1	53.57	5.336	1	577.43	0.361	50	1953.25

ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ความเข้มข้นโลหะหนักทั้งหมด (แคดเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
DAP2		1	0.8871	0.474	1	53.43	5.131	1	578.40	0.379	50	2136.17
		2	0.8873	0.406	1	45.76	5.088	1	573.42	0.394	50	2220.22
		3	0.8854	0.470	1	53.08	4.980	1	562.46	0.369	50	2083.80
DAP3		1	0.8850	0.437	1	49.38	5.414	1	611.75	0.394	50	2225.99
		2	0.8951	0.464	1	51.84	5.066	1	565.97	0.386	50	2156.18
		3	0.9177	0.475	1	51.76	5.065	1	551.92	0.372	50	2026.81
MPP1		1	0.8767	0.457	1	52.13	5.165	1	589.14	0.372	50	2121.59
		2	0.9006	0.441	1	48.97	5.160	1	572.95	0.370	50	2054.19
		3	0.9104	0.461	1	50.64	5.089	1	558.99	0.374	50	2054.04
MPP2		1	0.9473	0.480	1	50.67	5.419	1	572.05	0.396	50	2090.15
		2	0.9455	0.472	1	49.92	5.392	1	570.28	0.383	50	2025.38
		3	0.9450	0.490	1	51.85	5.514	1	583.49	0.399	50	2111.11
MPP3		1	0.9411	0.471	1	50.05	5.445	1	578.58	0.392	50	2082.67
		2	0.9499	0.485	1	51.06	5.418	1	570.38	0.380	50	2000.21
		3	0.9450	0.481	1	50.90	5.430	1	574.60	0.408	50	2158.73

ตารางที่ ค-3 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมในดิน

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	เจือจาง	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)						ความเข้มข้น (mg/kg)					
					F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
ดินนครปฐม (Np)	CK	1	0.9952	1	-0.009	0.120	0.062	0.092	0.223	0.014	ND.	12.06	6.23	9.24	22.41	1.41
		2	0.9495	1	-0.012	0.125	0.067	0.098	0.218	0.016	ND.	13.16	7.06	10.32	22.96	1.69
		3	0.9925	1	-0.004	0.128	0.064	0.098	0.214	0.015	ND.	12.90	6.45	9.87	21.56	1.51
	RP1	1	1.0110	1	-0.001	0.080	0.045	0.119	0.260	0.031	ND.	7.91	4.45	11.77	25.72	3.07
		2	1.0050	1	0.002	0.086	0.042	0.114	0.257	0.039	0.20	8.56	4.18	11.34	25.57	3.88
		3	1.0058	1	-0.004	0.083	0.043	0.111	0.245	0.036	ND.	8.25	4.28	11.04	24.36	3.58
	RP2	1	1.0124	1	-0.004	0.077	0.036	0.097	0.269	0.069	ND.	7.61	3.56	9.58	26.57	6.82
		2	0.9730	1	-0.006	0.078	0.033	0.103	0.262	0.040	ND.	8.02	3.39	10.59	26.93	4.11
		3	0.9755	1	-0.001	0.071	0.038	0.097	0.262	0.036	ND.	7.28	3.90	9.94	26.86	3.69
	RP3	1	1.0261	1	0.000	0.074	0.032	0.067	0.276	0.078	0.00	7.21	3.12	6.53	26.90	7.60
		2	0.9948	1	-0.002	0.072	0.032	0.062	0.264	0.070	ND.	7.24	3.22	6.23	26.54	7.04
		3	0.9651	1	-0.005	0.074	0.030	0.067	0.278	0.077	ND.	7.67	3.11	6.94	28.81	7.98
	DAP1	1	0.9817	1	-0.002	0.102	0.015	0.050	0.310	0.038	ND.	10.39	1.53	5.09	31.58	3.87
		2	0.9774	1	0.001	0.100	0.008	0.052	0.326	0.036	0.10	10.23	0.82	5.32	33.35	3.68
		3	0.9793	1	-0.001	0.100	0.010	0.052	0.338	0.041	ND.	10.21	1.02	5.31	34.51	4.19
	DAP2	1	0.9804	1	-0.007	0.115	0.010	0.049	0.324	0.038	ND.	11.73	1.02	5.00	33.05	3.88
		2	0.9819	1	-0.006	0.110	0.010	0.045	0.319	0.041	ND.	11.20	1.02	4.58	32.49	4.18
		3	0.9729	1	-0.007	0.099	0.012	0.040	0.315	0.042	ND.	10.18	1.23	4.11	32.38	4.32

ตารางที่ ค-3 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมในดิน

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง (g)	เจือ จาง	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)						ความเข้มข้น (mg/kg)						
					F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6	
	DAP3	1	0.9300	1	-0.004	0.082	0.023	0.036	0.312	0.047	ND.	8.82	2.47	3.87	33.55	5.05	
		2	0.9476	1	-0.010	0.076	0.021	0.034	0.316	0.048	ND.	8.02	2.22	3.59	33.35	5.07	
		3	0.9355	1	-0.007	0.083	0.023	0.034	0.319	0.045	ND.	8.87	2.46	3.63	34.10	4.81	
	MPP1	1	0.9870	1	-0.007	0.089	0.010	0.105	0.279	0.022	ND.	9.02	1.01	10.64	28.27	2.23	
		2	0.9888	1	-0.008	0.085	0.010	0.110	0.283	0.020	ND.	8.60	1.01	11.12	28.62	2.02	
		3	0.9855	1	-0.005	0.089	0.011	0.109	0.298	0.022	ND.	9.03	1.12	11.06	30.24	2.23	
	MPP2	1	0.9647	1	-0.007	0.057	0.026	0.088	0.308	0.026	ND.	5.91	2.70	9.12	31.93	2.70	
		2	0.9773	1	-0.006	0.059	0.025	0.087	0.315	0.021	ND.	6.04	2.56	8.90	32.23	2.15	
		3	0.9376	1	-0.004	0.055	0.028	0.083	0.304	0.021	ND.	5.87	2.99	8.85	32.42	2.24	
	MPP3	1	0.9738	1	-0.010	0.036	0.058	0.070	0.296	0.041	ND.	3.70	5.96	7.19	30.40	4.21	
		2	0.9508	1	-0.010	0.038	0.052	0.073	0.309	0.041	ND.	4.00	5.47	7.68	32.50	4.31	
		3	0.9320	1	-0.009	0.037	0.059	0.072	0.309	0.045	ND.	3.97	6.33	7.73	33.15	4.83	
	ดินระยอง (Ry)	CK	1	0.9813	1	0.300	0.117	0.078	0.002	0.009	0.008	30.57	11.92	7.95	0.20	0.92	0.82
			2	1.0199	1	0.300	0.102	0.079	0.002	0.010	0.009	29.41	10.00	7.75	0.20	0.98	0.88
			3	1.0036	1	0.309	0.115	0.075	0.003	-0.005	0.009	30.79	11.46	7.47	0.30	ND.	0.90
RP1		1	0.9766	1	0.002	0.173	0.060	0.151	0.065	0.027	0.20	17.71	6.14	15.46	6.66	2.76	
		2	1.0071	1	0.002	0.207	0.063	0.176	0.067	0.029	0.20	20.55	6.26	17.48	6.65	2.88	
		3	0.9755	1	0.003	0.182	0.068	0.150	0.068	0.026	0.31	18.66	6.97	15.38	6.97	2.67	

ตารางที่ ค-3 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมในดิน

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง (g)	เจือ จาง	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)						ความเข้มข้น (mg/kg)					
					F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
RP2		1	1.0064	1	0.001	0.176	0.042	0.109	0.098	0.081	0.10	17.49	4.17	10.83	9.74	8.05
		2	0.9734	1	-0.004	0.171	0.040	0.106	0.103	0.077	ND.	17.57	4.11	10.89	10.58	7.91
		3	0.9714	1	-0.004	0.163	0.039	0.107	0.103	0.084	ND.	16.78	4.01	11.02	10.60	8.65
RP3		1	1.0137	1	-0.005	0.146	0.034	0.136	0.094	0.097	ND.	14.40	3.35	13.42	9.27	9.57
		2	0.9832	1	-0.002	0.146	0.038	0.145	0.093	0.093	ND.	14.85	3.86	14.75	9.46	9.46
		3	1.0080	1	-0.005	0.168	0.039	0.149	0.098	0.094	ND.	16.67	3.87	14.78	9.72	9.33
DAP1		1	0.9577	1	0.011	0.281	0.025	0.131	0.030	0.013	1.15	29.34	2.61	13.68	3.13	1.36
		2	0.9784	1	0.013	0.270	0.024	0.165	0.031	0.012	1.33	27.60	2.45	16.86	3.17	1.23
		3	0.9814	1	0.011	0.279	0.023	0.140	0.037	0.014	1.12	28.43	2.34	14.27	3.77	1.43
DAP2		1	0.9684	1	-0.002	0.237	0.052	0.128	0.066	0.011	ND.	24.47	5.37	13.22	6.82	1.14
		2	0.9665	1	-0.003	0.223	0.045	0.162	0.067	0.012	ND.	23.07	4.66	16.75	6.93	1.24
		3	0.9642	1	-0.003	0.236	0.034	0.127	0.070	0.013	ND.	24.48	3.53	13.17	7.26	1.35
DAP3		1	0.9685	1	-0.021	0.246	0.021	0.177	0.034	0.017	ND.	25.40	2.17	18.28	3.51	1.76
		2	0.9732	1	-0.015	0.242	0.020	0.180	0.039	0.016	ND.	24.87	2.06	18.50	4.01	1.64
		3	0.9628	1	-0.011	0.243	0.022	0.181	0.036	0.016	ND.	25.24	2.29	18.80	3.74	1.66
MPP1		1	0.9533	1	0.121	0.205	0.063	0.076	0.017	0.010	12.69	21.50	6.61	7.97	1.78	1.05
		2	0.9434	1	0.128	0.202	0.061	0.074	0.015	0.012	13.57	21.41	6.47	7.84	1.59	1.27
		3	0.9482	1	0.120	0.203	0.062	0.064	0.013	0.007	12.66	21.41	6.54	6.75	1.37	0.74

