

การปรับเสถียรแอมโมเนียมในดินที่ปนเปื้อนด้วยปุ๋ยฟอสเฟต



T107741



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 107741
วัน,เดือน,ปี 10 พ.ศ. 2553

b. 12210699
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stabilization of Cadmium in Contaminated Soils using Phosphate Fertilizers



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of

Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การปรับเสถียรแควมเมียมในดินที่ปนเปื้อนด้วยปุ๋ยฟอสเฟต	
นักศึกษา	นางสาวพิชชาภา	บุญญคง
	นางสาวสกุลรัตน์	รัตนายน
	นางสาวหนึ่งฤทัย	บริรักษ์
ภาควิชา	เคมี	
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม	
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.กลั่นสุคนธ์	สุวรรณรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.อุสารัตน์	ถาวรชัยสิทธิ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	
กรรมการ ดร.สุวรรณดี จรรยาพูน	
กรรมการ อ.กลั่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
กรรมการ ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	



(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การปรับเสถียรแควมเมียมในดินที่ปนเปื้อนด้วยปุ๋ยฟอสเฟต	
นักศึกษา	นางสาวพิชชาภา	บุญญคง
	นางสาวสกุลรัตน์	รัตนายน
	นางสาวหนึ่งฤทัย	บริรักษ์
ภาควิชา	เคมี	
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม	
ปีการศึกษา	2548	
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์กลิ่นสุคนธ์	สุวรรณรัตน์
	ดร.อุสารัตน์	ถาวรชัยสิทธิ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยฟอสเฟต ในการปรับเสถียรแควมเมียมที่ปนเปื้อนในดินและรูปแบบต่างๆ ของแควมเมียมที่พบในดิน ทั้งก่อนและหลังปรับเสถียรด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้ทำการเก็บรวบรวมมาจากพื้นที่ที่ประสบปัญหาการปนเปื้อนของแควมเมียมในดินที่ห้วยแม่ดาว อ.แม่สอด จ.ตาก โดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต 3 ชนิด เป็นตัวปรับเสถียร ได้แก่ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ปุ๋ยไดเอมโมเนียมฟอสเฟต และปุ๋ยหินฟอสเฟต จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินตัวอย่างพบว่าดินตัวอย่างที่ใช้เป็นดินร่วนปนทราย มีค่าพีเอช 7.65 ± 0.06 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 15.6 ± 0.57 meq/100g มีความชื้น 3.64 ± 0.07 % ปริมาณอินทรีย์วัตถุ 9.58 ± 0.23 % ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเท่ากับ 22.85 ± 3.84 $\mu\text{gP/g}$ ดินแห้ง ความเข้มข้นแควมเมียมทั้งหมดเท่ากับ 126.8 ± 2.46 mg/kg ดินแห้ง ความเข้มข้นของแควมเมียมชะละลายเท่ากับ 43.12 ± 2.63 mg/kg ดินแห้ง จากการเปรียบเทียบชนิดของปุ๋ยที่ใช้ในการปรับเสถียรพบว่า ประสิทธิภาพในการปรับเสถียรสามารถเรียงลำดับได้คั้งนี้คือ TSP > DAP > RP ในการศึกษาผลของปริมาณที่ใช้ในการปรับเสถียรพบว่าสัดส่วน โมลฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียรแควมเมียม คือ 1.0 และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 1 สัปดาห์ และ 3 สัปดาห์สำหรับปุ๋ย DAP และ TSP ตามลำดับ นอกจากนี้รูปแบบต่างๆ ของแควมเมียมที่พบในดินหลังการปรับเสถียรมีแนวโน้มลดลงในดินตัวอย่างที่เติมปุ๋ยเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมปุ๋ย

คำสำคัญ : การปรับเสถียร การสกัดแบบลำดับขั้น แควมเมียม ปุ๋ยฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกคั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Stabilization of Cadmium in Contaminated Soils using Phosphate Fertilizers	
Name	Pidchapa	Boonyakong
	Sakunrat	Rattanayon
	Nungrutai	Borirak
Department	Chemistry	
Program	Environmental Resource Chemistry	
Academic Year	2005	
Special Project Advisor	Ms. Glinsukol	Suwonnarat
Special Project co-advisor	Dr. Usarat	Thawornchaisit

Abstract

This special project studied the efficiency of phosphate fertilizers to stabilize cadmium in contaminated soil and various forms of cadmium in soil before and after stabilization process using sequential extraction techniques. Soil using in this study was collected from contaminated area Mae Tao creek, Maesod district, and Tak province. Three phosphate fertilizers being tested were Triple superphosphate (TSP), Diammonium phosphate (DAP) and Rock phosphate (RP). From physical and chemical characterization of soil sample, it was found that soil using in this study was sandy loam texture with pH 7.56 ± 0.06 , Cation Exchange Capacity of 15.6 ± 0.57 meq/100g dry soil, moisture content $3.64 \pm 0.07\%$, organic matter $9.58 \pm 0.23\%$, available phosphate 22.85 ± 3.84 g/g dry soil, total cadmium concentration of 126.8 ± 2.46 mg/kg dry soil and leachable cadmium concentration of 43.12 ± 2.63 mg/kg dry soil. Comparison among three types of phosphate fertilizers, it was found that cadmium stabilization efficiency could be ranked as follows: TSP >DAP >RP. From the study on the effect of quantity of fertilizers on cadmium stabilization efficiency, the results showed that an optimum ratio of phosphate fertilizer to cadmium was 1:1. The optimum contact time was 1 week and 3 weeks using DAP and TSP as stabilizer, respectively. In addition, fraction of cadmium forms found in contaminated soil showed a decreasing trend in soil after stabilization compared to a control sample without phosphate fertilizers.

Keywords : Stabilization, Sequential extraction, Cadmium, Phosphate fertilizers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำของอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ อาจารย์กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ท่านและขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณดร.สุวรรณณี จรรยาพูน ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะตลอดจนช่วยตรวจรายละเอียดต่างๆ ในโครงการพิเศษฉบับนี้และผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ดินตัวอย่าง

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และนักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจในการทำโครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัวและเพื่อนๆ เป็นอย่างสูงที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจอย่างดีมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

พิชชาภา บุญญคง
สกุลรัตน์ รัตนายน
หนึ่งอุทัย บริรักษ์
17 มีนาคม 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโรงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 สมบัติของดิน	4
2.1.1 สมบัติทางกายภาพ	4
2.1.2 สมบัติทางเคมี	6
2.2 ภาวะมลพิษของดิน	7
2.3 โลหะหนักแคดเมียม	8
2.4 วิธีการบำบัดฟื้นฟูดิน	9
2.4.1 การล้างดิน (Soil washing)	9
2.4.2 อิเล็กโทรไคเนติกส์ (Electrokinetics)	9
2.4.3 ไฟโตเรเมเดียชัน (Phytoremediation)	10
2.4.4 การบำบัดด้วยแผ่นกั้นที่น้ำซึมผ่านได้ (Permeable treatment walls)	11
2.4.5 การปรับเสถียร (Stabilization)	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
2.5 การปรับเสถียร	11
2.6 ปุ๋ยฟอสเฟต	13
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	18
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	18
3.2 อุปกรณ์การทดลอง	19
3.3 วิธีการทดลอง	19
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดิน	19
3.3.2 การศึกษาสมบัติของตัวอย่างดิน	20
3.3.3 การศึกษาชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียร	20
3.3.4 การศึกษาปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียร	21
3.3.5 การศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ของปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อ การปรับเสถียร	21
3.3.6 การศึกษารูปแบบของแคดเมียมในดินภายหลังการปรับเสถียร ด้วยวิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction)	22
บทที่ 4 ผลการทดลอง	23
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน	23
4.2 ผลของชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน	24
4.3 ผลของปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน	28
4.4 ผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ของปุ๋ยฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพในการปรับเสถียร แคดเมียมในดิน	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	34
5.1 สรุปผลการทดลอง	34
5.2 ข้อเสนอแนะ	35
เอกสารอ้างอิง	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

ภาคผนวก	หน้า
ภาคผนวก ก	38
ภาคผนวก ข	39
ภาคผนวก ค	42
ภาคผนวก ค	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อัตราการแทรกซึมลงและความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน ที่ระดับความจุความชื้นปกติ	6
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติของดินตัวอย่าง	20
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน	23
ตารางที่ ก-1 พิเศษของดินตัวอย่าง	39
ตารางที่ ก-2 ความชื้น	39
ตารางที่ ก-3 การวิเคราะห์ความเป็นกรดของดิน	39
ตารางที่ ก-4 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	40
ตารางที่ ก-5 การกระจายตัวของอนุภาค	40
ตารางที่ ก-6 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน	40
ตารางที่ ก-7 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์	41
ตารางที่ ข-1 ข้อมูลการศึกษาปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสม ต่อการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน	42
ตารางที่ ข-2 ข้อมูลการศึกษาปริมาณปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน	43
ตารางที่ ข-3 ข้อมูลการศึกษาปริมาณปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน	44
ตารางที่ ข-4 ข้อมูลการศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ของปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน	45
ตารางที่ ข-5 ข้อมูลการศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ของปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน	46
ตารางที่ ค-1 ข้อมูลการสกัดแบบลำดับขั้นในการศึกษาชนิดของปุ๋ยฟอสเฟต ที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน	47
ตารางที่ ค-2 ข้อมูลการสกัดแบบลำดับขั้นในการศึกษาปริมาณปุ๋ยทริปเปิล - ซูเปอร์ฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน	48
ตารางที่ ค-3 ข้อมูลการสกัดแบบลำดับขั้นในการศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ของ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพการดูดซับ และดูดซึม	5
รูปที่ 2.2 ความเป็นกรด-ด่างของดิน	6
รูปที่ 2.3 โลหะหนักแคดเมียม	8
รูปที่ 2.4 อิเล็กโตรไคเนติกส์ (Electrokinetics)	10
รูปที่ 2.5 ไฟโตรีเมดิเอชัน (phytoremediation)	10
รูปที่ 2.6 การบำบัดด้วยแผ่นกั้นที่น้ำซึมผ่านได้ (Permeable treatment walls)	11
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตที่สำคัญจากหินฟอสเฟต	15
รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น	22
รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นแคดเมียมชะละลายในดินที่ผ่านการปรับเสถียร โดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต 3 ชนิด เทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมปุ๋ยฟอสเฟต	25
รูปที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การปรับเสถียรแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้ ปุ๋ยฟอสเฟต 3 ชนิด เทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมปุ๋ย	25
รูปที่ 4.3 รูปของแคดเมียมที่พบในดิน โดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต 3 ชนิด เทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมปุ๋ยฟอสเฟต	27
รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นแคดเมียมชะละลายในดินตัวอย่างที่ใช้ปุ๋ยฟอสเฟต เป็นตัวปรับเสถียรในปริมาณต่างกัน โดยใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (▲) และปุ๋ยโคแอมโมเนียมฟอสเฟต (●)	28
รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การปรับเสถียรแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (▲) และปุ๋ยโคแอมโมเนียมฟอสเฟต (●) ในสัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคดเมียมที่ต่างกัน	29
รูปที่ 4.6 รูปของแคดเมียมที่พบในดินหลังปรับเสถียรด้วยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ซูเปอร์ฟอสเฟตในสัดส่วน โมลฟอสเฟตต่อแคดเมียมที่ต่างกัน	30
รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นแคดเมียมชะละลายที่ระยะเวลาต่างกัน เมื่อใช้ปุ๋ยทริปเปิล ซูเปอร์ฟอสเฟต (▲) และปุ๋ยโคแอมโมเนียมฟอสเฟต (●) เป็นตัวปรับเสถียร	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 4.8 เเปอร์เซ็นต์การปรับเสถียรแคะเดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้ปุ๋ยทรูปเปิด ซูปเปอร์ฟอสเฟต (▲) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (●) ในระยะเวลาสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน	32
รูปที่ 4.9 รูปของแคะเดเมียมที่พบในดินหลังปรับเสถียรด้วยปุ๋ยทรูปเปิดซูปเปอร์ ฟอสเฟตที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ต่างกัน	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้

TSP	ฝุ่นทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต
DAP	ฝุ่นไดแอมโมเนียมฟอสเฟต
RP	ฝุ่นหินฟอสเฟต
AAS	อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
TCLP	Toxicity Characteristic leaching Procedure
meq/g	มิลลิอิควิวาเลนซ์ต่อกรัม
µgP/g	ไมโครกรัมฟอสฟอรัสต่อกรัม
mg/kg	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
XRF	เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

การขยายตัวของอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางดินจากการปนเปื้อนของโลหะหนักอย่างมาก สำหรับประเทศไทยปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินกำลังเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจ คือปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมในดินที่ห้วยแม่ดาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ที่มีการทำเหมืองแร่สังกะสี ซึ่งในแหล่งแร่สังกะสีพบแร่แคดเมียมอยู่ด้วยมีความเป็นไปได้ที่แคดเมียมจะไหลมาปนเปื้อนกับน้ำไปตามคลองชลประทานสู่ไร่นาของชาวบ้าน โดยนาข้าวที่อยู่ติดคลองชลประทานมีการปนเปื้อนแคดเมียมมากที่สุดและลดลงตามระยะทางที่ห่างออกไป เมื่อตรวจสอบพบการปนเปื้อนของแคดเมียมอยู่ช่วงระหว่าง 3.4-284 mgCd/kg ของดิน ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมต้องไม่เกิน 37 mg/kg นอกจากนี้ยังมีชาวบ้านที่มีอาการเจ็บป่วยคล้ายกับการได้รับพิษจากโลหะหนัก (ศูนย์พิษวิทยา, 2547) ด้วยเหตุนี้ภาครัฐจึงเร่งดำเนินการฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนอย่างเร่งด่วน เพื่อให้ดินมีสภาพที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูก

เทคโนโลยีการบำบัดและฟื้นฟูดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักที่น่าสนใจก็คือ การปรับเสถียร เพื่อลดการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักโดยการทำให้เป็นของแข็งการทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปที่เสถียรไม่สามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในวิธีนี้สามารถหาได้ง่าย ราคาถูก ขั้นตอนไม่ยุ่งยาก และใช้พลังงานน้อย จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ มีการนำปุ๋ยฟอสเฟตมาปรับเสถียรดินสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนแคดเมียม ผลการทดลองพบว่าปุ๋ยฟอสเฟตมีความสามารถปรับเสถียรแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินสังเคราะห์ได้เป็นอย่างดี (กิตติวรรณ และคณะ, 2547) งานวิจัยนี้จึงมุ่งจะนำปุ๋ยฟอสเฟตมาปรับเสถียรดินที่มีการปนเปื้อนจริง โดยศึกษาความสามารถของฟอสเฟตที่อยู่ในรูปปุ๋ยทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยหินฟอสเฟต, ปุ๋ยไคแอมโมเนียมฟอสเฟต และปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต ซึ่งเป็นตัวปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมเพื่อลดการเคลื่อนย้ายของแคดเมียมที่ปนเปื้อนไปยังตัวกลางอื่นๆ

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษากระบวนการปรับเสถียรแคะเมียมที่ปนเปื้อนในดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการปรับเสถียรแคะเมียมที่ปนเปื้อนในดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต
3. ศึกษาสัดส่วนของแคะเมียมรูปแบบต่างๆในดินภายหลังการปรับเสถียร

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างดินโดยนำดินตัวอย่างที่เก็บรวบรวมจากห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สวด จังหวัดตาก มาทำการตากแดดให้แห้ง นำดินไปบด แล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร และทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินตัวอย่าง โดยทำการศึกษาพีเอช ความเป็นกรดของดิน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ความชื้น ลักษณะเนื้อดิน องค์ประกอบของดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ความเข้มข้นแคะเมียมทั้งหมด และความเข้มข้นแคะเมียมชะละลาย

2. ศึกษาชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียร โดยทำการทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการปรับเสถียรแคะเมียมที่ปนเปื้อนในดินและรูปของแคะเมียมที่พบในดิน โดยนำปุ๋ยฟอสเฟต 3 ชนิดได้แก่ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และปุ๋ยหินฟอสเฟต โดยใช้สัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคะเมียมเท่ากับ 1:1 และใช้ระยะเวลาสัมผัสในการปรับเสถียร 3 สัปดาห์ และทำการวิเคราะห์การชะละลายของแคะเมียมในดินหลังปรับเสถียรด้วยวิธี TCLP แล้วนำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณแคะเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และรูปของแคะเมียมที่พบในดินหลังการปรับเสถียรด้วยการสกัดแบบลำดับขั้น (sequential extraction)

3. ศึกษาผลของปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพการปรับเสถียรแคะเมียมแต่ละชนิด โดยแปรค่าสัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อโมลแคะเมียมเท่ากับ 0.5:1, 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ตามลำดับ ใช้ระยะเวลาสัมผัส 3 สัปดาห์ และทำการวิเคราะห์การชะละลายของแคะเมียมในดินหลังปรับเสถียรด้วยวิธี TCLP แล้วนำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณแคะเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และรูปของแคะเมียมที่พบในดินหลังการปรับเสถียรด้วยการสกัดแบบลำดับขั้น (sequential extraction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ของปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียร โดยทำการทดลอง เปรียบเทียบความสามารถในการปรับเสถียรแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินและรูปของแคดเมียมที่พบในดิน โดยใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตที่สัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคดเมียมเท่ากับ 1:1 โดยแปรค่าระยะเวลาสัมพัทธ์เป็น 1, 2 และ 3 สัปดาห์ และทำการวิเคราะห์การชะละลายของแคดเมียมในดินหลังปรับเสถียรด้วยวิธี TCLP แล้วนำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และรูปของแคดเมียมที่พบในดินหลังการปรับเสถียรด้วยการสกัดแบบลำดับขั้น (sequential extraction)

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความเป็นไปได้ในการนำปุ๋ยฟอสเฟตมาใช้ในการปรับเสถียร โลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน และทราบสัดส่วนของแคดเมียมในรูปแบบต่างๆ ในดินภายหลังการปรับเสถียร
2. ทราบปัจจัยที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต
3. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้บำบัดพื้นพุดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 สมบัติของดิน (สุภมาศ, 2538)

2.1.1 สมบัติทางกายภาพ

1. พื้นที่ผิวจำเพาะ

เนื้อดินบอกถึงปริมาณคอลลอยด์อินทรีย์อย่างหยาบได้ ทั้งนี้เพราะอนุภาคดินเหนียวมีขนาดเล็กมาก อยู่ในสภาพคอลลอยด์ จึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักเป็นปริมาณมาก ดินที่มีเนื้อละเอียดจะมีพื้นที่ผิวสูงขึ้น การเพิ่มพื้นที่ผิวให้สูงขึ้นในดินเนื้อหยาบก็สามารถทำได้ โดยการเติมคอลลอยด์อินทรีย์ลงไป ซึ่งได้แก่ ฮิวมัส การเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้แก่ดิน เมื่อสลายตัวก็จะให้ฮิวมัสแก่ดิน

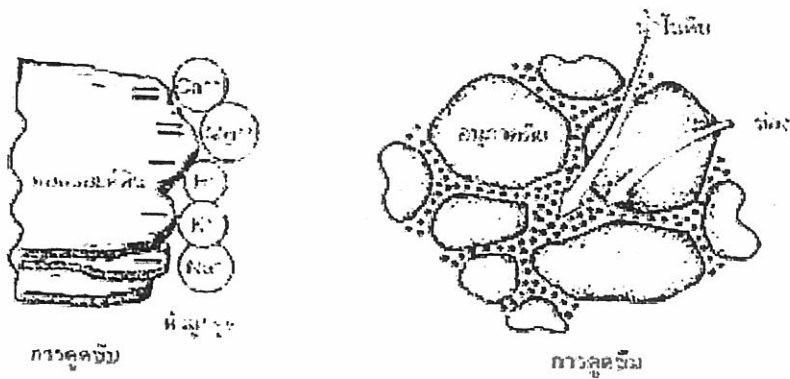
2. ความพรุนของดิน (soil porosity)

เนื้อดินหยาบจะมีช่อง (pore) ขนาดใหญ่อยู่มาก แต่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย เมื่อดินแห้งลงจะอุ้มน้ำได้น้อยทำให้ก๊าซถ่ายเทได้ดี ส่วนในดินที่มีปริมาณซิลต์สูง เมื่อฝนตกหรือระหว่างรดน้ำจะสูญเสียโครงสร้างดินได้ง่ายซิลต์จะไหลลงอุดตันช่องทำให้ช่องผิวหน้าดินปิด ดังนั้นแม้การรดน้ำเพียงเล็กน้อยก็อาจทำให้ช่องบนหน้าผิวดินปิด ทำให้น้ำและก๊าซถ่ายเทได้น้อยลง โดยทั่วไปแล้วช่องขนาดเล็ก (micropore) ในดิน ก็ยังมีความสัมพันธ์กับเนื้อดิน คือ เนื้อดินละเอียดจะมีช่องขนาดเล็กมากกว่าดินเนื้อหยาบ ซึ่งช่องขนาดเล็กจะสามารถดูดซึมน้ำเอาไว้ได้ ทำให้ดินเนื้อละเอียดมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ (available water capacity-AWE) มากกว่าดินเนื้อหยาบ ส่วนของน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีความสำคัญต่อพืช และจุลินทรีย์ในดินเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ดินเป็นแหล่งทิ้งวัสดุเหลือใช้ และต้องการให้ระบบดิน-พืช เป็นตัวการกำจัดสารมลพิษและวัสดุเหลือใช้ดังกล่าว

3. การดูดซับ (adsorption) และการดูดซึม (absorption)

การดูดซึมที่สำคัญในดินก็คือ การดูดซึมน้ำ น้ำจะถูกดินดูดไว้ในช่องระหว่างอนุภาคดิน ช่องในดินไม่อาจดูดซึมน้ำไว้ได้ทั้งหมด ทั้งนี้เพราะแรงดูดซึมต้องเอาชนะอิทธิพลแรงดึงดูดของโลกให้ได้ แรงดูดซึมนี้มีความสัมพันธ์โดยกลับกับขนาดของช่อง ยิ่งช่องมีขนาดเล็กแรงดูดซึมนิ่งยิ่งมาก ดังนั้นปริมาณน้ำที่ดูดซึมไว้จึงมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคดิน ดินที่มีอนุภาคดินเหนียวในปริมาณมาก (เนื้อดินละเอียด) จะดูดซึมน้ำได้มาก ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่สูงก็จะอุ้มน้ำไว้ได้มาก แสดงดังรูปที่ 2.1 (สุภมาศ, 2540)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ภาพการดูดซับ และดูดซึม

4. อินทรีย์วัตถุในดิน

ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีความสัมพันธ์กับเนื้อดิน กล่าวคือ ดินเนื้อละเอียดจะมีอินทรีย์วัตถุสูงกว่าดินเนื้อหยาบ ความสัมพันธ์เช่นนี้อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากดินเนื้อละเอียดค้ำน้ำและดูดซับไอออนที่เป็นธาตุอาหารพืชได้มาก พืชที่ขึ้นในดินเนื้อละเอียดจึงมีปริมาณมากกว่าที่ขึ้นในดินเนื้อหยาบ เมื่อซากพืชเหล่านี้ทับถมในดิน จึงทำให้ดินเนื้อละเอียดมีการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในอัตราที่มากกว่า ขณะที่ดินเนื้อหยาบมีการระเหยอากาศที่ดีกว่าดินเนื้อละเอียด ทำให้อัตราการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุสูง จึงเหลือปริมาณอินทรีย์ภูตุน้อยกว่าดินเนื้อละเอียด

5. สภาพความชื้นดินและการเคลื่อนย้ายของน้ำ

ความแตกต่างในด้านความสามารถกักน้ำ ของดินเป็นผลมาจากความแตกต่างของเนื้อดิน ดังนั้นเนื้อดินจึงเป็นปัจจัยควบคุมระดับการชะละลายของดิน และการแทรกซึมลง ของน้ำจากบนดินเข้าสู่ผิวดิน ในตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นอัตราการแทรกซึมลงของน้ำ และความสามารถกักน้ำของดินที่สภาพความจุที่ความชื้นปกติ ในประเภทเนื้อดินต่าง ๆ ซึ่งทั้งอัตราการแทรกซึมลงของน้ำ และความสามารถกักน้ำของดินสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน และการปรับปรุงโครงสร้างดินจึงเป็นการลดอัตราการแทรกซึมลง และเป็นการลดความจุในการกักน้ำของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 อัตราการแทรกซึมลงและความสามารถในการอุ้มน้ำของดินที่ระดับความจุความชื้นปกติ

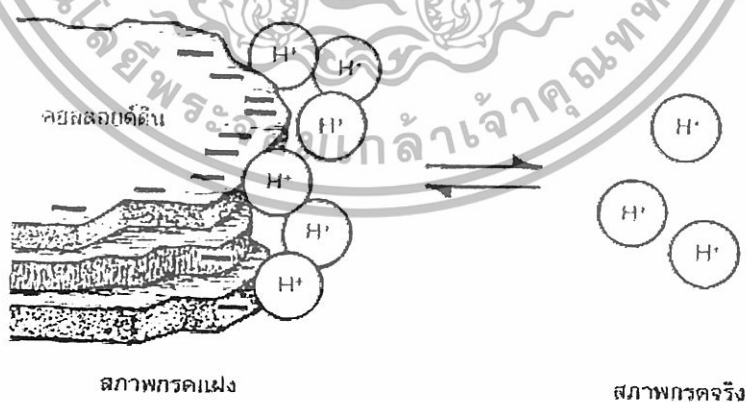
เนื้อดิน	การแทรกซึมลง (นิ้ว/ชม.)		ปริมาณน้ำทั้งหมด (นิ้ว/ฟุตของความลึก)
	ดินพีชปกคลุม	ดินว่าง	
ร่วนเหนียว	0.2	0.1	4.8
ร่วนปนซิลท์	0.6	0.3	4.2
ร่วน	1.0	0.5	3.8
ร่วนปนทราย	2.0	1.0	1.2

ที่มา : สุกมาศ ; 2540

2.1.2 สมบัติทางเคมี

1. ความเป็นกรด-ด่างของดิน

การวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน คล้ายคลึงกับการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ คือ การวัดพีเอชของดิน แต่แตกต่างกันที่ดินนั้นมีความเป็นกรดอยู่ 2 ชนิดคือ กรดจริง และกรดแฝง ดินมีทั้งประจุบวกและลบแต่มีค่าประจุลบมากกว่า ความมีประจุนี้ นับว่าเป็นประโยชน์มาก เพราะธาตุต่างๆในสารละลายดินรวมทั้งธาตุอาหารของพืชในรูปที่พืชดูดกินได้จะต้องอยู่ในรูปประจุเช่นกัน ธาตุอาหารพืชโดยส่วนใหญ่มีประจุเป็นบวก ดังนั้นจึงถูกดินดูดซับไว้ไม่ให้ไหลตามน้ำลงไปจนเลยระดับความลึกของราก ทำให้ธาตุอาหารที่ถูกดินดูดซับเอาไว้นี้ย่อมมีโอกาสให้พืชดึงดูดเอาไปใช้ได้ ดังรูปที่ 2.2 (สุกมาศ, 2540)



รูปที่ 2.2 ความเป็นกรด-ด่างของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนไอออนนั้นมีประจุบวก ดังนั้นส่วนของไฮโดรเจนที่ถูกดินดูดซับ จึงเรียกว่า สภาพกรดแฝง (potential acidity) ส่วนของกรดที่มีบทบาทต่อความสามารถในการละลายได้ของ ธาตุและความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชนี้ คือส่วนสภาพกรดจริง ดังนั้นดินเหนียวและดินทรายที่มีค่าพีเอชเท่ากัน จะมีความต้องการปูนในการยกระดับพีเอชไม่เท่ากันได้ เพราะดินทั้งสอง ชนิดมีค่าเป็นกรดแฝงไม่เท่ากัน เนื่องจากดินเหนียวมีค่าประจุลบมากกว่าจึงมีสภาพกรดแฝงมากกว่า ส่วนของไฮโดรเจนที่ถูกดูดซับจะมีปริมาณมากกว่าส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และจะปลดปล่อยจากส่วนที่ถูกดูดซับออกมาเป็นบางส่วน ลักษณะคล้ายการแตกตัวของกรดอ่อน

2. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (cation exchange capacity-CEC)

การที่ดินมีประจุไฟฟ้าเป็นผลเนื่องจากอนุภาคดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุในดิน โดยส่วนใหญ่อนุภาคของดินเหนียวมีรูปร่างแบนบางทำให้มี โอกาสที่อะตอมของธาตุที่เป็น องค์ประกอบอยู่รอบนอกจะหลุดออกไปได้มากขึ้น เมื่อสารประกอบใดเกิดมีการสูญหายของ อะตอมก็จะมีประจุที่ประจุที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่เป็นประจุลบ ดินมีความสามารถในการดึงดูดแคต ไอออนไว้ไม่เท่ากัน แคต ไอออนที่ถูกดูดซับ(adsorbed cation) กับคอลลอยด์ดินจะสามารถ เปลี่ยนแปลงกันได้กับแคต ไอออนในสารละลายดิน จึงมีชื่อเรียกว่า แคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable cation)

2.2 ภาวะมลพิษของดิน

ภาวะมลพิษของดิน (soil pollution) หมายถึง การปนเปื้อนของดินด้วยสารมลพิษ (soil pollutant) ที่มากเกินไปจนก่อให้เกิด อันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและ สัตว์ ดังนั้นภาวะมลพิษของดินจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อมีสารมลพิษในดิน และดินจะเสียได้ ก็ ต่อเมื่ออัตราการเพิ่มสารมลพิษลงในดินมีมากกว่าสลายตัวของสารมลพิษนั้น จนเกิดการสะสม มลพิษมากขึ้นเป็นอันตรายต่อภาวะแวดล้อม (นิตยา, 2544) สารที่ปนเปื้อนในดินมีด้วยกันหลาย ชนิด ได้แก่ สารอินทรีย์ระเหยได้ สารอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำ กัมมันตภาพรังสี และ โลหะหนัก ซึ่งสาร เหล่านี้สามารถแพร่กระจายไปสู่ห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศได้

ธาตุโลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง โลหะธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้น ไป โดยไม่รวมโลหะที่เป็น โลหะอัลคาไลน์ (alkaline) และ โลหะอัลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth) ซึ่งโดยทั่วไปจะธาตุในตารางธาตุที่มีเลขอะตอม (atomic number) ในช่วง 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7

รูปของธาตุโลหะในดิน

ธาตุโลหะที่ใส่ลงไปในดินจะอยู่ในรูปหนึ่งหรือหลายรูปดังต่อไปนี้

1. รูปที่ละลายในสารละลายดิน (soluble form)
2. รูปที่ถูกดูดซับในตำแหน่งผิวของอนุภาคคอลลอยด์ดิน (adsorbed form)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. รูปที่ตกตะกอนหรือตกตะกอนกับสารอื่น (precipitated form)
4. รูปที่ถูกรังและจับกับสารแขวนลอยอื่นหรือแร่ในดิน (fixed , occluded form)
5. รูปที่ถูกลูกเซลล์เข้าสู่ระบบชีวภาพเป็นสารอินทรีย์ (organic form)

ธาตุโลหะในรูปที่หนึ่งและสองถือเป็นรูปที่เคลื่อนที่ได้ (mobile) ในดิน สามารถถูกพืชนำไปใช้ได้ ส่วนสามรูปหลังเป็นรูปที่หยุดเคลื่อนที่ (immobile) แต่เนื่องจากกระบวนการในดินมีลักษณะเป็นพลวัต (dynamic) จึงอาจมีการเปลี่ยนแปลงรูปต่าง ๆ ได้ตลอดเวลา

