



การชะละลายของแคดเมียมออกจากดินที่บำบัดด้วยวิธีทางเคมี

The leaching of cadmium from chemical amendment soils

นายยุทธชัย อินทร์แปลง รหัส 49361515
นายอากรณ์ ตำโรง รหัส 49362482
นางสาวสิริสุขต์ พรหมประสิทธิ์ รหัส 49365001

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์	
วันที่รับ.....	14 / ก.ค. 2553
เลขทะเบียน.....	5670120 ea
เลขเรียกหนังสือ.....	มธ.
มหาวิทยาลัยนเรศวร	

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2552

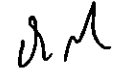


ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การชะละลายของเคดเมียมออกจากดินที่บำบัดด้วยวิธีทางเคมี
ผู้ดำเนินโครงการ นายยุทธชัย อินทร์แสง รหัส 49361515
 นายอากรณ์ สำโรง รหัส 49362482
 นางสาวศิริสุขต์ พรหมประสิทธิ์ รหัส 49365001
ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ชัยวัฒน์ โพธิ์ทอง
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ภาควิชา โยธา
ปีการศึกษา 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์ชัยวัฒน์ โพธิ์ทอง)


.....กรรมการ
(อาจารย์อำพล เตโชวานิชย์)


.....กรรมการ
(ผศ.ดร.ปองริย์ ทองสนิท)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การชะละลายของแคดเมียมออกจากดินที่บำบัดด้วยวิธีทางเคมี		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายยุทธชัย	อินทร์แสง	รหัส 49361515
	นายอากรณ์	สำโรง	รหัส 49362482
	นางสาวสิริสุขค์	พรมประสิทธิ์	รหัส 49365001
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ชัยวัฒน์	โพธิ์ทอง	
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม		
ภาควิชา	โยธา		
ปีการศึกษา	2552		

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการชะละลายของแคดเมียมหลังจากบำบัดดินด้วยวิธีทางเคมี และการศึกษารูปแบบของแคดเมียมในดินด้วยการสกัดลำดับส่วน โดยใช้ดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคดเมียมประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน แล้วนำมาบำบัดด้วยกรดลอย (FA) และหินฟอสเฟต (PR) ตามสัดส่วน 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ หมักใส่ถุงพลาสติก PE ทั้งไว้เป็นระยะเวลา 1 เดือน

จากการศึกษาการชะละลายในคอลัมน์ขนาด 5 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ด้วยน้ำกลั่น, สารละลาย EDTA 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม พบว่า ที่สัดส่วนผสม 30 % FA แคดเมียมจะถูกชะละลายออกมาน้อยที่สุดขณะที่การใช้หินฟอสเฟตในการบำบัดดิน ส่งผลให้แคดเมียมถูกชะละลายออกมาใกล้เคียงกันกับชุดควบคุม

จากการศึกษาการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified – BCR พบว่าในดินสังเคราะห์แคดเมียมจะยึดติดกับคาร์บอนเนต, ออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส, สารอินทรีย์และซัลไฟด์ และส่วนที่เหลือ ร้อยละ 72.36, 24.18, 1.84, และ 1.62 ตามลำดับ การบำบัดด้วย FA ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมที่ยึดติดกับคาร์บอนเนตมีค่าเพิ่มขึ้น และส่วนที่ยึดติดกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์มีค่าลดลง ขณะที่การบำบัดดินด้วย PR ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมที่ยึดติดกับคาร์บอนเนตมีค่าลดลง

Project title	The leachate of cadmium from chemical amendment soils	
Name	Mr. Yuttachai Intraplang	ID 49361515
	Mr. Akorn Samrong	ID 49362482
	Miss. Sirisuk Phromprasit	ID 49365001
Project advisor	Mr. Chaiwat Photong	
Major	Environmental Engineering	
Department	Civil Engineering	
Academic year	2552	

Abstract

This paper aimed to study the leaching of cadmium from chemical amendment soils and the speciation of cadmium in soils by modified-BCR sequential extraction. The synthetic of 100 mg cadmium /kg soils was used to treatment with fly ash and phosphate rock at the ratio of 10%, 20% and 30%.

The study of leaching of cadmium in the 5 cm diameter, 50 cm depth column with distilled water, EDTA 5 and 10 mmol/kg was found that the 30% FA had the lowest cadmium concentration in leachate. While the PR amendment soils had the cadmium concentration in leachate similar to control column.

The study of cadmium speciation in soils by modified-BCR sequential extraction was found that the cadmium content in the synthetic cadmium contaminated soils bounded with carbonate, iron and manganese oxide, organic matter and sulfide and residual fraction of 72.36%, 24.18%, 1.84% and 1.62% respectively. FA amendment soils, the cadmium content in carbonated fraction increased but in the organic matter and sulfide fraction reduced. While the cadmium content in carbonated fraction of PR amendment soils reduced.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางผู้ดำเนินงาน ต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ชัยวัฒน์ โพธิ์ทอง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำโครงการตลอดจนการติดตามประเมินผลการทำงานมาโดยตลอด ทางคณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ คุณวิษญา อิ่มกระง่าง เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมที่ให้คำแนะนำ และให้การช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์เครื่องมือ ตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดู และสั่งสอนจนเติบโตมาถึงปัจจุบัน ตลอดจนช่วยอุปการะทางด้านการเงิน และคอยให้กำลังใจจนกระทั่งโครงการนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่ได้เอื้อนามในที่นี้ ที่มีส่วนร่วมช่วยให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ คณะผู้ดำเนินงานขอขอบคุณคุณงามความดีที่เกิดจากโครงการนี้ แก่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีช่วยร่วมช่วยให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากการดำเนินงานโครงการนี้ คณะผู้ดำเนินงานต้องกราบขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายบุษชัย อินทร์แสง

นายอากรณ์ สำโรง

นางสาวสิริศุขต์ พรหมประสิทธิ์

เมษายน 2553

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาบัตร	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของ โครงการงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการงาน	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการทำโครงการงาน	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 แผนการดำเนินงาน	4
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการงาน	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น	5
2.1 การปนเปื้อนของโลหะหนัก	5
2.2 ชนิดของโลหะหนักที่จัดเป็นพิษต่อร่างกาย	6
2.3 วิธีการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก	10
2.4 การบำบัดดินด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Amendment)	14
2.5 กลไกการตรึงโลหะหนักในดิน	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการโครงการงาน	18
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ	18
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์	44
4.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ / เคมีของดิน	44
4.2 การทดลอง Modified - BCR	48
4.3 การทดสอบชะละลาย	51
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	54
5.1 บทสรุป	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก ก	58
ภาคผนวก ข	60
ประวัติส่วนตัวผู้ดำเนินงาน	70



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการศึกษาโครงการ	4
3.1 ตารางส่วนผสมดิน, แฉาลอย และหินฟอสเฟต	24
3.2 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของแฉาลอยถ่านหิน	25
4.1 ผลการทดลองหาความชื้นในมวลดิน	44
4.2 ผลการวิเคราะห์หาสารอินทรีย์ในดิน	44
4.3 ผลการวิเคราะห์หาความถ่วงจำเพาะของดิน	45
4.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า pH ของดิน	45
4.5 ผลการวิเคราะห์หาค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดิน	45
4.6 ผลการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดิน	46
4.7 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมทั้งหมดใน FA และ PR	47
4.8 ปริมาณแคลเซียมจากการสกัดลำดับส่วน มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	48
4.9 ร้อยละของปริมาณแคลเซียมจากการทดลองการสกัดลำดับส่วน	49
ก 1 แสดงปริมาณน้ำหนักดินแห้งซึ่งใช้ในการร่อนผ่านตะแกรง	58
ก 2 ค่าความถ่วงจำเพาะของดินชนิดต่าง ๆ	58
ก 3 แสดงค่าตัวแปรปรับแก้, K	59
ข 1 บันทึกผลการทดลองหาความชื้นในมวลดิน	60
ข 2 บันทึกผลการทดลอง Calibration Data ก่อนหาค่าความถ่วงจำเพาะ	61
ข 3 บันทึกผลการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน	62
ข 4 บันทึกผลการทดลองหาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ครั้งที่ 1	63
ข 5 บันทึกผลการทดลองหาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ครั้งที่ 2	64
ข 6 บันทึกผลการทดลองหาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ครั้งที่ 3	65
ข 7 สรุปค่าเฉลี่ย % Silt, % Sand และ % Clay จากการทดลองหาขนาดดินทั้ง 3 ครั้ง	66
ข 8 ผลของการวิเคราะห์หาค่า pH ของดิน	66
ข 9 ผลของการวิเคราะห์หาค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดิน	66
ข 10 ผลของการวิเคราะห์หาค่าสารอินทรีย์ในดิน	67
ข 11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในดิน	68
ข 12 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดใน FA และ PR	69

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
2.1 การปนเปื้อนของโลหะหนักที่เกิดในธรรมชาติ	5
3.1 อุปกรณ์ทดสอบหาปริมาณความชื้นในดิน	18
3.2 อุปกรณ์ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน	19
3.3 ตะแกรงพร้อมถาดรอง และเครื่องเขย่าตะแกรง	20
3.4 หลอด Centrifuge	21
3.5 เครื่องเขย่าแนวนราบ (Horizontal Shaker)	21
3.6 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Benchtop Centrifuge)	22
3.7 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)	22
3.8 คอลัมน์ที่ใช้ทดสอบ	23
3.9 แสดงการทำความสะอาดกระป๋องเก็บตัวอย่างดิน	27
3.10 แสดงการบรรจุดินลงกระป๋องเก็บตัวอย่างดิน	27
3.11 แสดงการนำกระป๋องเก็บตัวอย่างดินเข้าสู่ตู้อบ	28
3.12 แสดงการชั่งน้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่างดิน	28
3.13 แสดงระดับน้ำกลั่น 3 ใน 4 ส่วนของขวด	29
3.14 แสดงการไล่อากาศในน้ำด้วยการต้ม	30
3.15 แสดงการปรับปริมาตรน้ำ 500 ซม ³	30
3.16 แสดงการชั่งขวดแก้วและน้ำ	31
3.17 แสดงการนำดินใส่ขวดแก้วฟลาส 3 ใน 4 ส่วนของขวดปรับปริมาตร	32
3.18 แสดงการไล่อากาศโดยนำไปกวนในน้ำร้อน	33
3.19 แสดงการวัดอุณหภูมิของน้ำ	33
3.20 แสดงการชั่งน้ำหนัก Flask + Water + Soil	34
3.21 แสดงการชั่งดินที่อบแห้งแล้ว	35
3.22 แสดงการชั่งน้ำหนักตะแกรง	35
3.23 แสดงการเรียงขนาดตะแกรง	36
3.24 แสดงการเขย่าตะแกรง	37
3.25 แสดงขั้นตอนการหาสารอินทรีย์ด้วยวิธีการเผา	38
3.26 การสกัดด้วยวิธี Modified –BCR Sequential extraction	39
3.27 วิธีการทดลองการสกัดแยกด้วยวิธี Modified –BCR	41

3.28 คอลัมน์การทดสอบชะละลาย	42
4.1 กราฟแสดงผลการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified - BCR	49
4.2 กราฟแสดงปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกของ Control, 10% FA, 20% FA และ 30% FA	51
4.3 กราฟแสดงปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกของ Control, 10% PR, 20% PR และ 30% PR	52
ข 1 กราฟ Calibration Data	61
ข 2 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองครั้งที่ 1	63
ข 3 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองครั้งที่ 2	64
ข 4 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองครั้งที่ 3	65



สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

FA	=	Fly Ash
PR	=	Phosphate Rock



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันปัญหาโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมนั้นยังคงมีแนวโน้มว่าจะก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมเพราะว่าประเทศไทยของเราเป็นประเทศที่กำลังพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม เช่นการทำเหมืองแร่ การถลุงแร่ การทิ้งขยะอันตรายและของเสียลงบนดิน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและน้ำใต้ดิน โดยโลหะหนักแต่ละชนิดจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณนั้น และเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ทางห่วงโซ่อาหาร ทำให้เกิดภาวะที่ผิดปกติไปจากธรรมชาติ