ตารางที่ ค-3 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมในดิน

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	เจือจาง	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)						ความเข้มข้น (mg/kg)					
					F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
	MPP2	1	0.9672	1	0.021	0.241	0.063	0.135	0.020	0.018	2.17	24.92	6.51	13.96	2.07	1.86
		2	0.9975	1	0.020	0.227	0.073	0.130	0.022	0.018	2.01	22.76	7.32	13.03	2.21	1.80
		3	0.9930	1	0.020	0.264	0.067	0.131	0.020	0.017	2.01	26.59	6.75	13.19	2.01	1.71
	MPP3	1	0.9921	1	0.005	0.186	0.084	0.142	0.059	0.020	0.50	18.75	8.47	14.31	5.95	2.02
		2	0.9620	1	0.003	0.185	0.080	0.142	0.053	0.021	0.31	19.23	8.32	14.76	5.51	2.18
		3	0.9633	1	-0.004	0.184	0.079	0.144	0.054	0.024	ND.	19.10	8.20	14.95	5.61	2.49

ตารางที่ ค-4 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่วในดิน

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง (g)	เจือ จาง	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)						ความเข้มข้น (mg/kg)					
					F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
ดินนครปฐม (Np)	CK	1	0.9952	1	0.096	0.092	0.581	0.251	2.517	2.306	9.65	9.24	58.38	25.22	252.91	231.71
		2	0.9495	1	0.099	0.098	0.573	0.215	2.402	2.355	10.43	10.32	60.35	22.64	252.98	248.03
		3	0.9925	1	0.096	0.097	0.578	-0.039	2.586	2.357	9.67	9.77	58.24	ND.	260.55	237.48
	RP1	1	1.0110	1	0.055	0.082	0.188	0.199	1.961	3.626	5.44	8.11	18.60	19.68	193.97	358.65
		2	1.0050	1	0.055	0.080	0.162	0.181	1.940	3.617	5.47	7.96	16.12	18.01	193.03	359.90
		3	1.0058	1	0.048	0.083	0.179	0.177	1.998	3.756	4.77	8.25	17.80	17.60	198.65	373.43
	RP2	1	1.0124	1	0.061	0.077	0.169	0.134	1.614	3.788	6.03	7.61	16.69	13.24	159.42	374.16
		2	0.9730	1	0.061	0.088	0.164	0.132	1.697	4.068	6.27	9.04	16.86	13.57	174.41	418.09
		3	0.9755	1	0.060	0.082	0.160	0.134	1.660	3.984	6.15	8.41	16.40	13.74	170.17	408.41
	RP3	1	1.0261	1	0.018	0.131	0.139	0.373	1.577	4.091	1.75	12.77	13.55	36.35	153.69	398.69
		2	0.9948	1	0.013	0.147	0.142	0.371	1.571	3.851	1.31	14.78	14.27	37.29	157.92	387.11
		3	0.9651	1	0.017	0.138	0.146	0.372	1.575	3.784	1.76	14.30	15.13	38.55	163.20	392.08
	DAP1	1	0.9817	1	0.017	0.342	0.244	0.518	2.267	2.416	1.73	34.84	24.85	52.77	230.93	246.10
		2	0.9774	1	0.018	0.344	0.228	0.517	2.280	2.492	1.84	35.20	23.33	52.90	233.27	254.96
		3	0.9793	1	0.017	0.333	0.263	0.518	2.390	2.356	1.74	34.00	26.86	52.89	244.05	240.58
	DAP2	1	0.9804	1	0.015	0.185	0.285	0.455	2.314	2.615	1.53	18.87	29.07	46.41	236.03	266.73
		2	0.9819	1	0.017	0.174	0.272	0.461	2.244	2.659	1.73	17.72	27.70	46.95	228.54	270.80
		3	0.9729	1	0.019	0.195	0.254	0.453	2.465	2.351	1.95	20.04	26.11	46.56	253.37	241.65

ตารางที่ ค-4 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่วในดิน

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	เจือจาง	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)						ความเข้มข้น (mg/kg)						
					F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6	
	DAP3	1	0.9300	1	0.014	0.192	0.211	0.366	1.872	2.703	1.51	20.65	22.69	39.35	201.29	290.65	
		2	0.9476	1	0.010	0.183	0.217	0.359	1.759	3.041	1.06	19.31	22.90	37.89	185.63	320.92	
		3	0.9355	1	0.019	0.160	0.216	0.367	1.882	3.231	2.03	17.10	23.09	39.23	201.18	345.38	
	MPP1	1	0.9870	1	0.016	0.273	0.232	0.453	2.602	2.018	1.62	27.66	23.51	45.90	263.63	204.46	
		2	0.9888	1	0.013	0.267	0.243	0.450	2.655	2.377	1.31	27.00	24.58	45.51	268.51	240.39	
		3	0.9855	1	0.013	0.261	0.241	0.452	2.694	2.256	1.32	26.48	24.45	45.87	273.36	228.92	
	MPP2	1	0.9647	1	0.012	0.139	0.220	0.487	2.243	2.587	1.24	14.41	22.81	50.48	232.51	268.17	
		2	0.9773	1	0.011	0.147	0.224	0.485	2.317	2.527	1.13	15.04	22.92	49.63	237.08	258.57	
		3	0.9376	1	0.015	0.140	0.231	0.489	2.277	2.488	1.60	14.93	24.64	52.15	242.85	265.36	
	MPP3	1	0.9738	1	0.014	0.122	0.196	0.481	2.033	2.776	1.44	12.53	20.13	49.39	208.77	285.07	
		2	0.9508	1	0.012	0.115	0.199	0.487	2.027	3.035	1.26	12.10	20.93	51.22	213.19	319.20	
		3	0.9320	1	0.016	0.128	0.192	0.493	1.793	3.087	1.72	13.73	20.60	52.90	192.38	331.22	
	ดินระยอง (Ry)	CK	1	0.9813	1	0.640	2.227	0.872	0.933	0.811	0.245	65.22	226.94	88.86	95.08	82.65	24.97
			2	1.0199	1	0.613	2.129	0.839	0.916	0.888	0.240	60.10	208.75	82.26	89.81	87.07	23.53
			3	1.0036	1	0.680	2.203	0.889	0.961	0.793	0.246	67.76	219.51	88.58	95.76	79.02	24.51
RP1		1	0.9766	1	0.014	0.245	0.865	0.962	2.028	1.849	1.43	25.09	88.57	98.51	207.66	189.33	
		2	1.0071	1	0.014	0.227	0.841	0.903	1.969	1.834	1.39	22.54	83.51	89.66	195.51	182.11	
		3	0.9755	1	0.012	0.231	0.824	0.907	1.949	1.650	1.23	23.68	84.47	92.98	199.79	169.14	

ตารางที่ ค-4 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่วในดิน

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง (g)	เงื่อ จาก	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)						ความเข้มข้น (mg/kg)					
					F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
RP2		1	1.0064	1	0.016	0.148	0.834	0.757	0.756	3.375	1.59	14.71	82.87	75.22	75.12	335.35
		2	0.9734	1	0.017	0.131	0.829	0.786	0.632	3.320	1.75	13.46	85.17	80.75	64.93	341.07
		3	0.9714	1	0.015	0.140	0.804	0.774	0.743	3.680	1.54	14.41	82.77	79.68	76.49	378.83
RP3		1	1.0137	1	0.013	0.064	0.714	0.729	0.973	3.723	1.28	6.31	70.44	71.91	95.99	367.27
		2	0.9832	1	0.015	0.064	0.718	0.737	0.919	3.647	1.53	6.51	73.03	74.96	93.47	370.93
		3	1.0080	1	0.013	0.048	0.726	0.716	0.994	3.544	1.29	4.76	72.02	71.03	98.61	351.59
DAP1		1	0.9577	1	0.051	0.144	0.456	1.407	2.353	1.061	5.33	15.04	47.61	146.91	245.69	110.79
		2	0.9784	1	0.047	0.153	0.478	1.501	2.558	1.067	4.80	15.64	48.86	153.41	261.45	109.06
		3	0.9814	1	0.046	0.158	0.406	1.388	2.341	0.992	4.69	16.10	41.37	141.43	238.54	101.08
DAP2		1	0.9684	1	0.014	0.145	0.303	0.380	2.843	1.751	1.45	14.97	31.29	39.24	293.58	180.81
		2	0.9665	1	0.016	0.152	0.301	0.377	2.968	1.853	1.66	15.73	31.14	39.01	307.09	191.72
		3	0.9642	1	0.016	0.144	0.275	0.395	2.748	1.929	1.66	14.93	28.52	40.97	285.00	200.06
DAP3		1	0.9685	1	0.020	0.134	0.338	0.473	2.108	2.367	2.07	13.84	34.90	48.84	217.66	244.40
		2	0.9732	1	0.015	0.138	0.319	0.527	1.918	2.799	1.54	14.18	32.78	54.15	197.08	287.61
		3	0.9628	1	0.013	0.123	0.296	0.571	1.898	2.479	1.35	12.78	30.74	59.31	197.13	257.48
MPP1		1	0.9533	1	0.017	0.191	0.477	1.258	2.617	1.231	1.78	20.04	50.04	131.96	274.52	129.13
		2	0.9434	1	0.020	0.178	0.470	1.267	2.591	1.196	2.12	18.87	49.82	134.30	274.64	126.78
		3	0.9482	1	0.015	0.201	0.486	1.247	2.569	1.017	1.58	21.20	51.26	131.51	270.93	107.26