2.3 โลหะหนักแคดเมียม



รูปที่ 2.3 โลหะหนักแคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติอ่อน งามได้ มีสีขาวปนน้ำเงิน มีจุดหลอมเหลวประมาณ 321 องศาเซลเซียส รัศมีไอออนของแคดเมียม เป็น 65 พิโกเมตร มีประจุเป็น 2^+ และความหนาแน่นของประจุ 2.11×10^{10} แคดเมียมเป็นโลหะที่ทนต่อการกัดกร่อน และระหว่างกรหลอมเหลวด้วยความร้อน และความกดดันสูงทำให้กลายเป็นไอควันในรูปของแคดเมียมออกไซด์ แคดเมียมที่พบในธรรมชาติ ส่วนใหญ่มักพบปนอยู่กับแร่ธาตุสังกะสี ทองแดง และดีบุกซึ่งแคดเมียมมีลักษณะคล้ายคลึงสังกะสีอยู่หลายประการ เช่นถูกพืชดูดกินได้ง่าย มีคุณสมบัติทางเคมีและโครงสร้างอิเล็กตรอนิก (electronic configuration) ที่คล้ายคลึงกัน และจะพบแคดเมียมปนในสินแร่สังกะสีเสมอ นอกจากนี้แคดเมียมอาจอยู่ในรูปเกลือหรือสารประกอบต่างๆ เช่น รวมตัวกับกำมะถันเป็น แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide), แคดเมียมออกไซด์ มีสีแดง, แคดเมียมซัลเฟต มีสีเหลืองใช้ในการผลิตสี และแบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม ซึ่งใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางอุตสาหกรรมแคดเมียมมีความสำคัญ และมีประโยชน์หลายประการ เช่น การใช้แคดเมียมในโรงงานถลุงแร่และผลิตสังกะสี การชุบโลหะ ทำยาง พลาสติก โลหะผสม แบตเตอรี่ผสมซีเลเนียมทำสี การใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันเครื่อง รวมถึงการทำเหมืองแร่ ซึ่งกิจกรรมเหล่านี้ก็เป็นแหล่งสำคัญที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินอีกด้วย

โดยทั่วไปเมื่อแคดเมียมอยู่ในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพแลกเปลี่ยนได้ และเคลื่อนย้ายได้ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมสภาพเคลื่อนที่ได้ของแคดเมียมในดินคือ พีเอชและศักย์รีดอกซ์ ซึ่งดินที่มีศักย์รีดอกซ์สูงแคดเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบเช่น CdO หรือ $CdCO_3$ หรืออาจอยู่ร่วมกับฟอสเฟตได้เช่นเดียวกัน ซึ่งแคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าพีเอชระหว่าง 4.5-5.5 ขณะที่ในดินที่เป็นด่างแคดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ และในสภาพดินเป็นกรดสภาพละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก, อะลูมิเนียมและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ทำให้ศักยภาพในการเคลื่อนที่และแพร่กระจายของแคดเมียมสูงมากและเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการเคลื่อนที่และแพร่กระจายกับธาตุอื่น ๆ พบว่าความสามารถในการเคลื่อนที่เรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $Cd > Zn > Cu, Ni$ (ชุติมา, 2544)

2.4 วิธีการบำบัดฟื้นฟูดิน (พรสรวง และคณะ, 2546)

การบำบัดฟื้นฟูดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

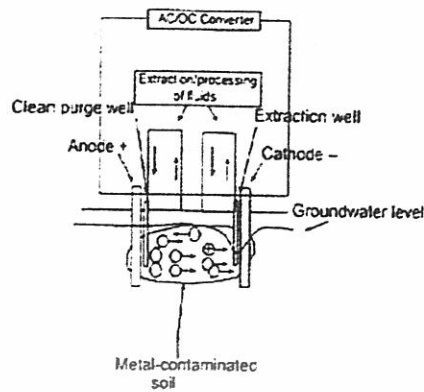
2.4.1 การล้างดิน (Soil washing)

การล้างดินเป็นกระบวนการบำบัดดินที่มีการปนเปื้อน โดยมีการกำจัดออกจากดินผ่านการชะล้าง ซึ่งการล้างดินนั้นต้องทำนอกพื้นที่ทำให้เพิ่มความยุ่งยากในการบำบัด โดยสารที่ใช้ในการล้างดินได้แก่ สารละลายที่เป็นด่าง (สารที่กัดกร่อน ปูนขาว เป็นต้น) สารละลายกรด (กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก) สารลดแรงตึงผิวซึ่งมีประสิทธิภาพไม่ดัดนักและการเตรียมสารมีความยุ่งยาก ใช้ต้นทุนสูง ติเลตติงเอเจนต์มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงแต่สารมีราคาสูงมาก จึงไม่นิยมใช้ เพอร์ออกไซด์และตัวออกซิไดซิงเอเจนต์

2.4.2 อิเล็กโทรไคเนติกส์ (Electrokinetics)

กระบวนการอิเล็กโทรไคเนติกส์ เป็นการผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสอ่อนระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดในดินที่ปนเปื้อน โดยไอออนและอนุภาคประจุเล็ก ๆ ที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ส่วนไอออนที่มีประจุลบจะเคลื่อนที่ไปที่ขั้วแอโนด ส่วนสารละลายบัฟเฟอร์ที่อยู่ในแท่งอิเล็กโทรดจะช่วยทำให้พีเอชมีค่าคงที่ วิธีนี้สามารถทำได้ในสถานที่จริง หรืออาจจะขุดดินขึ้นมาทำก็ได้ ไอออนของโลหะที่ละลายได้และที่เกิดพันธะยึดจับในดิน เช่น ออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ และคาร์บอเนต จะถูกกำจัดโดยวิธีนี้ แสดงผังรูป 2.4 (พรสรวง และคณะ, 2546)

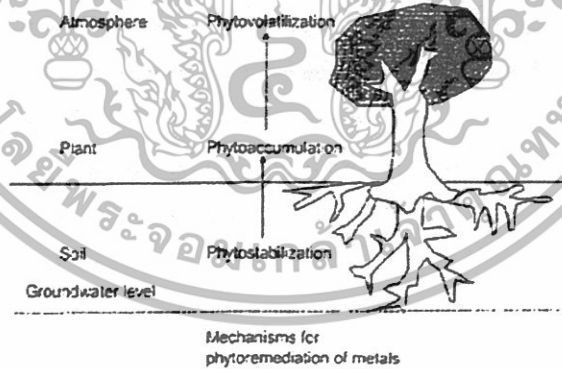
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 อิเล็กโตรไคเนติกส์ (Electrokinetics)

2.4.3 ไฟโตรเรมีเดียชัน (phytoremediation)

เป็นกระบวนการฟื้นฟูสภาพด้วยพืช ซึ่งเป็นกระบวนการดูดซับที่จะเก็บสะสมสารมลพิษ โดยรากและส่วนต่างของพืช อีกทั้งยังย่อยสลายสารมลพิษให้อยู่ในรูปของสารที่มีอันตรายน้อยกว่าด้วย อีกทั้งเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่ต้องใช้เวลาในการบำบัดดินและต้องหาวิธีกำจัดพืชที่ใช้ฟื้นฟูดินต่อไปอีก แสดงดังรูป 2.5 (พรสรวง และคณะ, 2546)

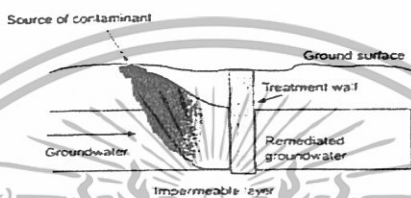


รูปที่ 2.5 ไฟโตรเรมีเดียชัน (phytoremediation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 การบำบัดด้วยแผ่นกั้นที่น้ำซึมผ่านได้ (Permeable treatment walls)

แผ่นกั้นที่น้ำซึมผ่านได้ ซึ่งบรรจุ reactive substance ใช้สำหรับการลดการรวมตัวของโลหะที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ซึ่งประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด เช่น ซีโอไลต์ ธาตุเหล็ก และปูนขาว (Vidac และ Pohland, 1996) ผลของการทำก่อนการทดลอง แสดงให้เห็นว่า ธาตุเหล็กสามารถใช้ลดโครเมียม และใช้ปูนขาวสำหรับการตกตะกอนของตะกั่ว เทคนิคนี้เหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนในบริเวณกว้าง โดยสามารถควบคุมการบำบัดและควบคุมอัตราการไหลได้ แสดงดังรูป 2.6 (พรสรวง และคณะ, 2546)



รูปที่ 2.6 การบำบัดด้วยแผ่นกั้นที่น้ำซึมผ่านได้ (Permeable treatment walls)

2.4.5 การปรับเสถียร (Stabilization)

การหยุดการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักโดยการทำให้เป็นของแข็งการทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปที่เสถียรไม่สามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ และสารประกอบที่ใช้ในการปรับเสถียร ได้แก่ สารประกอบฟอสเฟตชนิดต่างๆ ซีโอไลต์ เป็นต้น ซึ่งเป็นสารประกอบที่หาง่าย ราคาถูก ขั้นตอนการปรับสภาพดินไม่ยุ่งยาก และใช้พลังงานน้อย

2.5 การปรับเสถียร

การบำบัดดินโดยการปรับเสถียรเป็นกระบวนการหนึ่งทีออกแบบมาเพื่อลดการปนเปื้อนของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารเคมีในการทำให้ดินแข็งตัวเพื่อลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน โดยการใช้หลักการทำให้องค์ประกอบโลหะหนักนี้เปลี่ยนสภาพไป ทำให้อัตราการกระจายตัวของสิ่งแวดล้อมมีน้อยลง เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการผสมของเสียอันตรายและสารที่สามารถแข็งตัวได้เข้าไปด้วยกันเพื่อทำให้เกิดการแข็งตัวและจับยึดเอาของเสียอันตรายโลหะหนักเอาไว้

หลักการของกระบวนการนี้คือ

- เพิ่มความแข็งแรงของของแข็ง
- ลดความสามารถในการหดตัว (ของแข็งหดตัวได้น้อยกว่าของเหลว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลดความสามารถในการไหลผ่านของของเหลว

เมื่อกล่าวถึง Stabilization หรือการบำบัดดินด้วยการปรับเสถียร เราจะรวมถึง Stabilization และ Solidification เพราะการทำให้เป็นของแข็งก็เป็นการเพิ่มความเสถียรในการจัดการของเสียลดอัตราการรั่วไหลของของเสีย และลดความสามารถในการละลายของของเสีย

ในทางปฏิบัติกระบวนการบำบัดประกอบด้วย

- การกำจัดน้ำออก เพื่อลดปริมาณของของแข็ง
- เติมสารเพื่อให้ของเสียจับตัวเป็นก้อนของแข็ง

กลไกของการบำบัดส่วนใหญ่เน้นที่กระบวนการทางกายภาพ เช่น การจับยึด การดูดซึม หรือดูดซับ การตกตะกอน แต่ก็มีกระบวนการทางเคมีด้วยเช่นกัน เช่น การทำให้เปลี่ยนสภาพเพื่อให้โลหะหนักเสื่อมสภาพไป การเลือกชนิดของสารเคมีที่จะใช้ผสมกับสารพิษจำเป็นจะต้องใช้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกลไกการบำบัด

กลไกของการบำบัดมีดังนี้

1. การจับยึด (Macroencapsulation และ Microencapsulation)

โดยการให้โลหะหนักเข้าไปอยู่ในช่องว่างของตัวจับยึด ซึ่งตัวจับยึดแบ่งออกได้เป็นตัวจับยึดที่มีรูขนาดใหญ่ และตัวจับยึดที่มีรูขนาดเล็ก ตัวจับยึดชนิดนี้อาจจะมีรูทั้งขนาดเล็กและใหญ่ก็ได้ การจับยึดนี้เป็นเพียงการกำจัดขอบเขตของโลหะหนักให้อยู่ในบริเวณที่กำหนดไว้เท่านั้น หากตัวจับยึดเกิดการแตกร้าว สารพิษก็สามารถรั่วไหลออกสู่ภายนอกได้อีกครั้ง ดังนั้นถ้าตัวจับยึดที่มีรูขนาดเล็กจะมีความเสถียรภาพสูงกว่าตัวจับยึดที่มีรูขนาดใหญ่เนื่องจากการแตกออกของตัวจับยึดที่มีรูขนาดเล็กอาจจะไม่ทำให้จำนวนรูที่เกิดการแตกหักมีมากขึ้นหรือมีไม่มากเท่ากับจำนวนรูขนาดใหญ่ที่จะเกิดความเสียหายขึ้น

2. การดูดซึม (Absorption)

เป็นกระบวนการที่เกิดจากการกระทำของโลหะหนักซึ่งถือเป็นตัวถูกดูดซับ (Absorbate) และการดูดซึม (absorb) ซึ่งเป็นการต้องการให้โลหะหนักเข้าไปละลายเป็นเนื้อเดียวกับตัวดูดซึมนั่นเอง การดูดซึมนี้อาจจะมีการใช้งานสำหรับก๊าซพิษเท่านั้น เนื่องจากกลไกของการดูดซึมเกี่ยวข้องกับกระบวนการละลายสารชนิดหนึ่งให้อยู่ในสารอีกชนิดหนึ่งและตัวดูดซึม (ตัวทำละลาย) มักอยู่ในรูปของของเหลว เช่น การนำของเหลวชนิดหนึ่งไปจับเอาของเสียออกจากของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งนิยมใช้กับการดึงเอาสิ่งแปลกปลอมออกจากร้ำมันเพื่อให้น้ำมันมีความสะอาดขึ้นและสามารถนำกลับไปใช้ได้ใหม่ได้

3. การดูดซับ (Adsorption)

หลักการของการดูดซับจะแตกต่างจากการดูดซึมเล็กน้อย เนื่องจากการดูดซับจะเป็นการทำให้เกิดพันธะระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ปัจจุบันมีการพัฒนาคุณสมบัติของดินให้สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดซับได้โดยจะต้องผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาพ โดยการเปลี่ยนแปลง inorganic cation ที่อยู่ในดินออกและใส่สารอินทรีย์ที่มีโซ่พันธะยาวๆลงไปแทนการใส่สารอินทรีย์ลงในดินทำให้มีองค์ประกอบที่ไม่มีขั้วและทำให้สามารถดูดซับสารที่ไม่มีขั้วเช่นสารอินทรีย์ด้วยกันเองได้มากขึ้น

4. การตกตะกอน (Precipitation)

เป็นวิธีการที่ทำให้โลหะหนักตกตะกอน และมีความสามารถในการละลายในการละลายน้อยลงและส่งผลให้มีความสามารถในการปนเปื้อนสิ่งแวดล้อมน้อยลงด้วยวิธีการตกตะกอนไม่ได้ใช้สำหรับโลหะที่ละลายอยู่ของเสียที่เป็นของเหลวเท่านั้น แต่ยังใช้กับโลหะหนักที่เจือปนอยู่ในกากของแข็งด้วย เพราะโลหะหนักเหล่านี้เพียงรอเวลาที่จะให้เจอกับน้ำ เพื่อที่จะละลายและรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมเท่านั้น ดังนั้น เราสามารถใช้เทคนิคนี้กับกากของเสียเพื่อทำให้สารที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงละลายได้น้อยลงและทำให้กากของเสียมีคุณภาพดีขึ้น ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมน้อยลง การตกตะกอนเป็นวิธีที่เหมาะสมกับของเสียที่มีปริมาณโลหะหนักเจือปนอยู่มาก

2.6 ปุ๋ยฟอสเฟต (ขงยุทธ, 2541)

แร่ฟอสเฟต เป็นองค์ประกอบหลักที่ให้ธาตุฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ จะพบในหินอัคนีและหินตะกอน โดยทั่วไปในเปลือกโลกมีสารประกอบของฟอสเฟต (P_2O_5) อยู่ประมาณร้อยละ 0.23 แร่ฟอสเฟตที่พบในหินอัคนีได้แก่ แร่ไฮดรอกซิลฟลูออโรอะพาไทต์ ในขณะที่หินตะกอนที่สะสมในทะเลจะพบฟลูออโรอะพาไทต์หรือเฟรนโคไลต์ เนื่องจากฟอสเฟตเกิดอยู่ในรูปของสารประกอบต่างๆกันจึงมีลักษณะที่แตกต่างกันซึ่งธาตุฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในปุ๋ยเคมีที่มีฟอสฟอรัสชนิดต่างๆมักนิยมบอกในรูป Phosphorus peroxide(P_2O_5) มากกว่าอยู่ในรูปธาตุฟอสเฟต(Elemental P) ฟอสเฟตรูปต่างๆที่มีอยู่ในปุ๋ย ได้แก่

