สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษารูปฟอร์มของแคดเมียมในดินปนเปื้อนที่ผ่านการปลูกข้าว และปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์

STUDY ON THE FORMS OF CADMIUM IN CONTAMINATED SOIL AFTER PLANTED RICES AND APPIIED WITH ORGANIC FERTILIZER

T117311

นายณัฐภูมิ กล้าหาญ
นางสาวกุลชญา เสร็จกิจ
นางสาวภัทรินทร แก้วกัลยา

ศจพ.....
เลขทะเบียน..... 117311
วัน,เดือน,ปี..... 20 ก.ค. 2554

b.....
i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON THE FORMS OF CADMIUM IN CONTAMINATED SOIL AFTER PLANTED RICES AND APPIIED WITH ORGANIC FERTILIZER

MR. NUTTAPUM GLAHAN
MISS KUNCHAYA SETKIT
MISS PATARINTORN KAWKANLAYA

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การศึกษารูปฟอร์มของแคดเมียมในดินปนเปื้อนที่ผ่านการปลูกข้าวและปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์

Study on The Forms of Cadmium in Contaminated Soil after Planted Rices and Applied with Organic Fertilizer

ชื่อนักศึกษา ณัฐภูมิ กล้าหาญ

กุลชญา เสร็จกิจ

ภัทรินทร แก้วกัลยา

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน	
รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล	
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การศึกษารูปฟอร์มของแคดเมียมในดินปนเปื้อนที่ผ่านการปลูกข้าวและปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์

นักศึกษา ณัฐภูมิ กล้าหาญ
กุลชญา เสร็จกิจ
ภัทรินทร แก้วกัลยา

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2553

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้ศึกษารูปแบบการกระจายของแคดเมียมในดินปนเปื้อนที่ผ่านการปลูกข้าวและปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์โดยใช้ดินตัวอย่าง4ชนิด ได้แก่ ดินปนเปื้อนที่ไม่ได้ปลูกข้าว ดินปนเปื้อนและผ่านการปลูกข้าว ดินชนิดที่3และ4 คือดินปนเปื้อนทีปลูกข้าวและใส่ปุ๋ย500กรัมและ2000กรัมต่อดิน10 กิโลกรัมตามลำดับ ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน รูปแบบการกระจายของแคดเมียมจากการสกัดลำดับขั้น7ขั้นตอน ประกอบด้วย ส่วนที่ละลายและส่วนแลกเปลี่ยนไอออนเป็นส่วนที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดินซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้จะเคลื่อนที่ได้ดี ขณะที่อีก5ส่วนมักจะไม่เคลื่อนที่ คือส่วนที่ถูกดูดซับกับอินทรียวัตถุ ส่วนที่ยึดอยู่กับแมงกานีสออกไซด์ ส่วนที่ยึดกับเหล็กออกไซด์อสัณฐาน ส่วนผลึกเหล็กออกไซด์และส่วนที่เหลือ ผลการศึกษาพบว่าลักษณะเนื้อดินทั้ง4ชนิดเป็นดินร่วนปนทราย ค่าพีเอชเป็นกลาง มีปริมาณอินทรียวัตถุอยู่ในระดับสูงมาก ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในระดับปานกลาง ชุดดินตัวอย่างทั้งหมดมีออกไซด์ของซิลิกอน แคลเซียมและเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก รูปแบบการกระจายของแคดเมียมในดินตัวอย่างทั้ง4ชนิดอยู่ในรูปที่ถูกดูดซับกับอินทรียวัตถุในดินมากที่สุด รูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้ และรูปที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดินตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมทั้งหมดและจากการสกัดลำดับขั้นของดินตัวอย่างทั้ง 4 ชุดดิน พบว่าดินที่ปลูกข้าวและใส่ปุ๋ยทำให้ปริมาณแคดเมียมในดินลดลงแต่รูปแบบการกระจายไม่แตกต่างกัน เมื่อทำการการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยANOVAพบว่าปริมาณแคดเมียมรูปที่เคลื่อนที่ได้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น95% ดังนั้นการปลูกข้าวบนพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมและการใส่ปุ๋ยในปริมาณมากทำให้แคดเมียมที่อยู่ในส่วนที่เคลื่อนที่ได้ในดินลดลง

คำสำคัญ : การสกัดลำดับขั้น, แคดเมียม, ปุ๋ยอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Study on The Forms of Cadmium in Contaminated Soil after Planted Rices and Applied with Organic Fertilizer
Name	Nuttapum Glahan
	Kunchaya Setkit
	Patarintorn Kawkanlaya
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Environmental Resource Chemistry
Academic Year	2010
Advisor	Asst.Prof. Pitsamai Chairat-utai

ABSTARCT

This special project studied on the various forms of cadmium in contaminated soil after planted rice and applied with organic fertilizer. Four types of soil were used such as contaminated soil with unplanted rice, contaminated soil with planted rice, the third and the fourth type of contaminated soil with planted rice and added with 500 g. and 2000 g. fertilizer per 10 kg of soil. The parameters were studied such as, physical and chemical characteristic of soil and the various forms of cadmium by 7 steps sequential extraction (mobile Cd e.g. soluble plus exchangeable, surface adsorbed and non-mobile Cd e.g. organic matter-bound, Mn oxides bound, amorphous Fe oxides, crystalline Fe oxides and residues fractions) in soil. The results showed that the texture of four types of soil are sandy clay. The pHs are neutral and contain high organic matters. The cation exchange capacities are medium. All soil samples contain silicon oxide, calcium oxide and iron oxide as main contents. The forms of cadmium in all types of soil found mostly as cadmium bound to organic matter , secondly as soluble-exchangeable and surface adsorbed respectively. When compare the total amount of cadmium and the content of cadmium in all fraction in soil planting rice and soil added with fertilizer are decreased but the forms of cadmium are not different. Planting rice and adding organic fertilizer had a significantly effect on the forms of cadmium at 95 % confidence limit . However, it can be concluded that planting rice and applying more fertilizer does not only provide plant nutrients, but may also decreased the forms of mobile cadmium.

Key words: Cadmium, Sequential Extraction, organic fertilizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องมาจากความร่วมมือ และความกรุณาของทุกๆท่าน ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดี และ ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการผู้ควบคุมโครงงานพิเศษทั้งสองท่าน คือ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และ รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สละเวลาให้ข้อคิดและคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ซึ่งช่วยให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอบคุณ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ , เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเคมีทุกท่าน และนักศึกษาปริญญาโทที่ได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งในด้านอุปกรณ์ สารเคมี

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือของสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย และหน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำโครงงานพิเศษจนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อมที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ตลอดจนให้กำลังใจ ร่วมทุกข์ร่วมสุขในการทำการทดลอง จนฝ่าฟันอุปสรรคในการทำโครงงานพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงงานพิเศษฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ณัฐภูมิ กล้าหาญ
กุลชญา เสร็จกิจ
ภัทรินทร แก้วกัลยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 มลพิษของดิน (Soil pollution)	3
2.2 การสะสมโลหะหนักในดิน	4
2.3 การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation)	4
2.4 รูปแบบของแคดเมียมในดิน	7
2.5 สภาพการละลายและการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน	11
2.6 การสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction)	13
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	16
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	16
3.2 ดินที่ใช้ในการทดลอง	18
3.3 วิธีการทดลอง	18
3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	21
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	22
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสกัดแบบลำดับขั้น 25
4.2.1 รูปฟอร์มแคดเมียมในดิน 25
4.2.2. เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมทั้งหมดและที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น 27
4.2.3. ปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่เคลื่อนที่ได้และไม่เคลื่อนที่ 28
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 30
5.1 สรุปผลการทดลอง 30
5.2 ข้อเสนอแนะ 31
เอกสารอ้างอิง 32
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ดิน 34
ภาคผนวก ข วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential Extraction) 41
ภาคผนวก ค วิธีมาตรฐานการย่อยดินของ SW-846 Method 3050b (US.EPA, 1996) 43
ภาคผนวก ง สมบัติทางกายภาพ – เคมีของดินที่ทำการวิเคราะห์ 44
ภาคผนวก จ การสกัดลำดับขั้น 49
ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์ผลทางสถิติ 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงชุดการทดลอง 4 ชุดที่ทำการศึกษา 18

ตารางที่ 3.2 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน 18

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน 22

ตารางที่ ง.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ ทราย ซิลท์ เคลย์ 44

ตารางที่ ง.2 ค่าพีเอช 44

ตารางที่ ง.3 ค่าความเป็นกรดของดิน 45

ตารางที่ ง.4 เปอร์เซ็นต์ความชื้น 45

ตารางที่ ง.5 ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก 46

ตารางที่ ง.6 ปริมาณสารอินทรีย์ในดิน 46

ตารางที่ ง.7 ปริมาณสารอนินทรีย์ในดิน 46

ตารางที่ ง.8 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน 47

ตารางที่ ง.9 ปริมาณไนโตรเจนในดิน 47

ตารางที่ ง.10 ปริมาณเหล็กในดิน 48

ตารางที่ จ.1 ปริมาณแคดเมียมที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น 49

ตารางที่ จ.2 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในตัวอย่างดิน 56

ตารางที่ จ.3 สัดส่วน (%) รูปฟอร์มแคดเมียมที่พบในดินจากการสกัดแบบลำดับขั้นทั้ง 7 ขั้นตอน 56

ตารางที่ ฉ.1 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม 58

ตารางที่ ฉ.2 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม 58

ตารางที่ ฉ.3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม 59

ตารางที่ ฉ.4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม 59

ตารางที่ ฉ.5 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม 60

ตารางที่ ฉ.6 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ.7 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม 61
ตารางที่ ฉ.8 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม 61
ตารางที่ ฉ.9 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม 62
ตารางที่ ฉ.10 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม 62
ตารางที่ ฉ.11 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ประเภทของ Phytoremediation 6

รูปที่ 3.1 วิธีการสกัดแบบลำดับขั้น 20

รูปที่ 4.1 ปริมาณรูปฟอร์มแคดเมียมที่พบในดิน NP, P, F1, F2 จากการสกัดแบบลำดับขั้นทั้ง 7 ขั้นตอน 26

รูปที่ 4.2 สัดส่วน (%) รูปฟอร์มแคดเมียมที่พบในดิน NP , P , F1 , F2 จากการสกัดแบบลำดับขั้นทั้ง 7 ขั้นตอน 27

รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมทั้งหมดและปริมาณที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น 28

รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้และปริมาณที่อยู่ในรูปที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ 29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
Abs	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
AAS	อะตอมมิคแอปซอฟชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
°C	องศาเซลเซียส (อุณหภูมิ)
F1	ดินที่ทำการใส่ปุ๋ย 500 กรัม ต่อ ดิน 10 กิโลกรัม
F2	ดินที่ทำการใส่ปุ๋ย 2000 กรัม ต่อ ดิน 10 กิโลกรัม
meq/ดิน 100 กรัม	มิลลิกรัมสมมูลต่อดิน 100 กรัม
M	โมลต่อลิตร (โมลาลิตี้)
mV	มิลลิโวลต์
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
N	นอร์มอล
NP	ดินที่ไม่ได้ทำการปลูกพืชและใส่ปุ๋ย
ND	ไม่สามารถอ่านค่าได้ (Non Detect)
pH	พีเอช
ppm	หนึ่งส่วนในล้านส่วน (past per million)
P	ดินที่ทำการปลูกพืช
พีพีเอ็ม	หนึ่งส่วนในล้านส่วน (past per million)
มล.	มิลลิลิตร
มม.	มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงานวิจัย

เนื่องจากประเทศไทยมีอุตสาหกรรมเหมืองแร่เกิดขึ้นอย่างมากมาย การทำเหมืองแร่มีหลายกรรมวิธีเช่น เหมืองหาบ เหมืองอุโมงค์ เหมืองฉีด และเหมืองขุด การทำเหมืองแร่ด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นทำให้สมบัติของดินเปลี่ยนแปลงไป เช่น มีการปนเปื้อนของโลหะหนักที่เป็นผลมาจากในระหว่างกระบวนการขนย้าย ซึ่งพบว่าในระยะเวลา 2-3 ปีหลังจากการทำเหมืองแร่ พื้นที่บริเวณนั้นเป็นบริเวณที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชเนื่องจากมีการปนเปื้อนโลหะหนักในดินบริเวณเหมืองแร่และบริเวณใกล้เคียง ทำให้แคดเมียมสามารถดูดซึมเข้าไปในส่วนต่างๆของพืชได้ส่งผลให้พืชได้รับธาตุอาหารหลักในปริมาณน้อยกว่าความต้องการ กิจกรรมเหมืองแร่เป็นสาเหตุสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้ดินในหลายพื้นที่ของประเทศไทยมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก เช่น การทำเหมืองแร่ดีบุกที่ภูเขาร่อนนา-สรวงจันทร์ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของสารหนูในดิน (สุธิลา และคณะ,2544) เช่นเดียวกับพื้นที่ในห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการตรวจพบการปนเปื้อนของโลหะแคดเมียมในดิน ในเบื้องต้นได้มีการสันนิษฐานว่ามีสาเหตุมาจากวิธีการทิ้งและการจัดการที่ไม่เหมะสมของกากแร่ที่เหลือจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่สังกะสี การปนเปื้อนของโลหะหนักในดินส่งผลให้พื้นที่ ที่ได้รับผลกระทบมีสภาพไม่เหมาะสมต่อการเพาะปลูก ซึ่งได้เคยมีการตรวจวัดระดับสารแคดเมียมในดินและข้าว บริเวณอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ระหว่างปี พ.ศ. 2541 – 2546 พบว่า มีการปนเปื้อนของสารแคดเมียมในดินที่อาจส่งผลให้มีการปนเปื้อนในผลิตผลการเกษตร และเกิดผลกระทบต่อสุขภาพของประชากรกว่า 6,000 คน ซึ่งผลจากการปนเปื้อนของสารแคดเมียมในดินและแหล่งน้ำรวมทั้งข้าวซึ่งเป็นอาหารหลักและสินค้าส่งออกสำคัญของประเทศนั้นย่อมส่งผลกระทบต่อสภาพสิ่งแวดล้อม สุขภาพของประชาชน และเศรษฐกิจสังคม อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ถึงแม้ว่ายังไม่ส่งผลต่อสุขภาพร้ายแรงเหมือนกับที่เคยเกิดขึ้นในประเทศญี่ปุ่นก็ตาม แต่ในภายภาคหน้าอาจส่งผลกระทบต่อเนื่องไปในระยะยาวได้ ดังนั้นปัญหามลพิษทางดินที่เกิดจากการปนเปื้อนของโลหะหนักจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรศึกษา เพื่อหาวิธีการป้องกัน และแก้ไขปัญหาที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ จากการวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการฟื้นฟูสภาพดินปนเปื้อนโดยการใช้พืชดูดดึงแคดเมียมออกจากดินผลการทดลองพบว่า พืชสามารถดูดดึงแคดเมียมได้บางส่วน และมีบางส่วนที่เหลืออยู่ในดิน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบของโลหะแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินที่ผ่านการปลูกข้าว รวมทั้งศึกษารูปแบบแคดเมียมในดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมที่ทำการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ใน 2 อัตราส่วน โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการศึกษาด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential extraction) เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดฟื้นฟูพื้นที่ที่มีปัญหามลพิษทางดินจากโลหะหนัก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินที่มีการปนเปื้อนโลหะแคดเมียม

1.2.2 เพื่อศึกษารูปฟอร์มของแคดเมียมในดินที่ผ่านการปลูกข้าวและปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ดินที่ใช้ทำการทดลองเป็นดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างดินมาจากห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยนำมาปลูกข้าวพันธุ์ข้าวหอมดอกมะลิ เป็นเวลา 120 วัน

1.3.2. วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน โดยทำการวิเคราะห์ค่าพีเอช ความเป็นกรดของดิน ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ปริมาณอินทรียวัตถุ ปริมาณสารอนินทรีย์ ความชื้น การกระจายตัวของอนุภาค ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณฟอสฟอรัส ปริมาณเหล็กออกไซด์

1.3.3 ปุ๋ยอินทรีย์ที่ใส่ลงในดิน คือ ปุ๋ยคอก ในปริมาณ 500 และ 2000 กรัม ต่อดิน10 กิโลกรัม

1.3.4. ศึกษารูปฟอร์มของแคดเมียมในดิน ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงรูปฟอร์มของแคดเมียมที่อยู่ในดินและรูปที่พืชสามารถดึงไปใช้ได้

1.4.2 ทำให้ทราบถึงการแพร่กระจายของโลหะหนักจากดินสู่พืชที่ปลูกบนพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มลพิษของดิน (Soil pollution)

มลพิษของดิน หมายถึง สภาพความปนเปื้อนของเนื้อดินด้วยสารมลพิษ มากเกินขีดจำกัดจนเกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัย ตลอดจนการเติบโตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ จากคำนิยามจะเห็นได้ว่า ดินเสียนั้นจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีสารมลพิษในดิน และดินจะเสียได้ก็ต่อเมื่ออัตราการเพิ่มสารมลพิษลงไปในดินมากเกิน หรือการสลายตัวของสารมลพิษนั้นจนเกิดการสะสมสารมลพิษมากขึ้นถึงขั้นเป็นอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม

ตัวการที่ทำให้เกิดดินเสียแบ่งได้ 2 ประการคือ

1. เสียโดยกำเนิด เช่น ดินเค็ม ดินเปรี้ยว โดยกำเนิด เป็นต้น

2. เสียโดยการกระทำของมนุษย์ เช่น ดินเสียโดยการปนเปื้อนจากอินทรียสาร อนินทรียสาร ยากำจัดศัตรูพืช ธาตุพิษ และธาตุโลหะหนักและวัชพืช เป็นต้น

ดินเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก สามารถฟุ้งกระจายไปในอากาศและ ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศได้ซึ่งความรุนแรงนั้นขึ้น กับว่าอนุภาคดินนั้นมีองค์ประกอบอย่างไร สภาพทางอุตุนิยมวิทยา สภาพพื้นที่ เป็นต้น ในกรณีที่คล้ายคลึงกัน หากอนุภาคดินถูกพัดพาไปยังแหล่งน้ำ ดินที่เป็นมลสารจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ โดยตรงทั้งทางคุณภาพและปริมาณ อีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาโดยอ้อมเมื่ออนุภาคดินนั้นมีธาตุอาหารที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชน้ำ ก่อให้เกิดภาวะขาดออกซิเจนในแหล่งน้ำ สัตว์น้ำในแหล่งน้ำนั้นได้รับผลกระทบเกิดกลิ่นเหม็นของก๊าซไข่เน่า (hydrogen sulfide, H_2S)ในขณะเดียวกันดินเป็นแหล่งรองรับของเสีย รองรับมลสารต่างๆ จากอากาศ จากน้ำ จากกิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ จากกิจกรรมต่างๆ ดินทำหน้าที่ในการดูดซับมลสารต่างๆ ซึ่งเปรียบได้กับการลดมลพิษ แต่หากดินทำหน้าที่ในการรับมลสารต่างๆ มากเกินไป โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มลสารที่ย่อยสลายไม่ได้ ปัญหามลพิษทางดินจะเกิดขึ้น มีผลทำให้ความสามารถของดินที่เป็นแหล่งธาตุอาหารของพืชลดลง ผลผลิตที่ได้ลดลง หรือคุณภาพของผลผลิตลดลงไม่เหมาะสมในการบริโภค เพราะมีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพเกินกว่าระดับที่ปลอดภัยต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ สารมลพิษในดินอาจมีอยู่ในธรรมชาติ และโดยที่มนุษย์นำไปใส่ให้กับดิน หากมีมากจนถึงระดับที่เป็นพิษ จะทำให้สิ่งมีชีวิตหยุดการเจริญเติบโต มีการสะสมในโซ่อาหาร โดยจะพบในผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์ที่มนุษย์บริโภค มนุษย์ก็จะได้รับสารพิษเหล่านั้น จนเกิดความผิดปกติขึ้น สุขภาพเสื่อมโทรมจนถึงเสียชีวิตได้ สารมลพิษในดิน ยังทำให้จุลินทรีย์ในดินทำงานไม่ได้ ทำลายการดูดซึม ธาตุอาหารของรากพืช อันตรายจากมลพิษทางดิน เนื่องจากดินมีสารมลพิษหลายชนิดปะปนอยู่ ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ในดินเพิ่มขึ้น แต่มีออกซิเจนน้อยลง จึงมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน สารมลพิษจากดินสามารถกระจัดกระจายสู่แหล่งน้ำ และอากาศจึงก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำ และอากาศได้