การแก้ปัญหามลพิษโลหะหนักด้วยวิธีการบำบัดดินมีหลาย ๆ วิธีด้วยกัน เช่น การบำบัดดินด้วยกระบวนการบำบัดทางเคมี, วิธีทางกายภาพ-เคมี หรือกระบวนการทางชีวะ คือ การขุดเอาดินออกและถมส่วนบนด้วยดินที่สะอาด ยกตัวอย่างวิธีการบำบัดดินเช่น Soil washing, Solvent Extraction, Electro reclamation, Stabilization/Solidification, Phytoremediation และVitrification เป็นต้น ขณะที่วิธีการบำบัดดินด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Amendment) นั้นเป็นการฟื้นฟูสภาพดิน เพื่อลดการชะละลายของโลหะหนักในดิน โดยทำให้โลหะหนักในดินเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบที่มีความคงตัวมากขึ้นและทำให้โลหะหนักละลายออกสู่สถานะแวดล้อมได้น้อยลง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการชะละลายของแคดเมียมออกจากดินที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีทางเคมีมาแล้ว โดยใช้น้ำกลั่น และสารคีเลต ในการทำวิจัย ได้ใช้ดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคดเมียมขึ้นมา และบำบัดดินด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Amendment) โดยนำเอา หินฟอสเฟต (Phosphate rock, PR) และเถ้าลอย (Fly Ash, FA) มาผสมตัวอย่างดิน และทำการชะละลายด้วยสารละลายคีเลตที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ และเก็บน้ำตัวอย่างที่ได้จากการชะละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่ออกมา และศึกษารูปแบบของโลหะหนักในดินด้วยวิธี Modified BCR Sequential Extraction

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการบำบัดดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยวิธีทางเคมี
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการชะละลายของแคดเมียมหลังจากบำบัดด้วยวิธีทางเคมีแล้ว
- 1.2.3 เพื่อศึกษารูปแบบแคดเมียมในดินด้วยวิธีการสกัดลำดับส่วน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 เพื่อเป็นแนวทางในการใช้สารเคมีบำบัดแคดเมียมในดิน
- 1.3.2 เพื่อทราบถึงรูปแบบของแคดเมียมหนักในดิน
- 1.3.3 สามารถใช้เป็นข้อมูลในการวิจัยต่อไปได้ในอนาคต

1.4 ขอบเขตการทำโครงการ

- 1.4.1 เก็บตัวอย่างดินในมหาวิทยาลัยนเรศวรมาทำการสังเคราะห์การปนเปื้อนแคดเมียม
- 1.4.2 ศึกษาการบำบัดดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคดเมียม โดยใช้ แฉาลอย และหินฟอสเฟต
- 1.4.3 ศึกษาการชะละลายดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคดเมียม โดยใช้น้ำกลั่น และ สารละลายคีเลต
- 1.4.4 ศึกษารูปแบบของแคดเมียมที่อยู่ในดิน โดยใช้วิธี Modified BCR Sequential Extraction

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินการ

1.6 แผนการดำเนินงานตารางที่

ตารางที่ 1.1 แผนการศึกษาโครงการ

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	พ.ศ. 2552			พ.ศ. 2553			
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1) การหาสมบัติทางกายภาพ,เคมีของดิน							
2) เตรียมตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม							
3) ศึกษาการชะละลายแคดเมียม							
4) ศึกษาการสกัดแยกโลหะหนัก (BCR)							
5) วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล							
6) จัดทำรูปเล่ม							

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

รายการ	งบประมาณ
1.ค่าสารเคมีและเครื่องแก้ว	5,000 บาท
2. ค่าวัสดุสำนักงาน	500 บาท
3. ค่าถ่ายเอกสาร และเข้าเล่ม	1,000 บาท
รวมเป็นเงิน	6,500 บาท

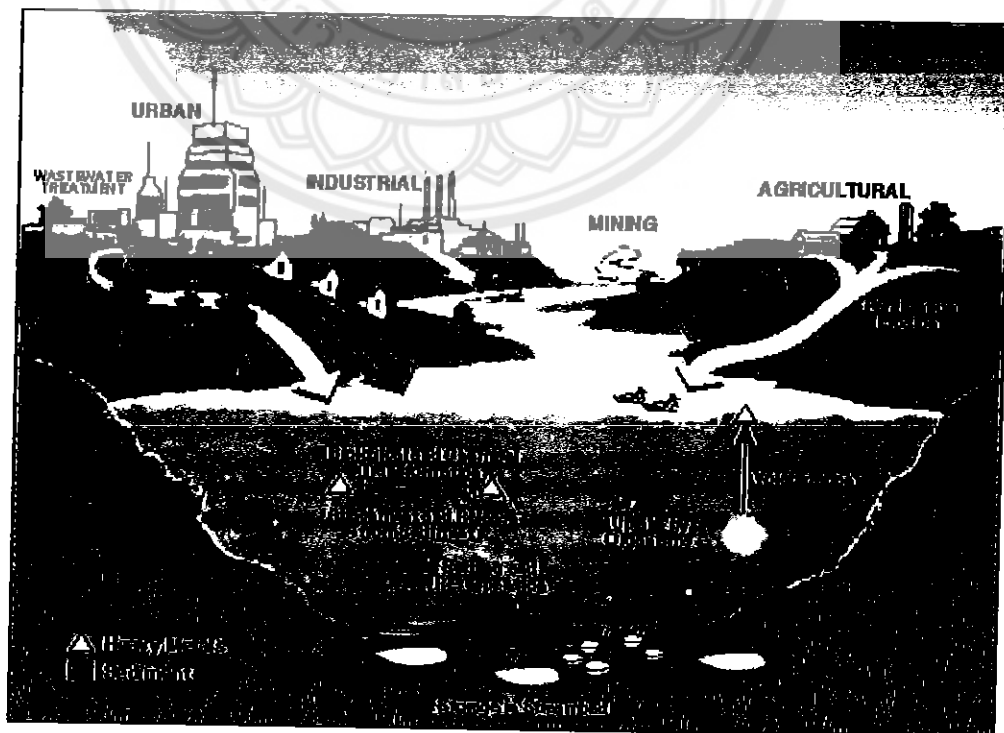
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 การปนเปื้อนของโลหะหนัก

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยี การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมนั้นได้ ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัด ส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงและยากต่อการแก้ไขทำให้มีการรื้อวไหลปนเปื้อนของโลหะหนักในดินและน้ำมีมากขึ้น

โลหะหนักจัดอยู่ในกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไปและส่วนใหญ่จะเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition metals ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงที่ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนที่ตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน ดินตะกอนที่อยู่ในน้ำรวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ โลหะหนักเป็นวัตถุพิษที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วนด้วยกัน เช่น ในด้านอุตสาหกรรม ซึ่งเราได้ใช้โลหะหนักในการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย สำหรับทางด้านการเกษตร โลหะหนักนั้นเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต



รูปที่ 2.1 การปนเปื้อนของโลหะหนักที่เกิดในธรรมชาติ

2.2 ชนิดของโลหะหนักที่จัดเป็นพิษต่อร่างกาย

โดยทั่วไปแล้วโลหะหนักมีทั้งหมด 22 ชนิด ได้แก่ ทองแดง เงิน, ทองคำ, ทองคำขาว สังกะสี ตะกั่ว, ดีบุก, โครเมียม, ทังสเตน, แคดเมียม,ปรอท, บิสมัท, พลวง, ไททาเนียม, แทนทาลัม โคบอลต์, ยูเรเนียม, นิเกิล, แมงกานีส, โมลิบดีนัม และเบอรั่มัสเนียม ปัจจุบันการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนัก เป็นปัญหาที่สำคัญต่อสิ่งแวดล้อม และมีผลทำให้เกิดโรคร้ายแรงต่าง ๆ ปัญหาการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักในประเทศไทย พบเกิดขึ้นมาเรื่อยๆ ในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะในบริเวณพื้นที่ศักยภาพแร่โลหะหนัก และพื้นที่การทำเหมืองแร่โลหะหนัก ซึ่งปกติการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมมีอยู่แล้วโดยธรรมชาติ โดยเกิดจากกระบวนการเกิดแร่ ส่วนใหญ่เกิดในพื้นที่แร่ซึ่งมีธาตุโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ และเมื่อผุพังจะถูกสลายตัวมาปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมของบริเวณพื้นที่การเกิดแร่ โดยเฉพาะในดินและแหล่งน้ำ ซึ่งโดยปกติความเข้มข้นของการแพร่กระจายจะพบมากในบริเวณใกล้แหล่งแร่ ปัจจุบันพบว่าพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักอยู่หลายแห่งที่เป็นปัญหาต่อพื้นที่ โดยมีผลกระทบด้านสุขภาพ และการเกษตรของประชาชนที่อยู่ในบริเวณนั้น เช่น การพบสารหนู หรือ ธาตุอาร์เซนิก (As) ในบริเวณพื้นที่ทำเหมืองดีบุกในจังหวัดนครศรีธรรมราช การพบธาตุตะกั่ว (Pb) ในแหล่งแร่ตะกั่วของพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี หรือ การพบธาตุแคดเมียม (Cd) บริเวณการทำเหมืองแร่สังกะสี ในอำเภอแม่สอดจังหวัดตาก เป็นต้น สำหรับสำหรับโลหะหนักบางชนิดที่เป็นพิษต่อร่างกายและถูกจัดให้เป็นบัญชีดำ (Black list) เนื่องจากมีพิษที่ร้ายแรงมากต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตจึงขออนุญาตกล่าวในรายละเอียดซึ่งจะบอกแหล่งที่มาและผลของการมีโลหะหนัก สะสมอยู่ในร่างกาย มี 4 ชนิด ดังต่อไปนี้

2.2.1 แคดเมียม (Cadmium-Cd)

แคดเมียมมักจะพบอยู่ร่วมกับสังกะสีในดินจากการถลุงแร่สังกะสีซึ่งจะทำให้แคดเมียมฟุ้งกระจายไปในอากาศและลงสู่ดินและแม่น้ำ นอกจากนี้ยังพบได้จากอุตสาหกรรมเคลือบโลหะ การผลิตสีผสมพลาสติกและสีทาบ้าน โดยจะมีโลหะหนักปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

พิษของแคดเมียมและโรคที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะทำให้เกิดพิษเฉียบพลันได้ แต่ส่วนใหญ่แล้วโรคที่เกิดขึ้นจากแคดเมียมมักจะเป็นชนิดเรื้อรัง และการที่ได้รับแคดเมียมติดต่อกันเวลานาน โรคที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มดังนี้

2.2.1.1 โรคปอดเรื้อรัง เกิดจากการที่ได้รับแคดเมียมเป็นเวลานาน ๆ และในปริมาณมาก โดยเฉพาะจากการหายใจ ซึ่งจะทำให้เกิดการอุดตันภายในปอด ทั้งนี้เป็นเพราะมีการอักเสบของหลอดลม มีพังคืดจับในทางเดินหายใจส่วนล่าง และมีการทำลายของถุงลมซึ่งจะกลายเป็นโรคถุงลมโป่งพองในที่สุด ผู้ที่มีความเสี่ยงมากคือคนทำงานกับผงแคดเมียมโดยตรง เช่น โรงงานแบตเตอรี่ขนาดเล็ก

2.2.1.2 โรคไตอักเสบ จะแสดงออกโดยมีการอักเสบของไต โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ท่อในไตซึ่งจะพบแคดเมียมในปัสสาวะสูง มีโปรตีน กลูโคสสูงในปัสสาวะ การทำงานทางท่อในไตเสีย

การทำงาน พบว่ามีการสะสมของแคดเมียมที่หมวกไตก่อให้เกิดการอักเสบและเป็นอันตรายต่อไป และอาจเป็นไตวายได้ในที่สุดการเกิดโรคไตอักเสบนี้จะเป็นแบบถาวร แม้ว่าจะไม่ได้รับแคดเมียมต่อไป แล้วแต่ไตก็ยังไม่สามารถฟื้นคืนกลับมาดังเดิมได้