- Water soluble P_2O_5* หมายถึง ปริมาณ P_2O_5 ที่ละลายในน้ำระบุเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ P_2O_5 ในตัวอย่างทั้งหมด
- Citrate soluble P_2O_5* หมายถึง ปริมาณ P_2O_5 ที่ละลายในสารละลายแอมโมเนียมซิเตรตที่อยู่ในสภาพสะเทิน (pH 7.0) และมีความเข้มข้น 1 นอร์มอล ระบุเปอร์เซ็นต์ของ P_2O_5 ในตัวอย่างทั้งหมด
- Citrate insoluble P_2O_5* หมายถึง ปริมาณ P_2O_5 ที่วิเคราะห์ได้จากกากที่เหลือหลังจากการสกัดด้วยน้ำและด้วยสารละลายแอมโมเนียมซิเตรต (pH 7.0,N)
- Available P_2O_5* หมายถึง ปริมาณ P_2O_5 ที่เป็นประโยชน์ต่อพืชซึ่งเป็นผลรวมของปริมาณ Water soluble P_2O_5 กับปริมาณ Citrate soluble P_2O_5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Total P_2O_5$ หมายถึง ปริมาณ P_2O_5 ซึ่งเป็นผลรวมของปริมาณ Available P_2O_5 กับปริมาณ Citrate insoluble P_2O_5

ฟอสฟอรัสในปุ๋ยฟอสเฟตมีทั้งส่วนที่ละลายน้ำได้ง่าย และส่วนที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก ในการเปรียบเทียบความมากน้อยของปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตชนิดต่างๆจะมีมาตรฐานดังนี้

รูปการละลาย	รูปทางเคมี	ความเป็นประโยชน์ต่อพืช
รูปที่ละลายน้ำได้ (Water soluble P)	Monophosphate($H_2PO_4^-$) เช่น $Ca(H_2PO_4)_2$, $NH_4H_2PO_4$	เป็นประโยชน์ต่อพืช (Available P)
รูปที่ละลายได้ในสารละลายแอมโมเนียมซีเตรต 15% หรือเข้มข้น 1 นอร์มอล, pH 7.0 หรือกรดซิตริก 2% (Citrate soluble P)	Diphosphate (HPO_4^{2-}) เช่น $CaHPO_4$	เป็นประโยชน์ต่อพืช (Available P)
รูปที่ไม่ละลาย (Insoluble P)	Triphosphate(PO_4^{3-}) เช่น $Ca_3(PO_4)_2$	ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Unavailable P)

ปุ๋ยฟอสเฟตที่ขายกันทั่วไปในท้องตลาดใช้หลักเกณฑ์ข้างต้นบอกปริมาณ Available P_2O_5 ว่ามีอยู่ที่เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ในการเปรียบเทียบราคาปุ๋ยว่าถูกหรือแพงกว่ากัน ควรพิจารณาจากส่วนของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เท่านั้น

ปุ๋ยฟอสเฟตมีด้วยกันอยู่หลายชนิด ในการทดลองนี้เลือกมาเพียง 3 ชนิด คือ ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (Diammonium phosphate, DAP), ปุ๋ยหินฟอสเฟต (Rock phosphate) และปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตชนิดเข้มข้น (Concentrated superphosphate)

1. ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (Diammonium phosphate, DAP, $(NH_4)_2HPO_4$)

มีไนโตรเจน 16-18% และ Available phosphoric acid 46-48% (ยงยุทธ, 2541) เตรียมได้โดยใช้ก๊าซแอมโมเนียทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอรัส หรือกับกรดสองชนิดที่เป็นส่วนผสมระหว่างกรดฟอสฟอรัสกับกรดกำมะถัน ปุ๋ยชนิดนี้ละลายน้ำได้ดี และมีผลตกค้างทำให้ดินเป็นกรดเพราะมีไนโตรเจนอยู่ในรูปแอมโมเนียม-ไนโตรเจน (NH_4-N) มีธาตุอาหารพืชสูง ดังนั้นในการใช้จึงทำให้ทุนค่าขนส่ง ค่าแรงในการใส่ ค่าเก็บรักษาและยังมีสมบัติทางกายภาพดี เช่น ไม่ชื้นง่าย เม็ดปุ๋ยมีความแกร่งสูง ปุ๋ยชนิดนี้เป็นที่นิยมกันมากในประเทศไทยและอื่นๆทั่วโลก โดยเฉพาะการใช้เป็นแม่ปุ๋ยเพื่อผลิตปุ๋ยผสมสูตรต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปุ๋ยหินฟอสเฟต (Rock phosphate)

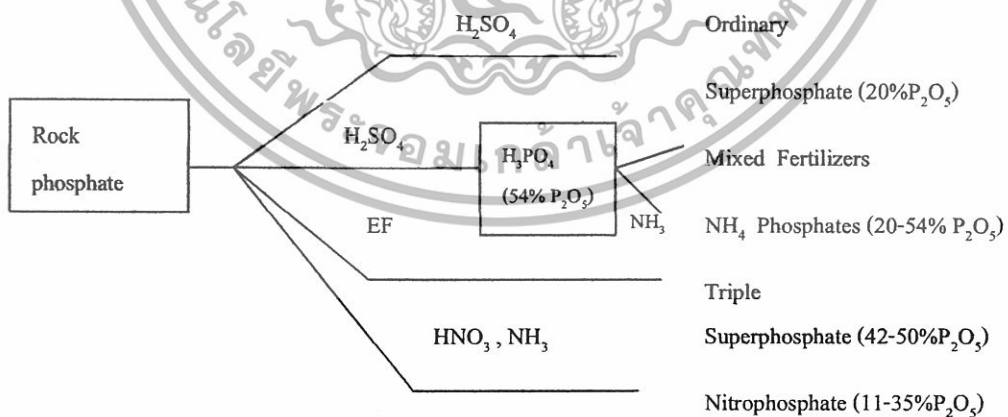
เป็นปุ๋ยที่นำมาจากแร่ที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบมากเรียกว่า แร่อะพาไทต์ (Apatite) แร่อะพาไทต์เท่าที่ทราบกันอยู่เวลานี้มีอยู่ 5 ชนิด คือ

- Carbonate apatite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCO}_3$)
- Fluorapatite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2$)
- Chloroapatite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCl}_2$)
- Hydroxy apatite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$)
- Sulfateapatite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaSO}_4$)

สินแร่เหล่านี้จะพบอยู่ในสภาพแข็งเป็นหินหรือเป็นก้อนคล้ายๆ ก้อนกรวด หรือมีสภาพอ่อนนุ่มคล้ายๆ ดิน (earthy form) ก็ได้ ถ้าอยู่ในสภาพแข็งเป็นหินเรียกว่า rock phosphate ถ้าอยู่ในสภาพอ่อนๆ คล้ายดินเรียกว่า Soft phosphate ถ้าหับคำว่าหินฟอสเฟตที่ใช้กันอยู่เวลานี้เป็นชื่อที่นิยมเรียกสินแร่ฟอสเฟตต่างๆ ไป โดยไม่จำกัดว่าสินแร่ฟอสเฟตชนิดนั้นๆ จะอยู่ในสภาพไหน

องค์ประกอบของปุ๋ยหินฟอสเฟตที่พบในท้องตลาดไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของแร่เป็นสำคัญ โดยทั่วไปจะมี P_2O_5 ระหว่าง 30-40% (ยางยุทธ, 2541) สำหรับหินฟอสเฟตในรูป Fluorapatite ปริมาณฟลูออรีนที่มีในปุ๋ยหินฟอสเฟต นับว่ามีความสำคัญมากเกี่ยวกับความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสต่อพืช กล่าวคือ ถ้าปุ๋ยหินฟอสเฟตมีฟลูออรีนมากขึ้นเท่าใดก็จะยิ่งทำให้ฟอสเฟตในตัวปุ๋ยมีความคงตัวและจะสลายตัวให้ฟอสเฟตไอออนได้ยากมากขึ้น ทำให้พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ยากมากขึ้น ปุ๋ยชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้กับดินที่มีความเป็นกรด

ปุ๋ยชนิดนี้นอกจากจะใช้เป็นปุ๋ยโดยตรงแล้ว ยังใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการเตรียมปุ๋ยเคมีที่มีฟอสฟอรัสชนิดอื่นๆ ได้อีกหลายชนิด ดังแผนภาพ



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตที่สำคัญจากหินฟอสเฟต (ยางยุทธ, 2541)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตชนิดเข้มข้น (Concentrated superphosphate)

ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตชนิดเข้มข้นหมายถึง ปุ๋ยเดี่ยวฟอสฟอรัสที่มีในปริมาณมาก ปุ๋ยชนิดนี้ที่มีการผลิตออกมาใช้กันคือปุ๋ย double superphosphate ที่มีปริมาณ P_2O_5 ระหว่าง 32-40 % และปุ๋ย triple superphosphate ที่มีปริมาณ P_2O_5 ระหว่าง 45-46 % (ยงยุทธ, 2541) ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตชนิดเข้มข้นที่ผลิตโดยใช้กรดฟอสฟอรัสในรูป Wet process acid มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบประมาณ 1-5 % โดยเฉลี่ย

กรดฟอสฟอรัส (H_3PO_4) ที่ใช้ในการผลิตได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างหินฟอสเฟตกับกรดกำมะถัน (Wet process acid) โดยใช้กรดกำมะถันเป็นในปริมาณที่สมดุลกับแคลเซียมที่มีอยู่ในฟอสเฟตแล้วกรองเอาไฮปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ออกจากส่วนผสมที่ได้จากปฏิกิริยา

โดยเฉลี่ยปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตชนิดเข้มข้นมีปริมาณ P_2O_5 มากกว่าปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตชนิดธรรมดาประมาณ 2 เท่า ดังนั้นถ้าพิจารณาจากคราคาต่อหน่วยของธาตุปุ๋ยฟอสฟอรัสแล้ว ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตชนิดเข้มข้นจะมีค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษา การขนส่งและการใช้ถูกกว่าปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตชนิดธรรมดา

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติวรรณ และคณะ (2547) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยฟอสเฟตในการปรับเสถียรแคลเซียมที่ปนเปื้อนในดินสังเคราะห์ โดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต 3 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยทริเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) และปุ๋ยหินฟอสเฟต (RP) พบว่าปุ๋ยทริเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตเป็นปุ๋ยที่มีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรมากที่สุด 99.79 % ประสิทธิภาพในการปรับเสถียรโลหะแคลเซียมเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณปุ๋ยทริเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตที่เติมในดิน โดยอัตราส่วนโดย โมลของฟอสฟอรัสต่อ โมลแคลเซียมให้ประสิทธิภาพในการปรับเสถียรดีที่สุด คือ 0.15 เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการปรับเสถียรทำให้ประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแคลเซียมด้วยปุ๋ยทริเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตมีมากขึ้น โดยประสิทธิภาพในการปรับเสถียรสูงสุด เมื่อใช้ระยะเวลาในการปรับเสถียร 4 สัปดาห์

Bradley และคณะ (2001) ทำการศึกษารับปรับเสถียรโลหะหนักด้วย PO_4^{3-} ที่ละลายได้ กับ ชี้เถ้า (bottom ash) จากเตาเผาของเสียที่เป็นของแข็ง ในชี้เถ้าจะมีพวกโลหะหนักที่สามารถชะได้ เช่น ตะกั่ว สังกะสี แคลเซียม โดยการเติม 0.38 โมลของฟอสเฟตที่ละลายได้ต่อกิโลกรัมของส่วนที่เหลือ ซึ่งเป็นปริมาณที่มีประสิทธิภาพอย่างมาก จากการทดลองสกัดส่วนของโลหะหนักต่างๆในการชะที่ทำได้ผลดังนี้ แคลเซียม 52 %, แคลเซียม 14 %, ทองแดง 98%, ตะกั่ว 99% และสังกะสี 36% พิเศษที่เหมาะสมคือ 4, 6 และ 8 ปริมาณและพื้นที่ที่ได้จาก spectroscopies แสดงการตกตะกอนในรูป Crystalline และ amorphous นั่นก็แสดงว่า ปฏิกิริยาของโลหะฟอสเฟตในส่วนนี้ไม่สามารถละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำได้ โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นและเห็นได้ชัดเจนคือ แคลเซียมฟอสเฟต, tertiary metal phosphate และในรูปของแร่อะพาไทต์ tertiary calcium phosphate, calcium hydroxyapatite, lead chloropyromophite และ lead hydroxyppyromophite

Panagiotis และคณะ (2002) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยโมโนเบสิกแคลเซียมฟอสเฟต เพื่อใช้ในการปรับเสถียร โลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน โดยดินตัวอย่างมีการปนเปื้อนของตะกั่ว สังกะสี แคลเซียม และสารหนู จากการทดลองเมื่อใช้วิธี TCLP ในการชะดินหลังปรับเสถียรและวิธีการชะด้วย EDTA และ DTPA โดยเติมอัตราส่วนโมลของฟอสเฟตต่อตะกั่วเท่ากับ 0.6 พบว่า มีการเคลื่อนย้ายของตะกั่วและแคลเซียมขณะที่การเคลื่อนย้ายของสังกะสีและสารหนูมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

McGowen และคณะ (2001) ทำการศึกษานำปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตมาใช้ในการลดการละลายและการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักที่มาจากรังหลอมและมีการปนเปื้อนในดิน โดยนำดินที่มีการปนเปื้อน Cd, Pb, Zn และ As ที่เก็บมาจากบริเวณเตาหลอมมาทำการแตกคอลัมน์แล้วเติมปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตลงไป ปริมาณ 460, 920 และ 2300 mgP/kg และในชุดควบคุมจะไม่มีการเติมปุ๋ยลงไป จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตในปริมาณ 2300 mgP/kg จะมีผลต่อการตรึง Cd, Pb และ Zn จากความเข้มข้นที่ถูกชะออกมาพบว่าโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นจากเดิม ทำให้การดูดซับและการเคลื่อนย้ายของโลหะไปยังดินลดลงด้วย



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ปุ๋ยหินฟอสเฟต
2. ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (TRI-CIRCLE BRAND)
3. ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต
4. กรดอะซิติก (AR grade, CARLO ERBA)
5. กรดบอริก (AR grade, CARLO ERBA)
6. กรดไนตริกเข้มข้น (AR grade, CARLO ERBA)
7. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (AR grade, CARLO ERBA)
8. กรดฟอสฟอริกเข้มข้น (AR grade, CARLO ERBA)
9. กรดไฮโดรคลอริก (AR grade, CARLO ERBA)
10. กรดไนตริกเข้มข้น (AR grade, CARLO ERBA)
11. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (AR grade, CARLO ERBA)
12. กรดไฮโดรฟลูอริก (AR grade, CARLO ERBA)
13. เอมีนแอลกอฮอล์ (AR grade, CARLO ERBA)
14. โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต (AR grade, CARLO ERBA)
15. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (AR grade, CARLO ERBA)
16. โพแทสเซียมไดโครเมต (AR grade, CARLO ERBA)
17. เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (AR grade, CARLO ERBA)
18. แอมโมเนียมอะซิเตต (AR grade, CARLO ERBA)
19. แอมโมเนียมออกซาเลต (AR grade, CARLO ERBA)
20. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (AR grade, CARLO ERBA)
21. แอมโมเนียมคลอไรด์ (AR grade, CARLO ERBA)
22. ซิลเวอร์ไนเตรต (AR grade, CARLO ERBA)
23. โซเดียมคลอไรด์ (AR grade, CARLO ERBA)
24. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (AR grade, CARLO ERBA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer รุ่น AA-680 ยี่ห้อ Shimadzu
2. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น MSB020 CX1.5 ยี่ห้อ SUNYO
3. เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น Hetofrig CB60 VS ยี่ห้อ Heto
4. เครื่อง Heating Water Bath รุ่น Model WB 7/14/22/29/45
5. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น 251 บริษัท Denver Instrument
6. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance) รุ่น TC-254 บริษัท Denver Instrument
7. เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrophotometer รุ่น D8ADVANCE บริษัท BRUKER AG
8. เครื่องกรองแบบลดความดัน รุ่น B-169 บริษัท B'U'CHI
9. ตู้อบของบริษัท Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP
10. ชุดย่อยสลาย (Microwave digestion) ของบริษัท Milestone microwave Laboratory Systems รุ่น 1200 Mega
11. กระดาษกรอง Whatman GF/C เบอร์ 1
12. ตะแกรงร่อนขนาด 2.5 และ 10 เมช
13. ไฮโดรมิเตอร์มาตรฐาน ASTM NO. 1.152 H
14. แท่งแก้วสำหรับคนแบบ Plunger
15. เทอร์โมมิเตอร์
16. เครื่องแก้วสำหรับห้องปฏิบัติการ