2.2 การสะสมโลหะหนักในดิน

โดยปกติผิวโลกจะมีโลหะหนักสะสมอยู่บริเวณหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากการผุพังและสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิดดิน ความเข้มข้นของโลหะหนักในเปลือกโลกและในดินมีค่าผันแปรได้ตามลักษณะของวัตถุต้นกำเนิด ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน เนื้อดิน และระดับความลึกของดินเป็นสำคัญ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีการเคลื่อนย้ายได้น้อย เนื่องจากมีความสามารถในการยึดเกาะอยู่ในส่วนที่เป็นอนุภาคดินเหนียว (Clay Fraction) ได้ดี ดังนั้นดินที่เป็นดินเหนียวจึงมีโลหะหนักอยู่ในรูปที่ดูดดึงได้ง่าย (Available Form) ในสารละลายดินน้อยกว่าดินที่เป็นดินทรายซึ่งมีส่วนที่เป็น (Clay Fraction) น้อย โลหะหนักส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปของสารละลายดินของดินทรายมากกว่าดินเหนียว หากเปรียบเทียบความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะหนัก พบว่า โลหะหนักที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย คือ นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี โลหะหนักที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ปานกลาง คือ ทองแดง ส่วนโลหะหนักที่เคลื่อนย้ายได้น้อย หรือไม่เคลื่อนย้ายเลย คือ ตะกั่ว ปรอท และโครเมียม อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของโลหะหนักอาจแปรผันตามความลึกของดิน เช่น น้ำที่ชะผ่านดินอาจทำให้โลหะหนักที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย เช่น สังกะสี และแคดเมียม เคลื่อนย้ายไปบริเวณอื่น ทำให้ความเข้มข้นของสังกะสี และแคดเมียมลดลงตามความลึกของดิน แต่น้ำที่ชะผ่านดินจะไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตะกั่ว และโครเมียมตามความลึกของดิน เพราะตะกั่ว และโครเมียมเป็นโลหะหนักที่เคลื่อนย้ายได้น้อยมาก และได้มีการศึกษาปริมาณของตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิล โครเมียม และปรอท ในดินที่ใส่ปุ๋ยหมักจากมูลฝอยชุมชน พบว่า ในดินชั้นบนจะเกิดการสะสมของโลหะหนักตะกั่วและแคดเมียมมากที่สุด ขณะที่ปริมาณของนิกเกิล และโครเมียมไม่เพิ่มขึ้นหรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วนปริมาณของปรอทไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

2.3 การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation)

การบำบัดสภาพดินที่มีการปนเปื้อนจากสารพิษโดยวิธีการบำบัดและฟื้นฟูด้วยพืชนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างไม่ว่าจะเป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน จุลินทรีย์ ชนิดของพืช รูปแบบ และชนิดของสารปนเปื้อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวคือ สภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ คุณสมบัติของดิน สภาพทางอุทกธรณีวิทยา กลไกของพืช และผลกระทบที่เกิดจากการเกษตรกรรม แต่อย่างไรก็ตาม การบำบัดและฟื้นฟูด้วยพืช นั้นจะอาศัยกระบวนการสำคัญๆ ที่นับว่าเป็นหลักการทำงานของ การบำบัดและฟื้นฟูด้วยพืช การบำบัดโดยพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งตามกลไกของพืชที่ใช้ในการกำจัดสารพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ได้ดังต่อไปนี้

1. Phytoextraction เป็นการใช้พืชเพื่อบำบัดสารมลพิษที่อยู่ในดิน ตะกอนดิน โดยใช้พืชไปดูดซึมสารมลพิษโดยผ่านราก แล้วไปเก็บสะสมในเนื้อเยื่อพืชส่วนที่เป็นลำต้นและใบ สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น เงิน แคดเมียม โคบอลต์ โครเมียม ทองแดง ปรอท แมงกานีส โมลิบดีนัม นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี เป็นต้น (จันทนี แจ่มแสงทอง, 2551) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (a)

2. Rhizofiltration เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการกรอง ดูดซับ และรับเอาสารปนเปื้อนต่างๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลายรอบๆ บริเวณรากให้เข้าไปในรากของพืชได้ ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ มีความเหมาะสมในการนำไปกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ในแหล่งน้ำ หรือในดินที่มีความชุ่มของน้ำหรือระบบไฮโดรโพนิคส์ (Hydroponics) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (d)

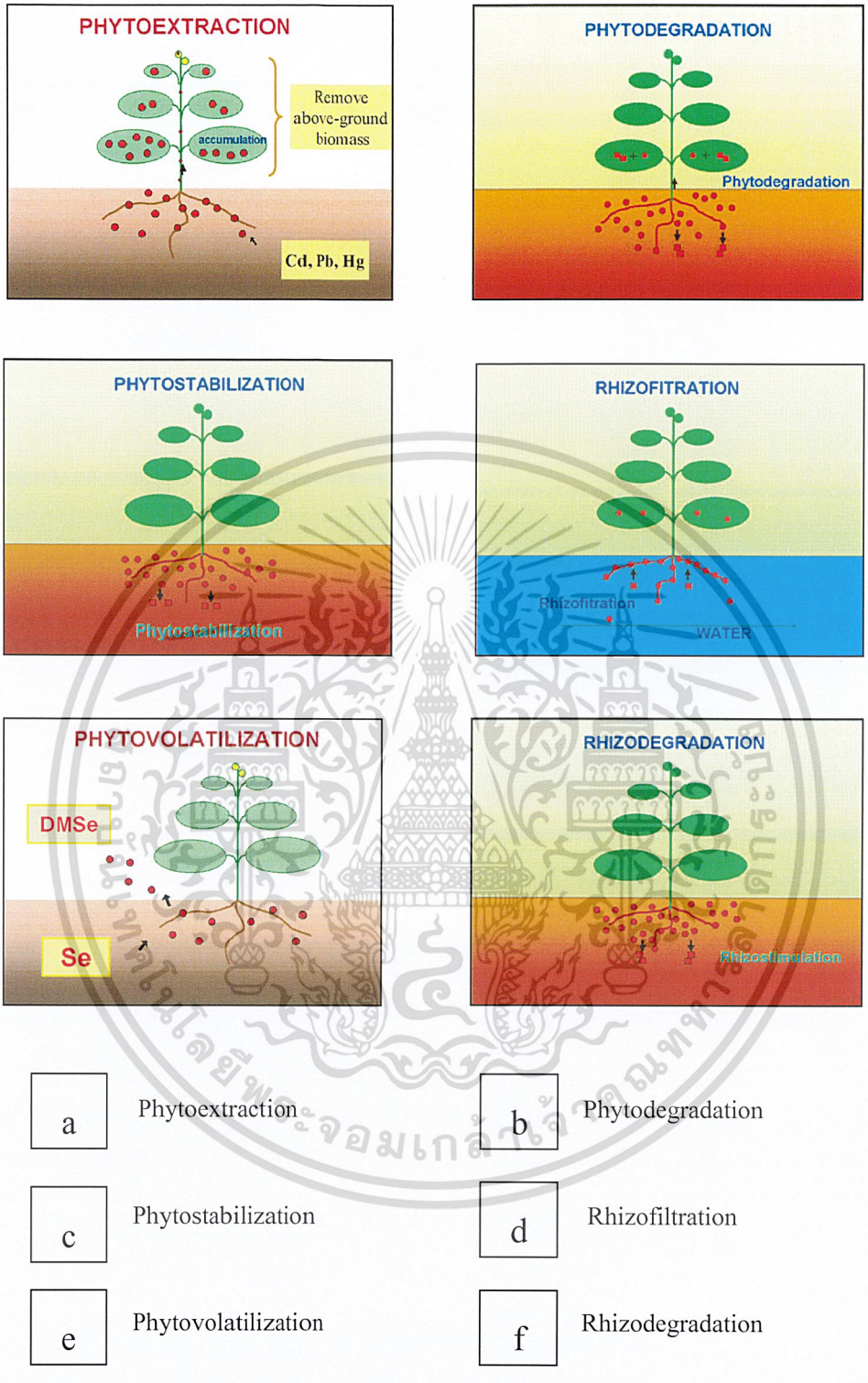
3. Phytostabilization เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการควบคุม หรือลดการเคลื่อนย้ายของสารพิษที่ปนเปื้อนในดิน และน้ำใต้ดินด้วยการตรึง และยึดไว้ที่ราก นอกจากนี้ Phytostabilization ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปลูกพืชคลุมดินในบริเวณที่มีการปนเปื้อน ทำให้สารปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นสูงลดระดับความเป็นพิษให้น้อยลง ด้วยการลดความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อน โดยกษัยการลม (Wind Erosion) การเคลื่อนย้ายผิวหน้าดิน และการชะล้างสารปนเปื้อนลงไปสู่น้ำใต้ดิน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (c)

4. Phytodegradation สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Phytotransformation เป็นการสลายตัวของโลหะหนักที่ปนเปื้อน โดยการดูดซับของพืชด้วย กระบวนการเมตาบอลิค (Metabolic) ภายในพืช หรือจากการสร้างสารประกอบต่างๆ ของพืช เช่น เอนไซม์ (Enzymes) สารพิษสามารถสร้างความเสียหายแก่พืชโดยการดูดใช้ธาตุอาหาร หรือการสะสมธาตุอาหารภายในเนื้อเยื่อของพืช ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (b)

5. Rhizodegradation หรือเรียกอีกอย่างว่า Phytostimulation, Rhizosphere, Biodegration หรือ Enhanced Rhizosphere Biodegration เป็นการสลายตัวของสารที่ปนเปื้อนในดิน ด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน เช่น ยีสต์ รา และแบคทีเรีย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (f)

6. Phytovolatilization คือการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการเป็นสื่อที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในดิน หรือในน้ำออกไปสู่อากาศ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (e)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ประเภทของ Phytoremediation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 รูปฟอร์มของแคดเมียมในดิน

แคดเมียมจะแพร่กระจายอยู่ในส่วนต่างๆของดินและอยู่ในรูปที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาวะและคุณสมบัติของดิน ซึ่งรูปที่พบอาจอยู่ในรูปใดรูปหนึ่งหรือหลายรูปดังต่อไปนี้

1. รูปที่ละลายในสารละลายดิน (soluble from) แคดเมียมที่อยู่ในรูปนี้ส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มที่มีการแพร่กระจายอยู่ในอนุภาคทราย (sand) และทรายแป้ง (silt) เนื่องจากอนุภาคของทรายและทรายแป้งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของดินเหนียว (clay) ทำให้สามารถละลายออกสู่สารละลายดินได้ง่ายและเคลื่อนที่ได้ดี

2. รูปที่ถูกดูดซับในตำแหน่งผิวของอนุภาคคอลลอยด์ดิน (adsorbed from) แคดเมียมที่แพร่กระจายในส่วนนี้มีขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคของดินเหนียวทำให้สามารถอยู่ได้ด้วยกระบวนการต่างๆเช่น การถูกดูดซับที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเพราะอนุภาคของดินเหนียวนั้นมีทั้งประจุบวกและประจุลบ และการเปลี่ยนแปลงไปเป็นส่วนหนึ่งของอนุภาคดินเหนียวโดยเข้าไปแทนที่ในช่องว่าง

3. รูปที่ถูกคลุกเคล้าเข้าสู่ระบบชีวภาพเป็นสารอินทรีย์ (organic form) แคดเมียมที่ถูกจับมักจะเกิดการเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ หรืออยู่ในรูปคีเลตที่มีโครงสร้างใหญ่ที่แข็งแรงและมีความเสถียรมาก โดยแคดเมียมจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางหรือสะพานเชื่อมระหว่างสารอินทรีย์และอนุภาคดินเหนียวเกิดเป็นโครงสร้างที่มีเสถียรภาพ ส่งผลให้แคดเมียมเกิดการตกตะกอน

4. รูปที่ตกตะกอน (precipitated form) แคดเมียมที่ละลายในสารละลายดินหรือถูกดูดซับอยู่ที่อนุภาคดิน อาจมีการตกตะกอนกับออกไซด์หรือไฮดรัสออกไซด์ของเหล็ก (Poor Crystalline Fe oxides form, Crystalline Fe oxides form) อะลูมินัมและแมงกานีส (Mn oxides form) เนื่องจากอะลูมินัมและเหล็กเป็นเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของดิน โอกาสที่แคดเมียมจะปะปนหรือเกิดสารประกอบกับออกไซด์หรือไฮดรัสออกไซด์ของเหล็ก อะลูมินัมและแมงกานีสจึงพบได้เสมอ ซึ่งการตกตะกอนในรูปนี้จะสัมพันธ์กับความเป็นกรดด่าง ของดินและความเข้มข้นของสาร

5. รูปที่ถูกตรึงและจับกับสารแขวนลอยอื่นหรือแร่ในดิน (residue form) แคดเมียมที่อยู่ในรูปนี้เป็นรูปที่พบในดินที่มีกระบวนการสลายตัวของสารหรือแร่ปฐมภูมิด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์หรือเคมี โดยโครงสร้างเดิมจะยุบแล้วเรียงตัวใหม่เกิดแร่ทุติยภูมิ ซึ่งในระหว่างที่มีการสลายตัวนั้นอะตอมของธาตุบางธาตุในโครงสร้างหลุดออกจากโครงสร้างทำให้อะตอมของแคดเมียมสามารถเข้าไปแทนที่ได้ หรือองค์ประกอบที่ละลายได้ถูกละลายและเคลื่อนย้ายออกไปแล้วแคดเมียมจึงเข้ามาแทนที่ในโครงสร้าง ซึ่งถ้าโครงสร้างใหม่อ่อนแอกว่าโครงสร้างเดิมแร่เหล่านี้จะสลายตัวและสร้างโครงสร้างใหม่จนกว่าจะได้โครงสร้างที่แข็งแรงกว่า

แคดเมียมในรูปสองรูปแรก ได้แก่ soluble form และ adsorbed form ถือเป็นรูปที่เคลื่อนที่ได้ดีในดิน (mobile forms) รวมทั้งพืชสามารถนำไปใช้ได้ง่าย ในขณะที่แคดเมียมที่พบในสามรูปหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(organic, precipitated, residue form) จัดเป็นรูปที่เคลื่อนย้ายและแพร่กระจายได้น้อยมาก (non-mobile)

2.4.1 ลักษณะการแพร่กระจายและการปนเปื้อน

แคดเมียมที่สะสมในดินได้มาจากแหล่งปนเปื้อนที่สำคัญ 3 แหล่ง คือ

1) เหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการถลุงแร่

2) กากตะกอนน้ำโสโครก

3) ปุ๋ย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปุ๋ยฟอสเฟตและปุ๋ยคอก

แคดเมียมมีลักษณะ คือ ถูกพืชดูดดึงได้ง่าย มีคุณสมบัติทางเคมีและโครงแบบอิเล็กทรอนิก (Electronic configuration) ที่คล้ายคลึงกัน และพบแคดเมียมปนในสินแร่สังกะสีเสมอ แคดเมียมเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตสูงมากโดยเข้าไปแย่งบทบาทของสังกะสีในกระบวนการชีวเคมีในร่างกายของสิ่งมีชีวิต

แคดเมียมในดินถูกดูดซับโดยอนุภาคดินเหนียว ออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัม และกรดฮิวมิก ซึ่งการดูดซับโดยอนุภาคดินเหนียวนั้นเนื่องมาจากอนุภาคดังกล่าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เมื่อสภาพทางเคมีของดินมีการเปลี่ยนแปลงและแคดเมียมอยู่ในรูปละลายได้ดีในดิน ถึงแม้มีปนเปื้อนในดินปริมาณเพียงเล็กน้อยก็จะถูกดูดดึงและสะสมในพืชได้ ซึ่งโดยสภาพความเข้มข้นปกติ พืชจะมีแคดเมียมในมวลแห้งน้อยกว่า 1 พีพีเอ็ม แต่ถึงแม้จะมีแคดเมียมในพืชสูงมาก พืชก็จะปราศจากอาการเป็นพิษจากแคดเมียม ซึ่งนับเป็นอันตรายอย่างมากเพราะพืชเป็นด่านแรกของโซ่อาหารของคนและสัตว์ที่กินพืช อย่างไรก็ตามก็มักจะถือว่าแคดเมียมที่สกัดได้โดยกรดแอซิติกประมาณ 20 พีพีเอ็ม เป็นระดับที่พืชแสดงอาการเป็นพิษ เช่นผักกาดหอม แต่ก็มีพืชที่ทนต่อแคดเมียมได้ถึง 50 พีพีเอ็ม และในหลายกรณีทนได้ถึง 200 พีพีเอ็ม จึงนับเป็นเรื่องที่ต้องระมัดระวังเพราะในสภาพดินธรรมดาทั่วไปถ้ามีแคดเมียมที่สกัดได้โดยกรดแอซิติกเกิน 0.15 พีพีเอ็ม ก็นับเป็นระดับสูงแล้ว

แคดเมียมเจือปนอยู่ในน้ำโสโครกเสมอ บางครั้งอาจปนอยู่สูงถึง 100 พีพีเอ็ม เนื่องจากของเสียชนิดนี้มีศักยภาพในการใช้เป็นปุ๋ยได้สูงจึงย่อมเป็นการนำแคดเมียมเข้าสู่วงจรอาหารอีกทางหนึ่ง โดยที่พืชแต่ละชนิดดูดกินและสะสมแคดเมียมในปริมาณที่แตกต่างกันมาก ส่วนที่สะสมแคดเมียมได้ดีก็คือส่วนใบ แม้พืชกินใบเช่นผักกาดหอมต่างสายพันธุ์ ก็ยังสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณที่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามการเลือกพืชปลูกในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม เป็นเรื่องที่ผู้บริโภคยอมรับได้ยาก อีกประการหนึ่งการปลูกพืชเลี้ยงสัตว์ในบริเวณดังกล่าว สัตว์ย่อมจะหลีกเลี่ยงการบริโภคไม่ได้ จึงเท่ากับเป็นการนำพิษสู่มนุษย์โดยอ้อมนั่นเอง ดังนั้นจึงน่าจะมีการกำหนดค่ามาตรฐานของแคดเมียมในของเหลือใช้ที่มีแคดเมียมเจือปนอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ความเป็นพิษของแคดเมียม