ตารางที่ ค-4 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่วในดิน

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	เจือจาง	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)						ความเข้มข้น (mg/kg)					
					F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
	MPP2	1	0.9672	1	0.006	0.137	0.258	0.659	2.346	2.107	0.62	14.16	26.67	68.13	242.56	217.85
		2	0.9975	1	0.006	0.151	0.238	0.727	2.752	1.843	0.60	15.14	23.86	72.88	275.89	184.76
		3	0.9930	1	0.004	0.128	0.276	0.755	2.781	1.955	0.40	12.89	27.79	76.03	280.06	196.88
	MPP3	1	0.9921	1	0.004	0.087	0.236	0.323	2.484	2.687	0.40	8.77	23.79	32.56	250.38	270.84
		2	0.9620	1	0.002	0.090	0.216	0.356	2.284	2.330	0.21	9.36	22.45	37.01	237.42	242.20
		3	0.9633	1	0.004	0.092	0.238	0.347	2.793	2.214	0.42	9.55	24.71	36.02	289.94	229.83

ตารางที่ ค-5 การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีสในดิน

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)												ความเข้มข้น (mg/kg)					
				F1	เจือจาง	F2	เจือจาง	F3	เจือจาง	F4	เจือจาง	F5	เจือจาง	F6	เจือจาง	F1	F2	F3	F4	F5	F6
ดินนครปฐม (Np)	CK	1	0.9952	0.098	1	0.197	25	0.618	1	0.212	25	0.593	25	0.162	25	0.098	4.925	0.618	5.300	14.825	4.050
		2	0.9495	0.084	1	0.194	25	0.674	1	0.184	25	0.617	25	0.152	25	0.084	4.850	0.674	4.600	15.425	3.800
		3	0.9925	0.083	1	0.196	25	0.681	1	0.197	25	0.630	25	0.139	25	0.083	4.900	0.681	4.925	15.750	3.475
	RP1	1	1.0110	0.036	1	0.081	25	0.147	1	0.311	25	0.682	25	0.327	25	0.036	2.025	0.147	7.775	17.050	8.175
		2	1.0050	0.034	1	0.082	25	0.156	1	0.272	25	0.754	25	0.327	25	0.034	2.050	0.156	6.800	18.850	8.175
		3	1.0058	0.021	1	0.078	25	0.152	1	0.311	25	0.766	25	0.313	25	0.021	1.950	0.152	7.775	19.150	7.825
	RP2	1	1.0124	0.012	1	0.994	1	0.068	1	0.282	25	0.771	25	0.499	25	0.012	0.994	0.068	7.050	19.275	12.475
		2	0.9730	0.016	1	0.971	1	0.067	1	0.251	25	0.791	25	0.464	25	0.016	0.971	0.067	6.275	19.775	11.600
		3	0.9755	0.009	1	0.987	1	0.063	1	0.294	25	0.791	25	0.451	25	0.009	0.987	0.063	7.350	19.775	11.275
	RP3	1	1.0261	0.016	1	0.818	1	0.038	1	0.319	25	0.787	25	0.794	25	0.016	0.818	0.038	7.975	19.675	19.850
		2	0.9948	0.019	1	0.811	1	0.040	1	0.285	25	0.756	25	0.710	25	0.019	0.811	0.040	7.125	18.900	17.750
		3	0.9651	0.017	1	0.786	1	0.041	1	0.267	25	0.769	25	0.791	25	0.017	0.786	0.041	6.675	19.225	19.775
	DAP1	1	0.9817	0.184	1	0.240	25	0.706	1	0.170	25	0.523	25	0.189	25	0.184	6.000	0.706	4.250	13.075	4.725
		2	0.9774	0.184	1	0.246	25	0.607	1	0.189	25	0.529	25	0.174	25	0.184	6.150	0.607	4.725	13.225	4.350
		3	0.9793	0.183	1	0.228	25	0.718	1	0.190	25	0.588	25	0.185	25	0.183	5.700	0.718	4.750	14.700	4.625
	DAP2	1	0.9804	0.161	1	0.234	25	0.792	1	0.201	25	0.537	25	0.179	25	0.161	5.850	0.792	5.025	13.425	4.475
		2	0.9819	0.155	1	0.231	25	0.810	1	0.183	25	0.520	25	0.185	25	0.155	5.775	0.810	4.575	13.000	4.625
		3	0.9729	0.152	1	0.233	25	0.791	1	0.220	25	0.525	25	0.181	25	0.152	5.825	0.791	5.500	13.125	4.525
	DAP3	1	0.9300	0.103	1	0.203	25	0.714	1	0.166	25	0.528	25	0.198	25	0.103	5.075	0.714	4.150	13.200	4.950
		2	0.9476	0.109	1	0.196	25	0.805	1	0.168	25	0.559	25	0.190	25	0.109	4.900	0.805	4.200	13.975	4.750
		3	0.9355	0.101	1	0.201	25	0.781	1	0.162	25	0.556	25	0.198	25	0.101	5.025	0.781	4.050	13.900	4.950

ตารางที่ ค-5 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีสในดิน

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/L)												ความเข้มข้น (mg/kg)					
				F1	เจือจาง	F2	เจือจาง	F3	เจือจาง	F4	เจือจาง	F5	เจือจาง	F6	เจือจาง	F1	F2	F3	F4	F5	F6
	MPP1	1	0.9870	0.322	1	0.311	25	1.055	1	0.182	25	0.477	25	1.988	1	0.322	7.775	1.055	4.550	11.925	1.988
		2	0.9888	0.366	1	0.354	25	0.990	1	0.177	25	0.521	25	0.085	25	0.366	8.850	0.990	4.425	13.025	2.125
		3	0.9855	0.348	1	0.322	25	0.911	1	0.173	25	0.533	25	0.079	25	0.348	8.050	0.911	4.325	13.325	1.975
	MPP2	1	0.9647	0.293	1	0.298	25	1.090	1	0.184	25	0.494	25	0.137	25	0.293	7.450	1.090	4.600	12.350	3.425
		2	0.9773	0.277	1	0.290	25	0.039	25	0.182	25	0.480	25	0.149	25	0.277	7.250	0.975	4.550	12.000	3.725
		3	0.9376	0.313	1	0.295	25	0.952	1	0.180	25	0.490	25	0.134	25	0.313	7.375	0.952	4.500	12.250	3.350
	MPP3	1	0.9738	0.359	1	0.258	25	1.056	1	0.178	25	0.484	25	0.157	25	0.359	6.450	1.056	4.450	12.100	3.925
		2	0.9508	0.326	1	0.241	25	1.027	1	0.170	25	0.536	25	0.153	25	0.326	6.025	1.027	4.250	13.400	3.825
		3	0.9320	0.377	1	0.565	10	1.021	1	0.159	25	0.495	25	0.152	25	0.377	5.650	1.021	3.975	12.375	3.800
ดินระยอง (Ry)	CK	1	0.9813	0.673	25	0.312	10	0.050	1	0.193	1	0.023	1	0.076	1	1714.56	317.95	5.10	19.67	2.34	7.74
		2	1.0199	0.634	25	0.321	10	0.050	1	0.145	1	0.019	1	0.089	1	1554.07	314.74	4.90	14.22	1.86	8.73
		3	1.0036	0.673	25	0.376	10	0.056	1	0.166	1	0.021	1	0.073	1	1676.46	374.65	5.58	16.54	2.09	7.27
	RP1	1	0.9766	0.149	25	0.569	10	0.358	1	0.181	25	0.244	25	0.194	25	381.43	582.63	36.66	463.34	624.62	496.62
		2	1.0071	0.133	25	0.638	10	0.321	1	0.197	25	0.225	25	0.190	25	330.16	633.50	31.87	489.03	558.53	471.65
		3	0.9755	0.155	25	0.537	10	0.316	1	0.197	25	0.218	25	0.205	25	397.23	550.49	32.39	504.87	558.69	525.37
	RP2	1	1.0064	0.102	25	0.529	10	0.273	1	0.220	25	0.238	25	0.356	25	253.38	525.64	27.13	546.50	591.22	884.34
		2	0.9734	0.101	25	0.576	10	0.266	1	0.234	25	0.245	25	0.412	25	259.40	591.74	27.33	600.99	629.24	1058.15
		3	0.9714	0.101	25	0.478	10	0.271	1	0.231	25	0.273	25	0.407	25	259.93	492.07	27.90	594.50	702.59	1047.46
	RP3	1	1.0137	0.022	25	0.558	10	0.139	1	0.227	25	0.278	25	0.637	25	54.26	550.46	13.71	559.83	685.61	1570.98
		2	0.9832	0.025	25	0.549	10	0.111	1	0.257	25	0.263	25	0.673	25	63.57	558.38	11.29	653.48	668.73	1711.25
		3	1.0080	0.021	25	0.560	10	0.123	1	0.244	25	0.299	25	0.674	25	52.08	555.56	12.20	605.16	741.57	1671.63