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นดินที่เก็บรวบรวมจากตำบลแม่ดาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตากเป็นพื้นที่ที่มีปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมในดิน และทำการเตรียมดินตัวอย่าง

1. ผึ่งดินโดยเกลี่ยดินให้กระจายทั่วภาชนะที่รองกระดาษไว้ ผึ่งในห้องที่สะอาดไม่มีฝุ่นคลุ้ง
2. เลือกเศษหญ้า เศษหินออกให้หมดเท่าที่จะทำได้
3. เมื่อดินแห้ง บดดินด้วยครกบดดิน แล้วร่อนดินด้วยตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร
4. เก็บดินไว้ในถุงพลาสติกแบบปิดได้ เขียนเลขที่ตัวอย่างดิน แล้วเก็บไว้วิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การศึกษาสมบัติของดินตัวอย่าง

ทำการวิเคราะห์หาสมบัติของดินตัวอย่างตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติของดินตัวอย่าง

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
1. ค่าพีเอช	เครื่องวัดพีเอช / 1:1(soil: water)
2. ความเป็นกรดของดิน	วิธีแบเรียมคลอไรด์โรตราทานอลามีน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
3. ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	การทำให้อิ่มตัวด้วยประจุบวก (กรมวิชาการเกษตร, 2544)
4. ความชื้น	อบแห้งที่อุณหภูมิ 103 °C
5. เปอร์เซ็นต์เนื้อดินสัมผัส	ไฮโดรมิเตอร์
6. องค์ประกอบของดิน	เอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (XRF)
7. ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน	การออกซิเดชันแบบเปียก (กรมวิชาการเกษตร, 2544)
8. ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์	Bray II (กรมวิชาการเกษตร, 2544)
9. ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด	เครื่องไมโครเวฟไคเจกซ์ชัน/อะตอมมิกแอบซอร์บ ชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
10. ปริมาณแคดเมียมชะละลาย	TCLP/อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (ท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6, 2540)

3.3.3 การศึกษาชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียร

- นำดินตัวอย่างใส่ลงในภาชนะพลาสติก เติมปุ๋ยหินฟอสเฟตโดยให้มีสัดส่วนของโมลฟอสเฟตต่อแคดเมียมเท่ากับ 1:1
- ตั้งทิ้งไว้วัน 3 สัปดาห์ นำดินที่ผ่านการปรับเสถียร ไปวิเคราะห์หาค่าพีเอช, ปริมาณแคดเมียมที่ชะละลายด้วยวิธี TCLP และการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential extraction)
- ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ตามวิธีข้างต้นแต่เปลี่ยนชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตที่ใช้เป็นปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตตามลำดับ
- ทำชุดควบคุมโดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับข้างต้น แต่ไม่เติมปุ๋ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การศึกษาปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียร

1. นำดินตัวอย่างใส่ลงในภาชนะพลาสติก เติมปุ๋ยฟอสเฟตที่ได้จากการทดลองที่ 3.3.3 โดยให้มีสัดส่วนของโมลฟอสเฟตต่อแคดเมียมเท่ากับ 0.5:1
2. ตั้งทิ้งไว้นาน 3 สัปดาห์ นำดินที่ผ่านการปรับเสถียรไปวิเคราะห์หาค่าพีเอช, ปริมาณแคดเมียมที่ชะละลายด้วยวิธี TCLP และการสกัดแบบลำดับขั้น
3. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ตามวิธีข้างต้น แต่เปลี่ยนสัดส่วนของโมลฟอสเฟตต่อแคดเมียมเป็น 0.5:1, 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ตามลำดับ
4. ทำชุดควบคุมโดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับข้างต้น แต่ไม่เติมปุ๋ยฟอสเฟต

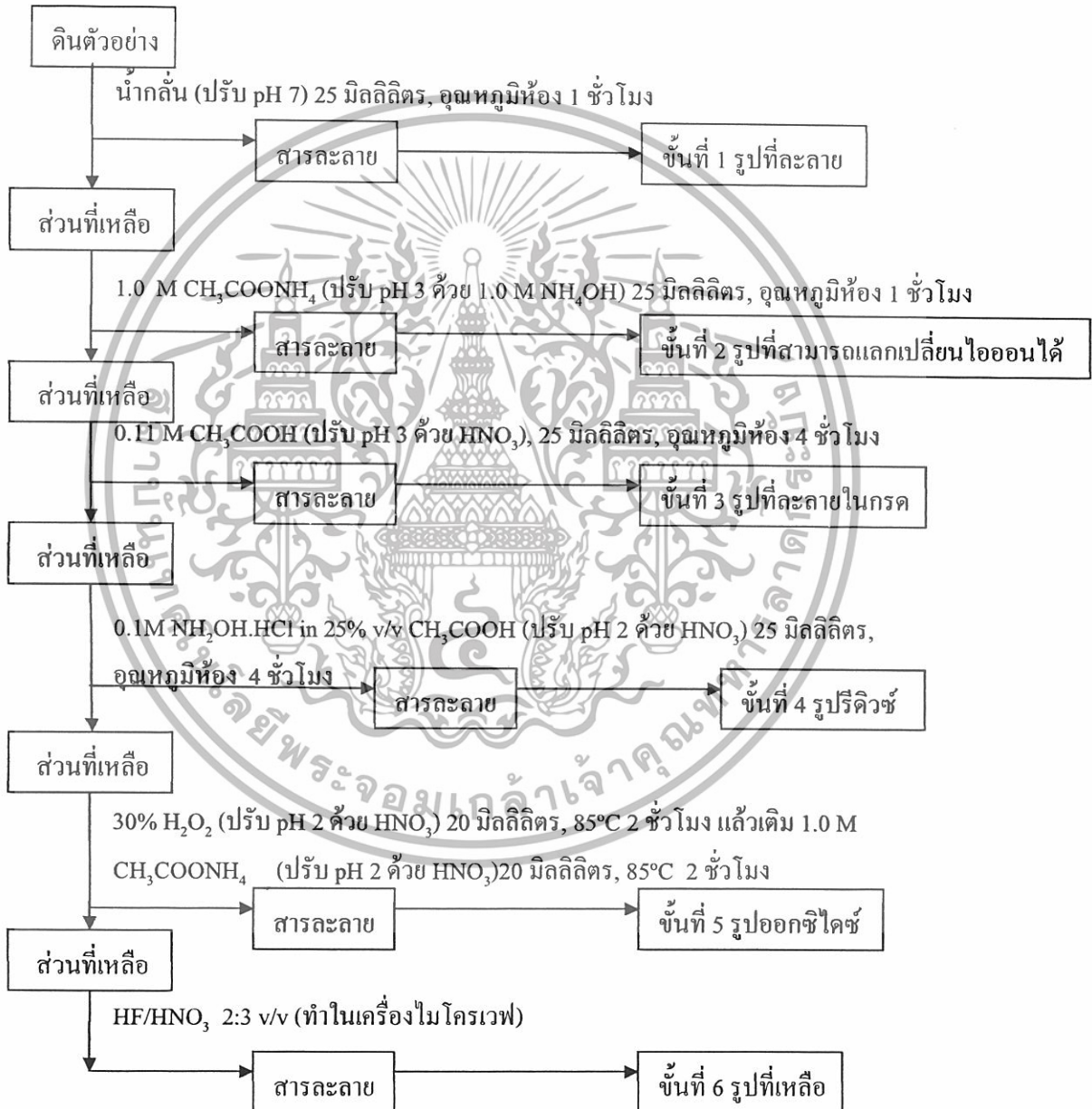
3.3.5 การศึกษาระยะเวลาสัมผัสของปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียร

1. นำดินตัวอย่างใส่ลงในภาชนะพลาสติก เติมปุ๋ยฟอสเฟตที่ได้จากการทดลองที่ 3.3.3 และปริมาณปุ๋ยที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.3.4 โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสเป็น 1 สัปดาห์
2. ตั้งทิ้งไว้นาน 3 สัปดาห์ นำดินที่ผ่านการปรับเสถียรไปวิเคราะห์หาค่าพีเอช, ปริมาณแคดเมียมที่ชะละลายด้วยวิธี TCLP และการสกัดแบบลำดับขั้น
3. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ตามวิธีข้างต้น แต่เปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสเป็น 1, 2 และ 3 สัปดาห์ ตามลำดับ
4. ทำชุดควบคุมโดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 การศึกษารูปแบบของแคดเมียมในดินภายหลังการปรับเสถียรด้วยวิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction)

- นำดินอย่างภายหลังการปรับเสถียรมาทำการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นเพื่อศึกษาสัดส่วนของโลหะรูปแบบต่างๆ ในดิน รูปแบบของแคดเมียมในดินภายหลังการปรับเสถียรทำการศึกษาดังวิธี Sequential extraction อ้างอิงตามวิธีการของ (ปกานีย์, 2545) ซึ่งวิธีการทดลองสามารถสรุปได้ดังแผนภาพที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการปรับเสถียรแควมที่ปนเปื้อนในดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต 3 ชนิด คือ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) และปุ๋ยหินฟอสเฟต (RP) ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินตัวอย่าง ผลของชนิดของปุ๋ยฟอสเฟต ปริมาณปุ๋ยฟอสเฟต และระยะเวลาสัมผัสของปุ๋ยฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพในการปรับเสถียร นอกจากนี้ยังทำการศึกษารูปต่าง ๆ ของแควมที่พบในดินทั้งก่อนและหลังการปรับเสถียร โดยใช้วิธีการสกัดแบบลำดับขั้น ผลการทดลองที่ได้เป็นดังนี้ คือ

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ในการศึกษาการปรับเสถียรแควมที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต ทำการศึกษาโดยใช้ดินตัวอย่างที่เก็บรวบรวมมาจากพื้นที่ที่ประสบปัญหาการปนเปื้อนของแควมในดินในห้วยแม่ดาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 (ดูรายละเอียดใน ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

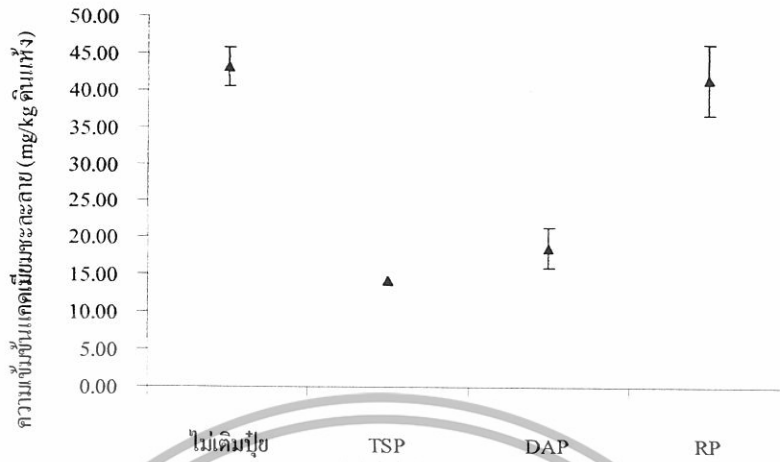
คุณสมบัติของดิน		ค่าที่วัดได้
ค่าพีเอช (อัตราส่วนดิน : น้ำ เท่ากับ 1:1)		7.65±0.06
ความเป็นกรดของดิน (meq/g ดินแห้ง)		0.24±0.09
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (meq/100g)		15.6±0.57
ความชื้น (%)		3.64±0.07
การกระจายตัวของอนุภาค	%sand	64.03
	%silt	22.67
	%clay	13.31
ลักษณะเนื้อดิน		sandy loam
องค์ประกอบของดิน	%Al ₂ O ₃	11.87
	%SiO ₂	69.53
	%Fe ₂ O ₃	4.55
ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (%)		9.58±0.23
ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (µgP/g ดินแห้ง)		22.85±3.84
ความเข้มข้นแควมทั้งหมด (mg/kg ดินแห้ง)		126.8±2.46
ความเข้มข้นแควมชะละลาย (mg/kg ดินแห้ง)		43.12±2.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

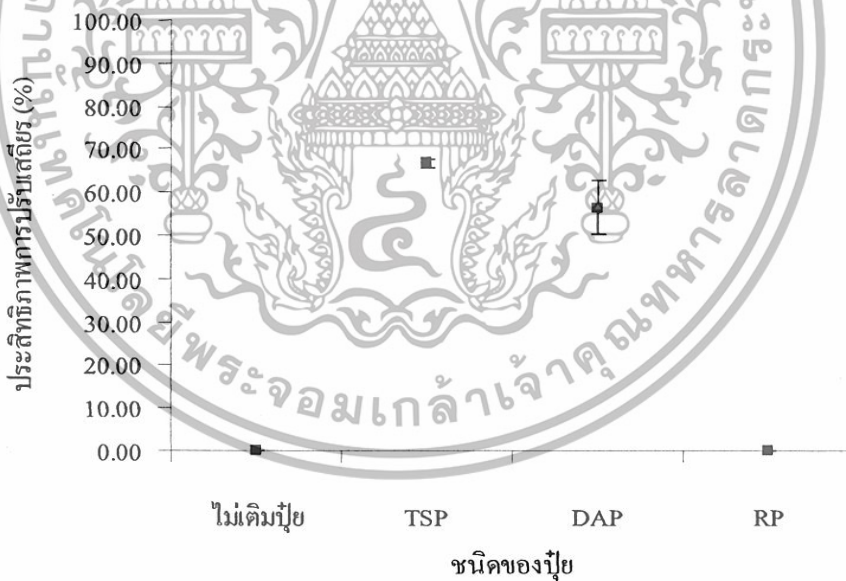
ผลการศึกษาคู่สมบัตินทางกายภาพและทางเคมีของดิน พบว่าดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีค่าพีเอช 7.65 แสดงว่าดินเป็นกลาง โดยมีค่าความเป็นกรดของดินเท่ากับ 0.23 ± 0.30 meq/g ดินแห้ง ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 15.6 ± 0.57 meq/100g มีความชื้น 3.64 ± 0.07 % ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) มีสีน้ำตาลเข้ม องค์ประกอบของดินมีสารประกอบออกไซด์ของอะลูมินา (Al) ซิลิกา (Si) และเหล็ก (Fe) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณ Al_2O_3 เท่ากับ 11.87 %, SiO_2 เท่ากับ 69.53 % และ Fe_2O_3 เท่ากับ 4.55 % มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ 9.58 ± 0.23 % ซึ่งกรมพัฒนาที่ดินจัดว่าเป็นดินที่มีอินทรีย์วัตถุมากกว่า 4.5 % เป็นดินที่มีระดับอินทรีย์วัตถุสูงมาก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) ทำให้มีปริมาณการดูดซับสารอินทรีย์ได้ค่อนข้างดี (สุกมาศ, 2538) จากการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินพบว่ามีค่าเท่ากับ 22.85 ± 3.84 μ g P/g ดินแห้ง มีความเข้มข้นแคดเมียมทั้งหมดเท่ากับ 126.8 ± 2.46 mg/kg ดินแห้ง และมีความเข้มข้นของแคดเมียมชะละลายเท่ากับ 43.12 ± 2.63 mg/kg ดินแห้ง ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมที่กำหนดให้ปริมาณแคดเมียมในดินต้องมีค่าไม่เกิน 37 mg/kg (กรมควบคุมมลพิษ, 2535)

4.2 ผลของชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน

ในการศึกษานี้ชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียร ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการปรับเสถียรแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินและรูปของแคดเมียมที่พบในดินโดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต 3 ชนิดเป็นตัวปรับเสถียรได้แก่ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) และปุ๋ยหินฟอสเฟต (RP) ลงไปในดิน โดยกำหนดให้สัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคดเมียมมีค่าคงที่เท่ากับ 1.0 และใช้ระยะเวลาสัมผัสในการปรับเสถียร 3 สัปดาห์ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-1 ภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นแคดเมียมละลายในดินที่ผ่านการปรับเสถียรโดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต 3 ชนิด เทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมปุ๋ยฟอสเฟต แถบความผิดพลาด (error bar) แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ หากไม่ปรากฏ แสดงว่ามีค่าน้อยมาก



รูปที่ 4.2 เปอร์เซนต์การปรับเสถียรแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต 3 ชนิดเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมปุ๋ย แถบความผิดพลาด (error bar) แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ หากไม่ปรากฏ แสดงว่ามีค่าน้อยมาก