จากการที่แคดเมียมถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมและสินค้าอุปโภคดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงทำให้โลหะแคดเมียมเกิดการปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม บรรยากาศและในอาหาร ทำให้มนุษย์ได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายได้หลายทางโดยไม่รู้ตัว คนทั่วไปจะได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจากอาหารที่บริโภคเข้าไปเป็นหลัก โดยอาจติดปะปนมากับพืชผัก ผลไม้ หรือผลิตภัณฑ์จากสัตว์ที่นำมาปรุงเป็นอาหาร แคดเมียมอาจละลายอยู่ในน้ำดื่มและได้รับจากอากาศโดยการหายใจเอาอากาศที่มีฝุ่นแคดเมียมฟุ้งกระจายอยู่ โดยเฉพาะในแหล่งอุตสาหกรรมที่มีการใช้แคดเมียมเป็นวัตถุดิบ เช่น โรงงานทำแบตเตอรี่ หรือบริเวณที่เป็นเหมืองทำแร่ สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง ที่มักมีแคดเมียมปนอยู่ด้วย การสัมผัสกับสิ่งของที่มีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบและการอยู่ในแหล่งที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในอากาศนานๆจะทำให้แคดเมียมซึมผ่านผิวหนังเข้าสู่ร่างกายเราได้อีกด้วย สำหรับผู้ที่สูบบุหรี่จัดจะทำให้ได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายเพิ่มขึ้น ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในร่างกายครึ่งหนึ่งจะไปสะสมอยู่ที่ตับและไต ทำให้เกิดพิษสะสมได้ในคน การขับแคดเมียมที่ร่างกายดูดซึมเข้าไปแล้วออกจากร่างกายเป็นไปค่อนข้างช้ามาก เพราะวงจรครึ่งชีวิตของแคดเมียมในคนค่อนข้างยาว 16 -33 ปี โดยความเป็นพิษของแคดเมียม แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

1. ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

1.1) ความเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร เมื่อร่างกายได้รับแคดเมียมโดยการกินซึ่งส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการกินอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีแคดเมียมปนเปื้อนหรือบรรจุในภาชนะที่เคลือบด้วยแคดเมียม อาการที่ปรากฏเริ่มแรกคือ รู้สึกคลื่นเหียนอย่างรุนแรง อาเจียน ท้องร่วง เป็นตะคริว และน้ำลายฟูมปาก ในรายที่เป็นมากอาจเกิดอาการช็อคเนื่องจากร่างกายสูญเสียน้ำมาก ระบบการทำงานของไตล้มเหลวและอาจถึงตายได้

1.2) ความเป็นพิษต่อระบบหายใจ การสูดหายใจเอาไอของแคดเมียมเข้าไปทำให้เกิดอาการระคายเคืองที่หลอดลม ปอด จมูก ลำคอ และยังทำให้เกิดอาการไอ เวียนศีรษะ อ่อนเพลีย หนาวสั่น มีไข้ เจ็บหน้าอก

2. ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง ความเป็นพิษจากแคดเมียมที่เกิดกับคนส่วนใหญ่มักเป็นแบบชนิดเรื้อรัง ซึ่งเกิดจากการที่ร่างกายได้รับแคดเมียมเข้าไปเป็นเวลานานติดต่อกัน ได้แก่

2.1) ความเป็นพิษต่อปอดในคนที่หายใจเอาฝุ่นหรือไอ (fume) ของแคดเมียมเข้าไปติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้เกิดการบวมหรือพองของเนื้อเยื่อปอด ประสิทธิภาพในการระบายลมของปอดจะลดลง ทำให้อากาศอยู่ภายในปอดนานกว่าปกติ มีอาการหายใจขัดหรือหายใจไม่ออก นอกจากนี้ยังพบว่า แคดเมียมทำให้เกิดโรคถุงลมโป่งพองและมีพังผืดในปอดจับในทางเดินหายใจส่วนล่าง เนื่องจากแคดเมียมจะเป็นตัวไปขัดขวางการสร้าง antitrypsin ซึ่งเป็นตัวควบคุม trypsin ในร่างกายคน ซึ่งสาร trypsin นี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคถุงลมโป่งพองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2) ความเป็นพิษต่อไต ผู้ที่ได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายนานติดต่อกันจะพบความเป็นพิษที่ไตก่อนที่ปอด จะเกิดแผลที่ไต พิษต่อไตจะปรากฏโดยผู้ป่วยมีอาการของโปรตีนยูเรีย คือ ไตจะมีการขับปัสสาวะที่มีโปรตีนมากกว่าปกติ ซึ่งโปรตีนที่ขับออกมาส่วนใหญ่จะเป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยชนิดของโปรตีนที่ถูกขับออกมาจะเป็นตัวบอกให้รู้ว่าไตส่วนใดถูกทำลาย เช่น ถ้าโปรตีนขนาดใหญ่ถูกขับออกมา แสดงว่า โกลเมอรูรัส(glumerulus) ถูกทำลาย แต่ถ้าเป็นโปรตีนขนาดเล็กถูกขับออกมา แสดงว่า ส่วนของทิบูลถูกทำลาย นอกจากโปรตีนแล้วยังอาจมีสารอื่นๆถูกขับออกมากผิดปกติด้วย เช่น กรดอะมิโน

2.3) ความเป็นพิษที่กระดูก ที่ปรากฏเด่นชัดในกรณีการเกิดโรค อิไต อิไต โรคชนิดนี้เป็นโรคกระดูกผุ คือ กระดูกจะพรุน กระดูกโก่ง งอโค้งได้ จะทำให้กระดูกเสียรูปทรง แตกร้าวและหักได้ เนื่องจากร่างกายดูดซึมแคลเซียมได้น้อยลง

2.4) ความเป็นพิษต่อระบบเลือดเข้าสู่หัวใจและระบบการสร้างเม็ดโลหิต จะทำให้เกิดความดันโลหิตสูง เป็นสาเหตุให้เกิดโรคหัวใจ หัวใจเต้นผิดปกติ ในกลุ่มผู้ป่วยที่เป็นโรค อิไต อิไต และกลุ่มคนงานที่ต้องสัมผัสกับแคดเมียมจะพบอาการของโรคโลหิตจางด้วย

2.5) ความเป็นพิษต่อตับ มีรายงานค่อนข้างน้อยเกี่ยวกับความเป็นพิษต่อตับในคน แต่จากการทดลองในสัตว์ทดลองพบว่า แคดเมียมในปริมาณน้อย (ในน้ำดื่ม 1 ppm) มีผลทำให้การทำงานของเอ็นไซม์ในตับเปลี่ยนไป

2.6) จากการทดลองในสัตว์ พบว่า แคดเมียมยังเป็นสารก่อมะเร็ง โดยทำให้เกิดมะเร็งของเนื้อเยื่อที่อยู่ลึก (sarcoma) เช่น กล้ามเนื้อกระดูกในหนูทดลอง

จากความเป็นพิษของโลหะหนักแคดเมียมที่กล่าวมา ยังมีโลหะหนักอื่นอีกหลายชนิดซึ่งไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม เช่น ตะกั่ว สารหนู ปรอท โครเมียม เป็นต้น เนื่องจากโลหะหนักต่างๆเหล่านี้ยังมีความจำเป็นต่อชีวิตประจำวันอยู่ การใช้โลหะหนักเหล่านี้จะทำให้โลหะหนักมีโอกาสที่จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมและปนเปื้อนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้ การศึกษาพิษวิทยาของโลหะหนักจึงมีความสำคัญเพื่อหาแนวทางป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตต่อไป

2.4.3 แคดเมียมในดิน

แคดเมียมเป็นธาตุที่มีอยู่น้อยในธรรมชาติมักพบปะปนอยู่กับแร่สังกะสี ทองแดง และดีบุก ปริมาณแคดเมียมที่พบในดินทั่วไปมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.07-1.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง(สุภมาศ ,2539) แม้แคดเมียมจะพบในธรรมชาติที่ระดับความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ แต่ถูกจัดเป็นมลพิษทางดินจำพวกโลหะหนักที่สำคัญชนิดหนึ่ง หากอัตราการเพิ่มแคดเมียมลงไปในดินมีมากกว่าอัตราการสลายตัวของแคดเมียม จนเกิดการสะสมมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงระดับที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมต่างๆของดิน ดินจะเกิดภาวะที่เรียกว่าเป็นมลพิษได้ ดังเช่นกรณีการปนเปื้อนและสะสมของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคดเมียมในดินที่ห้วยแม่ตาว อ.แม่สอด จ.ตาก จนส่งผลกระทบต่อพืชที่เพาะปลูกและสุขภาพของประชากรในพื้นที่ ซึ่งสันนิษฐานว่าการปนเปื้อนเกิดจากการทิ้งและการจัดการที่ไม่เหมาะสมของกากแร่ที่เหลือจากการทำเหมืองแร่สังกะสีที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (2547) กำหนดพื้นที่ที่เหมาะสำหรับที่อยู่อาศัยและการทำเกษตรกรรมจะต้องมีการปนเปื้อนของแคดเมียมในระดับที่ไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมแห้ง และพื้นที่ที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมนั้นจะต้องมีการปนเปื้อนของแคดเมียมในระดับที่ไม่เกิน 810 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง

แคดเมียมที่พบในดินอยู่ในสภาพที่ละลายง่าย โดยพบอยู่ในรูป Cd^{2+} เป็นส่วนใหญ่ (ศุภมาศ ,2539) ทำให้แคดเมียมสามารถแลกเปลี่ยนและเคลื่อนย้ายไปสู่ตัวกลางอื่นๆ เช่น พืช น้ำได้ง่าย ปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทต่อการเคลื่อนย้ายของแคดเมียมในดินคือ ความเป็นกรด-ด่างของดินและศักย์รีดอกซ์ (ศุภมาศ,2539) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงศักย์รีดอกซ์และความเป็นกรด-ด่างในดินจะมีผลต่อการละลายและการแพร่กระจายของแคดเมียมเป็นอย่างมาก แคดเมียมจะเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าพีเอช ระหว่าง 4.5-5.5 และการเคลื่อนที่จะลดลงอย่างมากเมื่อพีเอชสูงกว่า 7.5 (Mulligan et al.,2001) สภาพละลายได้ของแคดเมียมในดินที่เป็นกรดขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก อะลูมินัม ซิลิกอนและปริมาณอินทรียวัตถุในดิน แคดเมียมสามารถเคลื่อนที่และแพร่กระจายได้ดีในดินที่เป็นกรดได้ดีกว่าธาตุอื่น โดยความสามารถในการเคลื่อนที่และแพร่กระจายสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ Cd > Zn > Cu ~ Ni (Hickey และ Kittrick, 1984) สภาพการละลายได้และการเคลื่อนย้ายของแคดเมียมจะลดลงในดินที่เป็นด่าง เนื่องจากแคดเมียมถูกดูดซับด้วยแร่ดินเหนียว สารอินทรีย์ ออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัม หรือตกตะกอนกับคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังพบว่าแคดเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน เช่น CdO, $CdCO_3$, Cd(OH)

2.4.4 ปริมาณแคดเมียมในพืช

ปริมาณแคดเมียมในพืชทั่วไปมีค่าต่ำ จะมีค่าสูงในพืชบางชนิด เช่น ในผักกาดหอมมีปริมาณแคดเมียม 0.6 พีพีเอ็มหรือในใบผักโขม (Spinach) ในปริมาณ 0.11 พีพีเอ็ม (น้ำหนักสด) พืชกินใบหรือพืชหัวบางชนิดจึงเป็นตัวนำแคดเมียมสู่มนุษย์ เมื่อมีการปนเปื้อน แคดเมียมจะสะสมในรากมากที่สุด โดยสะสมในใบรองลงมา และมีการเคลื่อนย้ายสู่เมล็ดได้น้อย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพืชผักคือ ผักคะน้า ผักกาดขาว และกวางตุ้งแล้วผักกาดขาวสะสมแคดเมียมไว้ในต้นมากที่สุด ส่วนกวางตุ้งสมสมไว้ในรากมากที่สุด

2.5 สภาพการละลายและการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน

การเคลื่อนที่ (mobility) ของโลหะในดินเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการละลาย (solubility) ของโลหะชนิดนั้น การเคลื่อนที่ของโลหะในดินจะเกิดขึ้นใน 3 รูปแบบหลักๆได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากการนำไปใช้ของพืช การเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ และการเคลื่อนย้ายในสภาพสารละลายและสารแขวนลอย อันเนื่องมาจากการแพร่และการไหลของมวล

1. ความเป็นกรด-ด่างของดิน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดเพราะเมื่อดินมีสภาพกรด-ด่างที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของโลหะระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้น้อยและส่วนที่ละลายได้ในดินซึ่งสามารคเคลื่อนที่ได้ดี เช่นสภาพการละลายของเหล็ก ตะกั่ว และแคดเมียม จะมีค่าต่ำมากเมื่อดินมีสภาพเป็นกลาง (pH=7) และสภาพการละลายจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อดินมีสภาพความเป็นกรดมากขึ้น (pH=5)

2. ศักย์รีดอกซ์ (redox potential) การเปลี่ยนแปลงของศักย์รีดอกซ์ในดินเป็นผลมาจากกระบวนการการหายใจของจุลินทรีย์ในดิน เมื่อจุลินทรีย์ในดินที่ใช้ออกซิเจนเจริญได้ดีอัตราการใช้ออกซิเจนในการหายใจสูงกว่าอัตราการแพร่ของออกซิเจนจากอากาศลงสู่ดิน ดินจะเริ่มขาดออกซิเจนส่งผลให้จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนเริ่มเจริญมากขึ้น (มีการใช้ไนเตรตหรือเฟอร์ริกเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน) ศักย์รีดอกซ์ของดินจะเริ่มลดลง การเปลี่ยนแปลงการละลายได้ของโลหะ เช่น เมื่อศักย์รีดอกซ์ของดินลดลงจนดินอยู่ในสภาพรีดักชัน (< 100 mV) สภาพการละลายได้ของเหล็ก แมงกานีส โซเดียม และโพแทสเซียม จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่สภาพการละลายได้ของสังกะสีและทองแดงจะลดลง (คณาจารย์ ภาควิชาปฐพีวิทยา,2548)

3. เนื้อดิน ดินที่มีเนื้อละเอียดจะมีคุณสมบัติที่สามารถดูดซับสารหรือโลหะต่างๆ ได้ดีกว่าดินเนื้อหยาบ เนื่องจากดินเนื้อละเอียดจะมีสัดส่วนดินเหนียวมากกว่าดินเนื้อหยาบ ประกอบกับดินเหนียวมีอนุภาคที่เล็ก รูปร่างแบนและยังมีประจุลบที่ผิวเป็นจำนวนมาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) จึงสามารถดูดซับโลหะที่มีประจุบวกไว้ได้ดี โลหะจึงละลายออกมาสู่สารละลายดินและเคลื่อนที่ได้น้อยลงเมื่อถูกดูดซับที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติและปริมาณของตำแหน่งดูดซับของอนุภาคดินเหนียวที่เป็นองค์ประกอบในดิน

4. วัตถุต้นกำเนิดดิน ซึ่งจะมีองค์ประกอบจำพวกแร่ธาตุอยู่หลายชนิด ซึ่งสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆกับโลหะได้ เช่น การแทนที่ (isomorphous substitution) ของอนุภาคในแร่หรือการดูดซับที่ผิวของแร่ เช่นการแทนที่ Ca^{2+} ด้วย Pb^{2+}ในโครงสร้างของแร่ไฮดรอกอะพาไทด์ ทำให้เกิดแร่ชนิดใหม่คือ ไฮดรอกซีไพโรเมอร์ไฟท์ที่มีความสามารถในการละลายต่ำส่งผลให้สภาพการละลายของตะกั่วลดลงด้วย เนื่องจากถูกรีดิวซ์อยู่ในโครงสร้างของแร่แสดงได้ดังสมการที่ 2.1

$$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 + xPb^{2+} \longrightarrow Ca_{10}Pbx(PO_4)_6(OH)_2 + xCa^{2+} \qquad (2.1)$$

5. ชนิดและปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ในดินและสารละลายดิน สารอินทรีย์อยู่ในรูปที่มีประจุ จึงสามารถที่จะดูดซับโลหะได้เช่นเดียวกับอนุภาคดินเหนียว หรืออาจเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ นอกจากนี้สารอินทรีย์ยังสัมพันธ์กับการแลกเปลี่ยนพีเอชของดินซึ่งมีผลโดยตรงกับความสามารถการละลายของโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ไอออนของธาตุอื่นที่มีอยู่ในสารละลายดิน ที่สามารถเกิดสารประกอบกับโลหะ แล้วเกิดตะกอน หรือเปลี่ยนรูปเป็นรูปที่ละลายได้ดีขึ้น

7. คุณสมบัติอื่นๆของดิน ได้แก่ ความชื้นของดิน กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินและอุณหภูมิของดิน ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงศักย์รีดอกซ์ในดิน นอกจากนี้ยังสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อดิน และปริมาณอินทรียวัตถุ

2.6 การสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction)

การสกัดแบบลำดับขั้นเป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการศึกษารูปฟอร์มและปริมาณโลหะในดิน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการเลือกสารเคมีที่เหมาะสมในการสกัดแต่ละลำดับขั้นของการสกัดและปริมาณของโลหะที่ออกมาในแต่ละขั้นจะสามารถนำไปทำนายพฤติกรรมของโลหะที่เป็นพิษในสภาวะแวดล้อมต่างๆ นอกจากนี้ยังจะทำให้เข้าใจเคมีของดินที่สัมพันธ์ระหว่างโลหะและชนิดของดินมากยิ่งขึ้นอีกด้วย ประสิทธิภาพของการสกัดแบบลำดับขั้นขึ้นอยู่ปัจจัยที่สำคัญคือการเลือกหรือเรียงลำดับการใช้สารสกัดที่เหมาะสมในแต่ละส่วนหรือขั้นตอนของการสกัด ระดับความแรงของสารสกัดที่เพิ่มขึ้นในแต่ละลำดับขั้นเพื่อจะได้สามารถสกัดโลหะที่อยู่ในรูปต่างๆได้ อย่างเหมาะสม และลดการปนเปื้อนระหว่างขั้น ระยะเวลาของการสกัดแต่ละขั้นเพื่อให้เพียงพอ สำหรับการเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังรวมไปถึงความเข้มข้นของสารสกัด อัตราส่วนของสารสกัดและตัวอย่าง พีเอช และอุณหภูมิ (Shiowatana *et al.*,2001)

วิธีการและสารเคมีที่ใช้ในการสกัดลำดับขั้นมีอยู่หลายวิธีการ แต่ก็ยังไม่มีวิธีการใดที่เป็นมาตรฐานและนำมาใช้ได้ต่อมา Silveira *et al.* ได้เสนอวิธีการสกัดแบบ 7 ขั้นตอนที่มีความเหมาะสมกับดินในพื้นที่เขตร้อนที่มีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ในปริมาณสูง สภาวะการสกัดลำดับขั้นที่เหมาะสมได้ถูกเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมของ Tessier และ Ahnstorm ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการของ Silveira *et al.* ซึ่งสามารถจำแนกรูปฟอร์มของโลหะหนักได้ละเอียดมากขึ้น โดยเฉพาะรูปฟอร์มที่ถูกตรึงหรือจับอยู่กับแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ โดยมีลำดับการสกัดดังนี้คือ

ขั้นที่ 1 : ส่วนที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้ (0.1M $CaCl_2$)