ตารางที่ ค-5 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีสในดิน

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)												ความเข้มข้น (mg/kg)					
				F1	เจือจาง	F2	เจือจาง	F3	เจือจาง	F4	เจือจาง	F5	เจือจาง	F6	เจือจาง	F1	F2	F3	F4	F5	F6
DAP1		1	0.9577	0.299	25	1.021	10	0.748	1	0.962	1	0.400	1	0.012	25	780.52	1066.10	78.10	100.45	41.77	31.33
		2	0.9784	0.295	25	1.098	10	0.724	1	1.070	1	0.421	1	0.027	10	753.78	1122.24	74.00	109.36	43.03	27.60
		3	0.9814	0.284	25	1.080	10	0.781	1	0.103	10	0.376	1	0.037	10	723.46	1100.47	79.58	104.95	38.31	37.70
DAP2		1	0.9684	0.832	1	0.555	25	0.119	25	0.102	25	0.417	1	0.164	1	85.91	1432.78	307.21	263.32	43.06	16.94
		2	0.9665	0.722	1	0.544	25	0.109	25	0.103	25	0.427	1	0.149	1	74.70	1407.14	281.95	266.43	44.18	15.42
		3	0.9642	0.795	1	0.536	25	0.105	25	0.115	25	0.504	1	0.173	1	82.45	1389.75	272.25	298.17	52.27	17.94
DAP3		1	0.9685	0.383	1	0.521	25	0.072	25	0.138	25	0.642	1	0.186	1	39.55	1344.86	185.85	356.22	66.29	19.20
		2	0.9732	0.374	1	0.589	25	0.067	25	0.126	25	0.679	1	0.199	1	38.43	1513.05	172.11	323.67	69.77	20.45
		3	0.9628	0.356	1	0.587	25	0.063	25	0.140	25	0.621	1	0.199	1	36.98	1524.20	163.59	363.52	64.50	20.67
MPP1		1	0.9533	0.272	25	0.476	25	0.277	1	0.260	1	0.096	1	0.079	1	713.31	1248.30	29.06	27.27	10.07	8.29
		2	0.9434	0.233	25	0.474	25	0.291	1	0.254	1	0.099	1	0.077	1	617.45	1256.09	30.85	26.92	10.49	8.16
		3	0.9482	0.268	25	0.477	25	0.292	1	0.226	1	0.099	1	0.080	1	706.60	1257.65	30.80	23.83	10.44	8.44
MPP2		1	0.9672	0.213	25	0.419	25	0.915	1	0.809	1	0.700	1	0.094	1	550.56	1083.02	94.60	83.64	72.37	9.72
		2	0.9975	0.235	25	0.492	25	0.845	1	0.724	1	0.720	1	0.097	1	588.97	1233.08	84.71	72.58	72.18	9.72
		3	0.9930	0.236	25	0.484	25	0.934	1	0.795	1	0.711	1	0.099	1	594.16	1218.53	94.06	80.06	71.60	9.97
MPP3		1	0.9921	0.141	25	0.429	25	0.932	1	0.162	25	0.814	1	0.114	1	355.31	1081.04	93.94	408.22	82.05	11.49
		2	0.9620	0.134	25	0.400	25	0.916	1	0.171	25	0.875	1	0.117	1	348.23	1039.50	95.22	444.39	90.96	12.16
		3	0.9633	0.133	25	0.378	25	0.881	1	0.163	25	0.901	1	0.112	1	345.17	981.00	91.46	423.03	93.53	11.63

ตารางที่ ค-6 ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการเคลื่อนที่ (สกัดด้วยสารละลาย 0.05 M EDTA)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินนครปฐม (Np)	CK	1	0.7669	0.338	1	44.07	2.557	1	333.42	0.650	25	2118.92
		2	0.7595	0.323	1	42.53	2.515	1	331.14	0.667	25	2195.52
		3	0.7969	0.328	1	41.16	2.543	1	319.11	0.710	25	2227.38
	RP1	1	0.7687	0.285	1	37.08	2.257	1	293.61	0.566	25	1840.77
		2	0.8513	0.295	1	34.65	2.324	1	272.99	0.556	25	1632.80
		3	0.8275	0.298	1	36.01	2.234	1	269.97	0.556	25	1679.76
	RP2	1	0.8185	0.259	1	31.64	2.108	1	257.54	0.533	25	1627.98
		2	0.7854	0.262	1	33.36	2.111	1	268.78	0.553	25	1760.25
		3	0.8137	0.230	1	28.27	2.347	1	288.44	0.481	25	1477.82
	RP3	1	0.7879	0.288	1	36.55	2.011	1	255.24	0.495	25	1570.63
		2	0.8412	0.266	1	31.62	1.984	1	235.85	0.545	25	1619.71
		3	0.7866	0.255	1	32.42	1.812	1	230.36	0.556	25	1767.10
	DAP1	1	0.7508	0.277	1	36.89	2.166	1	288.49	0.583	25	1941.26
		2	0.7605	0.274	1	36.03	2.147	1	282.31	0.511	25	1679.82
		3	0.7552	0.273	1	36.15	2.052	1	271.72	0.565	25	1870.37

ตารางที่ ค-6 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการเคลื่อนที่ (สกัดด้วยสารละลาย 0.05 M EDTA)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
DAP2		1	0.7576	0.268	1	35.37	2.052	1	270.86	0.575	25	1897.44
		2	0.7469	0.264	1	35.35	2.134	1	285.71	0.502	25	1680.28
		3	0.7540	0.264	1	35.01	2.088	1	276.92	0.562	25	1863.40
DAP3		1	0.7580	0.261	1	34.43	2.121	1	279.82	0.510	25	1682.06
		2	0.7671	0.262	1	34.15	2.170	1	282.88	0.516	25	1681.66
		3	0.8018	0.281	1	35.05	2.175	1	271.26	0.565	25	1761.66
MPP1		1	0.7588	0.239	1	31.50	2.118	1	279.12	0.555	25	1828.55
		2	0.7572	0.226	1	29.85	2.029	1	267.96	0.550	25	1815.90
		3	0.7891	0.242	1	30.67	2.217	1	280.95	0.520	25	1647.45
MPP2		1	0.7611	0.221	1	29.04	2.079	1	273.16	0.500	25	1642.36
		2	0.7485	0.228	1	30.46	2.125	1	283.90	0.526	25	1756.85
		3	0.7698	0.227	1	29.49	2.197	1	285.40	0.516	25	1675.76
MPP3		1	0.7568	0.215	1	28.41	2.263	1	299.02	0.512	25	1691.33
		2	0.7744	0.223	1	28.80	2.028	1	261.88	0.512	25	1652.89
		3	0.7727	0.239	1	30.93	2.332	1	301.80	0.534	25	1727.71

ตารางที่ ค-6 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการเคลื่อนที่ (สกัดด้วยสารละลาย 0.05 M EDTA)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินระยอง (Ry)	CK	1	0.7788	0.381	1	48.92	2.807	1	360.43	0.799	25	2564.84
		2	0.7924	0.376	1	47.45	2.740	1	345.78	0.820	25	2587.08
		3	0.7721	0.372	1	48.18	2.799	1	362.52	0.786	25	2545.01
	RP1	1	0.8030	0.271	1	33.75	2.137	1	266.13	0.699	25	2176.21
		2	0.7954	0.270	1	33.95	2.211	1	277.97	0.708	25	2225.30
		3	0.7916	0.269	1	33.98	2.114	1	267.05	0.711	25	2245.45
	RP2	1	0.7821	0.250	1	31.97	2.008	1	256.74	0.643	25	2055.36
		2	0.7836	0.252	1	32.16	1.993	1	254.34	0.676	25	2156.71
		3	0.7980	0.288	1	36.09	2.125	1	266.29	0.728	25	2280.70
	RP3	1	0.8027	0.265	1	33.01	1.969	1	245.30	0.656	25	2043.10
		2	0.8056	0.271	1	33.64	2.091	1	259.56	0.653	25	2026.44
		3	0.8635	0.284	1	32.89	2.247	1	260.22	0.746	25	2159.81
	DAP1	1	0.8113	0.338	1	41.66	2.788	1	343.65	0.490	25	1509.92
		2	0.8128	0.326	1	40.11	2.594	1	319.14	0.490	25	1507.14
		3	0.8077	0.328	1	40.61	2.707	1	335.15	0.510	25	1578.56

ตารางที่ ค-6 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการเคลื่อนที่ (สกัดด้วยสารละลาย 0.05 M EDTA)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้น จาก AAS (mg/l)	เจือ จาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้น จาก AAS (mg/l)	เจือ จาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้น จาก AAS (mg/l)	เจือ จาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
DAP2		1	0.8369	0.308	1	36.80	2.669	1	318.92	0.557	25	1663.88
		2	0.7733	0.314	1	40.61	2.537	1	328.07	0.516	25	1668.18
		3	0.7857	0.301	1	38.31	2.606	1	331.68	0.513	25	1632.30
DAP3		1	0.7735	0.304	1	39.30	2.482	1	320.88	0.460	25	1486.75
		2	0.7951	0.305	1	38.36	2.444	1	307.38	0.455	25	1430.64
		3	0.7841	0.317	1	40.43	2.496	1	318.33	0.476	25	1517.66
MPP1		1	0.8145	0.321	1	39.41	2.671	1	327.93	0.524	25	1608.35
		2	0.8132	0.327	1	40.21	2.709	1	333.13	0.483	25	1484.87
		3	0.8040	0.318	1	39.55	2.635	1	327.74	0.477	25	1483.21
MPP2		1	0.8067	0.335	1	41.53	2.576	1	319.33	0.488	25	1512.33
		2	0.8167	0.323	1	39.55	2.520	1	308.56	0.440	25	1346.88
		3	0.8420	0.337	1	40.02	2.522	1	299.52	0.478	25	1419.24
MPP3		1	0.8020	0.308	1	38.40	2.446	1	304.99	0.336	25	1047.38
		2	0.8229	0.336	1	40.83	2.494	1	303.07	0.378	25	1148.38
		3	0.7845	0.321	1	40.92	2.404	1	306.44	0.361	25	1150.41