2.2.1.3 โรคกระดูก แคดเมียมนั้นทำให้เกิดการสูญเสียแคลเซียมออกมาในปัสสาวะสูง และอาจมีแคดเมียมเข้าไปสะสมในกระดูกทำให้กระดูกพรุนและมีอาการปวดกระดูกอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาการปวดกระดูกสะโพก ทำให้กระดูกเปราะแตกหักง่าย และอาจมีความสูงลดลงได้ เพราะการสูญเสียแคลเซียมทำให้เป็นโรคกระดูกพรุน

2.2.1.4 โรคความดันโลหิตสูงและโรคหัวใจ พบว่าแคดเมียมทำให้ความดันโลหิตสูงขึ้นมาก และมีโอกาสเป็นโรคหัวใจสูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจจะเป็นการร่วมกับโรคไตได้

2.2.1.5 โรคมะเร็ง มีข้อมูลการศึกษาติดตามคนงานที่ทำงานสัมผัสกับแคดเมียม เช่น โรงงานแบตเตอรี่แห่ง พบว่ามีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็งปอด สูงกว่าคนทั่วไปและอาจมีผลต่อการเสี่ยงเป็นโรคมะเร็งของต่อมลูกหมากด้วย

2.2.2 ตะกั่ว (Lead -Pb)

ตะกั่ว เป็นโลหะสีเทาเงินหรือเกมน้ำเงินเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ในเปลือกโลกตะกั่วในพื้นดินอาจเกิดตามธรรมชาติหรืออาจเกิดจาก ภาวะมลพิษดินที่มีสภาพเป็นกรด จะมีสารตะกั่วน้อยกว่าดินที่เป็นด่าง เนื่องจากอินทรีย์สารในดินอาจทำปฏิกิริยากับสารตะกั่วที่มีอยู่ สารตะกั่วที่อยู่ในสารประกอบอินทรีย์ เช่น ไนเตรด คลอเรท และสารประกอบอินทรีย์ซึ่งใช้เป็นสารเคมีในน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น เบนซิน สารตะกั่วในบรรยากาศที่ออกมาจากท่อไอเสียของรถยนต์ ซึ่งจะแพร่กระจายไปได้ไกลหลายกิโลเมตร และก็จะทำให้สิ่งแวดล้อมในบริเวณที่อยู่ห่างไกลปนเปื้อนไปด้วย ทั้งนี้สารตะกั่วนั้นสามารถถูกชะล้างออกจากบรรยากาศได้โดย ฝน เป็นต้น การเข้าสู่ร่างกายของตะกั่วนั้นสามารถเข้าได้ 3 ทาง ได้แก่ ทางปาก ทางจมูก และทางผิวหนัง

2.2.2.1 ทางปาก โดยการรับประทานอาหาร เครื่องดื่ม หรือยาที่มีสารตะกั่วปนเปื้อนอยู่ การใช้เครื่องมือหรือภาชนะต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนตะกั่ว และการสัมผัสเครื่องใช้ที่มีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ และไม่ได้ล้างมือก่อนที่จะรับประทานอาหาร

2.2.2.2 ทางจมูก โดยการหายใจเอาควัน ไอระเหย ฝุ่นละอองตะกั่วที่มีอยู่ในอากาศเข้าสู่ปอด

2.2.2.3 ทางผิวหนัง โดยการสัมผัสกับสินค้าอุปโภคบริโภคที่มีสารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วเจือปนเท่านั้น เช่น การล้างมือด้วยน้ำมันเบนซินหรือเมื่อน้ำมันเบนซินหาใส่ผิวหนัง จะทำให้ตะกั่วซึมผ่านผิวหนัง และเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดของร่างกาย พิษของตะกั่ว ที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ความเป็นพิษเฉียบพลัน และความเป็นพิษเรื้อรัง

ก. ความเป็นพิษเฉียบพลัน สำหรับผู้ที่ได้รับตะกั่วจะรู้สึกผิดปกติ มีกลิ่นโลหะในปาก กระหายน้ำ คอแห้ง ปวดแสบหน้าท้อง คลื่นไส้ อาเจียนมีลักษณะขาวขุ่นจากเลือดคลอไรด์ ผู้ที่

ได้รับตะกั่วส่วนมากจะมีอาการท้องร่วง และอาจจะมีส่วนน้อยที่มีอาการท้องผูก อุจจาระมีเลือด หรือมีสีดำอันเนื่องมาจากเลือดซัลไฟด์ ผู้ที่ได้รับตะกั่วบางรายอาจเกิดอาการช็อก กล้ามเนื้อกระดูกอ่อนเพลีย เป็นตะคริว โดยเฉพาะที่ขาทั้งสองข้าง หรือมีอาการของระบบประสาทส่วนกลาง เช่น ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ หรืออาจมีอาการผิดปกติที่ไร้สาเหตุ เช่น รู้สึกล้า ซึมเศร้า ถึงขั้นโคม่าและเสียชีวิตในที่สุด อาการที่รองลงมา ได้แก่ ภาวะไตเสื่อม ทำให้ปัสสาวะน้อยลงกว่าปกติ มีอัลบูมิน และมีเมือกในปัสสาวะ เจ็บไต นอกจากนี้ จะมีการสลายตัวของเม็ดเลือดแดง อาจทำให้เสียชีวิตภายใน 2-3 วัน

ข. ความเป็นพิษเรื้อรัง ผู้ที่ได้รับตะกั่วอาจมีอาการระบบทางเดินอาหารและทางระบบประสาท เช่น อาการทางระบบทางเดินอาหาร เช่น เบื่ออาหาร เหม็นเฟื่อนในลำคอ ท้องผูก เป็นตะคริวที่หน้าท้อง และอาการทางระบบประสาท เช่น ข้อมือตก เป็นอัมพาต ไม่มีแรงแต่ยังคงมีความรู้สึกอาการทางสมองหรือเยื่อหุ้มสมองอักเสบ อาการนี้พบน้อยในผู้ใหญ่ส่วนมากมักจะเกิดขึ้นกับเด็ก เช่น เด็กที่กำลังร่าเริงว่องไวอยู่ ๆ ก็หมดสติ นานประมาณ 2-3 ชั่วโมง จากสถิติผู้ป่วยที่มีอาการทางสมอง บางรายเสียชีวิต ประมาณร้อยละ 25 ของผู้รอดชีวิตอาจมีอาการทางประสาทถาวร ผลกระทบที่มีต่อผู้ใหญ่อาการทางระบบทางเดินอาหารที่พบบ่อยได้แก่ เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียนท้องผูก บางรายท้องเสียและปวดท้องอย่างรุนแรง (เรียกว่า ‘โคริก’) อาการทางระบบประสาท ได้แก่ กล้ามเนื้อแขนขาไม่มีแรง ปวดตามกล้ามเนื้อและข้อต่อต่าง ๆ กล้ามเนื้อเป็นอัมพาต และอาการทางโลหิต ได้แก่ เลือดจางซีดขาว อ่อนเพลีย ปวดศีรษะ มึนงง ตาเหลือง เป็นคันและผลกระทบที่มีต่อเด็ก ระบบประสาท ตะกั่วจะทำลายระบบประสาทส่วนกลางและส่วนปลายซึ่งเด็กอายุยังน้อยเท่าไร ระบบประสาทจะถูกทำลายมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้น จึงเป็นอันตรายต่อเด็กเป็นอย่างมาก ระบบปัสสาวะ ทำลายไตและทำให้ที่กรองปัสสาวะฝ่อลีบ ระบบเลือด ทำให้เม็ดเลือดแดงแตกง่าย และขัดขวางการสร้างฮีโมโกลบินทำให้ซีดและโลหิตจาง ระบบทางเดินอาหาร ทำให้ปวดท้องและเกร็งกล้ามเนื้อท้อง และการเจริญเติบโตในกรณีที่มีตะกั่วในเลือดตั้งแต่ 25 ไมโครกรัมในเลือด 1 เดซิลิตร จะยับยั้งการเจริญเติบโตของเด็ก ทำให้เด็กเจริญเติบโตไม่สมกับอายุ

2.2.3 พรอท (Hg)

พรอทเป็นโลหะสีขาวคล้ายเงินเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ สามารถทำให้เป็นของแข็งได้แค่เพราะที่อุณหภูมิปกติ พรอทสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ ทำให้เป็นอันตรายต่อร่างกายได้ง่ายขึ้น พรอทสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง เช่นเดียวกับสารพิษชนิดอื่น ๆ คือ ทางการหายใจ โดยสูดเอาผง หรือไอพรอทเข้าสู่ปอด เนื่องจากพรอทสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย, ทางปาก โดยการรับประทานเข้าไป มักเกิดจากอุบัติเหตุปะปนกับอาหารหรือน้ำดื่ม, ทางผิวหนัง โดยการดูดซึมไอระเหยหรือฝุ่นละอองของพรอททำให้ผิวหนังระคายเคืองเกิดโรคผิวหนังได้

2.2.3.1 พิษของปรอท

ปรอทจะทำอันตรายต่อร่างกายมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับเหตุการณ์และปัจจัย

ก. ทางที่พิษเข้าสู่ร่างกาย เช่น ทางผิวหนัง, ทางระบบหายใจ หรือทางระบบย่อย

อาหาร

ข. ปริมาณที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย

ค. ชนิดของสารปรอทที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายและอวัยวะส่วนใดของร่างกายที่ได้รับพิษของปรอทในรูปเมทิล หรืออัลคิล เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีพิษมากที่สุด

2.2.3.2 อาการพิษเกิดจากปรอท

การเกิดพิษจากสารปรอทมีทั้งชนิดเฉียบพลันและเรื้อรัง พิษชนิดเฉียบพลันมักเกิดจากอุบัติเหตุโดยการกลืนกินสารปรอทเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งปริมาณปกติที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายและทำให้คนตายได้ โดยเฉลี่ยประมาณ 0.02 กรัม อาการที่เกิดจากการกลืนกินปรอท คือ (1) อาเจียน ปากพองแดงไหม้อักเสบ และเนื้อเยื่ออาจหลุดออกมาเป็นชิ้น ๆ (2) เลือดออก ปวดท้องอย่างแรง เนื่องจากปรอทกระตุ้นระบบทางเดินอาหาร (3) มีอาการท้องร่วงอย่างแรง อุจจาระเป็นเลือด (4) เป็นลมสลบเนื่องจากร่างกายเสียเลือดมาก (5) เมื่อเข้าสู่ระบบหมุนเวียนโลหิต ปรอทจะไปทำลายไต ทำให้ปัสสาวะไม่ออกหรือปัสสาวะเป็นเลือด และตายในที่สุด

2.2.3.3 พิษชนิดเรื้อรัง

ปรอทเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะไปทำอันตรายต่อระบบประสาทส่วนกลาง ซึ่งได้แก่สมอง และไขสันหลัง ทำให้เสียการควบคุมเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวของแขน ขา การพูด และยังทำให้ระบบประสาทรับรู้สึกเสียไป เช่นการได้ยิน การมองเห็น ซึ่งอันตรายเหล่านี้ เมื่อเป็นแล้วไม่สามารถรักษาให้กลับคืนดังเดิมได้ อาการที่เป็นพิษมากเกิดจากการหายใจ ปอดอักเสบ มีอาการเจ็บหน้าอก มีไข้ แน่นหน้าอก หายใจไม่ออก และตายได้

2.2.4 สารหนู (Arsenic, As)

สารหนู(อาร์เซนิก) ในสภาพของโลหะจะมีสีเทา เปราะ อาร์เซนิกไตรออกไซด์ มีลักษณะเป็นของเหลวคล้ายน้ำมัน ส่วนอาร์เซนิกไตรออกไซด์ มีลักษณะเป็นผลึกแข็ง พิษสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง เช่น การหายใจ, การกิน และการสัมผัสทางผิวหนัง เป็นต้น