โลหะส่วนนี้เป็นส่วนที่ง่ายต่อการแลกเปลี่ยนกับสารเคมีต่างๆในสิ่งแวดล้อม สารสกัดที่นิยมใช้จะเป็นสารในกลุ่มของเกลือของธาตุต่างๆ (neutral salt) และอิเลกโตรไลต์ที่เป็นกลาง(neutral electrolytes) โดยในงานวิจัยนี้ได้นำ $CaCl_2$ โดยแคลเซียมไอออนจะเข้าไปแทนที่โลหะที่ถูกดูดซับอยู่ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะโลหะแคดเมียมและโลหะที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 2 โดยโลหะจะละลายอยู่ในรูป metal chloro-complexes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 2 : ส่วนที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดิน (1.0M CH_3COONa,pH 5)

โลหะส่วนที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดินเป็นส่วนที่มักจะเชื่อมอยู่กับคาร์บอเนตงานวิจัยนี้ได้นำ CH_3COONa มาใช้ โดยโซเดียมไอออนจะแทนที่โลหะที่ถูกดูดซับอยู่ และโลหะก็จะละลายอยู่ในรูปสารเชิงซ้อนอะซีเตท ทั้งนี้สารละลายจะต้องปรับพีเอชให้เท่ากับ 5 เพื่อป้องกันการละลายของโลหะที่เชื่อมกับอินทรียวัตถุ โลหะออกไซด์ ซัลไฟด์ แร่ดินเหนียวและยังป้องกันตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ (Muligan *et al.*,2001)

ขั้นที่ 3 : ส่วนที่ถูกดูดซับกับอินทรียวัตถุในดิน (NaOCl,pH8.5)

การสกัดโลหะในดินที่เชื่อมอยู่กับสารอินทรีย์ด้วยกลไกหลายแบบ เช่นการดูดซับ การเกิดสารเชิงซ้อนและการเกิดคีเลต จะทำให้โลหะถูกละลายอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์(organo-metal complexes) การสกัดโลหะในส่วนนี้มักจะใช้ตัวออกซิไดซ์ที่ร้อนในสารละลายสารอินทรีย์หรือสารที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ เช่น ออกไซด์และซัลไฟด์ของโลหะบางตัว ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแยกโลหะที่อยู่รูปสารอินทรีย์โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับ NaOCl ภายใต้อุณหภูมิ 90-95°C

ขั้นที่ 4 : ส่วนที่ยึดกับแมงกานีสออกไซด์ (0.05M $NH_2OH.HCl$,pH2)

โลหะที่อยู่ในรูปนี้เป็นรูปรีดิวซ์ที่สามารถละลายได้ง่ายการสกัดโลหะในดินที่ยึดติดอยู่กับแมงกานีสออกไซด์ในดิน นิยมใช้ $NH_2OH.HCl$ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นรีดิวซิงค์เอเจนต์(reducing agent) จากงานวิจัยของ Tipping *et al.*,1985 ได้รายงานไว้ว่า $NH_2OH.HCl$ สามารถสกัดอสัณฐานของแมงกานีสออกไซด์ได้สูงถึง 97% นอกจากนี้ยังพบว่า $NH_2OH.HCl$ มีความจำเพาะเจาะจงกับแมงกานีสออกไซด์โดยไม่ขึ้นกับความเข้มข้น แต่ต้องต้องปรับพีเอชให้น้อยกว่า 3 เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรีดิวซ์

ขั้นที่ 5 : ส่วนที่ยึดกับอสัณฐานของเหล็กออกไซด์ (0.2M(oxalic acid + NH_4 oxalate)pH3)

โลหะนี้อยู่ในรูปที่เป็นรูปรีดิวซ์ที่สามารถละลายได้ปานกลาง การสกัดโลหะในส่วนนี้นิยมใช้สารผสมของ oxalic acid และ ammonium oxalate ซึ่งมีความเฉพาะมากกว่า $NH_2OH.HCl$ โดยจำเป็นต้องปรับพีเอชให้เท่ากับ 3 เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรีดิวซ์ของรีดิวซิงค์เอเจนต์ด้วยเช่นกัน

ขั้นที่ 6 : ส่วนที่ยึดกับผลึกของเหล็กออกไซด์ (6 M HCl)

การสกัดโลหะในดินที่ยึดเกาะอยู่กับเหล็กออกไซด์ที่เป็นผลึกในดิน สารสกัดที่นิยมใช้คือ Dithinonite-Citrate-Bicarbanate แต่จากงานวิจัยของ Silveira *et al.*, 2006 พบว่าการใช้ 6 M HCl ในการสกัดผลึกของเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ Dithinonite-Citrate-Bicarbanate เป็นสารสกัด พบว่า 6 M HCl มีประสิทธิภาพในการสกัดเหล็กจากแร่สูงถึง 60% ของทั้งหมด

ขั้นที่ 7 : ส่วนที่เหลือ (HNO_3/HCl)

หลังจากที่สกัดโลหะบางส่วนออกไปแล้ว ของแข็งที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นแร่ปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ซึ่งมีโลหะปริมาณน้อยที่สุดในรูปผลึก และโลหะเหล่านี้ค่อนข้างจะเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาและไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบในสิ่งมีชีวิตในสภาพธรรมชาติ ในส่วนนี้จึงใช้สารสกัดที่มีความแรงมากกว่าสารสกัดส่วนอื่นๆ โดยปกติจะนำมาผสมกันของกรดที่ร้อนใช้เพื่อย่อยส่วนที่เหลือให้เป็นสารละลายใส ซึ่งในงานวิจัยนี้ ส่วนที่เหลือจากส่วนที่ 6 สามารถถูกละลายโดยการย่อยด้วย HNO_3 และ HCl ตามวิธีมาตรฐานการย่อยดินของ SW-846 Method 3050b (รายละเอียดดังภาคผนวก ข)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M. Rajaie *et al.* (2006) ศึกษาการสกัดแบบลำดับขั้นเพื่อทราบรูปแบบทางเคมีของธาตุและการนำธาตุนั้นๆมาใช้โดยพืช โดยดินตัวอย่างที่ศึกษาจะมีแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นองค์ประกอบหลัก สภาวะที่ทดลอง ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการอบดิน องค์ประกอบของดิน และการใส่ปุ๋ยหมักขยะ (MWC) 30 กรัมต่อกิโลกรัมดิน โดยในปุ๋ยจะมีส่วนผสมที่ต่างกันของ $CdSO_4$ ที่ได้มาจากการเติม (spike) ความเข้มข้นของแคดเมียม 5-60 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัม ดินลงไป ในการทดลองจะนำดินไปบรรจุในถุงพลาสติกและนำไปอบที่อุณหภูมิ 25±2 ˚C หลังจากผ่านไป 0, 1, 2, 4, 8 และ16 สัปดาห์ก็จะนำไปสกัดแบบลำดับขั้น จากการทดลองพบว่า ประมาณ 82- 88 % ของแคดเมียมที่เติมลงไปจะพบในรูปแลกเปลี่ยนประจุบวกและรูปที่ละลายในน้ำได้ รูปคาร์บอเนต และรูปของเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ โดยเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นจะเปลี่ยนไปตามปริมาณไอออนประจุบวกที่อยู่ในดิน รวมทั้งระยะเวลาในการอบดินจะมีผลต่อรูปแบบของแคดเมียมด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามการบำบัดเกือบทั้งหมดมากกว่า 80% ของปริมาณแคดเมียมที่เติมลงไป จะเปลี่ยนเป็นรูปคาร์บอเนต และรูปจับตัวกับสารอินทรีย์ในทันที

C.Tu , C.R. Zheng , H.H. Chen(2000) ได้ทำการศึกษาการบ่มดินไว้เป็นเวลา 3 เดือน เพื่อศึกษาถึงอิทธิผลของปุ๋ยยูเรีย (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) ที่มีผลต่อรูปของตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) รูปแบบของโลหะที่ทำการศึกษา ได้แก่ รูปแลกเปลี่ยนประจุบวกและรูปที่ละลายในน้ำได้(soluble plus exchangeable,SE) รูปของเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (Fe-Mn oxide,OX) รูปที่จับกับสารอินทรีย์ (organic matter complexed,OM) และในรูปของสารที่เหลือ (residual,RES) ผลการทดลอง พบว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในอัตรา 200 มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัม จะทำให้สัดส่วน รูปของการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ละลายในน้ำได้ มีค่าน้อยลงแต่จะเพิ่มสัดส่วนรูปของคาร์บอเนต รวมทั้งรูปของเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ของโลหะทั้ง 2 ชนิด กรณีที่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส ในอัตรา 80 มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัม จะทำให้รูปของการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ละลายในน้ำได้ ในโลหะทั้ง 2 ลดลง ขณะที่การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตรา 200 มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัม จะทำให้รูปของการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ละลายในน้ำได้เพิ่มขึ้น แต่จะลดสัดส่วนของรูปคาร์บอเนต ของทั้งตะกั่วและแคดเมียม ดังนั้นการเติมปุ๋ยเคมีที่ปนเปื้อนโลหะหนักไม่เพียงแต่จะให้ธาตุอาหารแก่พืชเท่านั้น แต่จะทำให้ความสามารถในการดูดซึมธาตุอาหารจากดินของพืชมีการเปลี่ยนแปลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เครื่องมือ/อุปกรณ์

3.1.1.1 เครื่องอะตอมมิคแอปซอฟชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.1.1.2 เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น SRS 3400

3.1.1.3 เครื่องเขย่าแนวนอน (Horizontal shaker)

3.1.1.4 เครื่องย่อยไมโครเวฟ

3.1.1.5 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Centaur 2 บริษัท SUNYO

3.1.1.6 อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น WB 22 บริษัท Memmert

3.1.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด รุ่นTC-254 บริษัท Denver Instrument Company

3.1.1.8 เครื่องวัดพีเอช รุ่น 215 บริษัท Denver Instrument Company

3.1.1.9 เครื่องกรองแบบลดความดัน รุ่น B-169 บริษัท B'U'CHI

3.1.1.10 เครื่องกลั่นไนโตรเจน รุ่น B-323 บริษัท B'U'CHI

3.1.1.11 เครื่องย่อยเจลดาห์(Kjedahl Digestion Unit) รุ่น B-426 บริษัท B'U'CHI

3.1.1.12 ตู้อบให้ความร้อน รุ่น ISOTEMP บริษัท Fisher Scientific

3.1.1.13 หลอดกลั่นเจห์ดาล

3.1.1.14 ไฮโดรมิเตอร์มาตรฐาน ASTM NO. 1.152

3.1.1.15 เทอร์โมมิเตอร์

3.1.1.16 แท่นให้ความร้อน

3.1.1.17 ตะแกรงร่อน ขนาด 35 เมช

3.1.1.18 กระดาษกรอง Whatman GF/C เบอร์ 2

3.1.1.19 แท่งแก้วสำหรับคนแบบ Plunger

3.1.1.20 เซลล์พลาสติกชนิดที่มีด้านใส 2 ด้าน

3.1.1.21 เครื่องแก้วและอุปกรณ์พลาสติกสำหรับห้องปฏิบัติการ

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.2 แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.3 แอมโมเนียมออกซาเลต ($(NH_4)_2C_2O_4.H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

3.1.2.4 แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) เกรดวิเคราะห์ บริษัท BDH Chemical

3.1.2.5 แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.6 ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.7 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba 3.1.2.8 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.9 โซเดียมอะซิเตท (NaOAc) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.10 โซเดียมไฮโปคลอไรต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem

3.1.2.11 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.12 เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.13 คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.14 แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.15 ไตรเอทานอลามีน ($(CH_2OHCH_2)_3N$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.16 ไฮดรอกไซลามีนไฮโดรคลอไรด์ ($NH_2OH{\cdot}HCl$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.17 ไอโซโพรพิวแอลกอฮอล์ (C_3H_8O) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.18 ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($KH_2PO_4.3H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.19 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.20 กรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.21 กรดออกซาลิก ($H_2C_2O_4$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.22 กรดบอริก (H_3BO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.23 กรดแอสคอร์บิก ($C_6H_8O_6$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.24 โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.25 โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.26 เมทิลเรด เกรดวิเคราะห์ บริษัท S.D. Finechem

3.1.2.27 แบเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.28 แอนติโมนีโพแทสเซียมทาร์เทรท ($KSbO.C_4H_4O_4$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.29 โบรโมกลีซอลกรีน เกรดวิเคราะห์ บริษัท Adros Organic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
117311

3.2 ดินที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 แหล่งที่มาของดิน

การทดลองนี้ใช้ดินที่เก็บจากพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมจากการทำเหมืองแร่ บริเวณห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยมีปริมาณแคดเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 30 -40 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง นำมาปลูกข้าวเป็นเวลา 120 วัน หลังจากการนั้นจึงนำดินนี้มาใช้ในการศึกษา โดยแบ่งชุดดินในการศึกษาดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงชุดการทดลอง 4 ชุดที่ทำการศึกษา

ชุดการทดลอง		รายละเอียด
1	NP	ชุดการทดลองที่ไม่ได้ผ่านการปลูกข้าว
2	P	ชุดการทดลองที่ผ่านการปลูกข้าว
3	F1	ชุดการทดลองที่ผ่านการปลูกข้าวและใส่ปุ๋ยคอก ในปริมาณ 500 กรัมต่อดิน 10 กิโลกรัม
4	F2	ชุดการทดลองที่ผ่านการปลูกข้าวและใส่ปุ๋ยคอก ในปริมาณ 2000 กรัมต่อดิน 10 กิโลกรัม

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมดิน

นำดินเกลี่ยให้กระจายทั่วทั้งถาดที่รองพลาสติกไว้และนำมาตากจนแห้ง จากนั้นสุ่มตัวอย่างดินทั้ง 5 ชุด นำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 เมช เก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อใช้ในการทดลอง

3.3.2 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ทำการตรวจวิเคราะห์ คือ พีเอช ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ปริมาณสารอินทรีย์ ปริมาณสารอนินทรีย์ ความชื้น ลักษณะเนื้อดิน ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ปริมาณเหล็ก โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน (กองวิเคราะห์, 2535)

พารามิเตอร์	วิธี/เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์
พีเอช	เครื่องวัดพีเอช
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	วิธีการทำให้อิ่มตัวด้วยแอมโมเนียมอะซิเทรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์	วิธี/เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์
ปริมาณสารอินทรีย์ (%)	วิธีการออกซิเดชันแบบเปียก
ความชื้น (%)	วิธีกราวิเมตริก
สารอนินทรีย์ในดิน	เอกซ์เรย์ดิสแฟสชัน (X-Ray Diffraction) or XRF
ความเป็นกรดของดิน	วิธีอิ่มตัวด้วยแบเรียมคลอไรด์
ความเข้มข้นของโลหะหนัก	เครื่องไมโครเวฟไดเจสเตอร์ และหาปริมาณด้วยเครื่องAAS
ปริมาณไนโตรเจน	**วิธีKjeldahl
ปริมาณฟอสฟอรัส	**วิธีการสกัดด้วย Bray II และหาปริมาณด้วยวิธี Ascorbic acid
ปริมาณเหล็กออกไซด์	**สกัดด้วยน้ำยา Diethyline triamine penta acetic acid) และหาปริมาณด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

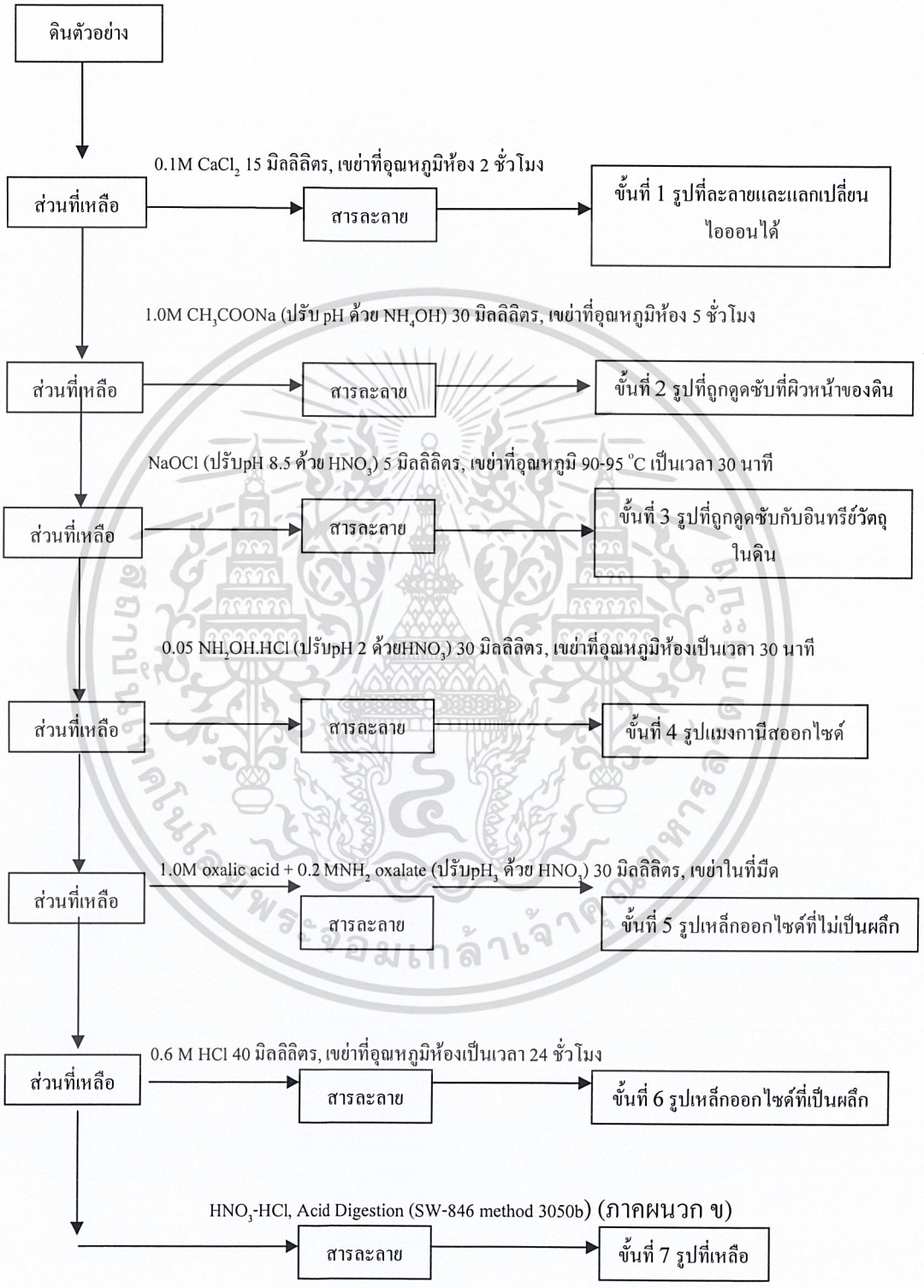
หมายเหตุ วิธีการทดลองในภาคผนวก ก.