ตารางที่ ค-7 ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการแลกเปลี่ยน (สกัดด้วยสารละลาย 1 M NH₄OAc)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินนครปฐม (Np)	CK	1	4.7246	0.491	1	10.39	0.335	1	7.09	0.940	25	497.40
		2	4.7080	0.481	1	10.22	0.290	1	6.16	0.928	25	492.78
		3	4.7035	0.496	1	10.55	0.311	1	6.61	0.941	25	500.16
	RP1	1	4.7551	0.365	1	7.68	0.153	1	3.22	0.399	25	209.77
		2	4.7568	0.357	1	7.51	0.157	1	3.30	0.382	25	200.77
		3	4.7591	0.356	1	7.48	0.150	1	3.15	0.377	25	198.04
	RP2	1	4.7670	0.309	1	6.48	0.152	1	3.19	0.281	25	147.37
		2	4.9637	0.317	1	6.39	0.158	1	3.18	0.289	25	145.56
		3	5.2958	0.319	1	6.02	0.151	1	2.85	0.286	25	135.01
	RP3	1	4.7022	0.278	1	5.91	0.092	1	1.96	0.225	25	119.62
		2	4.6974	0.283	1	6.02	0.080	1	1.70	0.230	25	122.41
		3	4.7406	0.286	1	6.03	0.095	1	2.00	0.232	25	122.35
	DAP1	1	4.6333	0.376	1	8.12	0.147	1	3.17	0.736	25	397.13
		2	4.6258	0.401	1	8.67	0.142	1	3.07	0.745	25	402.63
		3	4.6393	0.408	1	8.79	0.147	1	3.17	0.725	25	390.68

ตารางที่ ค-7 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการแลกเปลี่ยน (สกัดด้วยสารละลาย 1 M NH₄OAc)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้น จาก AAS (mg/l)	เจือ จาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้น จาก AAS (mg/l)	เจือ จาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้น จาก AAS (mg/l)	เจือ จาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
DAP2		1	4.6391	0.307	1	6.62	0.070	1	1.51	0.622	25	335.19
		2	4.6492	0.311	1	6.69	0.080	1	1.72	0.642	25	345.22
		3	4.6648	0.304	1	6.52	0.080	1	1.71	0.618	25	331.20
DAP3		1	4.6711	0.227	1	4.86	0.098	1	2.10	0.434	25	232.28
		2	4.6500	0.226	1	4.86	0.089	1	1.91	0.419	25	225.27
		3	4.7137	0.226	1	4.79	0.082	1	1.74	0.398	25	211.09
MPP1		1	4.6846	0.458	1	9.78	0.105	1	2.24	0.794	25	423.73
		2	4.6928	0.479	1	10.21	0.127	1	2.71	0.837	25	445.90
		3	4.6662	0.460	1	9.86	0.115	1	2.46	0.819	25	438.79
MPP2		1	4.6129	0.342	1	7.41	0.066	1	1.43	0.643	25	348.48
		2	4.6176	0.357	1	7.73	0.060	1	1.30	0.677	25	366.53
		3	4.6035	0.377	1	8.19	0.070	1	1.52	0.721	25	391.55
MPP3		1	4.6364	0.360	1	7.76	0.070	1	1.51	0.700	25	377.45
		2	4.6549	0.362	1	7.78	0.079	1	1.70	0.726	25	389.91
		3	4.6093	0.339	1	7.35	0.072	1	1.56	0.685	25	371.53

ตารางที่ ค-7 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการแลกเปลี่ยน (สกัดด้วยสารละลาย 1 M NH₄OAc)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/L)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/L)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/L)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินระยอง (Ry)	CK	1	4.9942	0.153	10	30.64	6.776	1	135.68	0.712	100	1425.65
		2	4.8695	0.166	10	34.09	6.913	1	141.97	0.720	100	1478.59
		3	4.8148	0.156	10	32.40	6.711	1	139.38	0.704	100	1462.16
	RP1	1	5.1481	0.899	1	17.46	1.399	1	27.18	0.527	100	1023.68
		2	4.8323	0.832	1	17.22	1.256	1	25.99	0.466	100	964.34
		3	4.8769	0.877	1	17.98	1.310	1	26.86	0.485	100	994.48
	RP2	1	4.8873	0.829	1	16.96	0.607	1	12.42	0.450	100	920.75
		2	4.9234	0.831	1	16.88	0.697	1	14.16	0.446	100	905.88
		3	4.8192	0.836	1	17.35	0.671	1	13.92	0.464	100	962.82
	RP3	1	4.8417	0.647	1	13.36	0.309	1	6.38	0.918	25	474.01
		2	4.8468	0.612	1	12.63	0.256	1	5.28	0.859	25	443.08
		3	4.8380	0.613	1	12.67	0.240	1	4.96	0.849	25	438.71
	DAP1	1	4.7556	0.849	1	17.85	0.319	1	6.71	0.466	100	979.90
		2	5.0045	0.813	1	16.25	0.304	1	6.07	0.468	100	935.16
		3	4.7585	0.830	1	17.44	0.305	1	6.41	0.474	100	996.11

ตารางที่ ค-7 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการแลกเปลี่ยน (สกัดด้วยสารละลาย 1 M NH₄OAc)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
DAP2		1	4.7159	0.449	1	9.52	-0.059	1	1.25	0.786	25	416.68
		2	4.6428	0.418	1	9.00	0.056	1	1.21	0.737	25	396.85
		3	4.6767	0.442	1	9.45	0.056	1	1.20	0.730	25	390.23
DAP3		1	5.8151	0.167	1	2.87	0.001	1	0.02	0.267	25	114.79
		2	4.7280	0.164	1	3.47	-0.033	1	-0.70	0.239	25	126.37
		3	4.7203	0.159	1	3.37	-0.017	1	-0.36	0.256	25	135.58
MPP1		1	4.5478	0.136	10	29.90	0.268	1	5.89	0.625	100	1374.29
		2	4.5621	0.139	10	30.47	0.239	1	5.24	0.604	100	1323.95
		3	4.5671	0.137	10	30.00	0.280	1	6.13	0.621	100	1359.72
MPP2		1	4.7799	0.845	1	17.68	0.155	1	3.24	0.583	100	1219.69
		2	4.7723	0.818	1	17.14	0.153	1	3.21	0.554	100	1160.87
		3	4.7856	0.804	1	16.80	0.159	1	3.32	0.534	100	1115.85
MPP3		1	4.7988	0.515	1	10.73	0.117	1	2.44	0.326	100	679.34
		2	4.8198	0.517	1	10.73	0.117	1	2.43	0.317	100	657.70
		3	4.9674	0.549	1	11.05	0.128	1	2.58	0.342	100	688.49

ตารางที่ ค-8 ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (สกัดด้วยสารละลาย 0.005 M DTPA)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินนครปฐม (Np)	CK	1	9.3517	0.091	25	24.33	5.200	1	55.60	0.393	100	420.24
		2	9.3572	0.094	25	25.11	5.467	1	58.43	0.390	100	416.79
		3	9.3957	0.096	25	25.54	5.400	1	57.47	0.391	100	416.15
	RP1	1	9.4974	0.059	25	15.53	4.259	1	44.84	0.241	100	253.75
		2	9.5003	0.062	25	16.32	4.007	1	42.18	0.238	100	250.52
		3	9.5454	0.060	25	15.71	4.208	1	44.08	0.233	100	244.10
	RP2	1	9.5411	0.052	25	13.63	4.079	1	42.75	0.182	100	190.75
		2	9.5273	0.055	25	14.43	3.917	1	41.11	0.187	100	196.28
		3	9.5153	0.053	25	13.92	4.322	1	45.42	0.189	100	198.63
	RP3	1	9.3760	1.093	1	11.66	3.830	1	40.85	0.168	100	179.18
		2	9.3844	0.050	25	13.32	4.440	1	47.31	0.170	100	181.15
		3	9.4204	0.046	25	12.21	4.166	1	44.22	0.157	100	166.66
	DAP1	1	9.2654	0.080	25	21.59	2.004	1	21.63	0.332	100	358.32
		2	9.2512	0.079	25	21.35	1.998	1	21.60	0.301	100	325.36
		3	9.2923	0.075	25	20.18	1.999	1	21.51	0.333	100	358.36

ตารางที่ ค-8 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (สกัดด้วยสารละลาย 0.005 M DTPA)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
	DAP2	1	9.2866	0.068	25	18.31	1.732	1	18.65	0.283	100	304.74
		2	9.3278	0.069	25	18.49	1.580	1	16.94	0.260	100	278.74
		3	9.3218	0.066	25	17.70	1.793	1	19.23	0.276	100	296.08
	DAP3	1	9.2445	0.066	25	17.85	2.085	1	22.55	0.249	100	269.35
		2	9.2185	0.074	25	20.07	2.080	1	22.56	0.287	100	311.33
		3	9.2503	0.076	25	20.54	1.986	1	21.47	0.263	100	284.32
	MPP1	1	9.3546	0.089	25	23.79	1.045	1	11.17	0.255	100	272.59
		2	9.3958	0.089	25	23.68	1.072	1	11.41	0.249	100	265.01
		3	9.3760	0.096	25	25.60	1.048	1	11.18	0.258	100	275.17
MPP2	1	9.2470	0.080	25	21.63	1.110	1	12.00	0.247	100	267.11	
	2	9.1880	0.084	25	22.86	1.080	1	11.75	0.259	100	281.89	
	3	9.3395	0.084	25	22.49	1.091	1	11.68	0.259	100	277.32	
MPP3	1	9.2807	0.084	25	22.63	0.997	1	10.74	0.252	100	271.53	
	2	9.3805	0.082	25	21.85	1.049	1	11.18	0.246	100	262.25	
	3	9.3739	0.080	25	21.34	1.047	1	11.17	0.241	100	257.10	