2.2.4.1 อาการรับพิษจากสารหนู

ก. แบบเฉียบพลัน (จากการกิน) ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อกระเพาะอาหาร ถ้าใส่คลื่นไส้ อาเจียน และท้องร่วง ในคนไข้ที่มีอาการรุนแรงอาจจะมีเลือดปน คนไข้จะอ่อนเพลีย อาจช็อกและตายได้

ข. แบบเรื้อรัง (จากการกินหรือหายใจ) จะมีอาการอ่อนเพลีย เมื่ออาหาร คลื่นไส้ ระบบทางเดินอาหารผิดปกติ ดับอาจถูกทำลาย นอกจากนี้มีอาการทางผิวหนัง ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของผิวหนัง ทำให้หนังคัน อาการบวมแฉะอาจจะเป็นสาเหตุของมะเร็งที่ผิวหนังได้

นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความผิดปกติของระบบเหงื่อและทำให้เกิดเนื้องอกบริเวณนี้ด้วย เป็นต้น

2.2.4.2 หลักการควบคุมและป้องกัน

จุดฝุ่นที่ฟุ้งกระจายเก็บไว้ในที่ปลอดภัย, หมั่นรักษาความสะอาดพื้นบริเวณที่ทำงาน, จัดการระบายอากาศให้เหมาะสม, สวมใส่เครื่องป้องกันอันตรายส่วนบุคคล, รักษาความสะอาดของร่างกายหลังการปฏิบัติงาน, คนที่มีเหงื่อออกมาก ไม่ควรทำงานเกี่ยวข้องกับสารหนู, ตรวจร่างกายเป็นประจำ ตลอดจนตรวจหาปริมาณของสารหนู, ไม่นำอาหาร เครื่องดื่ม เข้าไปรับประทานในสถานที่ทำงาน ตลอดจนงดการสูบบุหรี่ในที่ทำงาน

2.3 วิธีการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

การบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักมี 3 วิธี ได้แก่

2.3.1 วิธีที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในดิน คือ การกำจัดดินที่ปนเปื้อนออกไปแล้วแทนที่ด้วยดินที่ไม่มีโลหะหนักปนเปื้อนอย่างไรก็ตามคงเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริง เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

2.3.2 กระบวนการทางเคมี, กายภาพ-เคมี หรือกระบวนการทางชีวะ อย่างไรก็ตามอาจจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของดินภายหลัง

2.3.3 การบำบัดในที่เช่น การใช้สารเคมี Apatite และ Zeolite หรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม โดยการเติมสารเคมีผสมกับดินที่ปนเปื้อน (Chen *et al.*, 2006) ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่เป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ (Chen *et al.*, 2000)

วิธีทางกายภาพ-เคมี นั้นมักจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงและทำลายโครงสร้างของดิน วิธีการได้แก่ การขุดดินเอาดินออกและถมส่วนบนด้วยดินที่สะอาด แต่มักเป็นวิธีที่แพงเนื่องจากจำเป็นต้องกำจัดดินที่ปนเปื้อน และต้องขนส่งดินที่สะอาดมาถมส่วนที่ขุดออกไป (Tang *et al.*, 2004) ตัวอย่างของกระบวนการบำบัดดินมีรายละเอียดดังนี้

Soil washing เป็นวิธีที่ใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนที่ดูดติดบนผิวของอนุภาคดิน และถูกแยกออกมาในของเหลวที่ใช้ อาจใช้ความดันสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัด น้ำที่ใช้ล้างอาจเป็นกรด หรือด่าง หรือ Chelating agent เพื่อช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์หรือโลหะหนัก นอกจากนี้ อาจต้องคำนึงถึงการทำให้เป็นกลางของดินที่ผ่านการบำบัดแล้วร่วมด้วย ประสิทธิภาพของการบำบัดถูกจำกัดโดยค่าความซึมผ่านของดิน (Permeability) ดินที่มีค่าความซึมผ่านน้อยกว่า 10⁻⁴ ซม./วินาที ไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีนี้บำบัด (Abumaizer and Smith, 1999) การล้างดินไม่สามารถนำไปใช้กับดินได้ทุกชนิด แต่เหมาะกับดินที่เป็นดินหยาบหรือดินทราย ดินที่เม็ดละเอียด เช่น ตะกอน และดินเหนียว ที่ยากต่อการแยกออกจากของเหลว และมักจะยึดจับกับสารปนเปื้อนปริมาณที่สูง และจำเป็นต้องคำนึงถึงการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น สารปนเปื้อนที่มีความซับซ้อนอาจเป็นการยากที่จะใช้การล้างเพียงขั้นตอนเดียว (United Nation, 2000)

Solvent Extraction การสกัดด้วยตัวทำละลายสามารถนำมาใช้กับสารปนเปื้อนหลายชนิด ได้แก่ Semi-volatile halogenated และ Non-halogenated organics, ยากำจัดศัตรูพืช และ โลหะหนัก โดยดินที่ปนเปื้อนและตัวทำละลายหรือกรดจะถูกผสมในถังปฏิกริยา เมื่อสารปนเปื้อนถูกละลายโดยตัวทำละลาย ของเหลวจะถูกนำไปกำจัดสารปนเปื้อนออกเพื่อนำตัวทำละลายกลับมาใช้อีกครั้ง การสกัดด้วยตัวทำละลายถูกนำมาใช้อย่างประสบความสำเร็จในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหย (Halogenated หรือ Non-halogenated) เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ตัวทำละลายอาจตกค้างและปนเปื้อนในดินที่ผ่านการบำบัดแล้วเล็กน้อย จำเป็นต้องคำนึงถึงการใช้ประโยชน์ในอนาคตและพิษของตัวทำละลายที่ใช้ด้วย แต่มักไม่เหมาะสมในการนำมาใช้กับสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง หรือ Hydrophilic substances และอาจไม่เหมาะสมกับดินที่มีความชื้นปริมาณสูง ๆ นอกจากนี้การบำบัดและกำจัดตัวทำละลายที่ใช้แล้วอาจเป็นปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย (United Nation, 2000)

Electro reclamation เป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดโลหะหนักความเข้มข้นสูง สามารถกำจัด โลหะหนักได้หลายชนิด ขั้วไฟฟ้าจะถูกฝังลงในดินบริเวณที่ปนเปื้อนทำการป้อนกระแสไฟฟ้ากลไกการกำจัดอาจเกิดจากการตกตะกอน , การเกาะติดกับขั้วไฟฟ้า กระบวนการขึ้นอยู่กับชนิดของสารมลพิษ ของเหลว ซึ่งบางครั้งอาจจำเป็นต้องเติมและป้อนหมุนเวียนเข้าไปเพื่อที่จะลดพันธะระหว่างดินและสารพิษทำให้สารมลพิษเคลื่อนที่ได้ดียิ่งขึ้น วิธีนี้ยังต้องถูกพัฒนาต่อไป การประยุกต์ใช้มักก่อให้เกิดภาวะความเป็นกรดของดิน (PH 2-4) จำเป็นต้องทดสอบก่อนนำไปใช้กับสถานที่จริง รวมทั้งต้องพิจารณาปฏิกริยา Oxidation/Reduction อื่น ๆ ด้วย (United Nation, 2000)

Stabilization/Solidification เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์เป็นเทคโนโลยีที่ง่าย สารปนเปื้อนจะถูกยึดติดทางกายภาพหรือถูกห่อหุ้มภายในวัสดุที่เสถียรปฏิกริยาเคมี ระหว่างสารปนเปื้อนและสารเคมีจะลดการเคลื่อนที่ย้ายของสารปนเปื้อน การทำให้เป็นก้อนแข็งมักประสบความสำเร็จโดยการผสมดินที่ปนเปื้อนกับซีเมนต์ เพื่อให้ได้วัสดุที่จะถูกชะละลายออกมาน้อย สัดส่วนของสารเคมีมีใช้และดินที่ปนเปื้อนที่เหมาะสมต้องพิจารณาจากสมบัติของผลผลิตสุดท้ายที่ได้ การทำให้เป็นก้อนแข็งอาจส่งผลทำให้ปริมาตรของผลผลิตสุดท้ายเพิ่มขึ้นถึงเท่าตัวได้เมื่อเทียบกับปริมาตรเดิม ผลผลิตที่ได้ยังคงต้องถูกควบคุมเช่นเดียวกับของเสียอันตราย จำเป็นต้องมีการทดสอบความเข้ากันได้ของกระบวนการกับสารมลพิษและสิ่งแวดล้อม (United Nation, 2000)

Phytoemediation เป็นกระบวนการที่ใช้พืชเฉพาะในการกำจัดหรือทำเสถียรหรือทำลายสารปนเปื้อนในดิน เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายน้อย ไม่ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ใช้เพียงพื้นฐานของการทำการเกษตรเท่านั้น สารอินทรีย์ที่อยู่บริเวณใกล้ ๆ กับระบบราก พืชสามารถ Metabolize สารอินทรีย์ดังกล่าว หรือเคลื่อนย้ายสู่ส่วนที่เหนือดิน ขณะที่โลหะหนักก็สามารถสะสมอยู่ที่บริเวณรากและส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน สำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่การใช้พืชในการบำบัดยังไม่ถูกสาธิต

ทำให้ไม่ทราบลักษณะของการดำเนินการและค่าใช้จ่ายที่ชัดเจน และเป็นวิธีการบำบัดดินที่จำกัดเพียงค่าความยาวของรากพืชเศษพืชหรือส่วนที่ถูกเก็บเกี่ยวจำเป็นต้องนำไปกำจัดเช่นเดียวกับของเสียอันตราย การนำมาใช้กับดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักจำเป็นต้องใช้เวลานาน ซึ่งอาจจะเหมาะสมเฉพาะดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในระดับต่ำ (United Nation, 2000) Phytoremediation เป็นกระบวนการที่สามารถบำบัดดินที่ปนเปื้อน สารอินทรีย์ อนินทรีย์หรือสารกัมมันตภาพรังสีได้ด้วยพืช ประกอบด้วย 4 ชนิด

(1) Phytorextraction เป็นการนำพืชเพื่อบำบัดสารมลพิษที่อยู่ใน ดิน ตะกอนดิน โดยใช้พืชไปดูดซึมสารมลพิษโดยผ่านราก แล้วไปเก็บสะสมในเนื้อเยื่อพืชส่วนที่เป็น ลำต้น และใบ มีปัจจัยหลายประการที่จำกัดการบำบัดสาร โลหะหนัก (Metal phytorextraction) เช่น อัตราการดูดซึมสาร โลหะหนักโดยราก การนำไปใช้ประโยชน์ของโลหะหนักโดยพืช (Metal bioavailability) สัดส่วนของสาร โลหะหนักที่ถูกดูดซึมโดยราก ความทนได้ของเซลล์พืชต่อสาร โลหะหนักที่เป็นพิษ ดังนั้น พืชที่ใช้ในการบำบัดจึงควรมีความสามารถในการสะสมสาร โลหะหนักโดยผ่านรากได้มาก และสามารถเคลื่อนย้ายสาร โลหะหนักไปสู่ส่วนของด่อนพืชได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้พืชควรมีกลไกในการลดความเป็นพิษของสาร โลหะหนัก (Detoxify) และมีความทนต่อปริมาณสาร โลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูง สาร โลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น เงิน แคดเมียม โคบอลต์ โครเมียม ทองแดง ปรอท แมงกานีส โมลิบดีนัม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี สารกัมมันตรังสีสามารถบำบัดโดยวิธีนี้ เช่น สตรอนเชียม-90 (^{90}Sr) ซีเซียม-137 (^{137}Cs) พลูโทเนียม-239 (^{239}Pu) ยูเรเนียม-238 (^{238}U) และ Phytorextraction นั้นแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ Natural phytorextraction และ Induced phytorextraction