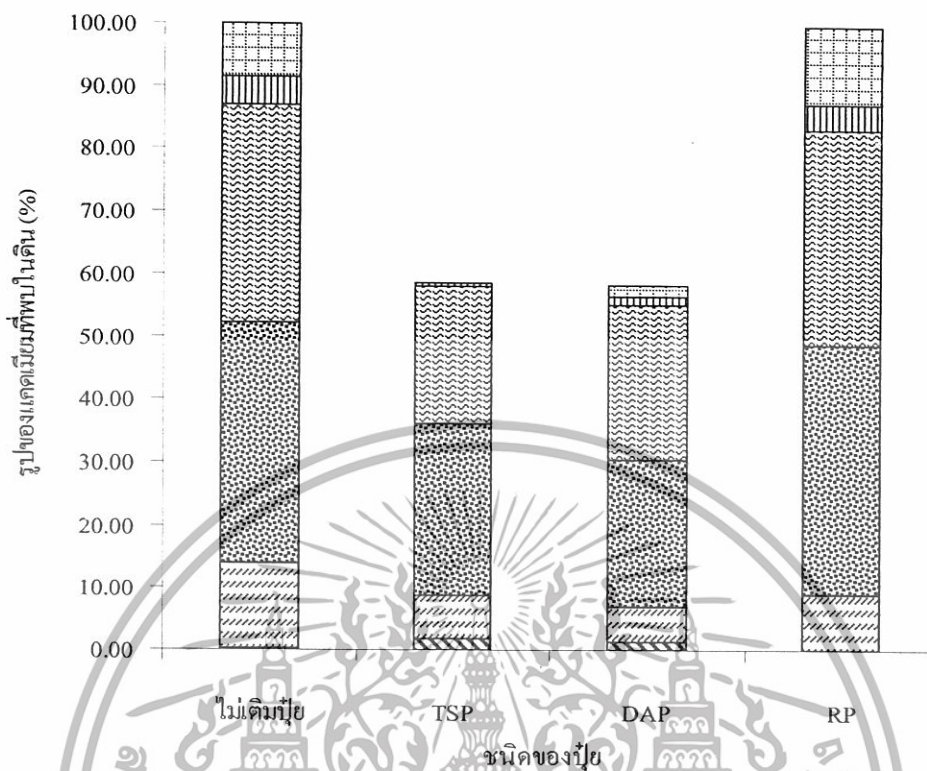
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 พบว่าผลของความเข้มข้นแคดเมียมในดินตัวอย่างที่ไม่เติมปุ๋ยมีความเข้มข้นแคดเมียมที่ชะละลายเท่ากับ 43.12 ± 2.63 mg/kg ดินแห้ง เมื่อเติมปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) ลงในดินตัวอย่าง พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่ชะละลายออกมาจากดินมีค่าลดลง โดยดินตัวอย่างที่ใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) เป็นตัวปรับเสถียร มีความเข้มข้นของแคดเมียมที่ชะละลายออกมาเท่ากับ 14.30 ± 0.46 mg/kg ดินแห้ง ในขณะที่ดินตัวอย่างที่ใช้ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) เป็นตัวปรับเสถียร มีความเข้มข้นของแคดเมียมที่ชะละลายออกมาจากดินเท่ากับ 18.75 ± 2.71 mg/kg ดินแห้ง ในกรณีของปุ๋ยหินฟอสเฟต (RP) พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่ชะละลายออกมาจากดินมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ชะละลายออกมาจากดินที่ไม่เติมปุ๋ยโดยมีค่าเท่ากับ 41.74 ± 4.83 mg/kg ดินแห้ง แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแคดเมียมได้น้อยมาก

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในแง่เปอร์เซ็นต์การปรับเสถียรแคดเมียมในดิน (รูปที่ 4.2) พบว่าปุ๋ยฟอสเฟตต่างชนิดกัน มีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรที่แตกต่างกัน ได้โดยความสามารถในการปรับเสถียรสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ คือ $TSP > DAP > RP$ โดยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) มีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรเท่ากับ 66.83 ± 1.06 % ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) มีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรเท่ากับ 56.51 ± 6.29 % และปุ๋ยหินฟอสเฟต (RP) มีค่าน้อยมาก ความสามารถในการปรับเสถียรของปุ๋ยทั้ง 3 ชนิดอาจเป็นผลเนื่องมาจากความสามารถในการละลายน้ำที่ไม่เท่ากัน โดยปุ๋ยหินฟอสเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ทำให้ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยากับแคดเมียมได้น้อยลง นอกจากนี้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตที่เกิดจากการนำหินฟอสเฟตที่ประกอบด้วย ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3(PO_4)_2$) มาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกและกรดกำมะถันซึ่งหินฟอสเฟต ก็จะเปลี่ยนรูปไปเป็น ไดแคลเซียมฟอสเฟต ($CaHPO_4$) และ โมโนแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca(H_2PO_4)_2$) ตามลำดับ ซึ่งเกลือทั้งสองชนิดนี้จะปล่อยฟอสเฟตออกมาได้ง่ายขึ้น (ขงยุทธ และคณะ, 2541) ทำให้ฟอสเฟต ไอออนเข้าทำปฏิกิริยากับแคดเมียม ได้ง่ายกว่าปุ๋ยหินฟอสเฟต นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษารั้งนี้กับกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยปุ๋ยที่ให้ประสิทธิภาพในการปรับเสถียรดีที่สุด คือ TSP และรองลงมา คือ DAP (กิตติวรรณ และคณะ, 2547) ดังนั้น ในการศึกษารั้งนี้จึงเลือกปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) เพื่อทำการทดลองในตอนต่อไป

เมื่อนำดินทั้งก่อนและหลังการปรับเสถียรมาทำการสกัดแบบลำดับขั้น เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของแคดเมียมที่พบในดินทั้งก่อนและหลังการปรับเสถียร ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตาราง ค-1 ภาคผนวก ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 รูปของแควดเมียมที่พบในดิน ได้แก่ รูปที่ละลายน้ำได้ (I) รูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ (II) รูปที่ละลายได้ในกรด (III) รูปรีติวซ์ (IV) รูปออกซิไดซ์ (V) รูปที่เหลือ (VI)

จากรูปที่ 4.3 พบว่าผลการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นของการปรับเสถียรแควดเมียมในดินที่ไม่เค็มปุ๋ยมีโลหะแควดเมียมอยู่ในรูปที่ละลายได้ในกรดมากที่สุดเท่ากับ 38.29 % เนื่องจากแควดเมียมละลายได้ดีในสภาวะกรด ซึ่งเป็นแควดเมียมที่อยู่ในรูปสารประกอบคาร์บอนेट รองลงมา คือ รูปรีติวซ์มีค่าเท่ากับ 34.26 % เมื่อพิจารณาชนิดของปุ๋ยที่เติมลงไปพบว่าการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นของการปรับเสถียรแควดเมียมในดินโดยใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) ทำให้โลหะแควดเมียมในรูปต่างๆ มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากฟอสเฟตไอออนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับแควดเมียม ในกรณีของปุ๋ยหินฟอสเฟตพบว่ารูปแบบต่าง ๆ ของแควดเมียมที่พบในดินภายหลังการปรับเสถียรมีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบของแควดเมียมที่พบในดินชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าปุ๋ยหินฟอสเฟต มีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแควดเมียมได้น้อยมาก ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นแควดเมียมชะละลายด้วยวิธี TCLP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

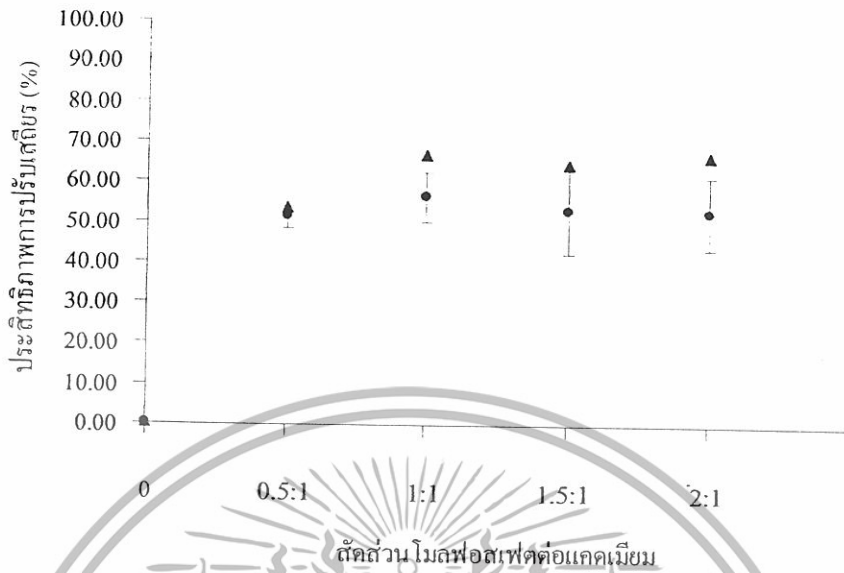
4.3 ผลของปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแควเคี่ยมในดิน

ในการศึกษาปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียร ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการปรับเสถียรแควเคี่ยมที่ปนเปื้อนในดินและรูปของแควเคี่ยมที่พบในดิน โดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต 2 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) และทำการแปรค่าสัดส่วน โมลฟอสเฟตต่อ โมลแควเคี่ยมเท่ากับ 0.5:1, 1:1, 1.5:1 และ 2:1 ตามลำดับ และใช้ระยะเวลาสัมผัส 3 สัปดาห์ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-2 และ ข-3 ภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นแควเคี่ยมละลายในดินตัวอย่างที่ใช้ปุ๋ยฟอสเฟตเป็นตัวปรับเสถียรในปริมาณต่างกัน โดยใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (Δ) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (\bullet) แถบความผิดพลาด (error bar) แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ หากไม่ปรากฏ แสดงว่ามีค่าน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



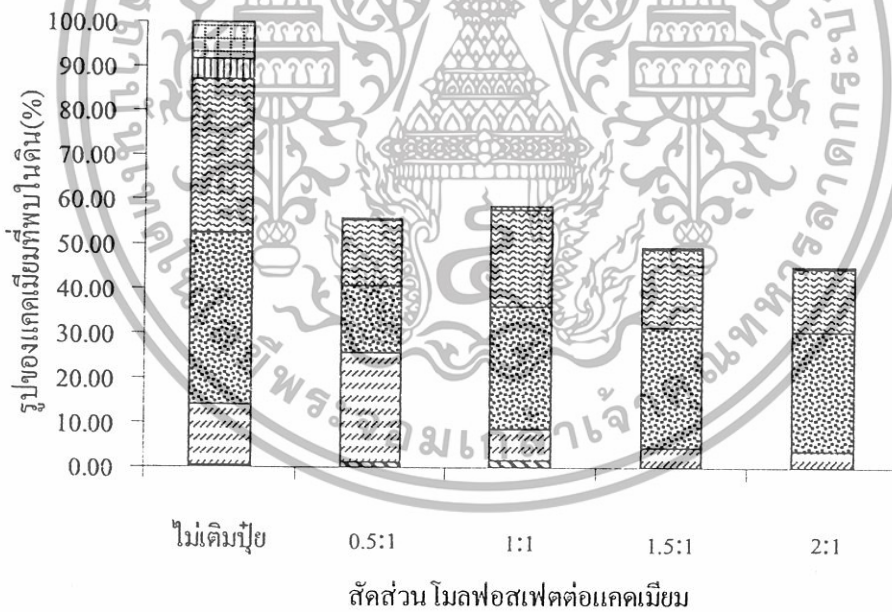
รูปที่ 4.5 เปรูเซ็นต์การปรับเสถียรแคลเซียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (▲) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (●) ในสัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคลเซียมที่ต่างกัน แถบความผิดพลาด (error bar) แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ หากไม่ปรากฏ แสดงว่ามีค่าน้อยมาก

จากรูปที่ 4.4 พบว่าปริมาณของปุ๋ยฟอสเฟตที่ใช้มีผลต่อความสามารถในการปรับเสถียรแคลเซียม โดยเมื่อเพิ่มปริมาณปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) ทำให้ความเข้มข้นแคลเซียมชะละลายมีค่าน้อยลงเทียบกับชุดควบคุม ความเข้มข้นแคลเซียมชะละลายมีค่าลดลงจาก 43.12 ± 2.63 mg/kg ดินแห้ง ในดินที่ไม่เติมเกลือ 14.30 ± 0.46 mg/kg ดินแห้ง เมื่อใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตในสัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคลเซียมเท่ากับ 1:1 และเมื่อเพิ่มสัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคลเซียมเป็น 1.5:1 และ 2:1 พบว่า ความเข้มข้นของแคลเซียมชะละลายมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้เมื่อใช้สัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคลเซียมเท่ากับ 1 ผลของความเข้มข้นแคลเซียมที่ชะละลายของดินภายหลังการปรับเสถียร โดยใช้ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคลเซียมที่ 0.5:1, 1:1, 1.5:1 และ 2:1 มีความเข้มข้นแคลเซียมที่ชะละลายมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าความเข้มข้นแคลเซียมที่ชะละลายแต่ละสัดส่วนเท่ากับ 20.98 ± 1.20 , 18.75 ± 2.71 , 20.21 ± 4.58 และ 20.30 ± 3.91 mg/kg ดินแห้ง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในแง่เปอร์เซ็นต์การปรับเสถียรแควเมียมที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้ปุ๋ย TSP (รูปที่ 4.5) พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแควเมียม เปอร์เซ็นต์การปรับเสถียรมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยสัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแควเมียมที่ 0.5:1, 1:1, 1.5:1 และ 2:1 มีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรเท่ากับ 53.82 ± 4.96 , 66.83 ± 1.06 , 64.73 ± 0.57 และ 66.79 ± 1.78 % ตามลำดับ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแควเมียมที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) พบว่าสัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแควเมียมที่ 0.5:1, 1:1, 1.5:1 และ 2:1 โดยมีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งประสิทธิภาพในการปรับเสถียรเท่ากับ 57.35 ± 2.78 , 56.51 ± 6.29 , 53.13 ± 10.62 และ 52.93 ± 9.07 % ตามลำดับ

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าผลของความเข้มข้นแควเมียมที่ชะละลายของดินภายหลังการปรับเสถียรโดยใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต(TSP) ที่สัดส่วน โมลฟอสเฟตต่อแควเมียม 1:1 มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 14.30 ± 0.46 mg/kgดินแห้ง และมีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรมากที่สุดเท่ากับ 66.83 ± 1.06 % ดังนั้นจึงนำดินที่ใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) มาทำการสกัดแบบลำดับขั้นเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของแควเมียมที่พบในดินทั้งก่อนและหลังการปรับเสถียร ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตาราง ก-2 ภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.6 รูปของแควเมียมที่พบในดิน ได้แก่ รูปที่ละลายน้ำได้ (☒) รูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ (▨) รูปที่ละลายได้ในกรด (▩) รูปรีดิคัล (⊞) รูปออกซิไดส์ (▧) รูปที่เหลือ (⊞) โดยใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) ในสัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแควเมียมที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 พบว่าผลการสกัดลำดับชั้นของการปรับเสถียรแคะเมียมในดินที่ไม่เติมปุ๋ยพบว่า มีโลหะแคะเมียมอยู่ในรูปที่ละลายได้ในกรดมากที่สุดเท่ากับ 38.29 % รองลงมา คือ รูปรีดิวซ์มีค่าเท่ากับ 34.76 % เมื่อพิจารณาปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต(TSP) ที่เติมลงไปดินในสัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคะเมียมที่ 0.5:1 พบว่าโลหะแคะเมียมในรูปที่ละลายได้ในกรดลดลงและรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับดินที่ไม่เติมปุ๋ย ส่วนสัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคะเมียมที่ 1:1, 1.5:1 และ 2:1 มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ

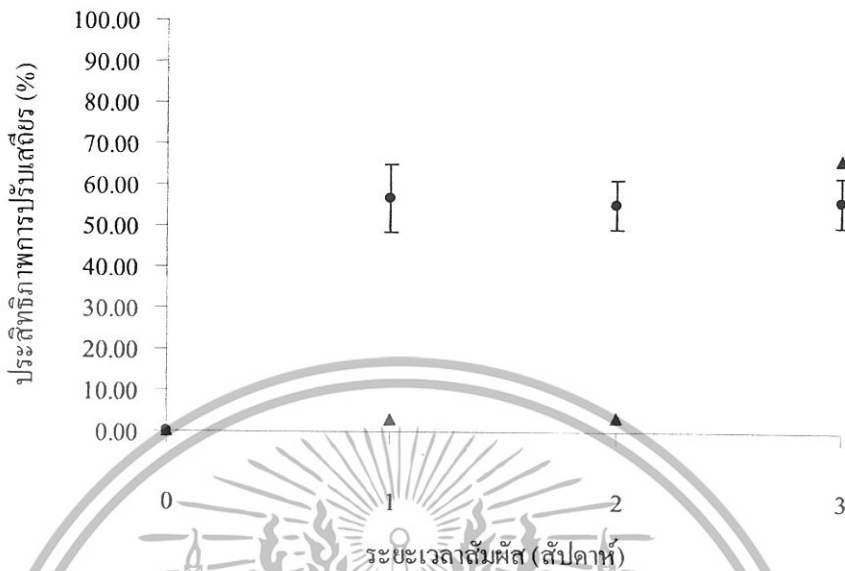
4.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสของปุ๋ยฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแคะเมียมในดิน

ในการศึกษาระยะเวลาสัมผัสของปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียร ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบความสามารถในการปรับเสถียรแคะเมียมที่ปนเปื้อนในดินและรูปของแคะเมียมที่พบในดินโดยใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) ที่สัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคะเมียมเท่ากับ 1:1 โดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัสเป็น 1, 2 และ 3 สัปดาห์ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 (ดูรายละเอียดตาราง ข-4 และ ข-5 ภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นแคะเมียมที่ละลายที่ระยะเวลาต่างกัน เมื่อใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (▲) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (●) เป็นตัวปรับเสถียร แถบความผิดพลาด (error bar) แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ หากไม่ปรากฏ แสดงว่ามีค่าน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

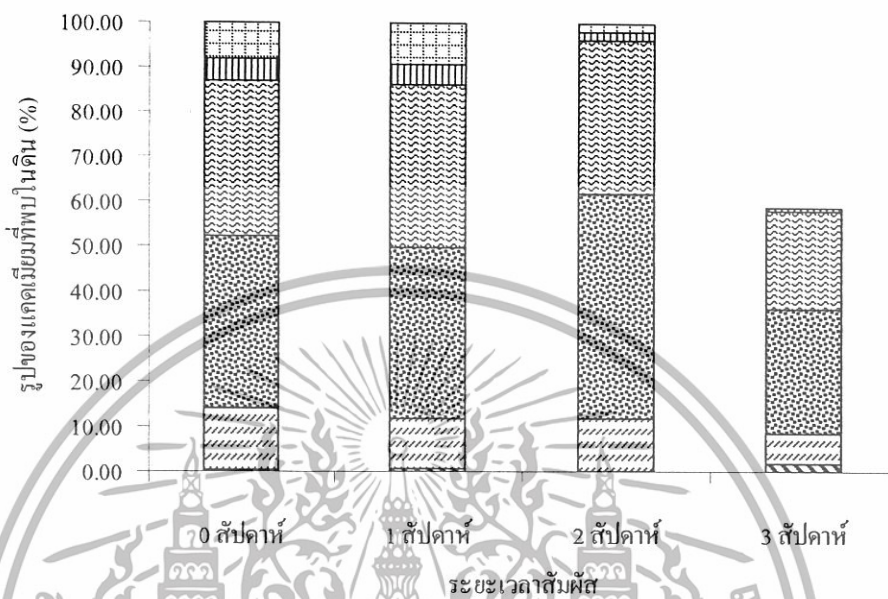


รูปที่ 4.8 เปรูเรชั่นต์การปรับเสถียรแคลเซียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้ปุ๋ยไตรฟอสเฟต (▲) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (●) ในระยะเวลาสัมผัสที่ต่างกัน แถบความผิดพลาด (error bar) แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ หากไม่ปรากฏ แสดงว่ามีค่าน้อยมาก

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อใช้ปุ๋ยไตรฟอสเฟต (TSP) ที่สัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคลเซียมเท่ากับ 1:1 เป็นตัวปรับเสถียรความเข้มข้นแคลเซียมที่ชะละลายที่ระยะเวลาสัมผัส 1 และ 2 สัปดาห์มีค่าไม่แตกต่างกัน ขณะที่ระยะเวลาสัมผัส 3 สัปดาห์ความเข้มข้นแคลเซียมที่ชะละลายมีค่าลดลงเหลือ 14.30 ± 0.46 mg/kg ดินแห้ง เทียบกับชุดไม่เติมปุ๋ย ในขณะที่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) ที่ระยะเวลาสัมผัส 1 สัปดาห์ ความเข้มข้นที่ชะละลายมีค่าลดลง แล้วจะคงที่เมื่อระยะเวลาสัมผัสที่ 2 และ 3 สัปดาห์ อาจเป็นผลมาจาก ปุ๋ยไดแอมโมเนียมมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบโดยสารประกอบไนโตรเจนอาจจะทำปฏิกิริยากับดินและส่งผลต่อการปรับเสถียร

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในแง่ประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแคลเซียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้ปุ๋ยไตรฟอสเฟต (TSP) (รูปที่ 4.8) สัดส่วน โมลฟอสเฟตต่อแคลเซียมเท่ากับ 1:1 พบว่าประสิทธิภาพในการปรับเสถียรที่ระยะเวลาสัมผัส 3 สัปดาห์ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 66.83 ± 1.06 ในขณะที่ระยะเวลาสัมผัส 1 และ 2 สัปดาห์มีความสามารถในการปรับเสถียรได้น้อยมาก ดังนั้นจึงนำดินที่ใช้ปุ๋ยไตรฟอสเฟต (TSP) มาทำการสกัดแบบลำดับขั้น เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลง

รูปแบบของแคะเมียมที่พบในดินทั้งก่อนและหลังการปรับเสถียร ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.9 (รายละเอียดตาราง ก-3 ภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.9 รูปแบบของแคะเมียมที่พบในดิน ได้แก่ รูปที่ละลายน้ำได้ (As) รูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ (Pb) รูปที่ละลายได้ในกรด (Cd) รูปรีดิวซ์ (Cr) รูปออกไซด์ (Ni) รูปที่เหลือ (Mn) โดยใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) ในระยะเวลาสัมผัสที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.9 ผลการสกัดแบบลำดับขั้นของการปรับเสถียรแคะเมียมในดินโดยใช้ ปุ๋ยทริปเปิลฟอสเฟต (TSP) สัดส่วนโมลฟอสเฟตต่อแคะเมียมเท่ากับ 1:1 พบว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 3 สัปดาห์ แคะเมียมในรูปต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลง ขณะที่ระยะเวลาสัมผัส 1 สัปดาห์ และ 2 สัปดาห์ พบว่ารูปแบบต่าง ๆ ของแคะเมียมที่พบในดินภายหลังการปรับเสถียรมีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบของแคะเมียมที่พบในดินชุดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการปรับเสถียรแคะเมียมที่ปนเปื้อนในดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต 3 ชนิด คือ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และปุ๋ยหินฟอสเฟต ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินตัวอย่าง ผลของชนิดของปุ๋ยฟอสเฟต ปริมาณปุ๋ยฟอสเฟต และระยะเวลาสัมผัสของปุ๋ยฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพในการปรับเสถียร นอกจากนี้ยังทำการศึกษารูปต่าง ๆ ของแคะเมียมที่พบในดินทั้งก่อนและหลังการปรับเสถียร ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษารุ่นนี้ได้เก็บรวบรวมมาจากพื้นที่ที่ประสบปัญหาการปนเปื้อนของแคะเมียมในดินที่ห้วยแม่ดาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีดังนี้ มีค่าพีเอช 7.65 ± 0.06 ความเป็นกรดของดินเท่ากับ 0.23 ± 0.30 meq/g ดินแห้ง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 15.6 ± 0.57 meq/100g มีความชื้น $3.64 \pm 0.07\%$ ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) มีสีน้ำตาลเข้ม องค์ประกอบของดินโดยมีปริมาณ Al_2O_3 เท่ากับ 11.87% , SiO_2 เท่ากับ 69.53% และ Fe_2O_3 เท่ากับ 4.55% มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ $9.58 \pm 0.23\%$ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าเท่ากับ 22.85 ± 3.84 μg P/g ดินแห้ง มีความเข้มข้นแคะเมียมทั้งหมดเท่ากับ 126.8 ± 2.46 mg/kg ดินแห้ง ความเข้มข้นของแคะเมียมชะละลายเท่ากับ 43.12 ± 2.63 mg/kg ดินแห้ง และรูปของแคะเมียมที่พบในดินอยู่ในรูปที่ละลายได้ในกรดมากที่สุดเท่ากับ 38.29% รองลงมาคือรูปรีดิวส์ เท่ากับ 34.26%

จากการศึกษาชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแคะเมียมในดินและรูปของแคะเมียมที่พบในดิน โดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต 3 ชนิดเป็นตัวปรับเสถียร ได้แก่ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และปุ๋ยหินฟอสเฟต พบว่าดินตัวอย่างที่ใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) เป็นตัวปรับเสถียร มีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรมากที่สุด รองลงมาคือ ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับ $66.83 \pm 1.06\%$, $56.51 \pm 6.29\%$ และปุ๋ยหินฟอสเฟตมีค่าน้อยมาก และรูปของแคะเมียมที่พบในดินโดยใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) ทำให้โลหะแคะเมียมในรูปต่างๆ มีแนวโน้มลดลงเทียบกับรูปแบบของแคะเมียมที่พบในดินชุดควบคุม ในกรณีของปุ๋ยหินฟอสเฟตพบว่ารูปแบบต่าง ๆ ของแคะเมียมที่พบในดินภายหลังการปรับเสถียรมีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบของแคะเมียมที่พบในดินชุดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาปริมาณของปุ๋ยฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแควมในดิน และรูปของแควมที่พบในดิน โดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต 2 ชนิดเป็นตัวปรับเสถียร ได้แก่ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต โดยแปรค่าสัดส่วน โมลฟอสเฟตต่อแควมในดิน เท่ากับ 0.5:1, 1:1, 1.5:1 และ 2:1 พบว่าสัดส่วน โมลฟอสเฟตต่อแควมที่มีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรมากที่สุด คือ 1:1 โดยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการปรับเสถียรมากกว่าปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และรูปของแควมที่พบในดิน โดยใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) เป็นตัวปรับเสถียร พบว่าโลหะแควมในรูปต่างๆ มีแนวโน้มลดลง เทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมปุ๋ย

จากการศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ของปุ๋ยฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพในการปรับเสถียรแควมในดินและรูปของแควมที่พบในดิน โดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต 2 ชนิดเป็นตัวปรับเสถียร ได้แก่ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต โดยแปรค่าระยะเวลาสัมพัทธ์เป็น 1, 2 และ 3 สัปดาห์ พบว่า ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) เกิดปฏิกิริยาในการปรับเสถียรได้เร็วกว่าปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตให้ประสิทธิภาพในการปรับเสถียรสูงกว่าปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตที่ให้ระยะเวลาในการสัมพัทธ์จนถึง 3 สัปดาห์ และรูปของแควมที่พบในดินมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) เป็นตัวปรับเสถียร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการปรับเสถียร โลหะชนิดอื่น และอิทธิพลของโลหะผสมที่มีผลต่อการปรับเสถียร
2. ควรศึกษาการปรับเสถียรในดินที่มีสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีที่แตกต่างกัน
3. ควรศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดแบบลำดับขั้นในวิธีอื่นๆ เพื่อให้ทราบถึงกลไกในการปรับเสถียรได้ชัดเจนยิ่งขึ้น
4. ควรมีการเพิ่มจำนวนซ้ำของตัวอย่างในการวิเคราะห์ให้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2535. มาตรฐานคุณภาพดิน. [Online]. Available: <http://www.pcd.go.th/>
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2547. คู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ดิน. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน
- กรมวิชาการเกษตร. 2544. คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช. กรุงเทพฯ: ชุมชนการเกษตรแห่งประเทศไทย
- กิตติวรรณ กิจปรกรณ์สันติ, ภาวิไล ส่งแสง และอรวรรณ บุญเพชรแก้ว. 2547. การปรับเสถียร แคลเมียมที่ปนเปื้อนในดินด้วยปุ๋ยฟอสเฟต. โครงการพิเศษ สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ชุติมา สันหัทธิตี และพรภิมล พัดภู. 2544. การดูดซับทองแดงและแคลเซียมในน้ำชะละลายจากกากตะกอนโดยใช้ไคโตซาน. โครงการพิเศษ สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นิตยา ศรีอุดมศิลป์, เบญจรัตน์ บุญช่วย และวิศรุต สุนทรารักษ์. 2544. การล้างดินและกากตะกอนที่ปนเปื้อนโครเมียมโดยใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ โซเดียมอิตีทีเอ และการละลายผสมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์กับโซเดียมอิตีทีเอ. โครงการพิเศษ สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปรานีย์ ศรีวิริยานุภาพ. 2545. การล้างดินกากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะแคลเซียมโดยใช้สารละลายการผสมของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์กับโซเดียมอิตีทีเอ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พรสรวง มากมณี, พิมพ์พิมล คงจินดา และภาสกร ศรีจิว. 2546. การล้างโครเมียมออกจากดินปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ขงยุทธ โอสดสภา และคณะ. 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2538. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยาทั่วโลก. 2547. ก้าวทันโลก: การปนเปื้อนของสารแคลเซียม อ.แม่สอด จ.ตาก. [Online]. Available: <http://webdb.dmsc.moph.go.th>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bradley S.C., T.Taler E., James E.K., J. Dykstra E. Jr., Elisabeth L.S., and Carl A.F.2001. Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement base solidified/stabilized waste materials. **Journal of Hazardous Material**. A82: 215-230.

Panagiotos T., Nymphodaora., andAnthimos. 2002. Evaluation of monobasic calcium phosphate for the immobilization of heavy metals in contaminated soils from Lavrion. **Journal of Hazardous Material**. B94: 135-146.

S.L. McGowen, N.T. Basta abdG.O. Brown.2001. Used of Diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and Trasport in Smelter-Contaminated soil. **Journal of Quality**.30:493-500.