ตารางที่ ค-8 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (สกัดด้วยสารละลาย 0.005 M DTPA)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินระยอง (Ry)	CK	1	9.7762	0.177	25	45.26	1.344	10	137.48	0.642	100	656.70
		2	9.6414	0.175	25	45.38	1.456	10	151.02	0.626	100	649.28
		3	9.6673	0.167	25	43.19	1.590	10	164.47	0.633	100	654.78
	RP1	1	9.8801	0.097	25	24.54	3.429	1	34.71	0.389	100	393.72
		2	9.8528	0.098	25	24.87	3.501	1	35.53	0.381	100	386.69
		3	9.6850	0.094	25	24.26	3.584	1	37.01	0.398	100	410.94
	RP2	1	9.9144	0.091	25	22.95	2.075	1	20.93	0.360	100	363.11
		2	9.9185	0.094	25	23.69	2.194	1	22.12	0.390	100	393.20
		3	9.8959	0.090	25	22.74	2.104	1	21.26	0.347	100	350.65
	RP3	1	10.0494	0.070	25	17.41	2.114	1	21.04	0.276	100	274.64
		2	9.7749	0.077	25	19.69	2.312	1	23.65	0.297	100	303.84
		3	9.6545	0.081	25	20.97	2.321	1	24.04	0.299	100	309.70
	DAP1	1	9.5877	0.147	25	38.33	5.220	1	54.44	0.578	100	602.86
		2	9.5850	0.150	25	39.12	5.217	1	54.43	0.554	100	577.99
		3	9.7614	0.154	25	39.44	6.228	1	63.80	0.594	100	608.52

ตารางที่ ค-8 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (สกัดด้วยสารละลาย 0.005 M DTPA)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
DAP2		1	9.5398	0.138	25	36.16	0.597	1	6.26	0.391	100	409.86
		2	9.4777	0.136	25	35.87	0.642	1	6.77	0.374	100	394.61
		3	9.6311	0.148	25	38.42	0.672	1	6.98	0.440	100	456.85
DAP3		1	9.4063	0.349	10	37.10	0.768	1	8.16	0.315	100	334.88
		2	9.3767	0.379	10	40.42	0.769	1	8.20	0.363	100	387.13
		3	9.3463	0.332	10	35.52	0.721	1	7.71	0.328	100	350.94
MPP1		1	9.2482	0.359	10	38.82	4.497	1	48.63	0.492	100	532.00
		2	9.1896	0.358	10	38.96	4.544	1	49.45	0.489	100	532.12
		3	9.1559	0.357	10	38.99	4.958	1	54.15	0.498	100	543.91
MPP2		1	9.5287	0.345	10	36.21	1.960	1	20.57	0.386	100	405.09
		2	9.6457	0.334	10	34.63	2.250	1	23.33	0.359	100	372.19
		3	9.6024	0.365	10	38.01	2.173	1	22.63	0.379	100	394.69
MPP3		1	9.7465	0.264	10	27.09	2.310	1	23.70	0.329	100	337.56
		2	9.5852	0.301	10	31.40	2.019	1	21.06	0.343	100	357.84
		3	9.6440	0.290	10	30.07	1.966	1	20.39	0.380	100	394.03

ตารางที่ ค-9 ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (สกัดด้วยสารละลาย 0.01 M CaCl₂)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินนครปฐม (Np)	CK	1	4.6685	0.047	1	1.01	-0.077	1	1.65	1.038	10	222.34
		2	4.7138	0.043	1	0.91	0.087	1	1.85	0.977	10	207.26
		3	4.6850	0.050	1	1.07	0.070	1	1.49	1.002	10	213.87
	RP1	1	4.7432	-0.011	1	-0.23	-0.069	1	-1.45	0.640	1	13.49
		2	4.7354	-0.002	1	-0.04	-0.056	1	-1.18	0.665	1	14.04
		3	4.7428	-0.002	1	-0.04	-0.041	1	-0.86	0.637	1	13.43
	RP2	1	4.7923	0.000	1	0.00	-0.099	1	-2.07	0.450	1	9.39
		2	4.7856	-0.002	1	-0.04	-0.011	1	-0.23	0.432	1	9.03
		3	4.7585	-0.002	1	-0.04	-0.042	1	-0.88	0.442	1	9.29
	RP3	1	4.6959	0.000	1	0.00	-0.033	1	-0.70	0.326	1	6.94
		2	4.7317	-0.003	1	-0.06	-0.040	1	-0.85	0.349	1	7.38
		3	4.7135	-0.006	1	-0.13	-0.029	1	-0.62	0.359	1	7.62
	DAP1	1	4.6410	0.013	1	0.28	0.032	1	0.69	0.139	25	74.88
		2	4.6264	0.012	1	0.26	0.045	1	0.97	0.132	25	71.33
		3	4.6505	0.020	1	0.43	0.034	1	0.73	0.139	25	74.72

ตารางที่ ค-9 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (สกัดด้วยสารละลาย 0.01 M CaCl₂)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
	DAP2	1	4.6937	0.013	1	0.28	0.075	1	1.60	0.106	25	56.46
		2	4.6418	0.010	1	0.22	0.031	1	0.67	0.099	25	53.32
		3	4.6437	0.017	1	0.37	0.035	1	0.75	0.112	25	60.30
	DAP3	1	4.6401	0.007	1	0.15	0.043	1	0.93	0.075	25	40.41
		2	4.6642	0.005	1	0.11	0.008	1	0.17	0.070	25	37.52
		3	4.6540	0.000	1	0.00	0.012	1	0.26	0.069	25	37.06
	MPP1	1	4.7086	0.019	1	0.40	0.029	1	0.62	0.197	25	104.60
		2	4.6920	0.011	1	0.23	0.045	1	0.96	0.182	25	96.97
		3	4.7779	0.013	1	0.27	0.052	1	1.09	0.190	25	99.42
MPP2	1	4.5972	0.013	1	0.28	0.040	1	0.87	0.180	25	97.89	
	2	4.5873	0.014	1	0.31	0.050	1	1.09	0.182	25	99.19	
	3	4.5917	0.010	1	0.22	0.040	1	0.87	0.178	25	96.91	
MPP3	1	4.7249	0.012	1	0.25	0.028	1	0.59	0.205	25	108.47	
	2	4.6262	0.011	1	0.24	0.061	1	1.32	0.195	25	105.38	
	3	4.6420	0.015	1	0.32	0.038	1	0.82	0.210	25	113.10	

ตารางที่ ค-9 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (สกัดด้วยสารละลาย 0.01 M CaCl₂)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
ดินระยอง (Ry)	CK	1	4.8937	0.195	10	39.85	3.871	1	79.10	0.678	100	1385.45
		2	4.9273	0.191	10	38.76	4.000	1	81.18	0.669	100	1357.74
		3	4.9625	0.203	10	40.91	4.553	1	91.75	0.673	100	1356.17
	RP1	1	4.8322	0.171	1	3.54	0.088	1	1.82	0.510	50	527.71
		2	4.9612	0.164	1	3.31	0.080	1	1.61	0.563	50	567.40
		3	4.8382	0.158	1	3.27	0.082	1	1.69	0.518	50	535.32
	RP2	1	4.8552	0.119	1	2.45	0.032	1	0.66	0.443	50	456.21
		2	4.8257	0.118	1	2.45	0.032	1	0.66	0.435	50	450.71
		3	5.3427	0.124	1	2.32	0.041	1	0.77	0.427	50	399.61
	RP3	1	4.8590	0.058	1	1.19	0.051	1	1.05	0.377	25	193.97
		2	4.8615	0.051	1	1.05	0.051	1	1.05	0.370	25	190.27
		3	4.8428	0.054	1	1.12	0.049	1	1.01	0.369	25	190.49
	DAP1	1	4.7863	0.354	1	7.40	0.051	1	1.07	0.841	50	878.55
		2	5.1027	0.376	1	7.37	0.053	1	1.04	0.912	50	893.64
		3	4.7941	0.368	1	7.68	0.057	1	1.19	0.870	50	907.37

ตารางที่ ค-9 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักในการประเมินศักยภาพการดูดซึมโดยพืช (สกัดด้วยสารละลาย 0.01 M CaCl₂)

ตัวอย่างดิน	สัญลักษณ์	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	แคดเมียม			ตะกั่ว			แมงกานีส		
				ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)	ความเข้มข้นจาก AAS (mg/l)	เจือจาง	ความเข้มข้น (mg/kg)
	DAP2	1	4.7187	0.223	1	4.73	0.049	1	1.04	0.484	50	512.85
		2	4.6720	0.203	1	4.35	0.047	1	1.01	0.494	50	528.68
		3	4.7130	0.219	1	4.65	0.051	1	1.08	0.493	50	523.02
	DAP3	1	4.6342	0.159	1	3.43	0.049	1	1.06	0.420	25	226.58
		2	4.6371	0.161	1	3.47	0.046	1	0.99	0.418	25	225.36
		3	4.6621	0.161	1	3.45	0.048	1	1.03	0.443	25	237.55
	MPP1	1	4.5592	0.937	1	20.55	0.064	1	1.40	0.481	100	1055.01
		2	4.6293	1.029	1	22.23	0.069	1	1.49	0.452	100	976.39
		3	4.5617	1.047	1	22.95	0.066	1	1.45	0.470	100	1030.32
MPP2	1	4.7683	0.529	1	11.09	0.019	1	0.40	0.852	50	893.40	
	2	4.8380	0.528	1	10.91	0.017	1	0.35	0.892	50	921.87	
	3	4.8021	0.530	1	11.04	0.017	1	0.35	0.862	50	897.52	
MPP3	1	4.8053	0.285	1	5.93	0.004	1	0.08	1.048	25	545.23	
	2	4.7693	0.279	1	5.85	0.004	1	0.08	1.070	25	560.88	
	3	4.8183	0.282	1	5.85	0.008	1	0.17	1.039	25	539.09	

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิตินี้ใช้โปรแกรม Minitab (Version 16) ชุดข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มอักษรแตกต่างกัน คือชุดข้อมูลที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (p -value < 0.05) และข้อมูลที่มีกลุ่มอักษรเหมือนกัน คือชุดข้อมูลที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (p -value > 0.05)

A = ประเภทของสารปรับปรุงดิน (A1 = ชุดการทดลองที่ไม่ผสมสารปรับปรุงดิน, A2 = ชุดการทดลองที่ผสมปุ๋ยหินฟอสเฟต (RP), A3 = ชุดการทดลองที่ผสมปุ๋ยโดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP), A4 = ชุดการทดลองที่ผสมปุ๋ยโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (MPP))