(1.1) Natural phytorextraction เป็นการบำบัดสารมลพิษโดยวิธีการปลูกพืชในดินที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษ แล้วทำการรดน้ำใส่ปุ๋ยเท่าที่จำเป็น พืชบางชนิด สามารถเจริญเติบโตโดยไม่จำเป็นต้องใส่ปุ๋ยหรือรดน้ำ แต่อาศัยน้ำฝนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ส่วนใบและลำต้นพืชที่มีการสะสมสารมลพิษ จะถูกเก็บเกี่ยวและทำการบำบัดโดยวิธีที่เหมาะสมต่อไป พืชที่เลือกใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพืชที่ชอบขึ้นตามธรรมชาติอยู่แล้ว และมีความทนทานต่อความเข้มข้นของ โลหะหนักหรือสารพิษอื่น ๆ โดยทั่วไปแล้ว พืชเหล่านี้จะเป็นพืชที่เจริญเติบโตไม่รวดเร็วนัก และเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้วจะมีขนาดที่ไม่ใหญ่นักมีรากตื้น

(1.2) Induced phytorextraction เป็นการบำบัดสารมลพิษโดยการเลือกใช้พืชที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วตลอดอายุการเจริญเติบโต ร่วมกับการเติมสารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ (Inducing agent) เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษสู่พืชมากขึ้น ยังผลให้เพิ่มขีดความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ

(2) Phytorestabilization เป็นการนำพืชเพื่อยับยั้งหรือลดการเคลื่อนที่ของสารมลพิษในดินตะกอนดิน หรือ ดม โดยการนำพืชเพื่อจำกัดการเคลื่อนที่และการดูดซับของสารมลพิษใน

ดิน ตะกอนดิน หรือตะกอน พืชที่ใช้ควรมีความสามารถในการลดปริมาณการซึมผ่านของน้ำในโครงสร้างของดิน เพื่อเป็นการลดปริมาณสารมลพิษปนเปื้อนไปสู่น้ำใต้ดิน ป้องกันการสึกกร่อนของหน้าดินและการกระจายของสารมลพิษไปยังบริเวณอื่น ๆ การบำบัดโดยวิธีนี้สามารถเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการดูดซับ (Sorption) การตกตะกอน (Precipitation) การเกิดสารเชิงซ้อน (Complexation) การรีดิวซ์เวเลนซ์โลหะ (Metal valence reduction) สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น ตะกั่ว สารหนู แคดเมียม โครเมียม ทองแดง และ สังกะสี

(3) Phytovolatilization เป็นการนำพืชเพื่อบำบัดสารมลพิษโดยใช้พืชไปดูดซับสารมลพิษ แล้วด้วยกลไกที่เกิดขึ้นในต้นพืชเองได้ทำการแปลง (Transformation) สารมลพิษให้อยู่ในรูปที่ระเหยได้และมีความเป็นพิษลดลงจากเดิม หลังจากนั้น สารมลพิษที่อยู่ในรูปที่ระเหยได้สามารถกำจัดออกโดยผ่านทางใบพืช ซึ่งเป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจ และศึกษาค้นคว้าวิจัย เพื่อการปรับปรุงพืชที่สามารถทำหน้าที่พิเศษนี้ได้อย่างยอดเยี่ยม สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดด้วยวิธีนี้ เช่นปรอท

(4) Rizofiltration เป็นการนำพืชเพื่อบำบัดสารมลพิษ โดยการใช้รากพืชในการดักกรองสารมลพิษ หรือ ดูดซับสารมลพิษในน้ำ เช่น น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ ซึ่งวิธีนี้สามารถช่วยในการลดปริมาณสารมลพิษได้มาก ทั้งนี้เนื่องจากเฉพาะส่วนของรากพืช ที่สะสมสารมลพิษเท่านั้น ที่จำเป็นต้องบำบัดในขั้นตอนต่อไป ส่วนของใบและลำต้นที่ไม่ปนเปื้อนหลังจากการเก็บเกี่ยว ก็จะทิ้งไปหรือนำไปทำประโยชน์อย่างอื่นได้ ขึ้นกับชนิดของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัด เช่น พืชบางชนิดมีดอกที่สวยงาม จึงสามารถเก็บดอกไปขายในช่วงเวลาระหว่างการบำบัดได้อีกด้วย สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี โครเมียม สำหรับสารกัมมันตรังสีที่สามารถบำบัดโดยวิธีนี้ เช่น ^{137}Cs และ ^{238}U

Verifications เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก, สารประกอบอินทรีย์ และสารกัมมันตรังสี โดยใช้ความร้อนที่เพียงพอจนทำให้เกิดการหลอมเป็นแก้วและเย็นตัวลง เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ทั้งในที่ (In-situ) นอกสถานที่ (EX-situ) โดยการแทรก Graphite electrodes ลงในพื้นที่ที่เป็นลักษณะเปิดในการให้พลังงานเข้าไป ผลของการให้พลังงานไฟฟ้าจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นถึงกว่า 1700°C ทำให้เกิดการหลอมตัว สามารถนำมาใช้ได้กับสารอินทรีย์, สารอนินทรีย์, สารกัมมันตรังสี สารอินทรีย์มักจะถูกทำลาย ขณะที่สารอนินทรีย์จะถูกตรึงอยู่ในโครงสร้าง ดินที่ผ่านกระบวนการนี้แล้วจะไม่สามารถนำมาใช้เพื่อการเกษตรกรรมได้อีก เป็นการจำกัดการใช้ประโยชน์ในอนาคต (United Nation., 2000)

2.4 การบำบัดดินด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Amendment)

การบำบัดด้วยสารเคมีเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโดยการเติมวัสดุที่สังเคราะห์หรือวัสดุธรรมชาติ เช่น สารเคมีที่สังเคราะห์, วัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรม, ของเสียอุตสาหกรรม, สลัดจ์จากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ, แร่ต่าง ๆ กับดินหรือตะกอนที่ปนเปื้อนเพื่อป้องกันการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนลงสู่ชั้นดินที่ลึกลงไป หรือปนเปื้อนสู่พื้นผิวดินและน้ำใต้ดิน และลดส่วนของโลหะหนักที่จะนำไปใช้ทางชีวะ (Bioavailable fraction) ขณะที่ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดยังคงอยู่เท่าเดิมเพียงแต่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่เสถียรมากขึ้น สารที่เติม (Amendments) จะทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปของของแข็งมากขึ้นผ่านกระบวนการตกตะกอนเป็นแร่หรือกระบวนการดูดซับ (Brown *et al.*, 2005)

2.4.1 การตรึงโลหะหนักจะสามารถลดการชะละลายและลดส่วนที่จะนำไปใช้โดยพืชผ่านกระบวนการดูดซับ, การแลกเปลี่ยนไอออน, การตกตะกอน, (K_2HPO_4 , DAP) ฟอสฟอรัสบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วจะก่อให้เกิด Pyromorphite เป็นรูปซึ่งมีความสามารถในการละลายได้ต่ำและละลายได้น้อยกว่าตะกั่วที่อยู่ในดินรวมทั้ง PbO และ $PbCO_3$ (Brown *et al.*, 2005) ขณะที่การใช้ หินฟอสเฟต (Phosphate rock, PR) เป็นสารที่เติมเพื่อบำบัดดินก็ประสบความสำเร็จ แม้จะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้น้อย แต่อาจจะปล่อยฟอสฟอรัสออกมาในปริมาณที่เพียงพอเพื่อบำบัดดิน, การใช้สารสังเคราะห์ Hydroxyapatite กับดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว สามารถทำให้เกิดเป็น Pyromorphite แต่การนำ Hydroxyapatite มาใช้ในภาคสนามมักไม่ค่อยเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ (Chen *et al.*, 2006) ขณะที่การศึกษางานบางฉบับรายงานว่า การใช้ไฮดรอกซีอะพาทาइटหรือแมงกานีสออกไซด์สามารถลดความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่วละลายในดิน (Chen *et al.*, 2000)

2.4.2 การเติมสารเคมีบางชนิดเพื่อตรึงโลหะหนักในดินด้วย โคลโลไมด์, ฟอสเฟต, สารอินทรีย์ลงในดินที่ปนเปื้อน สามารถลดการละลายของโลหะหนักด้วยกระบวนการตกตะกอน, การดูดซับ หรือการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Chen *et al.*, 2000)

2.4.3 การใช้ฟอสเฟตเพื่อตรึงโลหะหนักในดินเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดในสถานที่จริง โดยเฉพาะแคดเมียมและตะกั่ว สารประกอบฟอสเฟตของแคดเมียมและตะกั่วที่เกิดขึ้นมีความสามารถในการละลายต่ำจะถูกยึดไว้ในโครงสร้างของดิน (Hodson *et al.*, 2001) การเติม Hydroxyapatite, หินฟอสเฟต หรือกรดฟอสฟอริก ในดินหรือน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่ว สามารถลดการละลายของตะกั่วได้โดยการเกิดเป็น Lead orthophosphate สารที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบมักถูกนำมาใช้ในภาคสนามเนื่องจากมีราคาถูกและสามารถใช้ดินที่บำบัดแล้วเพื่อการเกษตรต่อไปได้ตามปกติการเกิดเป็น Pyromorphite นอกจากจะลดการเคลื่อนที่ของตะกั่วแล้วยังสามารถลดการนำไปใช้โดยพืชด้วย (Tang *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2005) นอกจากนี้ นักวิจัยบางคนคาดว่า มี 2 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่างตะกั่วและอะพาไทต์ ได้แก่ การเกิดสารประกอบตะกั่ว

ฟอสเฟตที่มีเสถียรภาพมากขึ้น เช่น $\text{Ca}_{(10-x)}\text{Pb}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างตะกั่วและแคลเซียมใน Hydroxyapatite lattice และการละลายของหินฟอสเฟตหรือ Hydroxyapatite ($\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) แล้วตามกระบวนการตกตะกอน Pyromorphite-like mineral ($\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2$, $\text{X}=\text{OH}^-, \text{Cl}^-, \text{F}^-$, etc) หรือ Hydroxypyromorphite เป็นกลไกหลัก (Chen *et al.*, 2005 ; Adriano *et al.*, 2004)

2.4.4 สารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่สามารถลดการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักด้วยกระบวนการดูดซับ ได้แก่ เหล็กออกไซด์ สามารถลดตะกั่วและอาร์เซนิกที่จะถูกชะออกมา , โคลนแดง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมอลูมิเนียม ถัดออกจากเครื่องกำจัดฝุ่นแบบไซโคลน และสลัดจ์จากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดการชะของโลหะหนักออกมา และลดส่วนที่พืชจะนำไปใช้ เนื่องจากองค์ประกอบที่มีอะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์ปริมาณสูง, ปุ๋ยคอกที่มีเหล็กปริมาณสูง สามารถลดการนำตะกั่วไปใช้โดยพืช เช่นเดียวกับสังกะสีและแคลเซียม (Brown *et al.*, 2005) กลไกที่สำคัญในการตรึงโลหะหนักยังคงยากที่จะอธิบายได้ชัดเจน แม้ว่ากลไกที่ถูกเสนอจะอยู่บนพื้นฐานของกระบวนการดูดซับบนพื้นผิวและตามด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนของแคลเซียม งานวิจัยส่วนมากเสนอแนะว่าการละลายของสารประกอบฟอสเฟต ปล่อยไอออนลบของฟอสเฟตออกมาแล้วเกิดกระบวนการตกตะกอนในรูปของแข็งซึ่งมีค่าความสามารถในการละลายต่ำมีเสถียรภาพสูงกว่า (Raicevic *et al.*, 2005) สารเคมีสามารถตรึงโลหะหนักได้จาก (1)ความเป็นต่างจากการละลายของสารเคมีต่อดินที่เป็นกรด ทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งประกอบด้วยโลหะหนัก เช่น โลหะฟอสเฟต, โลหะคาร์บอเนต เป็นองค์ประกอบหลักหรือการตกตะกอนร่วมในไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบรอง (2)การเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นด่าง สนับสนุนการดูดซับของโลหะหนักผ่านกระบวนการ Surface complexation ซึ่งปกติบนผิวของแร่จะมีประจุเป็นบวกในสถานะที่ pH ต่ำ เนื่องจากการดูดติดกับโปรตอน และต้องการประจุลบเมื่อ pH สูงขึ้นนำไปสู่การ Deprotonation ของพื้นผิวดังนั้นเมื่อ pH สูงขึ้น ไอออนบวกจึงก่อรูปเป็นสารประกอบที่มีเสถียรภาพกับไอออนลบบนผิว อนุภาคดินเหนียวในดินธรรมชาติจะแสดงให้เห็นกระบวนการ Surface complexation เนื่องจากมีพื้นผิวจำเพาะที่สูง อย่างไรก็ตาม ไอออนลบของอาร์เซนิกในสารละลาย ก็อาจถูกตรึงด้วยเมื่อ pH สูงขึ้นจากการเติมสารเคมีที่ใช้บำบัด และ(3)การตรึงโลหะหนักจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน เช่น ซีโอไลต์ ซึ่งเป็นผลึกของ Aluminum-silicates มีธาตุหมู่ 1 และ 2 เป็น Counter ion เป็นโครงข่ายกรวยสามเหลี่ยมของ $[\text{SiO}_4]^-$ และ $[\text{AlO}_4]^-$ และยึดติดด้วยการแชร์ออกซิเจน การแทนที่ของซิลิกา ด้วยอลูมิเนียมทำให้เกิดประจุลบในโครงสร้างซึ่งอาจมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity, CEC) มีค่าสูงการดูดซับโลหะหนักบน Hydroxyapatite ได้แก่ Cd, Cu, Ni, Si และ Zn ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของแคลเซียมบนอนุภาคของ Apatite ในดิน การตกตะกอนในรูปของโลหะฟอสเฟตเป็นกลไกหลักในการตรึงโลหะหนัก ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำในช่วง pH ที่กว้าง ทำให้การใช้ฟอสเฟตในการบำบัดดินที่