* กรมพัฒนาที่ดิน, 2547

**คู่มือการวิเคราะห์ดินทางเคมี, พัชรี.2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การศึกษารูปฟอร์มของแคดเมียมในดินด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction)



รูปที่ 3.1 วิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงผลในรูปค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ความแตกต่างของตัวอย่างดินทั้ง 4 ชุดจะวิเคราะห์ด้วย ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยโปรแกรม SPSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษารูปแบบของโลหะแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินที่ผ่านการปลูกข้าว รวมทั้งศึกษารูปแบบแคดเมียมในดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมที่ทำการใส่ปุ๋ยใน 2 อัตราส่วน โดยแบ่งชุดดินที่ทำการทดลองออกเป็น 4 ชุดดิน คือ ชุดดินที่ไม่ได้ทำการปลูกพืช(NP) , ชุดดินที่ทำการปลูกพืช(P) , ชุดดินที่ทำการใส่ปุ๋ย 500 กรัมต่อดิน10 กิโลกรัม(F1) และชุดดินที่ทำการใส่ปุ๋ย 2000 กรัมต่อดิน10 กิโลกรัม(F2) ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำในแต่ละชุดการทดลอง ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้เป็นดังนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินที่เก็บมาจากบริเวณพื้นที่เหมืองแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งมีลักษณะเนื้อดิน สมบัติทางกายภาพและเคมี สามารถสรุปได้ดังแสดงในตาราง4.1 (รายละเอียดในภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน		ดินตัวอย่าง			
		NP	P	F1	F2
1.ความชื้น (%)		0.02±0.001	0.02±0.001	0.02±0.000	0.02±0.005
2.เปอร์เซ็นต์เนื้อดินสัมผัส	% ทราย	67.33	59.92	79.92	82.50
	% ซิลท์	20.08	26.33	5.00	2.50
	% ดินเหนียว	12.58	13.75	15.08	15.00
	เนื้อดิน	ร่วนปนทราย	ร่วนปนทราย	ร่วนปนทราย	ร่วนปนทราย
3.ค่าพีเอช (ดิน : น้ำ เท่ากับ 1:1)		7.52±0.00	7.34±0.02	7.56±0.02	7.57±0.03
4.ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (meq/100 g-soil)		10.00±0.16	11.00±0.16	10.40±0.00	11.26±0.09
5.ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (%)		9.71±0.01	9.59±0.01	9.51±0.00	11.05±0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน (ต่อ)

ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน		ดินตัวอย่าง			
		NP	P	F1	F2
6.ความเป็นกรด (meq/g-dry soil)		0.03±0.002	0.07±0.003	0.06±0.002	0.05±0.002
7.ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (mg/ kg-dry soil)		9.06±1.48	3.84±0.27	6.45±1.06	5.85±0.73
8.ปริมาณไนโตรเจน (%)		0.24±0.003	0.21±0.003	0.23±0.003	0.07±0.001
9.ปริมาณเหล็ก(mg/ kg-dry soil)		5.15±0.01	6.27±0.01	5.50±0.08	6.03±0.01
10.ปริมาณอนินทรียวัตถุ	% MgO	1.45	1.54	1.86	1.69
	% SiO_2	63.9	67.3	71.8	80.8
	% CaO	11.1	11.9	8.88	7.43
	% Fe_2O_3	8.41	7.16	7.95	8.44
	% ZnO	1.54	1.53	1.38	0.985
11.ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด(mg/ kg-dry soil)		99	78	72	43

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง (ดังตารางที่ 4.1) พบว่าชุดดินในแต่ละชุดมีคุณสมบัติและลักษณะของดินแตกต่างกัน ดังนี้คือ

1. ลักษณะของเนื้อดิน พบว่า ดินทั้ง 4 ชุดการทดลองมีลักษณะที่เหมือนกัน คือจัดอยู่ในกลุ่มดินร่วนปนทราย (sandy loam)

2. ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงเป็นกลาง ค่าพีเอชโดยเฉลี่ยของชุดดิน NP, ชุดดิน P, ชุดดิน F1, ชุดดิน F2 มีค่าเท่ากับ 7.52, 7.34, 7.56, 7.57 ตามลำดับ

3ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินทั้ง 4 ชุดการทดลองมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกใกล้เคียงกันอยู่ในระดับปานกลาง (ค่าCEC ระดับปานกลางเท่ากับ 10-15 meq/100 g-soil , ศุภมาศ , 2539) คือ 10.00 , 11.00 , 10.40 , 11.26 meq/100 g-soil ตามลำดับ เนื่องจากดินทั้ง 4 ชุดการทดลองนั้นมีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทรายเช่นเดียวกัน จึงทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งโดยปกติแล้วความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกจะสัมพันธ์กับลักษณะของเนื้อดิน กล่าวคือความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อดินมีเนื้อละเอียดหรือมีสัดส่วนของดินเหนียว(clay fraction) เพิ่มมากขึ้น อนุภาคดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนียวซึ่งมีประจุลบอยู่ที่ผิวเป็นส่วนใหญ่มีการจับกับไอออนอย่างหลวมๆจึงสามารถแทนที่ด้วยประจุอื่นๆได้โดยง่าย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

4. ความอุดมสมบูรณ์ของดินซึ่งวัดจากร้อยละของปริมาณอินทรียวัตถุในดิน พบว่า ดินทั้ง 4 ชุด มีความอุดมสมบูรณ์อยู่ในระดับสูงมาก คือ มีปริมาณอินทรียวัตถุ 9.51-11.05% (ระดับอินทรียวัตถุที่ใช้เป็นมาตรฐาน >4.5% ถือว่าดินนั้นมีระดับอินทรียวัตถุในปริมาณสูงมาก, กรมพัฒนาที่ดิน, 2545) โดยที่ดินชุด F2 ซึ่งเป็นดินที่มีการใส่ปุ๋ยคอกในปริมาณที่สูงกว่าดินชุดอื่นๆทำให้ ปริมาณสารอินทรีย์ในดินจึงสูงที่สุด

5. ความเป็นกรดในดิน NP, P, F1, F2 พบว่ามีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.03, 0.07, 0.06, 0.05 meq /g-dry soil ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่มีค่าอยู่ในระดับปานกลาง ในชุดดินP ที่ทำการปลูกพืชประจุบวกที่มีในดินอาจเกิดการแลกเปลี่ยนกับประจุบวกที่ยึดเกาะตามบริเวณรากทำให้ดินมีความเป็นกรดสูงกว่าชุดดินNP (ไม่ได้ทำการปลูกพืช) นอกจากนี้ชุดดินF1, F2 ที่ทำการใส่ปุ๋ยคอกอาจเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันปลดปล่อย H^+ ลงสู่ดินเป็นผลทำให้มีค่าความเป็นกรดในดินสูง

6. ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ พบว่าชุดดินP , F1 , F2 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ (3.80-6.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) ชุดดินNP มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ (9.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) (มาตรฐานฟอสฟอรัสในดิน3-6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินถือว่าอยู่ในระดับต่ำ , ปริมาณฟอสฟอรัส 6-10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ถือว่าอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ , มงคลและสัมฤทธิ์,2539) เมื่อพิจารณาค่าพีเอช พบว่ามีค่าเท่ากับ 7.3-7.6 ซึ่งถ้าค่าพีเอชสูงกว่า 7.2 ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปที่พืชดึงดูดไปใช้ได้ยากเป็นส่วนใหญ่จึงอาจทำให้ฟอสฟอรัสในดินมีปริมาณน้อยมากอาจทำให้ดินขาดฟอสฟอรัสซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักชนิดหนึ่งที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช

7.อนินทรียวัตถุในดิน มีซิลิกอนออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก (62-81 %) รองลงมาคือแคลเซียมออกไซด์, เหล็กออกไซด์ (7-12 %) และแมกนีเซียมออกไซด์และสังกะสีออกไซด์ (1-2 %) ตามลำดับ

8. ปริมาณไนโตรเจน พบว่าดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณไนโตรเจนในชุดดิน NP , P , F1 ในระดับสูงถึงสูงมากเท่ากับ 0.24 , 0.21 , 0.23 (%) ตามลำดับ (ปริมาณไนโตรเจนตั้งแต่ระดับ 0.175 จนถึงสูงกว่า0.225 ถือว่าเป็นระดับที่มีไนโตรเจนสูงถึงสูงมากตามลำดับ , มงคลและสัมฤทธิ์, 2539) ซึ่งเป็นระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ในชุดดินF2 ที่ทำการใส่ปุ๋ยคอกมีปริมาณไนโตรเจนค่อนข้างต่ำ เท่ากับ 0.07% ทั้งๆ ที่ใส่ปุ๋ยคอกมากที่สุด ซึ่งอาจเกิดจากธาตุไนโตรเจนพืชนำไปใช้ หรือมีการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปอื่นๆ (ปริมาณไนโตรเจนระดับ 0.050-0.075 ถือว่าอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ปริมาณเหล็กในดินที่พบในชุดดินNP, P , F1 , F2 มีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 5.15 , 6.27 , 5.50 , 6.03 มิลลิกรัม / กิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ

10. ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 99.00 , 78.00, 72.00 , 43.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ จัดได้ว่าเป็นพื้นที่ที่ไม่เหมาะแก่การทำเกษตรกรรมเนื่องจากมีปริมาณแคดเมียมเกินค่ามาตรฐาน (มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมซึ่งได้กำหนดให้พื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินสูงเกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้งเป็นพื้นที่ที่ไม่เหมาะสำหรับการอยู่อาศัยและการทำเกษตรกรรม , ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 , 2547)

4.2 การสกัดแบบลำดับขั้น

ในทำการวิเคราะห์รูปฟอร์มของแคดเมียมในดินด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น จะแบ่งวิธีการสกัดออกเป็น 7 ลำดับขั้นตอน ดังนี้คือ

ขั้นที่ 1 รูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้ (Soluble-exchangeable ; soluble)

ขั้นที่ 2 รูปที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดิน (Surface adsorbed ; adsorb)

ขั้นที่ 3 รูปที่ถูกดูดซับกับอินทรียวัตถุในดิน (Organic matter ; OM)

ขั้นที่ 4 รูปที่ยึดกับแมงกานีสออกไซด์ในดิน (Mn oxides)

ขั้นที่ 5 รูปที่ยึดกับอสัณฐานเหล็กออกไซด์ในดิน (Poor crystalline Fe oxides)

ขั้นที่ 6 รูปที่ยึดกับผลึกเหล็กออกไซด์ในดิน (Crystalline Fe oxides)

ขั้นที่ 7 รูปที่เหลือ (Residue)

4.2.1 รูปฟอร์มแคดเมียมในดิน

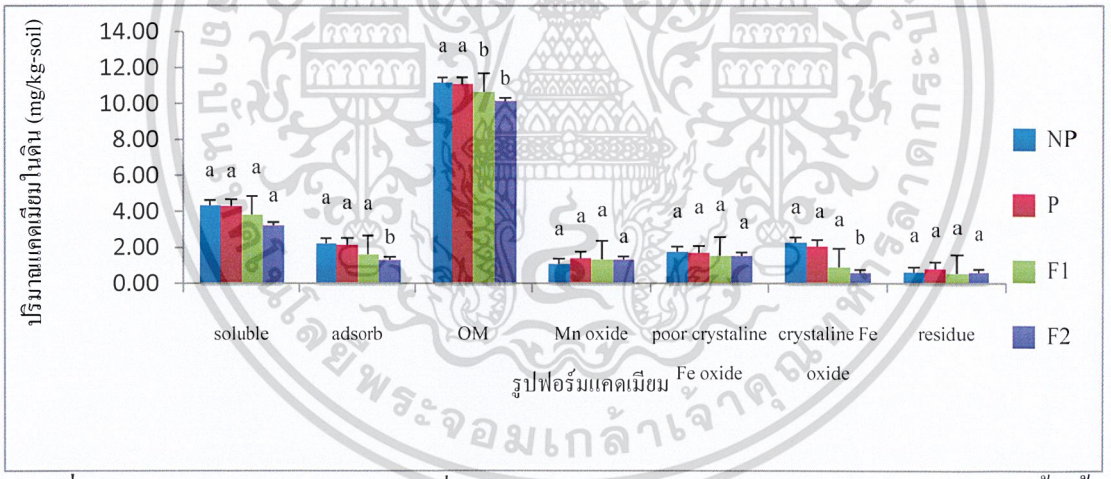
จากรูปที่ 4.1 พบว่าแคดเมียมในดินตัวอย่างที่ทำการศึกษาจะพบอยู่ในรูปที่ถูกดูดซับกับอินทรียวัตถุในดินมากที่สุด (OM, 43.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) รองลงมาคือรูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้ (soluble, 15.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) และ รูปที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดิน (adsorb, 7.32 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน พบว่ามีค่าสูงมากระหว่าง 9.5-11.05% ซึ่งตามมาตรฐานอินทรียวัตถุกำหนดค่าไว้ดังนี้ คือ >1.5-2.5% ถือว่ามีอินทรียวัตถุอยู่ในระดับปานกลาง , >4.5% ถือว่ามีอินทรียวัตถุอยู่ในระดับสูงมาก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2545) ดังนั้นการที่พบรูปฟอร์มแคดเมียมในรูปที่ถูกดูดซับกับอินทรียวัตถุ(OM) สูงกว่ารูปฟอร์มอื่นๆ อาจเกิดจากการที่ดินมีอินทรียวัตถุสูง โดยเมื่อเปรียบเทียบผลจากงานวิจัยของ ชัชวพร , 2551 ที่เก็บดินปนเปื้อนแคดเมียมจากเหมืองแม่ตาวมาทำการสกัดลำดับขั้น พบว่าแคดเมียมจะอยู่ในรูปที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(adsorb) เป็นส่วนใหญ่ โดยที่ปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่า 0.5-1.5% ซึ่งมีปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับดินตัวอย่าง

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางสถิติของแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่ถูกดูดซับกับอินทรียวัตถุในดิน (OM) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าชุดดินที่ไม่ใส่ปุ๋ยคอก (ชุดดินNP , P) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับชุดดินที่ใส่ปุ๋ยคอก (ชุดดินF1 , F2) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงให้เห็นว่าการใส่ปุ๋ยคอกในดินทำให้ปริมาณแคดเมียมในดินมีค่าต่ำกว่าดินที่ไม่ได้ทำการใส่ปุ๋ย ในขณะที่แคดเมียมที่อยู่ในรูปที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดิน (adsorb), รูปที่ยึดกับผลึกเหล็กออกไซด์ในดิน (Crystalline Fe oxides) พบว่า ดินที่ทำการใส่ปุ๋ย 2000 กรัมต่อดิน 10 กิโลกรัม (ชุดดินF2) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับดินที่ไม่ใส่ปุ๋ย (ชุดดินNP, P) พิจารณาได้ว่าการใส่ปุ๋ยคอกในดินมากขึ้นทำให้ปริมาณแคดเมียมในดินต่ำกว่าดินที่ไม่ปลูกพืชและใส่ปุ๋ยน้อยกว่า เมื่อพิจารณา รูปฟอร์มแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้ (soluble) , รูปที่ยึดกับแมงกานีสออกไซด์ (Mn oxides), รูปที่ยึดกับอสัณฐานเหล็กออกไซด์ (Poor crystalline Fe oxides) และรูปที่เหลือ (residue) ของทั้งสี่ชุดดิน พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

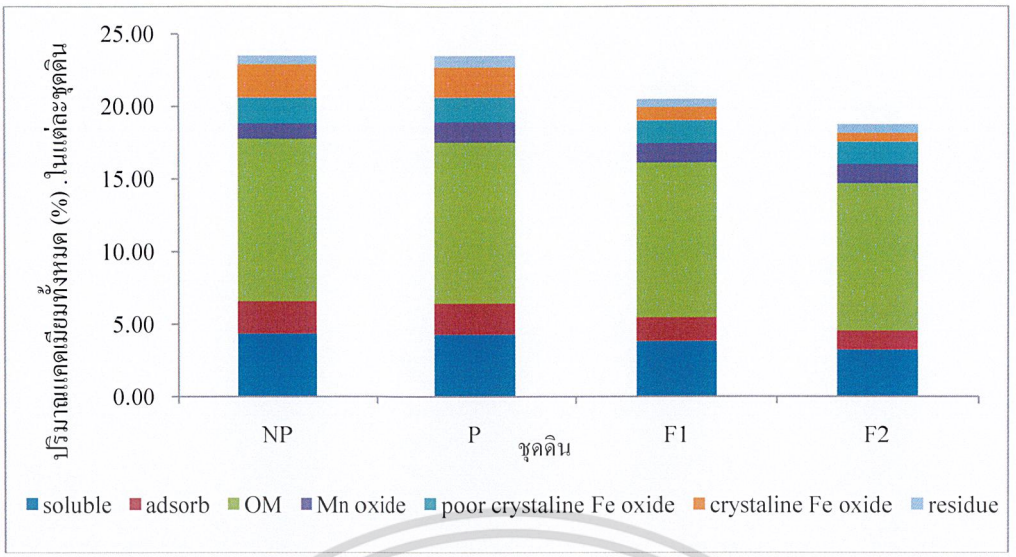


รูปที่ 4.1 ปริมาณรูปฟอร์มแคดเมียมที่พบในดิน NP, P, F1, F2 จากการสกัดแบบลำดับขั้นทั้ง 7 ขั้นตอน (ภาคผนวก จ)

—— แถบแสดงความผิดพลาดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างทางสถิติของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ;

เมื่อนำ ปริมาณแคดเมียมที่ได้จากการสกัดลำดับทั้ง 7 ขั้นตอนของแต่ละชุดดิน(mg/kg-dry soil) มารวมกันคิดเป็น100% และนำค่าที่สกัดได้ในแต่ละรูปฟอรม์คำนวณสัดส่วนที่ได้ในหน่วยเปอร์เซนต์ ผลดังรูปที่ 4.2 โดยปริมาณแคดเมียมในแต่ละชุดดิน NP, P, F1, F2 เท่ากับ 27.26, 27.24, 23.77, 21.74 % ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

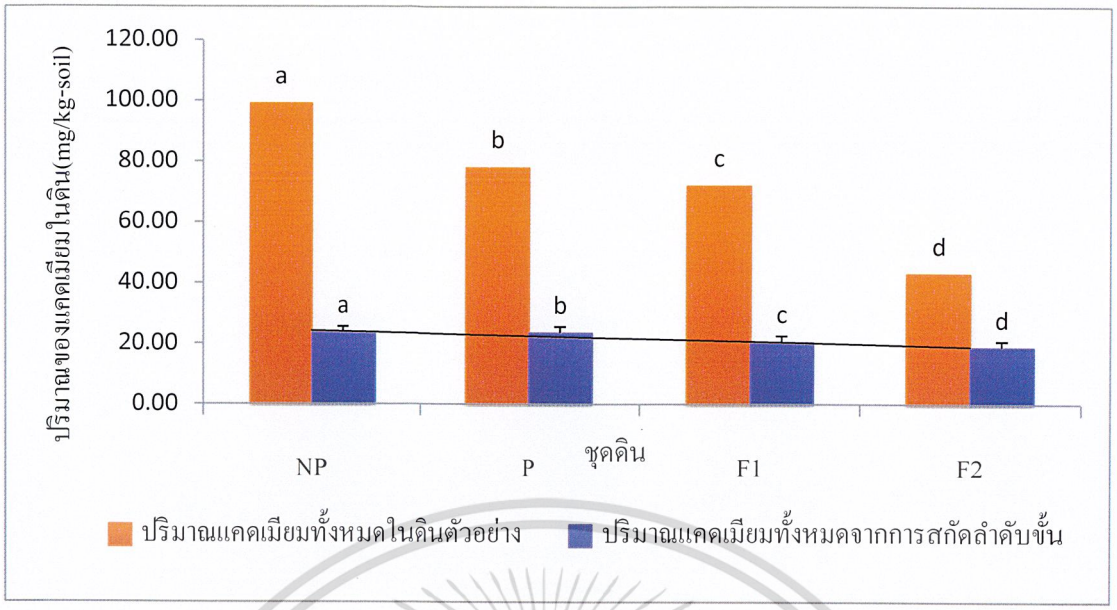


รูปที่ 4.2 สัดส่วน (%) รูปฟอร์มแคดเมียมที่พบในดิน NP , P , F1 , F2 จากการสกัดแบบลำดับขั้นทั้ง 7 ขั้นตอน