B = ปริมาณของสารปรับปรุงดิน (B1 = ปริมาณ 2,500 mgP/kg, B2 = ปริมาณ 5,000 mgP/kg, B3 = ปริมาณ 7,500 mgP/kg)

ตารางที่ ง-1 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดินหลังจากการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินนครปฐม

A	B	N	Mean	Grouping		
3	2	3	6.907	A		
4	3	3	6.903	A		
3	3	3	6.903	A		
3	1	3	6.897	A		
4	1	3	6.887	A		
4	2	3	6.873	A		
2	3	3	6.780		B	
1	3	3	6.780		B	
1	2	3	6.780		B	
1	1	3	6.780		B	
2	2	3	6.727		B	
2	1	3	6.717		B	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างในดินหลังจากการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินระยอง

A	B	N	Mean	Grouping											
3	3	3	7.013	A											
2	3	3	6.540		B										
3	2	3	6.407			C									
2	2	3	6.267				D								
2	1	3	6.133					E							
3	1	3	5.363						F						
4	3	3	5.203							G					
4	2	3	4.777								H				
4	1	3	4.290									I			
1	3	3	3.597											J	
1	1	3	3.597											J	
1	2	3	3.597											J	

ตารางที่ ง-3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในดินนครปฐมหลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping											
3	3	3	53.57	A											
3	2	3	53.56	A											
4	2	3	52.82	A											
3	1	3	52.67	A											
1	3	3	52.50	A											
1	2	3	52.50	A											
1	1	3	52.50	A											
4	3	3	52.31	A											
4	1	3	51.92	A											
2	3	3	51.70	A											
2	2	3	51.25	A											
2	1	3	51.07	A											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของตะกั่วในดินนครปฐมหลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping			
2	3	3	626.1	A			
2	2	3	611.3	A			
2	1	3	605.0	A			
3	1	3	594.9	A			
3	2	3	594.8	A			
4	3	3	594.8	A			
4	1	3	594.7	A			
1	3	3	594.4	A			
1	2	3	594.4	A			
1	1	3	594.4	A			
3	3	3	592.9	A			
4	2	3	592.0	A			

ตารางที่ ง-5 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของแมงกานีสในดินนครปฐมหลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping			
2	3	3	4654	A			
2	2	3	4045	B			
2	1	3	3590	B	C		
4	2	3	3089			C	
3	2	3	3074			C	
3	1	3	3073			C	
3	3	3	3063			C	
1	3	3	3045			C	
1	2	3	3045			C	
1	1	3	3045			C	
4	1	3	3022			C	
4	3	3	3016			C	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-6 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในดินระยองหลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping			
2	1	3	51.46	A			
2	2	3	51.43	A			
2	3	3	51.32	A			
1	3	3	51.30	A			
1	2	3	51.30	A			
1	1	3	51.30	A			
3	1	3	51.05	A			
3	3	3	50.99	A			
4	2	3	50.81	A			
3	2	3	50.76	A			
4	3	3	50.67	A			
4	1	3	50.58	A			

ตารางที่ ง-7 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของตะกั่วในดินระยองหลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping			
2	3	3	607.0	A			
2	2	3	598.7	A			
2	1	3	580.2	A			
3	3	3	576.5	A			
4	2	3	575.3	A			
1	3	3	574.7	A			
1	2	3	574.7	A			
1	1	3	574.7	A			
4	3	3	574.5	A			
4	1	3	573.7	A			
3	2	3	571.4	A			
3	1	3	570.7	A			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-8 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งหมดของแมงกานีสในดินระยองหลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping				
2	3	3	4654	A				
2	2	3	4045		B			
2	1	3	3590			C		
3	2	3	3089				D	
3	3	3	3074				D	
3	1	3	3073				D	
4	3	3	3063				D	
4	1	3	3045				D	
4	2	3	3045				D	
1	2	3	3045				D	
1	3	3	3022				D	
1	1	3	3016				D	

ตารางที่ ง-9 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมที่ไม่เสถียร หลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินนครปฐม

A	B	N	Mean	Grouping				
1	3	3	19.285	A				
1	2	3	19.285	A				
1	1	3	19.285	A				
2	1	3	12.609		B			
3	2	3	12.127		B	C		
3	1	3	11.434		B	C	D	
2	2	3	11.248		B	C	D	
3	3	3	10.953		B	C	D	
2	3	3	10.520			C	D	
4	1	3	9.928				D	E
4	3	3	9.806				D	E
4	2	3	8.684					E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-10 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่วที่ไม่เสถียร หลังการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินนครปฐม

A	B	N	Mean	Grouping							
1	3	3	78.68	A							
1	2	3	78.68	A							
1	1	3	78.68	A							
3	1	3	61.46		B						
4	1	3	52.65			C					
3	2	3	48.24				D				
3	3	3	43.44					E			
4	2	3	39.57					E			
4	3	3	34.81						F		
2	2	3	31.15						F	G	
2	1	3	30.84						F	G	
2	3	3	29.87							G	

ตารางที่ ง-11 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีสที่ไม่เสถียร หลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินนครปฐม

A	B	N	Mean	Grouping							
4	1	3	968.00	A							
4	2	3	902.36		B						
4	3	3	779.95			C					
3	1	3	695.35				D				
3	2	3	691.99				D				
3	3	3	626.18					E			
1	3	3	576.04					E			
1	2	3	576.04					E			
1	1	3	576.04					E			
2	1	3	217.45						F		
2	2	3	107.66							G	
2	3	3	86.63							G	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-12 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแคดเมียมที่ไม่เสถียร หลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินระยอง

A	B	N	Mean	Grouping						
1	3	3	49.11	A						
1	2	3	49.11	A						
1	1	3	49.11	A						
4	1	3	40.95		B					
4	2	3	33.68			C				
3	1	3	32.12			C	D			
3	2	3	28.52				D	E		
4	3	3	27.63					E		
3	3	3	27.34					E		
2	1	3	25.67					E		
2	2	3	21.41						F	
2	3	3	19.00							F

ตารางที่ ง-13 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของตะกั่วที่ไม่เสถียร หลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินระยอง

A	B	N	Mean	Grouping						
1	3	3	369.33	A						
1	2	3	369.33	A						
1	1	3	369.33	A						
2	1	3	110.64		B					
2	2	3	99.42		B	C				
2	3	3	79.06			C	D			
4	1	3	72.23				D	E		
3	1	3	66.48				D	E	F	
3	3	3	48.06					E	F	G
3	2	3	47.12						F	G
4	2	3	40.72							G
4	3	3	33.22							G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-14 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของแมงกานีสที่ไม่เสถียร หลังการปรับปรุงด้วยปุ๋ยฟอสเฟตในดินระยอง

A	B	N	Mean	Grouping						
1	1	3	1989.3	A						
1	3	3	1989.3	A						
1	2	3	1989.3	A						
4	1	3	1963.4	A	B					
3	1	3	1926.1	A	B					
4	2	3	1847.2	A	B	C				
3	2	3	1778.0		B	C				
3	3	3	1672.9			C	D			
4	3	3	1477.0				D			
2	1	3	992.1						E	
2	2	3	821.5						E	F
2	3	3	623.8							F

ตารางที่ ง-15 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินนครปฐมภายใต้การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping						
1	3	3	42.59	A						
1	2	3	42.59	A						
1	1	3	42.59	A						
3	1	3	36.36		B					
2	1	3	35.91		B					
3	2	3	35.24		B	C				
3	3	3	34.54		B	C	D			
2	3	3	33.53		B	C	D	E		
2	2	3	31.09			C	D	E		
4	1	3	3067					D	E	
4	2	3	2966						E	
4	3	3	2938							E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-16 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการเคลื่อนที่ของตะกั่วในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping			
1	3	3	327.9	A			
1	2	3	327.9	A			
1	1	3	327.9	A			
4	3	3	287.6		B		
3	1	3	280.8		B		
4	2	3	280.8		B		
2	1	3	280.1		B		
3	3	3	278.0		B		
3	2	3	277.8		B		
4	1	3	276.0		B		
2	2	3	271.6	B	C		
2	3	3	240.5		C		

ตารางที่ ง-17 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการเคลื่อนที่ของแมงกานีสในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping			
1	3	3	2181	A			
1	2	3	2181	A			
1	1	3	2181	A			
3	1	3	1830		B		
3	2	3	1814		B		
4	1	3	1764		B		
2	1	3	1718		B		
3	3	3	1708		B		
4	2	3	1692		B		
4	3	3	1691		B		
2	3	3	1652		B		
2	2	3	1622		B		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-18 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการแลกเปลี่ยนของแคดเมียมในดินนครปฐมหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping				
1	2	3	10.385	A				
1	1	3	10.385	A				
1	3	3	10.385	A				
4	1	3	9.947	A				
3	1	3	8.814		B			
4	2	3	7.778			C		
4	3	3	7.632			C		
2	1	3	7.554			C		
3	2	3	6.608				D	
2	2	3	6.297				D	
2	3	3	5.990				D	
3	3	3	4.838					E

ตารางที่ ง-19 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการแลกเปลี่ยนของตะกั่วในดินนครปฐมหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping				
1	3	3	6.621	A				
1	2	3	6.621	A				
1	1	3	6.621	A				
2	1	3	3.223		B			
3	1	3	3.137		B			
2	2	3	3.074		B			
4	1	3	2.471		B	C		
3	3	3	1.917			C	D	
2	3	3	1.888			C	D	
3	2	3	1.648				D	
4	3	3	1.590				D	
4	2	3	1.417				D	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-20 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการแลกเปลี่ยนของแมงกานีสในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping							
1	3	3	496.8	A							
1	2	3	496.8	A							
1	1	3	496.8	A							
4	1	3	436.1		B						
3	1	3	396.8			C					
4	3	3	379.6			C	D				
4	2	3	368.9				D				
3	2	3	337.2					E			
3	3	3	222.9						F		
2	1	3	202.9						F		
2	2	3	142.6							G	
2	3	3	121.5							G	