ปนเปื้อนโลหะหนักเป็นเทคโนโลยีที่ได้เปรียบในการบำบัดโลหะหนักในดิน (Adriano *et al.*, 2004)

2.4.5 การใช้สารประกอบฟอสเฟตที่มีความสามารถในการละลายสูง เช่น Diammonium phosphate (DAP อัตรา 2,300 มก. P/กก.) มีประสิทธิภาพสูงในการตรึงแคลเซียม, ตะกั่ว และ สังกะสีในดิน โดยการทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะฟอสเฟต (Adriano *et al.*, 2004) แต่การเติมสารประกอบฟอสเฟตในรูปที่มีความสามารถในการละลายสูงมักเสี่ยงต่อการเกิดกระบวนการ Eutrophication หากใส่ในปริมาณมาก (Chen *et al.*, 2000) งานวิจัยอื่นแสดงให้เห็นว่า สารประกอบฟอสเฟตในรูปที่มีความสามารถในการละลายสูง เช่น เกลือฟอสเฟต มีศักยภาพในการก่อให้เกิด Lead Pyromorphite กว่า การใช้หินฟอสเฟต, การใช้สารเคมีในรูป Na_2HPO_4 และ Pyrophosphate มีประสิทธิภาพสูงในการตกตะกอนและเพิ่มการดูดซับของตะกั่วและสังกะสี, ในรูปของแคลเซียมและอลูมิเนียมฟอสเฟต เป็นสารเคมีที่มีศักยภาพเป็นไปได้ในการนำมาบำบัดดิน เนื่องจากหาได้ง่ายและมีปริมาณมาก (Basta and McGowan, 2004)

2.4.6 การใช้ปูนขาวอีกเป็นวิธีใช้อย่างกว้างขวางในการบำบัดดิน pH ที่สูงขึ้นเป็นผลจากการปล่อย Hydroxylion จากการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะในรูปของโลหะคาร์บอเนต ลดการนำไปใช้หรือการดูดซับโดยพืช (Lee *et al.*, 2004) สารที่มีสมบัติเป็นค่า ค่าได้แก่ แคลเซียมออกไซด์, แคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนต สามารถลดการละลายได้ของโลหะหนักและเพื่อความเป็นค่าให้แก่ดิน พร้อมกับการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของอนุภาคดิน (Base McGowan, 2004) ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ทางเทอร์โมไดนามิกของการละลายได้ของแคลเซียม, ตะกั่ว และสังกะสี และปฏิกิริยาการละลาย แคลเซียมฟอสเฟต, มีค่า $\text{Log } K_{sp}$ ต่ำที่สุดเป็น -38.1, Lead chloropyromorphite มีค่า $\text{Log } K_{sp}$ ต่ำที่สุดเป็น -76.8 และ Zinc pyromorphite มีค่า $\text{Log } K_{sp}$ ต่ำที่สุดเป็น -63.1 ตามลำดับ

2.5 กลไกการตรึงโลหะหนักในดิน

ไอออนของโลหะหนักจะถูกตรึงให้อยู่ในดินด้วยปฏิกิริยา การดูดซับ , การตกตะกอน, การเกิดเป็นสารเชิงซ้อน การดูดซับเป็นกระบวนการสะสมของไอออนของโลหะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว ซึ่งอาจรวมถึงการแลกเปลี่ยนไอออน, การก่อตัวเป็นผิวเชิงซ้อน, การตกตะกอน และการแพร่ (Adriano *et al.*, 2004)

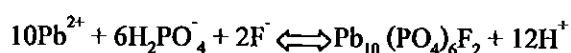
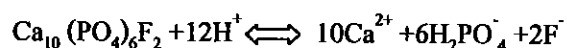
2.5.1 การดูดซับ (Adsorption) ไอออนในสารละลายจะดูดติดกับไอออนบนผิวของดินด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิต การดูดติดของไอออนในสารละลายด้วยสารละลายด้วยประจุบนผิวสามารถแบ่งออกเป็น การดูดซับจำเพาะ (Specific adsorption) และการดูดซับไม่จำเพาะ (Nonspecific retention) โดยทั่วไปการดูดซับไม่จำเพาะ คือ กระบวนการที่ประจุบน ไอออนถูกทำให้เป็นกลางด้วยประจุบนอนุภาคดินโดยแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิต ขณะที่การดูดซับจำเพาะ หมายถึง พันธะทาง

เคมีที่เกิดขึ้นระหว่าง อีออนและพื้นผิวดูดซับบนผิวดิน ซึ่งนอกจากการดูดซับไม่จำเพาะแล้ว ยังมีกระบวนการอื่น ที่เกี่ยวข้องกับการตรึงของโลหะหนักในดิน ได้แก่ การตกตะกอน และการเกิดเป็นสารเชิงซ้อน สมบัติของดินและองค์ประกอบของสารละลายในดิน มีผลต่อสมดุลของโลหะระหว่างสารละลายและของแข็ง ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายขึ้นกับ PH, สารอินทรีย์ และอีออนลบของสารอนินทรีย์ตามธรรมชาติ (Adriano *et al.*, 2004)

2.5.2 การเกิดสารเชิงซ้อน (Complexation) งานศึกษาจำนวนมากพบว่า อีออนลบเชิงซ้อนมีผลต่อการดูดซับของโลหะหนักในดิน เช่น คลอไรด์ ในสารละลายสามารถเกิดสารเชิงซ้อนกับแคดเมียม เป็น CdCl^+ ซึ่งส่งผลทำให้การดูดซับของแคดเมียมบนอนุภาคดินลดลงในทางตรงกันข้ามกับแคดเมียมสามารถดูดติดกับ Kaolinite ได้มากขึ้นหากมีสารอินทรีย์เนื่องจากสารอินทรีย์สามารถดูดติดอยู่บนผิวของดินเหนียว สารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของดินจะมีลิแกนด์ที่สามารถจับกับโลหะหนัก เมื่อ pH สูงขึ้น หมู่ฟังก์ชัน Carboxyl, Phenolic, Alcoholic และ Carbonyl ของสารอินทรีย์ในดินจะมีความชอบในการจับกับอีออนของโลหะหนักสูงขึ้นตามลำดับ $\text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$ (Adriano *et al.*, 2004)

2.5.3 การตกตะกอน (Precipitation) กระบวนการตกตะกอนดูเหมือนจะเป็นกระบวนการที่มีอำนาจเหนือกว่ากระบวนการอื่น ในดินที่เป็นด่าง และมีอีออนลบ เช่น ซัลเฟต คาร์บอเนต, ไฮดรอกไซด์ และฟอสเฟต โดยเฉพาะที่มีโลหะหนักความเข้มข้นสูง การตกตะกอนร่วมของโลหะหนัก โดยเฉพาะที่มี Iron oxyhydroxide ก็สามารถเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกัน เช่นเดียวกับการตกตะกอนของโลหะฟอสเฟต

การใส่ปูนขาวมักสนับสนุนให้เกิดการตรึงของโลหะหนัก เช่น ทำให้ดินที่ถูกบำบัด pH สูงขึ้นประมาณ 7.18-8.04 ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการตกตะกอนของโครเมียม (Cr^{3+}) ในรูป $\text{Cr}(\text{OH})_3$ การเพิ่มขึ้นของ PH มักจะส่งผลให้ประจุลบของดินเพิ่มขึ้น ซึ่งสนับสนุนต่อการดูดซับของโครเมียม (Adriano *et al.*, 2004) Ma *et al.*, (1995) เสนอว่า ตะกั่วถูกตรึงด้วย Hydroxyapatite เป็นผลมาจากการละลายหินของฟอสเฟต ตามด้วยการตกตะกอนของ Pyromorphite-like mineral ($\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2$, $\text{X}=\text{OH}^-, \text{Cl}^-, \text{F}^-$) เป็นกลไกหลัก ตัวอย่างดังสมการข้างล่าง (Cao *et al.*, 2004)



2.5.4 การแลกเปลี่ยน (Ion Exchange) การตรึงของตะกั่วเป็นผลมาจากการเกิดเป็นสารประกอบตะกั่วฟอสเฟต เช่น $\text{Ca}_{(10-x)}\text{Pb}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ผ่านทางกระบวนการแลกเปลี่ยนอีออน โดยที่อีออนของตะกั่ว เข้าไปแลกเปลี่ยนกับแคลเซียมใน Hydroxyapatite (Cao *et al.*, 2004)

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงการ

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.1.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ / เคมีของดิน

3.1.1.1 การทดสอบความชื้นของดิน

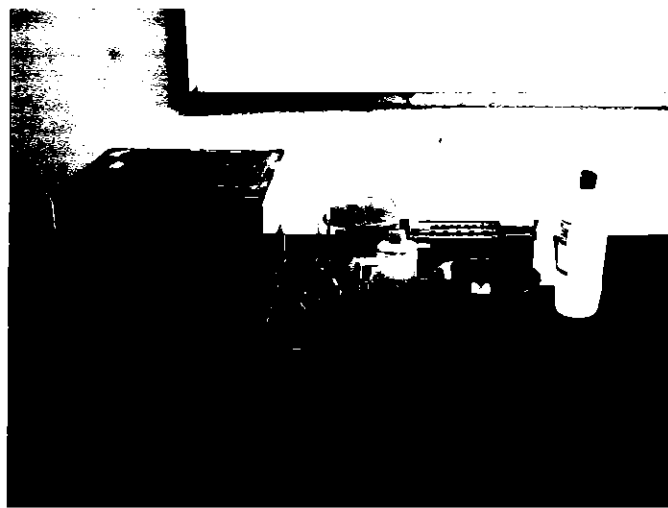
เครื่องชั่งที่สามารถปรับตำแหน่งทศนิยมได้ 2 ตำแหน่งขึ้นไป และกระป๋องอลูมิเนียมใส่ตัวอย่างดินที่ใช้ทำสอบขนาดเล็ก ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ทดสอบหาปริมาณความชื้นในดิน