4.2.2. เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมทั้งหมดและที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น

จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมทั้งหมดและปริมาณที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น พบว่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินทั้ง 4 ชุด (43-99%) มีปริมาณสูงกว่าปริมาณแคดเมียมที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น (18.76-23.53%) โดยพบว่าในชุดดิน NP (ที่ไม่ได้ทำการปลูกข้าว) มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดสูงที่สุด (99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) เมื่อนำชุดดินNP มาทำการเปรียบเทียบกับชุดดินP (ทำการปลูกข้าว, 78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) พบว่าในชุดดิน P มีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่าชุดดิน NP แสดงให้เห็นว่าชุดดินที่ทำการปลูกข้าว ปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในดินบางส่วนอาจจะถูกข้าวดึงดูดไปสะสมไว้ในส่วนต่างๆของพืช จึงทำให้ปริมาณแคดเมียมในดินลดลง นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบชุดดินF2 (ทำการใส่ปุ๋ยคอก, 43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) กับชุดดินP (ไม่ใส่ปุ๋ยคอก, 78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) พบว่าในชุดดิน F2 มีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่าชุดดินP ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใส่ปุ๋ยคอกซึ่งเป็นการปรับปรุงดินอาจมีผลทำให้ข้าวที่ทำการปลูกมีปริมาณต้นข้าวที่เจริญเติบโตได้ดีกว่าชุดดิน P (ไม่ได้ทำการใส่ปุ๋ย) โดยจากการที่ปริมาณต้นข้าวเจริญได้ดีกว่าส่งผลให้ดึงดูดแคดเมียมในดินไปสะสมอยู่ที่ต้นข้าวเป็นปริมาณสูงกว่าทำให้มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินน้อยกว่าชุดดินอื่นๆ และเมื่อทำการศึกษาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น พบว่า มีผลการศึกษาที่สอดคล้องกับผลการศึกษาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด โดยจากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมดและปริมาณที่ได้จากการสกัดลำดับขั้นทั้ง 7 ขั้นตอน ในชุดดินNP , P , F1 , F2 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จึงพิจารณาได้ว่าการปลูกพืชและการใส่ปุ๋ยมีผลทำให้ปริมาณแคดเมียมในดินลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมทั้งหมดและปริมาณที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างทางสถิติของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวก จ)

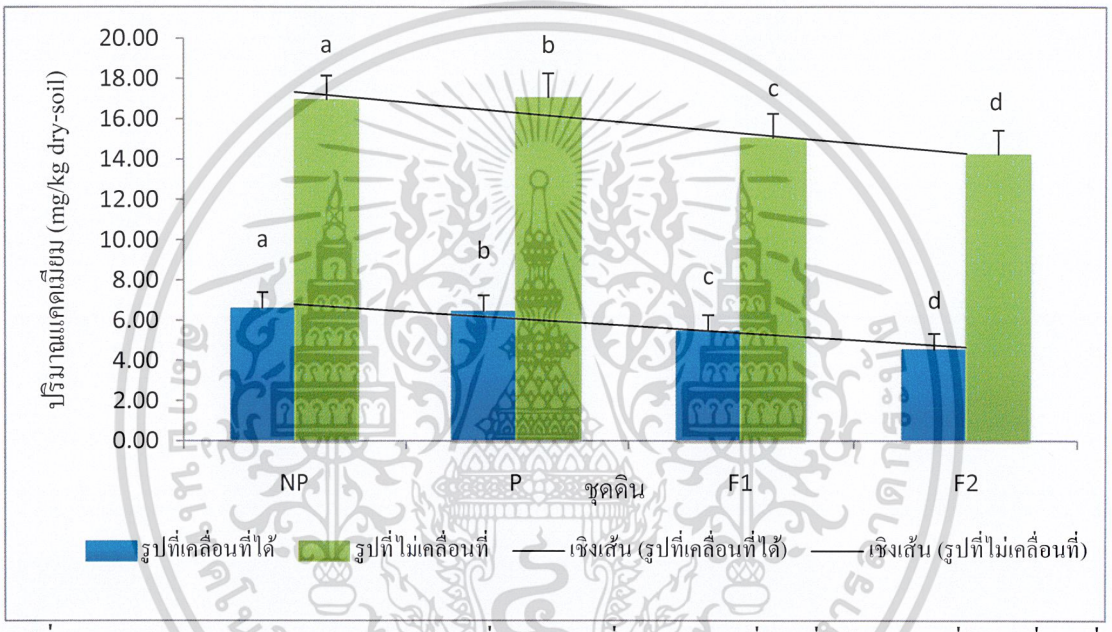
4.2.3. ปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่เคลื่อนที่ได้และไม่เคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.4 ทำการเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (รูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้;solubleและ รูปที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดิน; adsorb) และปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่ไม่เคลื่อนที่ (รูปที่ยึดกับแมงกานีสออกไซด์ในดิน;Mn oxides)รูปที่ยึดกับอสัณฐานเหล็กออกไซด์ในดิน; Poor crystalline Fe oxides ; รูปที่ยึดกับผลึกเหล็กออกไซด์ในดิน; Crystalline Fe oxides และรูปที่เหลือ; residue) พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในดินซึ่งอยู่ในรูปฟอร์มที่ไม่เคลื่อนที่ (non-mobile, 14.23-17.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) ซึ่งสูงกว่ารูปที่เคลื่อนที่ได้ (mobile, 4.53-6.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) (ดังรูปที่ 4.4) ซึ่งเป็นผลดี เนื่องจากรูปฟอร์มที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้จะทำให้แคดเมียมแพร่กระจายในดินได้น้อยกว่า

เมื่อพิจารณารูปฟอร์มแคดเมียมที่เคลื่อนที่ได้ซึ่งพืชสามารถดึงดูดไปใช้ได้ อาจส่งผลทำให้มีการปนเปื้อนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้ จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปฟอร์มแคดเมียมที่เคลื่อนที่ได้ทั้งสี่ชุดดินมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยปริมาณแคดเมียมมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อมีการปลูกพืชและใส่ปุ๋ย จึงอาจพิจารณาได้ว่าการปลูกพืชและการใส่ปุ๋ยมีผลทำให้ปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปฟอร์มที่เคลื่อนที่ได้ในดินลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรูปฟอร์มที่ไม่เคลื่อนที่ ซึ่งเป็นรูปฟอร์มแคดเมียมที่ค่อนข้างเสถียรจึงมีโอกาสที่จะปนเปื้อนลงสู่สารละลายดินได้น้อยกว่ารูปฟอร์มแคดเมียมที่เคลื่อนที่ได้ จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าปริมาณแคดเมียมในชุดดินทั้งสี่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อมีการปลูกพืชและใส่ปุ๋ย แสดงให้เห็นว่าการปลูกพืชและการใส่ปุ๋ยมีผลทำให้ปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปฟอร์มที่ไม่เคลื่อนที่ในดินลดลง โดยเมื่อทำการการปลูกข้าวและทำการใส่ปุ๋ยคอกลงไปอาจส่งผลให้อสัณฐานของดินเปลี่ยนแปลง ทำให้รูปฟอร์มที่ไม่เคลื่อนที่มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้และรูปที่ไม่เคลื่อนที่ (ภาคผนวก จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษารูปฟอร์มแคดเมียมในดินปนเปื้อนที่ผ่านการปลูกข้าวและปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์โดยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น 7 ขั้นตอน ผลการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเก็บรวบรวมมาจากพื้นที่ที่ประสบปัญหาการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินที่ห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะทางกายภาพและเคมี ดังนี้ ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย ชุดดิน NP (ดินที่ไม่ได้ผ่านการปลูกข้าว) , P (ดินที่ผ่านการปลูกข้าว) , F1 (ดินที่ผ่านการปลูกข้าวและใส่ปุ๋ยคอกในปริมาณ 500 กรัมต่อดิน 10 กิโลกรัม) และ F2 (ดินที่ผ่านการปลูกข้าวและใส่ปุ๋ยคอกในปริมาณ 2000 กรัมต่อดิน 10 กิโลกรัม) มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.52 , 7.34 , 7.56 , 7.57 ตามลำดับ , ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีค่าเท่ากับ 10.00 , 11.00 , 10.40 , 11.26 มิลลิกรัมสมมูลต่อน้ำหนักดินแห้ง 100 กรัม ตามลำดับ, ปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่าเท่ากับ 9.71 , 9.59 , 9.51 , 11.05 (%) ตามลำดับ, ความเป็นกรดในดินเท่ากับ 0.03 , 0.07 , 0.06 , 0.05 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัมดินแห้งตามลำดับ, มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเท่ากับ 9.06 , 3.84 , 6.45 , 5.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้งตามลำดับ, มีเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในดินเท่ากับ 0.24 , 0.21 , 0.23 , 0.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้งตามลำดับ, มีปริมาณเหล็กในดินเท่ากับ 5.15 , 6.27 , 5.50 , 6.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้งตามลำดับ, ดินทั้งสี่ชุดดินมีออกไซด์ของแมกนีเซียม ซิลิกอน แคลเซียม เหล็ก สังกะสีเป็นองค์ประกอบหลัก และความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 99 , 78 , 72 , 43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้งตามลำดับ

จากการศึกษารูปฟอร์มแคดเมียมในดินปนเปื้อนโดยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้นพบว่า รูปฟอร์มแคดเมียมที่พบในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่ถูกดูดซับกับอินทรียวัตถุ(OM) รูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้ (soluble) รูปที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดิน (adsorb) ตามลำดับ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมในดินระหว่างปริมาณแคดเมียมทั้งหมดและปริมาณแคดเมียมที่ได้จากการสกัดแบบลำดับขั้น พบว่าในดินที่ปลูกข้าวจะมีปริมาณแคดเมียมน้อยกว่าชุดดินที่ไม่ได้ปลูกข้าว แสดงให้เห็นว่าชุดดินที่ทำการปลูกข้าวนั้น ข้าวอาจมีการดึงดูดแคดเมียมบางส่วนขึ้นไปได้ทำให้มีปริมาณแคดเมียมในสารละลายดินน้อยกว่า และเมื่อพิจารณาระหว่างชุดดินที่ใส่ปุ๋ยคอกและชุดดินที่ปลูกข้าว พบว่าชุดดินที่ใส่ปุ๋ยคอกมีปริมาณแคดเมียมในดินน้อยกว่าเนื่องจากปุ๋ยอาจทำให้ข้าวเจริญได้ดีกว่าจึงทำให้ต้นข้าวดึงดูดแคดเมียมไว้ในส่วนต่างๆของพืชได้มากกว่าดินที่ใส่ปุ๋ยน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาในระยะยาว เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆที่อาจมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในดิน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ค่าพีเอช ในดินในฤดูกาลที่แตกต่างกัน

2. ควรมีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการที่จะหาวิธีการในการลดการแพร่กระจายของแคดเมียมในดินที่อยู่ในรูปฟอร์มต่างๆ เพื่อลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในดิน และลดการแพร่กระจายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร เช่น การเลือกปลูกพืชที่ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของห่วงโซ่อาหาร

3.ควรทำการศึกษาการวิเคราะห์หาแมงกานีสในดินด้วยวิธีทางเคมี เช่น วิธีการสกัดด้วยน้ำยาสกัด DTPA แล้วทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer

4.ควรทำการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในพืชเพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

5.ควรมีการศึกษาตัวอย่างดินที่ทำการใส่ปุ๋ย แต่ไม่ได้ทำการปลูกพืชเพื่อนำมาใช้เป็นชุดควบคุมเพื่อทำการเปรียบเทียบรูปฟอร์มแคดเมียมจากการใส่ปุ๋ยคอกที่มีผลต่อปริมาณแคดเมียมในดิน

6.ควรเพิ่มการใส่ปุ๋ยคอกในอัตราที่เพิ่มขึ้นเพื่อพิสูจน์ว่าผลของการลดลงของแคดเมียมนั้นเกิดจากการใส่ปุ๋ยจริงหรือไม่เพราะผลของแคดเมียมในชุดดินที่ทำการใส่ปุ๋ย 500 กรัมต่อกิโลกรัมดินมีผลการทดลองที่ไม่ชัดเจน

7.ควรทำการศึกษาเนื่องเพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยคอกที่เหมาะสมที่ทำให้ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2545. **การผลิตและประโยชน์ของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ.** กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และกรองแก้ว ทิพยศักดิ์ .2549. **ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม 2.** กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

กองวิเคราะห์ดิน กรมพัฒนาที่ดิน. 2535. **คู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ดินของกลุ่มเคมีดินที่ 2.** กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.** พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จันทนี แจ่มแสงทอง.2551. **การบำบัดสารมลพิษโดยใช้เทคโนโลยี Phytoremediation.**กลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ.

ชัชวพร ยิ่งสมบัติ.2551. **การปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยปุ๋ยทริปเปิลซุปเปอร์ฟอสเฟต.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

พัชรี ธีรจินดาขจร.2552. **คู่มือการวิเคราะห์ดินทางเคมี** ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

มงคล ตั๊ะอุ่น และ สัมฤทธิ์ เฟื่องจันทร์ .2539. ปฏิบัติการธาตุอาหารพืชสวน.คณะเกษตรศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุธีลา ตุลยะเสถียรและคณะ.2544.**มลพิษสิ่งแวดล้อม.**1.กรุงเทพฯ: บริษัทรวมสาสน์ (1997) จำกัด.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2539 .**ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี.** กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

C. Tu, C.R. Zheng, H.M. Chen. 2000. **Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil**. Chemosphere 41, 133-138.

M. Rajaie, N. Karimian, M. Maftoun, J. Yasrebi, M.T. Assad .2006. **Chemical forms of cadmium in two calcareous soil textural classes as affected by application of cadmium-enriched compost and incubation time**. Geoderma 136, 533–541.

Mulligan, C.N., Yong, R.N. and B.F. Gibbs. 2001 **"Remediation technologies for metal contaminated soil and groundwater : an evaluation."** Eng. Geo. 60:193-207.

Shiowatana, J., Tantidanai, N. Nookabkaew, S. and Nacapricha, D. 2001. **"A flow system for the determination of metal speaciation in soil by sequential."** Envi. Inter. 26 : 381-387.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

U.S. EPA. 1996. **Acid digestion of Sediments, Sludges and soil / SW-846 Method 3050b.**

Silveira, M.L., Alleoni, L.R.F., O'Connor, G.A. and Chang, A.C. 2006. **"Heavy metal sequential extraction method – A modification for tropical soils."** Chemophere. 64:1929-1938

Tipping, E., Hetherington, N.B. and Hilton, J. 1985. **"Artifacts in the use of selective chemical extraction to determine distributions of metals between oxides of manganese and iron**." Anal. Chem. 57:1944-1946

Hickey, M.G. and Kittrick, J.A. 1984. **"Chemical portioning of Cd, Cu, Ni, and Zn in soil and sediment containing high levels of heavy metals."** J. Environ. Qual. 13:372-376

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์ดิน

ก.1 การหาปริมาณอนุภาคทราย ซิลท์ และเคลย์

การปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

1) เทสารละลายคัลกอน จำนวน 100 มล. ลงในกระบอกตวงปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 ลิตร ผสมให้ทั่วด้วยแท่งแก้วคนแบบ plunger ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่ (อยู่ในช่วง 20°C - 15°C)

2) ค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในสารละลายอย่างระมัดระวัง อ่านค่าจากสเกลที่รอยเว้าบนของของเหลวที่ล้อมรอบไฮโดรมิเตอร์

การอ่านค่าจากสารแขวนลอย

1)ชั่งดินที่ผึ่งแห้งและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 เมช แล้ว 40.0 กรัม (ถ้าเป็นดินทรายทรายร่วนหรือดินทรายใช้ 100 กรัม) ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มล. เติมสารละลายคัลกอน 100 มล. และน้ำประมาณ 300 มล. ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน

2)นำสารแขวนลอยดินจากที่เตรียมไว้ มากวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กประมาณ 5 นาที แล้วเทลงกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร

3)ปรับปริมาตรสารละลายจากข้อ 2 ด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 ลิตร ทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่

4)จุ่มแท่งแก้วคนแบบ plunger แบบขึ้น – ลง เบาๆเพื่อให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วทั้งกระบอกตวง (ให้หมุนขึ้นลงแบบเกลียวสว่าน 2 – 3 รอบ)

5)บันทึกเวลาเมื่อคนเสร็จ เติม 1 หยดของเอมิลอัลกอฮอล์ ถ้าที่ผิวของสารแขวนลอยมีฟอง

6)ค่อยๆหย่อน ไฮโดรมิเตอร์ลงอย่างระมัดระวังลงในสารแขวนลอยและอ่านสเกลเหมือนเดิม

7)เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาที หลังจากการผสมค่าที่อ่านได้ต้องหักลบจากค่าที่อ่านได้จากการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

8)ค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงอย่างระมัดระวังลงในสารแขวนลอยและอ่านสเกลเหมือนเดิม

9)เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาที หลังจากการกวนผสมค่าที่อ่านได้ต้องหักลบจากค่าที่อ่านได้จากการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

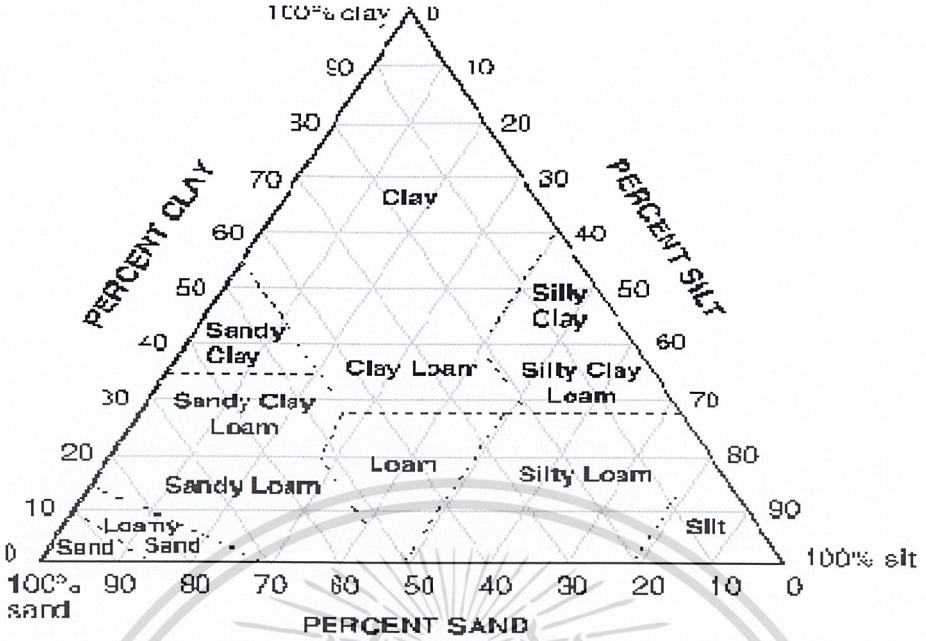
10)ค่อยๆดึงไฮโดรมิเตอร์ขึ้นอย่างระมัดระวังเมื่ออ่านเสร็จ ล้างและเช็ดให้แห้ง

11)เมื่อครบ 2 ชั่วโมงให้อ่านค่าไฮโดรมิเตอร์อีกครั้งโดยทำเหมือนเดิม

<u>ข้อควรระวัง</u>

การหาขนาดของอนุภาคด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์นี้ไม่เหมาะสมในกรณีที่ดินตัวอย่างมีหินปูนมากหรือเป็นดินเค็ม หรือมีอินทรีย์คาร์บอนมากกว่า 2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1สามเหลี่ยมจำแนกเนื้อสัมผัสดิน