Vidac,R.D., Pohaland,F.G., 1996.Treatment Walls. **Technology Evaluation Report TE-96-01**, Groundwater Remediation Technology Analysis Center, Pittburgh.P.A.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ตารางที่ ก-1 พีเอชของดินตัวอย่าง

ตัวอย่าง ดิน	1:1 (ดิน:น้ำ)
1	7.60
2	7.72
3	7.63
เฉลี่ย	7.65
SD	0.06

ตารางที่ ก-2 ความชื้น

ตัวอย่าง ดิน	น้ำหนักดินเปียก (กรัม)	น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น
1	5.0377	4.8506	3.71
2	5.0170	4.8369	3.59
3	5.0203	4.8388	3.62
		เฉลี่ย	3.64
		SD	0.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 การวิเคราะห์ความเป็นกรดของดิน

	น้ำหนักดินเปียก(g)	ปริมาตร HCl (ml)	ความเป็นกรด(meq/g ดินแห้ง)
blank	0.00	32.5	
1	7.00	31.4	0.33
2	7.07	31.7	0.24
3	7.02	32	0.15
		เฉลี่ย	0.24
		SD	0.57

ตารางที่ ก-4 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

H₂SO₄ (N) 0.02
 ปริมาตรทั้งหมดของ aliquot (มล.) 200
 น้ำหนักดิน (กรัม) 2
 ml. of aliquot ที่ใช้ 25

ตัวอย่างดิน	ปริมาตร H ₂ SO ₄ (มล.)	CEC (meq/100g)
blank	1.20	
1	3.10	15.20
2	3.20	16.00
เฉลี่ย	3.15	15.60
	SD	0.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 การกระจายตัวของอนุภาค

ตัวอย่าง	ค่าที่อ่านได้จากไฮโครมิเตอร์(กรัม/ลิตร)	
	40 วินาที	2 ชั่วโมง
Blank	3.01	3.01
1	23.01	11.01
2	22.01	11.01
3	23.01	12.01
เฉลี่ย	22.68	11.34

ตารางที่ ก-6 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

ตัวอย่าง	น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)	ปริมาตรที่ใช้ในการไทเทรตด้วย FAS (มล.)	%OM
Blank	0.0000	8.50	
1	0.4135	3.55	9.46
2	0.4058	3.65	9.44
3	0.4094	3.40	9.84
เฉลี่ย	0.4096	3.53	9.58
		SD	0.23

ตารางที่ ก-7 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

ครั้งที่	น้ำหนักดินแห้ง(g)	Abs	ความเข้มข้น ($\mu\text{gP/ml}$)	ความเข้มข้น ($\mu\text{gP/g}$)
1	2.0024	0.481	0.54	26.90
2	2.0086	0.409	0.45	22.37
3	2.0042	0.358	0.39	19.27
			เฉลี่ย	22.85
			SD	3.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลการศึกษาชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน

ชนิดของปุ๋ย	ครั้งที่	น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)	ปริมาตรน้ำชะ (มล.)	Abs	ความเข้มข้นแคดเมียมชะละลาย (ppm)	ความเข้มข้นแคดเมียมชะละลาย (มก./กก.ดินแห้ง)	%การปรับเสถียร
ไม่เติมปุ๋ย	1	10.0100	191	0.440	2.291	43.71	ND
	2	10.0100	195	0.442	2.301	44.83	ND
	3	10.0113	193	0.407	2.118	40.82	5.32
TSP	1	10.0033	198	0.137	0.700	13.85	67.89
	2	10.0035	197	0.142	0.726	14.29	66.85
	3	10.0032	195	0.148	0.757	14.76	65.76
DAP	1	10.0031	196	0.197	1.015	19.88	53.89
	2	10.0000	198	0.203	1.046	20.72	51.96
	3	10.0000	136	0.223	1.151	15.66	63.69
RP	1	10.0009	196	0.450	2.343	45.93	ND
	2	10.0006	161	0.435	2.265	36.46	15.45
	3	10.0010	196	0.420	2.186	42.84	0.65

หมายเหตุ ND – ไม่ตรวจพบการปรับเสถียร (NOT DETECTED)

ตัวอย่างการคำนวณ ; ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ครั้งที่ 1

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นแคดเมียมชะละลาย} &= (0.700 \times 198) / 10.0033 \\ \text{(มก./กก.ดินแห้ง)} &= 13.85 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการปรับเสถียร} &= 100 - ((13.85/43.12) \times 100) \\ &= 67.89\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลการศึกษาปริมาณปุ๋ยทริปเปิดซูปเปอร์ฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียร
แคดเมียมในดิน

สัดส่วน โมล ฟอสเฟตต่อ แคดเมียม	ครั้งที่	น้ำหนัก ดินแห้ง (กรัม)	ปริมาตร น้ำชะ (มล.)	Abs	ความเข้มข้น แคดเมียมชะ ละลาย (ppm)	ความเข้มข้น แคดเมียมชะ ละลาย (มก./ กก.ดินแห้ง)	%การปรับ เสถียร
ไม่เติมปุ๋ย	1	10.0100	191	0.440	2.291	43.71	ND
	2	10.0100	195	0.442	2.301	44.83	ND
	3	10.0113	193	0.407	2.118	40.82	5.32
0.5	1	10.0035	155	0.220	1.136	17.59	59.20
	2	10.0014	172	0.229	1.183	20.34	52.83
	3	10.0002	186	0.227	1.172	21.80	49.43
1.0	1	10.0033	198	0.137	0.700	13.85	67.89
	2	10.0035	197	0.142	0.726	14.29	66.85
	3	10.0032	195	0.148	0.757	14.76	65.76
1.5	1	10.0036	197	0.153	0.784	15.43	64.21
	2	10.0022	196	0.152	0.778	15.25	64.63
	3	10.0034	196	0.149	0.763	14.94	65.35
2.0	1	10.0001	198	0.133	0.679	13.44	68.84
	2	10.0026	194	0.149	0.763	14.79	65.70
	3	10.0029	196	0.147	0.752	14.74	65.82

หมายเหตุ ND – ไม่ตรวจพบการปรับเสถียร (NOT DETECTED)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลการศึกษาปริมาณปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียร
แกลบเมี่ยมในดิน

สัดส่วน โมล ฟอสเฟตต่อ แกลบเมี่ยม	ครั้งที่	น้ำหนัก ดินแห้ง (กรัม)	ปริมาตร น้ำชะ (มล.)	Abs	ความเข้มข้น แกลบเมี่ยมชะ ละลาย (ppm)	ความเข้มข้น แกลบเมี่ยมชะ ละลาย (มก./ กก.ดินแห้ง)	%การปรับ เสถียร
ไม่เติมปุ๋ย	1	10.0100	191	0.440	2.291	43.71	ND
	2	10.0100	195	0.442	2.301	44.83	ND
	3	10.0113	193	0.407	2.118	40.82	5.32
0.5	1	10.0020	181	0.213	1.099	19.88	53.89
	2	10.0000	179	0.225	1.162	20.80	51.77
	3	10.0000	196	0.220	1.136	22.26	48.39
1.0	1	10.0031	196	0.197	1.015	19.88	53.89
	2	10.0000	198	0.203	1.046	20.72	51.96
	3	10.0000	136	0.223	1.151	15.66	63.69
1.5	1	10.0023	197	0.235	1.214	23.92	44.54
	2	10.0000	182	0.230	1.188	21.62	49.86
	3	10.0000	138	0.212	1.093	15.09	65.00
2.0	1	10.0020	199	0.213	1.099	21.86	49.30
	2	10.0000	157	0.196	1.009	15.85	63.25
	3	10.0000	210	0.214	1.104	23.18	46.23

หมายเหตุ ND – ไม่ตรวจพบการปรับเสถียร (NOT DETECTED)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลการศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ของปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการ
ปรับเสถียรแคดเมียมในดิน

ระยะเวลา สัมพัทธ์	ครั้งที่	น้ำหนัก ดินแห้ง (กรัม)	ปริมาตร น้ำชะ (มล.)	Abs	ความเข้มข้น แคดเมียมชะ ละลาย (ppm)	ความเข้มข้น แคดเมียมชะ ละลาย (มก./ กก.ดินแห้ง)	%การปรับ เสถียร
ไม่เติมปุ๋ย	1	10.0100	191	0.440	2.291	43.71	ND
	2	10.0100	195	0.442	2.301	44.83	ND
	3	10.0113	193	0.407	2.118	40.82	5.32
1 สัปดาห์	1	10.0000	188	0.423	2.229	41.91	3.04
	2	10.0000	197	0.429	2.230	43.93	ND
	3	10.0000	186	0.429	2.255	41.93	2.75
2 สัปดาห์	1	10.0000	194	0.391	2.034	39.45	8.51
	2	10.0000	197	0.429	2.233	43.99	ND
	3	10.0000	188	0.423	2.202	41.39	4.01
3 สัปดาห์	1	10.0033	198	0.137	0.700	13.85	67.89
	2	10.0035	197	0.142	0.726	14.29	66.85
	3	10.0032	195	0.148	0.757	14.76	65.76

หมายเหตุ ND – ไม่ตรวจพบการปรับเสถียร (NOT DETECTED)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลการศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ของปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับ
เสถียรแคดเมียมในดิน

ระยะเวลา สัมพัทธ์	ครั้งที่	น้ำหนัก ดินแห้ง (กรัม)	ปริมาตร น้ำชะ (มล.)	Abs	ความเข้มข้น แคดเมียมชะ ละลาย (ppm)	ความเข้มข้น แคดเมียมชะ ละลาย (มก./ กก.ดินแห้ง)	%การปรับ เสถียร
ไม่เติมปุ๋ย	1	10.0100	191	0.440	2.291	43.71	ND
	2	10.0100	195	0.442	2.301	44.83	ND
	3	10.0113	193	0.407	2.118	40.82	5.32
1 สัปดาห์	1	10.0051	138	0.204	1.051	14.50	66.37
	2	10.0059	159	0.243	1.256	19.96	53.70
	3	10.0074	181	0.228	1.178	21.30	50.61
2 สัปดาห์	1	10.0049	153	0.215	1.109	16.96	60.66
	2	10.0009	194	0.183	0.941	18.26	57.66
	3	10.0007	196	0.218	1.125	22.05	48.87
3 สัปดาห์	1	10.0031	196	0.197	1.015	19.88	53.89
	2	10.0000	198	0.203	1.046	20.72	51.96
	3	10.0000	136	0.223	1.151	15.66	63.69

หมายเหตุ ND – ไม่ตรวจพบการปรับเสถียร (NOT DETECTED)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลการสกัดแบบลำดับขั้นในการศึกษาชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับ
เสถียรแควเคเมียมในดิน

ลำดับขั้น	ชนิดของปุ๋ย	ความเข้มข้นของแควเคเมียม (มก./กก.ดินแห้ง)			ค่าเฉลี่ย	% แควเคเมียม
		1	2	3		
ขั้นที่ 1 รูปที่ละลายน้ำได้	ไม่เติมปุ๋ย	0.27	0.27	0.27	0.27	0.32
	TSP	1.47	1.47	1.47	1.47	1.73
	DAP	0.95	1.21	1.34	1.16	1.37
	RP	0.03	nd	0.29	0.16	0.06
ขั้นที่ 2 รูปที่สามารถแลกเปลี่ยน ไอออนได้	ไม่เติมปุ๋ย	11.63	11.63	11.63	11.63	13.70
	TSP	5.15	6.20	6.33	5.89	6.94
	DAP	4.75	4.62	5.02	4.80	5.66
	RP	9.61	10.53	10.79	10.31	9.07
ขั้นที่ 3 รูปที่ละลายได้ในกรด	ไม่เติมปุ๋ย	32.50	32.50	32.50	32.50	38.29
	TSP	24.05	21.30	24.71	23.35	27.51
	DAP	19.59	19.85	20.51	19.98	23.54
	RP	45.46	44.67	45.06	45.06	39.63
ขั้นที่ 4 รูปรีควิวซ์	ไม่เติมปุ๋ย	29.51	29.51	29.51	29.51	34.76
	TSP	16.70	18.93	20.12	18.58	21.89
	DAP	20.25	20.51	22.09	20.95	24.68
	RP	37.32	40.47	40.47	39.42	34.67
ขั้นที่ 5 รูปออกซิไดส์	ไม่เติมปุ๋ย	3.94	3.94	3.94	3.94	4.64
	TSP	0.55	0.55	0.55	0.55	0.65
	DAP	1.47	1.08	1.21	1.25	1.47
	RP	4.62	4.88	4.36	4.62	4.06
ขั้นที่ 6 รูปที่เหลือ	ไม่เติมปุ๋ย	7.04	7.04	7.04	7.04	8.29
	TSP	nd	nd	nd	nd	nd
	DAP	0.63	1.67	1.15	1.15	1.66
	RP	13.19	13.68	14.77	13.88	12.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ ; ชั้นที่ 1 รูปที่ละลายน้ำได้ ไม่เติมปุ๋ย

$$\text{ปริมาณแคดเมียม} = (0.27/84.88) \times 100$$

$$= 0.32\%$$

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลการสกัดแบบลำดับขั้นในการศึกษาปริมาณปุ๋ยที่ปลดปล่อยฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียรแคดเมียมในดิน

ลำดับขั้น	สัดส่วน โมล ฟอสเฟตต่อ แคดเมียม	ความเข้มข้นของแคดเมียม (มก./กก.ดินแห้ง)			ค่าเฉลี่ย	% แคดเมียม
		1	2	3		
ชั้นที่ 1 รูปที่ละลายน้ำได้	ไม่เติมปุ๋ย	0.27	0.27	0.27	0.27	0.32
	0.5	1.08	1.21	1.08	1.12	1.32
	1.0	1.47	1.47	1.47	1.47	1.73
	1.5	0.16	nd	nd	0.16	0.19
	2.0	nd	nd	nd	nd	nd
ชั้นที่ 2 รูปที่สามารถแลกเปลี่ยน ไอออนได้	ไม่เติมปุ๋ย	11.63	11.63	11.63	11.63	13.70
	0.5	20.77	20.51	20.77	20.68	24.36
	1.0	5.15	6.20	6.33	5.89	6.94
	1.5	3.83	4.10	3.44	3.79	4.47
	2.0	3.18	2.91	3.31	3.13	3.69
ชั้นที่ 3 รูปที่ละลายได้ในกรด	ไม่เติมปุ๋ย	32.50	32.50	32.50	32.50	38.29
	0.5	12.76	13.29	12.89	12.98	15.29
	1.0	24.05	21.30	24.71	23.35	27.51
	1.5	21.69	24.05	23.40	23.05	27.16
	2.0	22.35	23.00	23.27	22.87	26.94
ชั้นที่ 4 รูปรีดิคัล	ไม่เติมปุ๋ย	29.51	29.51	29.51	29.51	34.76
	0.5	13.16	12.50	11.06	12.24	14.42
	1.0	16.70	18.93	20.12	18.58	21.89
	1.5	18.80	11.58	13.68	14.69	17.31
	2.0	12.63	11.32	12.76	12.24	14.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 (ต่อ) ข้อมูลการสกัดแบบลำดับชั้นในการศึกษาปริมาณปุ๋ยทรีปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียรแควเมียมในดิน

ลำดับชั้น	สัดส่วน โมล ฟอสเฟตต่อ แควเมียม	ความเข้มข้นของแควเมียม (มก./กก.ดินแห้ง)			ค่าเฉลี่ย	% แควเมียม
		1	2	3		
ชั้นที่ 5 รูปออกซิไดส์	ไม่เติมปุ๋ย	3.94	3.94	3.94	3.94	4.64
	0.5	0.42	0.42	0.42	0.42	0.49
	1.0	0.55	0.55	0.55	0.55	0.65
	1.5	0.42	0.29	0.42	0.38	0.45
	2.0	0.42	0.29	0.29	0.33	0.39
ชั้นที่ 6 รูปที่เหลื่อ	ไม่เติมปุ๋ย	7.04	7.04	7.04	7.04	8.29
	0.5	nd	nd	nd	nd	nd
	1.0	nd	nd	nd	nd	nd
	1.5	nd	nd	nd	nd	nd
	2.0	nd	nd	nd	nd	nd

หมายเหตุ ND – ไม่ตรวจพบการปรับเสถียร (NOT DETECTED)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลการสกัดแบบลำดับขั้นในการศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ของปุ๋ยทริปเปิดซูปเปอร์
ฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการปรับเสถียรแควเมียมในดิน

ลำดับขั้น	ระยะเวลา สัมพัทธ์ (สัปดาห์)	ความเข้มข้นของแควเมียม (มก./กก.ดินแห้ง)			ค่าเฉลี่ย	% แควเมียม
		1	2	3		
ขั้นที่ 1 รูปที่ละลายน้ำได้	ไม่เติมปุ๋ย	0.27	0.27	0.27	0.27	0.21
	1	0.68	0.81	0.95	0.81	0.64
	2	0.42	0.68	0.68	0.60	0.17
	3	1.47	1.47	1.47	1.47	1.73
ขั้นที่ 2 รูปที่สามารถแลกเปลี่ยน ไอออนได้	ไม่เติมปุ๋ย	0.68	11.63	11.63	7.98	13.70
	1	13.16	13.55	14.08	13.59	11.19
	2	3.97	4.88	3.97	4.27	11.82
	3	5.15	6.20	6.33	5.89	6.94
ขั้นที่ 3 รูปที่ละลายได้ในกรด	ไม่เติมปุ๋ย	32.50	32.50	32.50	32.50	38.29
	1	47.56	47.16	47.43	47.38	37.66
	2	16.18	19.98	17.75	17.97	49.74
	3	24.05	21.30	24.71	23.35	27.51
ขั้นที่ 4 รูปรีคิวซ์	ไม่เติมปุ๋ย	29.51	29.51	29.51	29.51	34.76
	1	47.16	46.11	44.93	46.07	36.62
	2	13.16	10.27	14.08	12.50	34.60
	3	16.70	18.93	20.12	18.58	21.89
ขั้นที่ 5 รูปออกซิไดส์	ไม่เติมปุ๋ย	3.94	3.94	3.94	3.94	4.64
	1	5.02	5.67	6.07	5.58	4.44
	2	0.68	0.68	0.68	0.68	1.88
	3	0.55	0.55	0.55	0.55	0.65
ขั้นที่ 6 รูปที่เหลือ	ไม่เติมปุ๋ย	7.04	7.04	7.04	7.04	8.29
	1	1.06	17.68	16.89	11.88	9.44
	2	0.63	0.63	0.69	0.65	1.80
	3	nd	nd	nd	nd	nd

หมายเหตุ ND – ไม่ตรวจพบการปรับเสถียร (NOT DETECTED)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้