3.1.1.2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

อุปกรณ์จะประกอบด้วย ขวดแก้วพลาสติก (Volumetric Flask) ขนาดความจุ 500 ml ที่สามารถทนความร้อนได้สูง, เทอร์โมมิเตอร์ 0 - 100 องศาเซลเซียส อ่านได้ละเอียด 0.1-0.5 องศาเซลเซียส, แท่งแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มม. ยาว 30 ซม. แท่งแก้วคน, หลอดใช้ดูดน้ำออกหรือเติมน้ำใน Volumetric Flask, ถาดสำหรับใช้ต้มน้ำ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

3.1.1.3 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

ตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันออกไปสำหรับเบอร์ตะแกรงที่นิยมใช้กันก็คือขนาด $3/8$ นิ้ว เบอร์ 4, 10, 20, 40, 100 และ 200 โดยเบอร์ตะแกรงที่จะขาดไม่ได้ก็คือ เบอร์ 4, 100, 200 ซึ่งตะแกรงที่มีช่องเปิดใหญ่ที่สุดจะอยู่บนและไล่ตามลำดับลงมา ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตะแกรงพร้อมถาดรอง และเครื่องเขย่าตะแกรง

3.1.2 การสกัดแยกลำดับส่วน Modified – BCR

3.1.2.1 หลอด Centrifuge

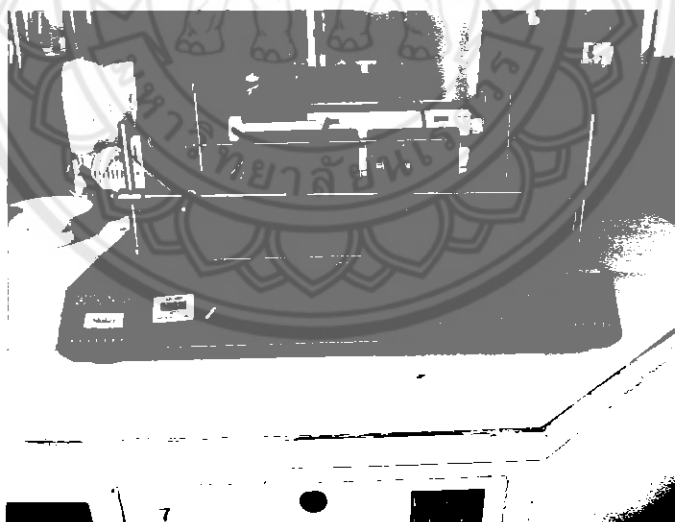
หลอด Centrifuge พลาสติก PE ขนาด 50 มิลลิลิตรใช้สำหรับใส่ตัวอย่างดินที่ทดสอบด้วยวิธี Modified – BCR ดังรูป 3.4



รูปที่ 3.4 หลอด Centrifuge

3.1.2.2 เครื่องเขย่าแบบแนวนราบ (Horizontal Shaker)

เครื่องเขย่าที่สามารถปรับความเร็วรอบและเวลาได้ ใช้สำหรับเขย่าตัวอย่างดินทิ้งไว้ได้นาน 16 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องเขย่าแนวนราบ (Horizontal Shaker)

3.1.2.3 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Benchtop Centrifuge)

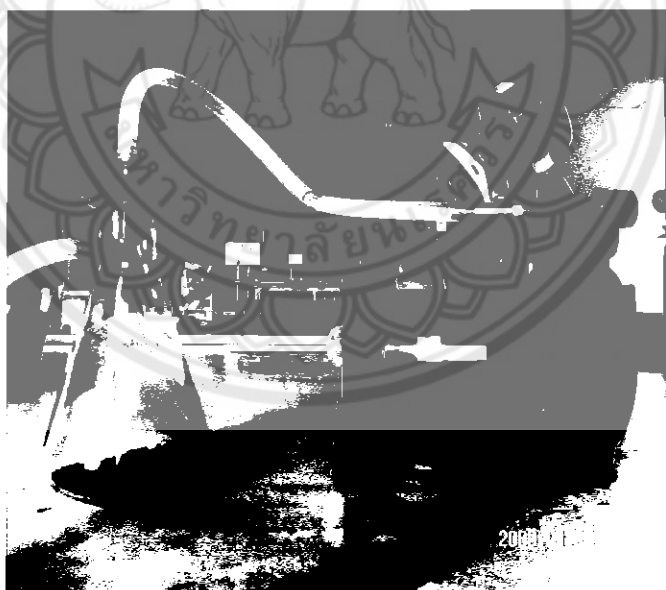
เครื่อง Centrifuge เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับเหวี่ยงแยกส่วนน้ำใสกับส่วนที่เป็นตะกอนดินออกจากกัน ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Benchtop Centrifuge)

3.1.2.4 ปั๊มสุญญากาศ (Vacum Pump)

ปั๊มสุญญากาศ (Vacum Pump) ใช้สำหรับกรองตัวอย่างดินในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อแยกส่วนน้ำใสกับดินออกจากกัน ดังรูปที่ 3.7



รูป 3.7 ปั๊มสุญญากาศ (Vacum Pump)

3.1.3 การชะละลายโลหะหนักออกจากดิน

3.1.3.1 คอลัมน์ที่ใช้ทดสอบ

ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ลึก 65 เซนติเมตร บรรจุดินลึก 50 เซนติเมตร ทางด้านล่างเป็นกรวดขนาด 2 มิลลิเมตรลึก 5 เซนติเมตรเจาะรูด้านล่างสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำขนาด ¼ นิ้ว เป็นคอลัมน์ที่ใช้ชะละลายแคดเมียมด้วยสารละลาย EDTA ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 คอลัมน์ที่ใช้ทดสอบ

3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง

3.2.1 การเตรียมดินและการบำบัดดินด้วยวิธีทางเคมี

เก็บตัวอย่างดิน ณ บริเวณหน้าอาคารปฏิบัติการคณะวิศวกรรมศาสตร์ หาดำแหน่งเก็บดิน โดยใช้เครื่อง GPS GARMIN รุ่น GPS III PLUS, Position Format: UTM/UPS, Map Datum: WGS84 การเก็บตัวอย่างดินใช้วิธี Disturb sampling ที่ความลึก 20 เซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างดินที่ได้จากการเก็บนำมาตากแดดให้ดินแห้งเป็นเวลา 5 วัน แล้วนำตัวอย่างดินมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำดินที่ได้จากการร่อนมาผสมกับเถ้าลอย หินฟอสเฟต รวมกันตามส่วนผสม ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางส่วนผสมดิน, เถ้าลอย และหินฟอสเฟต

ชุดที่	สัดส่วน (%)	ดิน (g)	หินฟอสเฟต (g)	เถ้าลอย (g)	สารละลาย $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$
1	0	3,000	-	-	300
2	10	2,700	300	-	300
3	20	2,400	600	-	300
4	30	2,100	900	-	300
5	10	2,700	-	300	300
6	20	2,400	-	600	300
7	30	2,100	-	900	300

ควบคุมความชื้นที่ 30 % เท่ากันทุกชุด โดยอาศัยสารละลายแคลเซียม ไนเตรทความเข้มข้น 2744.4 มิลลิกรัม จำนวน 300 มิลลิกรัม ซึ่งจะทำได้ดินที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบประมาณ 100 มิลลิกรัมแคลเซียมต่อกิโลกรัมดิน

เมื่อเตรียมครบตามขั้นตอนแล้วนำตัวอย่างดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคลเซียม 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ใส่ถุงพลาสติก PE ที่ปิดมิดชิดสามารถเก็บความชื้นได้ ทั้งหมด 7 ตัวอย่าง แบ่งเป็น

- ชุดควบคุม (ตัวอย่างดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคลเซียม)
- 10 % FA (ตัวอย่างดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคลเซียมผสมเถ้าลอย 10 %)
- 20 % FA (ตัวอย่างดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคลเซียมผสมเถ้าลอย 20 %)
- 30 % FA (ตัวอย่างดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคลเซียมผสมเถ้าลอย 30 %)
- 10 % PR (ตัวอย่างดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคลเซียมผสมหินฟอสเฟต 10 %)

- 20 % PR (ตัวอย่างดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคดเมียมผสมหินฟอสเฟต 20 %)

- 30 % PR (ตัวอย่างดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคดเมียมผสมหินฟอสเฟต 30 %)

ตัวอย่างดินที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคดเมียมในถุงพลาสติก PE ทั้ง 7 ตัวอย่าง หมักทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 เดือนก่อนจะนำไปทดสอบการสกัดลำดับส่วนและการชะละลายต่อไป

ย. 3530

2582

3.2.1.1 องค์ประกอบของเถ้าลอย

เถ้าลอยมีลักษณะเป็นอนุภาคกลมมีขนาดอยู่ในช่วง 0.5-100 ไมโครเมตร ประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ดังนั้นจึงเป็นแหล่งของอะลูมิเนียมและซิลิกอนที่ดี นอกจากนี้ยังมี Mg, Ti, Na, K, S และ P เป็นต้น นอกจากนี้ชั้นคุณภาพการใช้เถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM แบ่งได้เป็น 2 Class ดังนี้ Class F จะต้องมีอนุภาค เล็กกว่า 5 ไมครอนร้อยละ 90, Class C จะต้องมีอนุภาค เล็กกว่า 5 ไมครอนร้อยละ 93 ขึ้นไป

ตารางที่ 3.2 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน

	Class F	Class F	Class C	Class C
	low - Fe	high - Fe	high - Ca	low - Ca
SiO_2	46-57	42-54	25-42	46-59
Al_2O_3	18-29	16.5-24	15-21	14-22
Fe_2O_3	16/06	16-24	50-10	13/05
CaO	1.8-5.5	1.3-3.8	17-32	16/08
MgO	0.7-2.1	0.3-1.2	4-12.5	3.2-4.9
K_2O	1.9-2.8	2.1-2.7	0.3-1.6	0.6-1.1
Na_2O	0.2-1.1	0.2-0.9	0.8-6.0	1.3-4.2
SO_3	0.4-2.9	0.5-1.8	0.4-5.0	0.4-2.5
LOI	0.6-4.8	1.2-5.0	0.1-1.0	0.1-2.3
TiO_2	1-2	1-1.5	<1	<1

3.2.1.2 องค์ประกอบของหินฟอสเฟต

หินฟอสเฟต (Phosphate rock) หินฟอสเฟตเกิดจากการสะสมตัวกันของแร่ฟอสเฟต ฟอสเฟตหรือฟอสฟอไรต์ (Phosphate or Phosphorite) เป็นคำที่มีความหมายเหมือนกัน กล่าวคือ เป็นกลุ่มของแร่ที่มีอนุภาครดฟอสฟอริก (PO_4), เป็นองค์ประกอบ เช่น แร่อะพาไทต์ เป็นต้น หินฟอสเฟตที่ประกอบด้วยแร่อะพาไทต์ (Apatite) มีอยู่ 3 ชนิด ซึ่งอยู่ในรูปของผลึกแบบสมสัณฐาน (Isomorphous) ถือเป็นผลึกที่มีโครงสร้างเหมือนกันแต่มีสูตรเคมีต่างกัน ได้แก่ ฟลูอออะพาไทต์ (Fluorapatite : $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$), คลออะพาไทต์ (Chlorapatite : $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$), ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite : $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$)

หินฟอสเฟตส่วนใหญ่มักพบแร่คาร์บอนเนตฟลูอออะพาไทต์เป็นองค์ประกอบ แร่อะพาไทต์ชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันในชื่อของแร่แฟรงโคไลต์ (Francolite) ซึ่งเป็นวัตถุบัพัณฐานของสารประกอบที่มีธาตุฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นที่ต้องการต่อวงการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่มาก เมื่อพบแร่ที่มีลักษณะทางกายภาพเหมือนแร่อะพาไทต์แต่ไม่สามารถระบุชื่อให้ชัดเจนได้ก็เรียกชื่อว่าแร่คอลโลเฟน (Collophane) ธาตุแคลเซียม (Ca) ธาตุฟอสฟอรัส หรืออนุภาครดฟอสเฟต (P or PO_4) และธาตุฟลูออรีน (F) อาจถูกแทนที่โดยธาตุอื่นได้