การคำนวณ

$$\% \text{ Sand} = [\,(W - R)40S \times 100\,] / W$$

$$\% \text{ Clay} = [\,(R_{2hr}) \times 100\,] / W$$

$$\% \text{ Silt} = 100 - (\%\text{Sand} + \%\text{Clay})$$

ก.2 การวัดค่าพีเอช (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

1)ชั่งดินแห้ง 5 g ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นลงไป 5 ml พร้อมบันทึกหมายเลขตัวอย่างดิน

2)กวนให้เข้ากันอย่างน้อย 5 วินาที และตั้งทิ้งไว้ 10 นาที

3)ขณะที่ตั้งสารละลายทิ้งไว้ ให้ทำการปรับเทียบเครื่องวัดพีเอชกับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน 4 และ 7 (ปฏิบัติตามคู่มือการใช้เครื่องวัดพีเอช)

4)จุ่มอิเลคโทรดลงในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายดินที่ครบตามเวลากวนโดยใช้การหมุนอิเล็คโทรดเบาๆ (ระวัง! อิเลคโทรดกระแทกแตกได้) อ่านค่าพีเอช

ก.3 การหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

1)ชั่งตัวอย่างดิน 5 กรัม (ละเอียดสองตำแหน่งทศนิยม) ใส่ขวดรูปชมพู ขนาด 125 มล. เติมสารละลายแอมโมเนียม อะซิเทต 1 นอร์มอล ลงไป 60 มล. ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2)เขย่าสารละลายดิน 30 นาที โดยใช้เครื่องเขย่า จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง นาน 5 นาที แยกเอาส่วนใสไว้ (ถ้าต้องหาเปอร์เซ็นต์เบสอิ่มตัวได้เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} ,K^{+} Na^{+})

3)ล้างดินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเทต 1 นอร์มอล ครั้งละ 30 มล. นำไปปั่นเหวี่ยงแยกเอาส่วนใสออกจนไม่มีแคลเซียมเหลืออยู่ (การทดสอบแคลเซียมทำได้โดยนำส่วนใสที่ได้จากการล้างแต่ละครั้ง ประมาณ 10 มล. ใส่หลอดทดลอง หยดแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 นอร์มอล, แอมโมเนียมออกซาเลต 10% และ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 50% อย่างละ 2-3 หยด นำไปต้มให้เดือด ถ้าตะกอนหรือสารละลายขุ่น ของแคลเซียมออกซาเลตแสดงว่ามีแคลเซียมค้างอยู่ ต้องล้างด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเทตต่อไปอีก)

4)ล้างตัวอย่างดินต่อด้วย สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 นอร์มอล อีก 1 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยไอโซโพรพิวแอลกอฮอล์ 7 ครั้ง ครั้งละ 30 มล. โดยในการล้างแต่ละครั้งให้นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง นาน 3-5 นาที เพื่อแยกส่วนใสออก จนไม่มีคลอไรด์เหลืออยู่ในดิน ใช้หลอดหยดดูดเฉพาะส่วนที่ใสมาใส่ภาชนะอื่นเพื่อทดสอบคลอไรด์ การทดสอบคลอไรด์ทำได้โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.1 นอร์มอล 2-3 หยดลงในสารละลายส่วนที่ใสจากการปั่นเหวี่ยง ถ้ามีตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) เกิด แสดงว่ายังมีคลอไรด์เหลืออยู่ ต้องล้างตัวอย่างดินด้วย สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ต่อ

5)นำสารละลายที่ได้จากข้างต้นทิ้งไป นำดินที่ได้มาล้างต่อด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10 % เพื่อไล่แอมโมเนียมไอออนในดิน โดยล้างครั้งละ 30 มล. ซ้ำ 3 ครั้ง นำไปปั่นเหวี่ยงเก็บส่วนใสไว้

6)นำส่วนใสที่ได้จากสารละลายดินมาใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล. ปรับปริมาตรรวมด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มล.

7)นำสารละลายที่ได้ไปกลั่น เพื่อกลั่นแอมโมเนียออกมาโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 % ลงไป 25 มล. ใส่ในขวดกลั่นเจห์ดาลโดยให้ปลายคอนเดนเซอร์จุ่มอยู่ในสารละลายกรดบอริค 3% จำนวน 50 มล. ซึ่งใส่อินดิเคเตอร์ผสมไว้ 2-3 หยด กลั่นจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียว ขณะที่กลั่นควรตรวจสอบว่าน้ำหล่อเย็นที่เข้าและออก ช่วยดักให้ก๊าซแอมโมเนียกลั่นตัวได้ดีหรือไม่ ถ้าอุณหภูมิน้ำออกและที่ภาชนะที่ใส่สารละลายกรดบอริคสูงมากจะไม่สามารถจับก๊าซแอมโมเนียด้วยกรดบอริคได้สมบูรณ์ ควรใช้น้ำแข็งหล่อเย็นรอบๆภาชนะที่ใส่สารละลายบอริคด้วย

8)นำสารละลายที่ได้จากการกลั่นไปไทเทรต ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริคมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง

9)กลั่นแบลงค์ และไทเทรตเช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

<u>การคำนวณ</u>

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริคมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (mL)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริคมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริคมาตรฐาน (นอร์มอล)

X = น้ำหนักเป็นกรัมของตัวอย่างดิน

ก.4 การวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในดินโดยวิธี Walkley and Black (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

1)ชั่งตัวอย่างดินซึ่งร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มม. (32 mesh) โดยชั่งดินในช่วง 0.2-2.0 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลม ขนาด 250 มล. เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมท1 N ลงไป 10 มล. โดยใช้ปิเปตต์ แกว่งและวนฟลาสก์เบาๆ ให้ดินและสารละลายผสมกันทั่ว เติมกรดซัลฟูริคเข้มข้นจำนวน 20 มล. ลงไปโดยเร็วและแกว่งฟลาสก์ ค่อนข้างแรงประมาณ 1 นาที ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที ถ้าพบว่าสารละลายของดินตัวอย่างใดเป็นสีเขียวก่อนที่จะไทเทรต แสดงว่ามีสารอินทรีย์อยู่มากเกินกว่าปริมาณโครเมตที่เติม ให้ทำการวิเคราะห์ใหม่ โดยชั่งน้ำหนักดินให้น้อยกว่าเดิม

2)เติมน้ำกลั่นลงไป 100 มล. และเติม H_3PO_4 เข้มข้นลงไป 10 มล. แกว่งฟลาสก์ แล้วเติมอินดิเคเตอร์ 3-4 หยด สีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงปนน้ำเงิน แต่ถ้าใช้ O-phenantholine เป็น อินดิเคเตอร์ สีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว

3)ไทเทรตสารละลายด้วยสารละลาย เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 N ที่หาความเข้มข้นที่แน่นอนมาแล้ว จนกระทั่งถึงจุดยุติ คือ สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงหรือสีม่วงปนน้ำเงินเป็นสีเขียวใส (ใช้ BDS หรือ diphenylamine เป็นอินดิเคเตอร์) หรือสีของสารละลาย จะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง (ถ้าใช้ O-phenantholine เป็นอินดิเคเตอร์)

4)ทำแบลงค์ซึ่งไม่มีตัวอย่างดิน แต่เติมสารเคมีต่างๆเหมือนกัน และทำควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน ใช้เป็น Method Blank

<u>การคำนวณ</u>

$$\% \text{ Organic carbon} = [(B-T)\ N/B] \times [100/77] \times 0.003 \times [100/X] \times 10$$

N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมท

B = จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับแบลงค์

T = จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับตัวอย่างดิน

X = น้ำหนักดิน

$$\% \text{ Organic matter} = \% \text{ Organic carbon} \times 1.724$$

หรือ
$$\% \text{ Organic matter} = [(B-T)\ N/B] \times [100/77] \times [100/58] \times 0.003 \times [100/X] \times 10 \quad (ก.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.5 การหาค่าความชื้น

1)ชั่งกระจกนาฬิกาที่สะอาด

2)นำตัวอย่างดินมาชั่ง 10 g ลงบนกระจกนาฬิกา จดบันทึกน้ำหนักเปียก

3)นำไปเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ105–110°C เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมงทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์

4)นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง

5)คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

% ความชื้น = [(น้ำหนักเปียก – น้ำหนักแห้ง) × 100] / น้ำหนักเปียก

6)ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย

ก.6 การวิเคราะห์ความเป็นกรดของดิน (กลิ่นสุคนธ์ และกรองแก้ว ทิพยศักดิ์)

1)ชั่งดิน 5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่

2)เติมสารละลายผสม $BaCl_2$ 0.5 นอร์มอล และ 0.055 นอร์มอล ไทรเอทานอลลามีน ลงไป 50 มล. ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 1คืน กรองโดยใช้กรวยแบบลดความดัน และล้างดินด้วยแบเรียมคลอไรด์ไทรเอทานอลามีน 2-3 ครั้ง จนสารละลายที่ได้มีปริมาตร 100 มล. ลงในขวดวัดปริมาตร และใช้สารละลายผสม $BaCl_2$ 0.5 นอร์มอล และ 0.055 นอร์มอล ไทรเอทานอลลามีน ปรับปริมาตรจนถึงขีด

3)เทสารละลายที่กรองได้ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มล. ล้างขวดด้วยน้ำกลั่นและเทลงผสม เติมอินดิเคเตอร์ 4-5 หยด จะได้สารสายสีเขียว

4)ทำการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดไฮโดรคลอริกก่อน (ให้ได้ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ถ้าไม่ใกล้เคียงกับ 0.2 นอร์มอล ต้องเตรียมใหม่

5)นำตัวอย่างสารละลายดินที่กรองแล้ว จากข้อ 3 ไปไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริคจากข้อ 4 จนถึงจุดยุติเป็นสีชมพูม่วง

6)ใช้น้ำกลั่นทำแบลงค์ เช่นเดียวกับตัวอย่างดินและไทเทรตเช่นกัน

<u>การคำนวณ</u>

ความเป็นกรดของดิน $= [(B - S) \times N \times 100] / [X (100 - \%\text{ความชื้น})]$ meq/g drysoil … (ก.9)

เมื่อ N = ความเข้มข้นของ HCl (N)

B = ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ในการไทเทรตกับแบลงค์ (mL)

S = ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ในการไทเทรตกับตัวอย่างดิน (mL)

X = น้ำหนักของดิน (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.7 การวิเคราะห์หา Fe ในดิน

วิธีการวิเคราะห์

1) ชั่งดิน(ที่ผึ่งให้แห้งในที่ร่มและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 mesh) 10 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 125 มิลลิลิตร

2) ปิเปตน้ำยาสกัด (0.005 M DPTA pH 7.3) 20 มิลลิลิตร ใส่ตัวอย่างดิน

3) ปิดด้วยจุกยาง เขย่าด้วยเครื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4) กรองตัวอย่างโดยใช้กระดาษกรอง เบอร์ 5 เก็บสารละลายที่กรองได้ไว้ในขวดพลาสติก

5) วัดความเข้มข้น Fe ด้วยเครื่อง AAS เปรียบเทียบกับ working standard โดยใช้ความยาวคลื่นตามที่วิธีการวิเคราะห์แต่ละธาตุกำหนด

ก.8 การวิเคราะห์หาไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

วิธีการวิเคราะห์

1) ชั่งดิน(ที่ผึ่งให้แห้งในที่ร่มและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 mesh) 2 กรัม ใส่ Kjeldahl digestion flask

2) เติม catalyst mixture ประมาณ 1 กรัม

3) เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร นำเข้าเตาย่อยโดยใช้อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง ตัวอย่างจะเป็นสีขาวขุ่นและไม่มีควันของกรดซัลฟุลริก

4) ทำแบลงค์โดยใช้ catalyst mixture ประมาณ 1 กรัม และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร แล้วทำการย่อยเช่นเดียวกัน

5) ปิดเครื่อง ทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นจึงนำออกจากเตาย่อยเติมน้ำกลั่นประมาณ 10 มิลลิลิตร (อย่าเติมน้ำกลั่นในขณะที่ตัวอย่างยังร้อนอยู่) จะเกิดความร้อน ทิ้งไว้ให้เย็น ปรับปริมาตรโดยเทสารละลายตัวอย่างผ่านกรวยกรองลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร ใช้น้ำกลั่นล้าง digestion flask ทีละน้อยๆๆ 3-4 ครั้ง เพื่อล้างตัวอย่างดินที่ติดค้างใน digestion flask ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เก็บไว้ในขวดพลาสติก

6) ปิเปตสารละลายที่ได้จากการปรับปริมาตร(ควรทำแบลงค์ก่อนตัวอย่าง)ปริมาตร 10มิลลิลิตร ใส่ distillation flask เข้ากับเครื่องกลั่น

7) นำขวดรูปชมพู่ ขนาด 125 มิลลิลิตร ซึ่งมี 2% H_3BO_3-indicator บรรจุอยู่ 10 มิลลิลิตร มารองรับใต้คอนเดนเซอร์ของเครื่องกลั่น โดยให้ปลายของคอนเดนเซอร์จุ่มลงในสารละลาย H_3BO_3-indicator

8) กลั่นจนปริมาตรของสารละลายในขวดรูปชมพู่ที่รองรับใต้คอนเดนเซอร์ เพิ่มขึ้นถึงระดับ 75 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) นำสารละลายที่กลั่นได้ไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน 0.005 N H_2SO_4 ที่จุดยุติสารละลายจะมีสีม่วง-แดง จดปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน 0.005 N H_2SO_4 ที่ใช้ไทเทรตเพื่อคำนวณหา Total N ในดิน

ก.9 การวิเคราะห์หาฟอสฟอรัสในดิน (ด้วยวิธี Bray II)

วิธีการวิเคราะห์

1) ชั่งดิน(ที่ผึ่งให้แห้งในที่ร่มและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 mesh) 5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2) ปิเปตน้ำยาสกัด Bray II 50 มิลลิลิตร ใส่ตัวอย่างดิน

3)ปิดด้วยจุกยาง เขย่าด้วยมือ 60 วินาที แล้วกรองทันทีด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 เก็บสารละลายตัวอย่างไว้ในขวดพลาสติก

4) ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 5 มิลลิลิตรใส่ขวดรูปชมพู่ 25 มิลลิลิตร

5) เติม 2% กรดบอริก 5 มิลลิลิตร

6) เติม Murphy's reagent 2 มิลลิลิตร

7) เติม 2.5% สารละลายกรดแอสคอบิก 1 มิลลิลิตร

8)ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

9)ปิดจุก เขย่าสารละลายให้เข้ากัน จะได้สารละลายสีน้ำเงิน

9.1)ถ้าความเข้มของสีของสารละลายตัวอย่างดินเกินสีของ working standard ให้ทำใหม่โดยลดปริมาตรสารละลายตัวอย่าง

9.2)ถ้าความเข้มของสีของสารละลายตัวอย่างดินเจือจางมากให้เพิ่มปริมาตรของสารละลายตัวอย่าง

10.ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที จึงนำไปอ่านค่าด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 820 นาโนเมตร

11.เตรียม working standard 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ppm P โดยปิเปตสารมาตรฐาน 5 ppm P 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ ขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วดำเนินการเหมือนตัวอย่างทุกประการ (อ่านค่า working standard ก่อนตัวอย่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential Extraction)

ขั้นที่ 1 ส่วนที่ละลายและสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้

1) นำตัวอย่างดิน 1 กรัม เติม 0.1 M $CaCl_2$ 15 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติก

2) นำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส นาน 5 นาที

3) ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร

4) นำไปกรองด้วย syringe filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syringe

5) เก็บส่วนใสใส่ในขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5 ˚C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS

6) นำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นตอนต่อไป

ขั้นที่ 2 : ส่วนที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดิน

1) นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 1 มาเติม 1.0 M CH_3COONa 30 มิลลิลิตร

2) ปรับ pH=5 ด้วย NH_4OH

3) นำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส นาน 5 นาที

4) ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร

5) นำไปกรองด้วย syringe filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syringe

6) เก็บส่วนใสใส่ในขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5 ˚C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS

7) นำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นตอนต่อไป

ขั้นที่ 3 : ส่วนที่ถูกดูดซับกับอินทรียวัตถุในดิน

1) นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 1 มาเติม NaOCl 5 มิลลิลิตร

2) ปรับ pH=8.5 ด้วย HNO_3

3) นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 90-95˚C เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส นาน 5 นาที

4) ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร

5) นำไปกรองด้วย syringe filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syringe

6) เก็บส่วนใสใส่ในขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5 ˚C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS

ขั้นที่ 4 : ส่วนที่ยึดเกาะกับแมงกานีสออกไซด์

1) นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 1 มาเติม 0.05M $NH_2OH.HCl$ 30 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ปรับ pH=2 ด้วย HNO_3

3) นำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส นาน 5 นาที

4) ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร

5) นำไปกรองด้วย syringe filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syringe

6) เก็บส่วนใสใส่ในขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS

ขั้นที่ 5 : ส่วนที่ยึดเกาะกับอสัณฐานของเหล็กออกไซด์

1) นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 1 มาเติม 0.2M(oxalic acid + NH_4 oxalate) 30 มิลลิลิตร

2) ปรับ pH=3 ด้วย HNO_3

3) นำไปเขย่าในที่มืด ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส นาน 5 นาที

4) ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร

5) นำไปกรองด้วย syringe filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syringe

6) เก็บส่วนใสใส่ในขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS

ขั้นที่ 6 : ส่วนที่ยึดเกาะกับผลึกของเหล็กออกไซด์

1) นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 1 มาเติม 6 M HCl 40 มิลลิลิตร

2) นำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส นาน 5 นาที

3) ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร

4) นำไปกรองด้วย syringe filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syringe

5) เก็บส่วนใสใส่ในขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS

ขั้นที่ 7: ส่วนที่เหลือ

นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 6 มาทำตามวิธีมาตรฐานการย่อยดินของ SW-846 Method 3050b (รายละเอียดดังภาคผนวก ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

วิธีมาตรฐานการย่อยดินของ SW-846 Method 3050b (US.EPA, 1996)

1)ชั่งตัวอย่างดินจากส่วนที่เหลือในขั้นที่ 3 มา 1 กรัมดินแห้ง ใส่ในหลอดย่อย

2)เติม HNO_3 10 มิลลิลิตร ปิดฝาหลอด

3) นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95°c ±5°c ปล่อยให้เข้าสู่สภาวะรีฟลักซ์ 10-15 นาทีแล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

4) เติม conc.HNO_3 5 มิลลิลิตรปิดฝาแล้วรีฟลักซ์ 30 นาที ถ้าเกิดไอหรือควันสีน้ำตาลให้เติม conc.HNO_3 อีก 5 มิลลิลิตร เติมจนกระทั่งไม่เกิดควันสีน้ำตาล

5) นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95°c ±5°c และปล่อยให้รีฟลักซ์ 10 นาทีตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

6) เติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร และ 30 %H_2O_2 3 มิลลิลิตร

7) ปิดฝาหลอดแล้วนำไปให้ความร้อนจนสารละลายเดือด ในระหว่างนั้นค่อยๆ เติม 30 %H_2O_2 ลงไปจนกระทั่งสารละลายเดือดน้อยที่สุด ให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆจนสารละลายลดลงประมาณ 5 มิลลิลิตร