ตารางที่ ง-21 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของแคดเมียมในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping							
1	3	3	25.00	A							
1	2	3	25.00	A							
1	1	3	25.00	A							
4	1	3	24.35	A	B						
4	2	3	22.32		B	C					
4	3	3	21.94			C					
3	1	3	21.04			C	D				
3	3	3	19.49				D	E			
3	2	3	18.17					E			
2	1	3	15.85						F		
2	2	3	13.99						F	G	
2	3	3	12.39							G	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-22 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของตะกั่วในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping			
1	3	3	57.17	A			
1	2	3	57.17	A			
1	1	3	57.17	A			
2	3	3	44.13		B		
2	1	3	43.70		B		
2	2	3	43.10		B		
3	3	3	22.20			C	
3	1	3	21.58			C	
3	2	3	18.27			C	
4	2	3	11.81				D
4	1	3	11.25				D
4	3	3	11.03				D

ตารางที่ ง-23 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของแมงกานีสในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping			
1	3	3	417.7	A			
1	2	3	417.7	A			
1	1	3	417.7	A			
3	1	3	347.3		B		
3	2	3	293.2			C	
3	3	3	288.3			C	
4	2	3	275.4			C	D
4	1	3	270.9			C	D
4	3	3	263.6			C	D
2	1	3	249.5				D
2	2	3	195.2				E
2	3	3	175.7				E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-24 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของแคดเมียมในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping			
1	1	3	0.995399	A			
1	3	3	0.995399	A			
1	2	3	0.995399	A			
3	1	3	0.323185		B		
4	1	3	0.303348		B		
3	2	3	0.286163		B		
4	3	3	0.271629		B	C	
4	2	3	0.268585		B	C	
3	3	3	0.086019			C	D
2	3	3	0.000000				D
2	2	3	0.000000				D
2	1	3	0.000000				D

ตารางที่ ง-25 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของตะกั่วในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping			
1	3	3	1.66304	A			
1	1	3	1.66304	A			
1	2	3	1.66304	A			
3	2	3	0.94373	A	B		
4	2	3	0.90993	A	B		
4	3	3	0.88777		B		
4	1	3	0.79776		B		
3	1	3	0.45202		B		
3	3	3	0.00000		B	C	
2	3	3	0.00000			C	
2	2	3	0.00000			C	
2	1	3	0.00000			C	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-26 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึ่มโดยพืชของแมงกานีสในดินนครปฐมภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping						
1	3	3	214.493	A						
1	2	3	214.493	A						
1	1	3	214.493	A						
4	3	3	108.981		B					
4	1	3	100.328		B					
4	2	3	97.996		B					
3	1	3	73.643			C				
3	2	3	56.692				D			
3	3	3	38.331					E		
2	1	3	13.656							F
2	2	3	9.235							F
2	3	3	7.311							F

ตารางที่ ง-27 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping						
1	3	3	48.18	A						
1	2	3	48.18	A						
1	1	3	48.18	A						
3	1	3	40.79		B					
4	2	3	40.37		B					
4	3	3	40.05		B					
4	1	3	39.72		B					
3	3	3	39.36		B					
3	2	3	38.57		B					
2	1	3	33.89				C			
2	2	3	33.40				C			
2	3	3	33.18				C			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-28 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการเคลื่อนที่ของตะกั่วในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping			
1	3	3	356.2	A			
1	2	3	356.2	A			
1	1	3	356.2	A			
3	1	3	332.6		B		
4	1	3	329.6		B	C	
3	2	3	326.2		B	C	D
3	3	3	315.5		B	C	D
4	2	3	309.1			C	D
4	3	3	304.8				D
2	1	3	270.4				E
2	2	3	259.1				E
2	3	3	255.0				E

ตารางที่ ง-29 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการเคลื่อนที่ของแมงกานีสในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping			
1	3	3	2566	A			
1	2	3	2566	A			
1	1	3	2566	A			
2	1	3	2216		B		
2	2	3	2164		B		
2	3	3	2076		B		
3	2	3	1655			C	
3	1	3	1532			C	D
4	1	3	1525			C	D
3	3	3	1478				D
4	2	3	1426				D
4	3	3	1115				E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-30 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการแลกเปลี่ยนของแคดเมียมในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping					
1	2	3	32.375	A					
1	1	3	32.375	A					
1	3	3	32.375	A					
4	1	3	30.123	A					
2	1	3	17.554		B				
4	2	3	17.206		B				
3	1	3	17.180		B				
2	2	3	17.063		B				
2	3	3	12.887		C				
4	3	3	10.837		C	D			
3	2	3	9.325			D			
3	3	3	3.236						E

ตารางที่ ง-31 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการแลกเปลี่ยนของตะกั่วในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping						
1	3	3	139.008	A						
1	2	3	139.008	A						
1	1	3	139.008	A						
2	1	3	26.676		B					
2	2	3	13.500		C					
3	1	3	6.397			D				
4	1	3	5.745			D	E			
2	3	3	5.542			D	E			
4	2	3	3.257			D	E	F		
4	3	3	2.481			D	E	F		
3	2	3	0.218				E	F		
3	3	3	0.347						F	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-32 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการแลกเปลี่ยนของแมงกานีสในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping							
1	2	3	1455.5	A							
1	1	3	1455.5	A							
1	3	3	1455.5	A							
4	1	3	1352.7		B						
4	2	3	1165.5			C					
2	1	3	994.2				D				
3	1	3	970.4				D				
2	2	3	929.8				D				
4	3	3	675.2					E			
2	3	3	451.9						F		
3	2	3	401.3						F		
3	3	3	125.6							G	

ตารางที่ ง-33 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของแคดเมียมในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping							
1	2	3	44.61	A							
1	3	3	44.61	A							
1	1	3	44.61	A							
3	1	3	38.97		B						
4	1	3	38.97		B						
3	3	3	37.68		B						
3	2	3	36.82		B						
4	2	3	36.28		B						
4	3	3	29.52					C			
2	1	3	24.56						D		
2	2	3	23.13						D	E	
2	3	3	19.36							E	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-34 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของตะกั่วในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping					
1	2	3	150.988	A					
1	1	3	150.988	A					
1	3	3	150.988	A					
3	1	3	57.559		B				
4	1	3	50.741		B	C			
2	1	3	35.748			C	D		
2	3	3	22.910				D	E	
4	2	3	22.175				D	E	
4	3	3	21.717				D	E	
2	2	3	21.437				D	E	
3	3	3	8.027					E	
3	2	3	6.678					E	

ตารางที่ ง-35 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของแมงกานีสในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping						
1	3	3	653.6	A						
1	2	3	653.6	A						
1	1	3	653.6	A						
3	1	3	596.5		B					
4	1	3	536.0			C				
3	2	3	420.4				D			
2	1	3	397.1				D	E		
4	2	3	390.7				D	E		
2	2	3	369.0				D	E		
4	3	3	363.1					E		
3	3	3	357.7					E		
2	3	3	296.1							F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-36 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของแคดเมียมในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping									
1	3	3	39.839	A									
1	2	3	39.839	A									
1	1	3	39.839	A									
4	1	3	21.911		B								
4	2	3	11.015			C							
3	1	3	7.480				D						
4	3	3	5.878				D	E					
3	2	3	4.573					E	F				
3	3	3	3.452						F	G			
2	1	3	3.370						F	G			
2	2	3	2.406							G	H		
2	3	3	1.119								H		

ตารางที่ ง-37 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึมโดยพืชของตะกั่วในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping									
1	3	3	84.0101	A									
1	2	3	84.0101	A									
1	1	3	84.0101	A									
2	1	3	1.7095				B						
4	1	3	1.4470				B						
3	1	3	1.0977				B						
3	2	3	1.0422				B						
2	3	3	1.0368				B						
3	3	3	1.0263				B						
2	2	3	0.6965				B						
4	2	3	0.3680				B						
4	3	3	0.1110				B						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-38 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ในการศึกษาศักยภาพการดูดซึ่มโดยพืชของแมงกานีสในดินระยองภายหลังจากการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

A	B	N	Mean	Grouping						
1	1	3	1366.5	A						
1	2	3	1366.5	A						
1	3	3	1366.5	A						
4	1	3	1020.6		B					
4	2	3	904.3			C				
3	1	3	893.2			C				
4	3	3	548.4				D			
2	1	3	543.5				D			
3	2	3	521.5				D			
2	2	3	435.5					E		
3	3	3	229.8						F	
2	3	3	191.6							F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวณัฐนันท์ รอดสา
วัน เดือน ปีเกิด	18 มีนาคม พ.ศ. 2535
ที่อยู่	31/6 หมู่ 2 ตำบลบางขนาก อำเภอบางน้ำเปรี้ยว จังหวัด ฉะเชิงเทรา 24150
ประวัติการศึกษา	2553 วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง เกรดเฉลี่ย 2.66 2557 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง เกรดเฉลี่ย 3.93
ผลงานวิชาการ	นำเสนอผลงานเรื่อง การตรึงแคดเมียมในดินโดยใช้ไดแอมโมเนียม ฟอสเฟต, โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต และหินฟอสเฟต (Immobilization of Cadmium in Soil Using Diammonium Phosphate, Monopotassium Phosphate and Rock Phosphate.) งานการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 16 ระหว่างวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2560 ณ โรงแรมเดอะทวิน ทาวเวอร์ รongเมือง กรุงเทพฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้