8) เติม conc. HCl 10 มิลลิลิตร และให้ความร้อนต่อนาน 15 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

9) ปรับปริมาตรให้เป็น100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น แล้วกรองด้วยกระดาษกรองwhatman เบอร์ 41

10) เก็บส่วนที่กรองได้ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง FAAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

สมบัติทางกายภาพ – เคมีของดินที่ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ง.1 เปอร์เซ็นต์ ทราย ซิลท์ เคลย์

ชุดดิน	40 วินาที	2 ชั่วโมง	น้ำหนักดิน	% sand	% clay	% silt
NP	13.07	5.03	40.00	67.33	12.58	20.08
P	16.03	5.50	40.00	59.92	13.75	26.33
F1	8.03	6.03	40.00	79.92	15.08	5.00
F2	7.00	6.00	40.00	82.50	15.00	2.50

ตารางที่ ง.2 ค่าพีเอช

ชุดดิน	ค่า pH	อุณหภูมิ (° C)	อัตราส่วน ดิน : น้ำกลั่น	SD
NP				
1	7.51±0.00	29.2	1:1	
2	7.52±0.00	29.4	1:1	
3	7.52±0.00	28.8	1:1	0.00
เฉลี่ย	7.52±0.00	29.1		
P				
1	7.34±0.02	29.1	1:1	
2	7.32±0.02	29.2	1:1	
3	7.37±0.02	28.7	1:1	
เฉลี่ย	7.34±0.02	29	1:1	0.02
F1				
1	7.59±0.02	29.2	1:1	
2	7.53±0.02	29.4	1:1	
3	7.55±0.02	29.1	1:1	
เฉลี่ย	7.56±0.02	29.2	1:1	0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดดิน	ค่า pH	อุณหภูมิ (° C)	อัตราส่วน ดิน : น้ำกลั่น	SD
F2				0.03
1	7.57±0.03	29.3	1:1	
2	7.61±0.03	29.3	1:1	
3	7.54±0.03	28.9	1:1	
เฉลี่ย	7.57±0.03	29.2		

ตารางที่ ง.2 ค่าพีเอช (ต่อ)

ตารางที่ ง.3 ความเป็นกรดของดิน

ชุดดิน	ความเป็นกรดของดิน(meq/g dry siol)			เฉลี่ย	SD
	1	2	3		
NP	0.0667	0.0666	0.0626	0.0653	0.002
P	0.0307	0.0267	0.0347	0.0307	0.003
F1	0.0626	0.0586	0.0586	0.0599	0.002
F2	0.0546	0.0507	0.0546	0.0533	0.002

ตารางที่ ง.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น

ชุดดิน	%ความชื้น			เฉลี่ย	SD
	1	2	3		
NP	0.0158±0.001	0.0137±0.001	0.0158±0.001	0.0151±0.001	0.001
P	0.0180±0.001	0.0169±0.001	0.0160±0.001	0.0169±0.001	0.001
F1	0.0166±0.000	0.0176±0.000	0.0177±0.000	0.0173±0.000	0.000
F2	0.0166±0.005	0.0182±0.005	0.0270±0.005	0.0206±0.005	0.005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.5 ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

ชุดดิน	ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (meq/ดิน 100 กรัม)			เฉลี่ย	SD
	1	2	3		
NP	9.7786±0.16	10.1990±0.16	9.9984.00±0.16	9.9984±0.16	0.16
P	11.1987±0.16	10.9982±0.16	10.7996±0.16	10.9988±0.16	0.16
F1	10.3969±0.00	10.3990±0.00	10.3998±0.00	10.9982±0.00	0.00
F2	11.3984±0.09	11.1989±0.09	11.1973±0.09	11.2649±0.09	0.09

ตารางที่ ง.6 ปริมาณสารอินทรีย์ในดิน

ชุดดิน	% OC			เฉลี่ย	SD
	1	2	3		
NP	9.71±0.012	9.69±0.012	9.72±0.012	9.71±0.01	0.012
P	9.6±0.008	9.59±0.008	9.58±0.008	9.59±0.01	0.008
F1	9.5±0.005	9.51±0.005	9.51±0.005	9.51±0.00	0.005
F2	11.05±0.005	11.04±0.005	11.05±0.005	1.05±0.00	0.005

ตารางที่ ง.7 ปริมาณสารอนินทรีย์ในดิน

ธาตุ/สารประกอบ	ชุดดิน			
	NP (%)	P (%)	F1 (%)	F2 (%)
Pd	0.15			0.137
Au	0.155	0.141		
MgO	1.45	1.54	1.86	1.69
SiO2	63.9	67.3	71.8	80.8
CaO	11.1	11.9	8.88	7.43
V2O5		4.33	7.85	
Fe2O3	8.41	7.16	7.95	8.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธาตุ/สารประกอบ	ชุดดิน			
	NP (%)	P (%)	F1 (%)	F2 (%)
La2O3	7.95			
Tb4O7	2.52	2.26		
Dy2O3	1.89	1.13		
NiO		0.381		
Ho2O3		1.27		
ZnO	1.54	1.53	1.38	0.985
CuO	0.675	0.675		
MnO	nd	nd	nd	nd
Total	100	100	100	100

Nd = non detect

ตารางที่ ง.8 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน

ชุดดิน	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในดิน (mg/kg-soil)			เฉลี่ย	SD
	1	2	3		
NP	11.16±1.48	8.06±1.48	7.97±1.48	9.06±1.48	1.48
P	4.03±0.27	4.03±0.27	3.46±0.27	3.84±0.27	0.27
F1	7.49±1.06	5.00±1.06	6.87±1.06	6.45±1.06	1.06
F2	6.86±0.73	5.14±0.73	5.54±0.73	5.85±0.73	0.73

ตารางที่ ง.9 ปริมาณไนโตรเจนในดิน

ชุดดิน	Total N (%)			เฉลี่ย	SD
	1	2	3		
NP	0.24±0.003	0.24±0.003	0.24±0.003	0.24±0.003	0.003
P	0.22±0.003	0.21±0.003	0.21±0.003	0.21±0.003	0.003
F1	0.23±0.003	0.24±0.003	0.23±0.003	0.23±0.003	0.003
F2	0.07±0.001	0.07±0.001	0.07±0.001	0.070.001	0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.10 ปริมาณเหล็กในดิน

ชุดดิน	ความเข้มข้นเหล็กในดิน(mg/kg-soil)			เฉลี่ย	SD
	1	2	3		
NP	5.15±0.01	5.16±0.01	5.14±0.01	5.15±0.01	0.01
P	6.28±0.01	6.26±0.01	6.27±0.01	6.27±0.01	0.01
F1	5.50±0.08	5.60±0.08	5.40±0.08	5.5±0.08	0.08
F2	6.02±0.01	6.04±0.01	6.03±0.01	6.03±0.01	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
การสกัดลำดับขั้น

ตารางที่ จ.1 ปริมาณแคดเมียมที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น

รูปฟอร์มของแคดเมียม		ครั้งที่	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มเข้นของแคดเมียม(mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
1.รูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออน (soluble-exchangeable; soluble)	NP	1	25	3.88	y = 0.1947x + 0.0151
		2	25	4.49	
		3	25	4.65	
		4	25	4.38	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		4.35	
		SD		0.29	
	P	1	25	4.23	y = 0.1947x + 0.0151
		2	25	4.68	
		3	25	3.68	
		4	25	4.60	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		4.30	
		SD		0.40	
	F 500	1	25	3.98	y = 0.1947x + 0.0151
		2	25	2.27	
		3	25	3.89	
		4	25	5.18	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		3.83	
		SD		1.03	
	F 2000	1	25	2.61	y = 0.1947x + 0.0151
		2	25	2.55	
		3	25	2.58	
		4	25	5.18	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		3.23	
		SD		1.12	

Y = Abs. , X = ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัม/ลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 ปริมาณแคดเมียมที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของแคดเมียม		ครั้งที่	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มเข้นของแคดเมียม(mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
2.รูปที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดิน (surface adsorbed; adsorb)	NP	1	50	2.48	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	2.27	
		3	50	2.01	
		4	50	2.18	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		2.23	
		SD		0.17	
	P	1	50	2.08	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	2.50	
		3	50	1.62	
		4	50	2.40	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		2.15	
		SD		0.34	
	F 500	1	50	2.13	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	1.13	
		3	50	1.43	
		4	50	1.85	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		1.63	
		SD		0.38	
	F 2000	1	50	1.26	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	0.75	
		3	50	1.61	
		4	50	1.60	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		1.30	
		SD		0.35	

Y = Abs. , X = ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัม/ลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 ปริมาณแคดเมียมที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของแคดเมียม		ครั้งที่	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มเข้นของแคดเมียม(mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
3.รูปที่จับกับอินทรียวัตถุในดิน (organic matter;OM)	NP	1	25	11.40	y = 0.1947x + 0.0151
		2	25	11.10	
		3	25	11.08	
		4	25	11.15	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		11.18	
		SD		0.13	
	P	1	25	11.05	y = 0.1947x + 0.0151
		2	25	11.00	
		3	25	11.28	
		4	25	11.05	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		11.09	
		SD		0.11	
	F 500	1	25	10.78	y = 0.1947x + 0.0151
		2	25	10.63	
		3	25	10.90	
		4	25	10.35	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		10.66	
		SD		0.21	
	F 2000	1	25	10.10	y = 0.1947x + 0.0151
		2	25	10.15	
		3	25	10.10	
		4	25	10.25	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		10.15	
		SD		0.06	

Y = Abs. , X = ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัม/ลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 ปริมาณแคดเมียมที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของแคดเมียม		ครั้งที่	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มเข้นของแคดเมียม(mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
4.รูปที่จับกับแมงกานีสออกไซด์ในดิน (Mn oxides)	NP	1	50	1.03	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	1.00	
		3	50	1.13	
		4	50	1.20	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		1.09	
		SD		0.08	
	P	1	50	1.25	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	1.30	
		3	50	1.25	
		4	50	1.78	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		1.39	
		SD		0.22	
	F 500	1	50	1.05	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	1.35	
		3	50	1.18	
		4	50	1.80	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		1.34	
		SD		0.28	
	F 2000	1	50	1.20	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	1.05	
		3	50	1.15	
		4	50	1.90	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		1.33	
		SD		0.34	

Y = Abs. , X = ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัม/ลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 ปริมาณแคดเมียมที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของแคดเมียม		ครั้งที่	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มเข้นของแคดเมียม(mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
5.รูปอสัณฐานเหล็กออกไซด์ในดิน (Poor crystalline Fe oxides)	NP	1	50	2.53	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	1.73	
		3	50	1.03	
		4	50	1.80	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		1.77	
		SD		0.53	
	P	1	50	1.13	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	2.75	
		3	50	1.43	
		4	50	1.53	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		1.71	
		SD		0.62	
	F 500	1	50	1.25	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	1.88	
		3	50	1.48	
		4	50	1.63	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		1.56	
		SD		0.23	
	F 2000	1	50	1.78	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	1.55	
		3	50	1.20	
		4	50	1.65	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		1.54	
		SD		0.21	

Y = Abs. , X = ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัม/ลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 ปริมาณแคดเมียมที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของแคดเมียม		ครั้งที่	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มเข้นของแคดเมียม(mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
6.รูปที่ผลึกเหล็กออกไซด์ในดิน (Crystalline Fe oxides)	NP	1	50	3.75	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	0.80	
		3	50	1.38	
		4	50	3.20	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		2.28	
		SD		1.23	
	P	1	50	1.25	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	1.95	
		3	50	1.38	
		4	50	3.63	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		2.05	
		SD		0.95	
	F 500	1	50	1.20	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	0.48	
		3	50	0.98	
		4	50	1.03	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		0.92	
		SD		0.27	
	F 2000	1	50	0.55	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	0.33	
		3	50	0.75	
		4	50	0.75	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		0.59	
		SD		0.18	

Y = Abs. , X = ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัม/ลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 ปริมาณแคดเมียมที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของแคดเมียม		ครั้งที่	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มเข้นของแคดเมียม(mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
7.รูปที่เหลือ (residue)	NP	1	50	0.60	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	0.60	
		3	50	0.50	
		4	50	0.80	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		0.63	
		SD		0.11	
	P	1	50	0.48	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	0.45	
		3	50	1.50	
		4	50	0.85	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		0.82	
		SD		0.42	
	F 500	1	50	0.55	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	0.68	
		3	50	0.55	
		4	50	0.53	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		0.58	
		SD		0.06	
	F 2000	1	50	0.55	y = 0.1947x + 0.0151
		2	50	0.53	
		3	50	0.70	
		4	50	0.70	y = 0.2126x + 0.0538
		เฉลี่ย		0.62	
		SD		0.08	

Y = Abs. , X = ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัม/ลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง) = (ความเข้มข้นของแคดเมียม คำนวณจากกราฟมาตรฐานมาตรฐาน (มิลลิกรัม/ลิตร) X ปริมาตรสารละลาย (มิลลิลิตร) X ดิน 1000 กรัม) / น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)

ตารางที่ จ.2 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดิน	น้ำหนักดิน (g)	ปริมาตร	Total Cd (mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
NP	0.5000	50	9.00	y = 0.528x – 0.6292
P	0.5000	50	78.00	
F1	0.5000	50	72.00	
F2	0.5000	50	43.00	

ตัวอย่างการคำนวณ

ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง) = (ความเข้มข้นของแคดเมียม คำนวณจากกราฟมาตรฐานมาตรฐาน (มิลลิกรัม/ลิตร) X ปริมาตรสารละลาย (มิลลิลิตร) X ดิน 1000 กรัม) / น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)

ตารางที่ จ.3 สัดส่วน (%) รูปฟอร์มแคดเมียมที่พบในดินจากการสกัดแบบลำดับขั้นทั้ง 7 ขั้นตอน

รูปฟอร์มแคดเมียม	NP	P	F1	F2	สัดส่วน(%)แคดเมียมในดิน
Soluble (%)	5.04	4.98	4.43	3.74	18.19
Adsorb (%)	2.59	2.49	1.89	1.51	8.48
OM (%)	12.95	12.85	12.35	11.76	49.92
Mn oxide (%)	1.26	1.61	1.56	1.54	5.97
poor crystaline Fe oxide (%)	2.05	1.98	1.80	1.79	7.62
crystaline Fe oxide (%)	2.64	2.38	1.06	0.69	6.77
Residue (%)	0.72	0.95	0.67	0.72	3.06
ปริมาณแคดเมียมทั้ง 7 ขั้นตอน (%)	27.26	27.24	23.77	21.74	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{สัดส่วน (\%) รูปฟอร์มแคดเมียมแต่ละชุดดิน} = \left[\frac{\text{ปริมาณแคดเมียมแต่ละชุดดิน}}{\text{ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดแต่ละชุดดิน}} \times 100 \right]$$

$$\text{สัดส่วน (\%) รูปฟอร์มแคดเมียมทั้งหมดแต่ละชุดดิน} = \text{ผลรวมสัดส่วน (\%) รูปฟอร์มแคดเมียมในแต่ละชุดดิน}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ตารางที่ ฉ.1 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม

(รูปของแคดเมียมที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้ในดินตัวอย่างทั้ง 4 ชุดดิน)

รูปฟอร์มแคดเมียม	ชุดดิน	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ		
		Sig.	P	ผล*
1. รูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้	F2	0.139	0.05	ND
	F1	0.139	0.05	ND
	P	0.139	0.05	ND
	NP	0.139	0.05	ND

ND = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ D = ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ฉ.2 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม

(รูปของแคดเมียมที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดินในดินตัวอย่างทั้ง 4 ชุดดิน)

รูปฟอร์มแคดเมียม	ชุดดิน	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ		
		Sig.	P	ผล*
2. รูปที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดิน	F2	0.234	0.05	D
	F1	0.050	0.05	ND
	P	0.050	0.05	ND
	NP	0.050	0.05	ND

ND = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ D = ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ.3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม

(รูปของแคดเมียมที่จับอินทรียวัตถุในดิน ในดินตัวอย่างทั้ง 4 ชุดดิน)

รูปฟอร์มแคดเมียม	ชุดดิน	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ		
		Sig.	P	ผล*
3. รูปที่ถูกดูดซับกับอินทรียวัตถุ	F2	1.000	0.05	D
	F1	1.000	0.05	ND
	P	0.447	0.05	ND
	NP	0.447	0.05	ND

ND = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ D = ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ฉ.4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม

(รูปของแคดเมียมที่จับกับแมงกานีสออกไซด์ในดิน ในดินตัวอย่างทั้ง 4 ชุดดิน)

รูปฟอร์มแคดเมียม	ชุดดิน	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ		
		Sig.	P	ผล*
4. รูปที่ยึดกับแมงกานีสออกไซด์	NP	0.191	0.05	ND
	F2	0.191	0.05	ND
	F1	0.191	0.05	ND
	P	0.191	0.05	ND

ND = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ D = ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ.5 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม

(รูปของแคดเมียมอสัณฐานเหล็กออกไซด์ในดิน ในดินตัวอย่างทั้ง 4 ชุดดิน)

รูปฟอร์มแคดเมียม	ชุดดิน	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ		
		Sig.	P	ผล*
5. รูปที่ยึดกับ อสัณฐานเหล็กออกไซด์	NP	0.565	0.05	ND
	F2	0.565	0.05	ND
	F1	0.565	0.05	ND
	P	0.565	0.05	ND

ND = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ D = ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ฉ.6 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม

(รูปของแคดเมียมผลึกเหล็กออกไซด์ในดิน ในดินตัวอย่างทั้ง 4 ชุดดิน)

รูปฟอร์มแคดเมียม	ชุดดิน	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ		
		Sig.	P	ผล*
6. รูปที่ยึดกับผลึกเหล็กออกไซด์	F2	0.052	0.05	D
	F1	0.052	0.05	ND
	P	0.067	0.05	ND
	NP	0.067	0.05	ND

ND = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ D = ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ.7 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม

(รูปของแคดเมียมที่เหลือในดิน ในดินตัวอย่างทั้ง 4 ชุดดิน)

รูปฟอร์มแคดเมียม	ชุดดิน	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ		
		Sig.	P	ผล*
7. รูปที่เหลือ	F1	0.242	0.05	ND
	F2	0.242	0.05	ND
	NP	0.242	0.05	ND
	P	0.242	0.05	ND

ND = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ D = ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ฉ.8 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม

(การวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน)

ชุดดิน	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ		
	Sig.	P	ผล*
NP	1.000	0.05	D
P	1.000	0.05	D
F1	1.000	0.05	D
F2	1.000	0.05	D

ND = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ D = ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ.9 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม

(การวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมจากการสกัดลำดับขั้น)

ชุดดิน	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ		
	Sig.	P	ผล*
F2	1.000	0.05	D
F1	1.000	0.05	D
P	1.000	0.05	D
NP	1.000	0.05	D

ND = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ D = ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ฉ.10 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม

(การวิเคราะห์รูปฟอร์มแคดเมียมที่สามารถเคลื่อนที่ได้)

ชุดดิน	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ		
	Sig.	P	ผล*
F2	1.000	0.05	D
NP	0.054	0.05	ND
P	0.054	0.05	D
F1	1.000	0.05	ND

ND = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ D = ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ.11 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Duncan ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนแคดเมียม

(การวิเคราะห์รูปฟอร์มแคดเมียมที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้)

ชุดดิน	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ		
	Sig.	P	ผล*
F2	1.000	0.05	ND
NP	1.000	0.05	ND
P	1.000	0.05	ND
F1	1.000	0.05	ND

ND = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ D = ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้