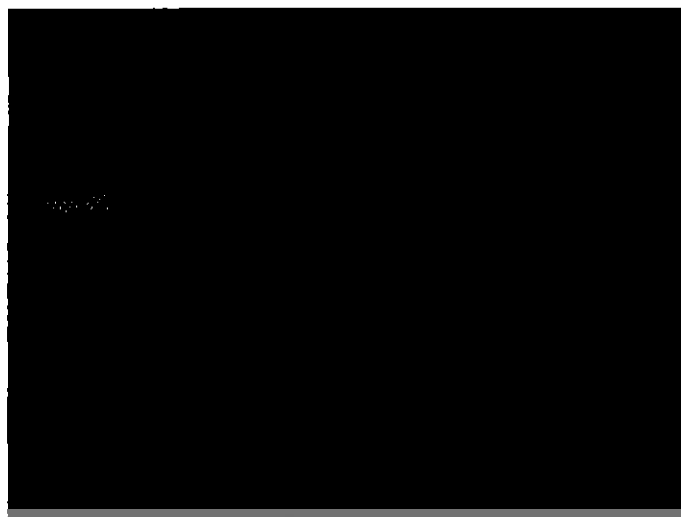
3.2.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ / เคมีของดิน

3.2.1.1 การทดสอบความชื้นของดิน

ASTM D 2216 - 98 Test Method for Laboratory Determination of Water

(Moisture) Content of Soil and rock by mass

ขั้นตอนที่ 1 ทำความสะอาด และเช็ดกระป๋องเก็บตัวอย่างดินพร้อมฝาปิดให้แห้ง แล้วนำกระป๋องเก็บตัวอย่างดินพร้อมฝาปิดไปชั่งน้ำหนัก บันทึกผลน้ำหนักกระป๋องที่ได้ดังรูปที่



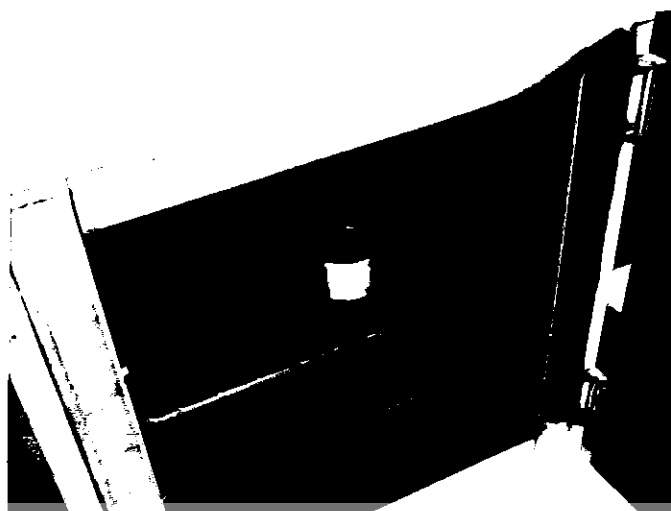
รูปที่ 3.9 แสดงการทำความสะอาดกระป๋องเก็บตัวอย่างดิน

ขั้นตอนที่ 2 เลือกตัวอย่างดินที่จะทำการทดลองอย่างน้อย 3 – 5 ตัวอย่าง บรรจุลงในกระป๋องเก็บตัวอย่างแล้วปิดฝาทันที นำไปชั่งน้ำหนัก (ควรให้น้ำหนักของแต่ละตัวอย่างมีความใกล้เคียงกัน และไม่ควรมีน้อยกว่า 100 กรัม) บันทึกผลน้ำหนักกระป๋องกับน้ำหนักดินเปียกที่ได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงการบรรจุดินลงกระป๋องเก็บตัวอย่างดิน

ขั้นตอนที่ 3 นำกระป๋องเก็บตัวอย่างดินเข้าสู่อบโดยนำฝากระป๋องวางไว้ได้กระป๋องก่อน และใช้อุณหภูมิในการอบที่ 105 ± 5 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 16 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักของดินไม่เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงการนำกระป๋องเก็บตัวอย่างดินเข้าสู่ตูบ

ขั้นตอนที่ 4 นำกระป๋องเก็บตัวอย่างดินออกจากตูบ แล้วนำฝากระป๋องมาปิดไว้ โดยทิ้งไว้ให้กระป๋องเย็นก่อน (สามารถจับได้ด้วยมือเปล่า) จึงนำมาชั่งน้ำหนัก บันทึกผลน้ำหนัก กระป๋องกับน้ำหนักดินแห้งที่ได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงการชั่งน้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่างดิน

3.2.1.2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

ASTM D 854 – 00 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer

ขั้นตอนที่ 1 การสอบเทียบ (Calibrate) ขวดพลาสติกก่อนหรือหลังการทดลอง วัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำในขวดพลาสติก (ที่ขีดปริมาตร 500 ซม³) และ

น้ำหนักขวดที่อุณหภูมิต่างๆกัน (ในช่วงที่ทำการทดลอง) สำหรับอ่านค่าน้ำหนักของน้ำในขวดพลาสติกที่อุณหภูมิทดลอง

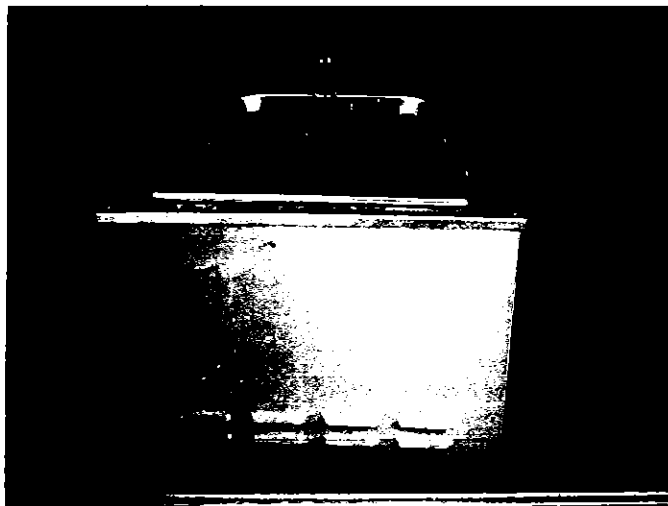
ก ทำความสะอาดขวดแก้วพลาสติกที่จะใช้ทำการทดลอง

ข เติมน้ำกลั่นในขวดประมาณ $3/4$ ของคอขวด (เพื่อไม่ให้น้ำเดือดขวดแก้วจะแตก) ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงระดับน้ำกลั่น 3 ใน 4 ส่วนของคอขวด

ค ไล่อากาศในน้ำ ด้วยการค้ำน้ำให้เดือดในเตาบนเสน หรือเตาแผ่นร้อน (Hot Plate) ประมาณ 10 นาทีนำขวดแก้วลงจากเตา เติมน้ำกลั่นที่ค้ำไล่อากาศทิ้งไว้แล้วลงในขวดแก้วพลาสติกให้เต็มด้วยวิธีการลัดน้ำ (Siphon) จุ่มปลายสายยางลงใต้ผิวน้ำเพื่อไม่ให้อากาศเข้าไปผสมในน้ำอีก ปลอຍให้เย็น ถ้าต้องการให้เย็นเร็ว อาจแช่ในอ่างน้ำ (Water Bath) จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 40-50 องศาเซลเซียส ตรวจสอบว่าอุณหภูมิของน้ำในขวดแก้วเท่ากันทุกระดับถ้าไม่เท่ากันคลึงขวดเอียงไปมาหรือใช้หลอดแก้วคนดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงการไล่อากาศในน้ำด้วยการค้ำ

ง แต่งขอบน้ำให้อยู่ที่ขีดบอกระดับ 500 ซม³ สังเกตขอบล่างของ
โถ้งผิวน้ำขีดขอบภายนอก และภายในเหนือผิวน้ำให้แห้งดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงการปรับปริมาตรน้ำ 500 ซม³

จ นำขวดแก้วและน้ำ ขึ้นชั่ง และวัดอุณหภูมิน้ำตรวจสอบอีกครั้งว่า
อุณหภูมิของน้ำในขวดเท่ากัน ทุกระดับหรือไม่ ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงการซังขวดแก้วและน้ำ

ช ทำการทดลองในข้อ 4-5 อีก 3-4 ครั้งในช่วงอุณหภูมิจากประมาณ 40 (หรือ 50) องศา จนถึงอุณหภูมิห้อง ถ้าต้องการให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของห้อง ใช้น้ำแข็งผสมในอ่างแช่น้ำ แต่ต้องระวังขณะอ่านค่า อุณหภูมิทดลองจะต้องกวนน้ำ (แบบไม่ให้อากาศเข้าไปผสม) ให้มีอุณหภูมิเท่ากันทั่วขวด

ขั้นตอนที่ 2 นำดินใส่ในขวดแก้วพลาสติกและใส่น้ำลงไปประมาณ 3 ใน 4 ส่วนของปริมาตรขวด โดยให้ดินจมอยู่ใต้น้ำทั้งหมดและอย่าให้ดินติดอยู่ข้างๆ ขวดดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงการนำดินใส่ขวดแก้วฟลาส 3 ใน 4 ส่วนของ
ขวดปรับปริมาตร

ขั้นตอนที่ 3 ทำการไล่ฟองอากาศโดยใช้ ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) แรงดูด 10 - 20 นิ้วปรอท ประมาณ 4 - 5 นาที หรือนำไปกวนในน้ำร้อนอย่างน้อย 10 นาที หรือจะทำทั้งสองอย่างควบคู่กันไปก็ได้โดยใช้ปั๊มสุญญากาศไม่น้อยกว่า 10 นาทีแล้วจึงกวนในน้ำร้อนอีกประมาณ 10 นาทีพร้อมกับกลิ้งขวดไปมาหลายรอบทำเช่นนี้สลับกันไปเรื่อยๆ และคอยสังเกตว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นอีกหรือไม่ทำงานกระทั่งฟองอากาศหมดไปซึ่งต้องใช้เวลาและความละเอียดในการสังเกตดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงการไล่ฟองอากาศโดยนำไปกวนในน้ำร้อน

ขั้นตอนที่ 4 หลังจากไล่ฟองอากาศหมดแล้ว ทำการเติมน้ำกลั่นให้ระดับท้องน้ำอยู่ที่ขีด 50 มิลลิลิตรพอดี ในการเติมน้ำกลั่นนี้ควรใช้หลอดและปล่อยน้ำกลั่นจากหลอดโดยจุ่มปากหลอดให้อยู่ใต้ระดับน้ำในขวดฟลาสเพื่อป้องกันอากาศลงไปอีกอีก แล้วตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องทดสอบจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำใน Flask เท่ากับอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิที่ต้องการ (โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์คอยเช็คอยู่เสมอ) และคอยสังเกตว่าถ้าระดับในขวดฟลาสต่ำกว่าขีด 500 มิลลิลิตร ก็ให้เติมน้ำกลั่นให้ท้องน้ำพอดีกับขีดอยู่เสมอ ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงการวัดอุณหภูมิของน้ำ

ขั้นตอนที่ 5 นำขวดฟลาสไปชั่ง จะได้เป็นน้ำหนักของขวดฟลาส + น้ำ + ดิน (Flask + Water + Soil) แล้วจึงทำการวัดอุณหภูมิโดยจุ่มเทอร์โมมิเตอร์ให้อยู่ประมาณกึ่งกลางกระเปาะของขวด Flask คอยจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ แล้วจึงบันทึกค่าอุณหภูมินี้ไว้หลังจากนั้น

นำไปเทใส่ภาชนะโดยต้องเทดินออกให้หมด จนกระทั่งขวด Flask สะอาด เสร็จแล้วจึงนำไป
อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียสโดยทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน



รูปที่ 3.20 แสดงการชั่งน้ำหนัก Flask + Water + Soil

ขั้นตอนที่ 6 นำดินที่อบแห้งแล้วไปชั่งแล้วบันทึกค่า เมื่อลบน้ำหนักภาชนะออก
จะได้เป็นน้ำหนักของดินแห้ง ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงการชั่งดินที่อบแห้งแล้ว

3.2.1.3 การทดสอบหาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน

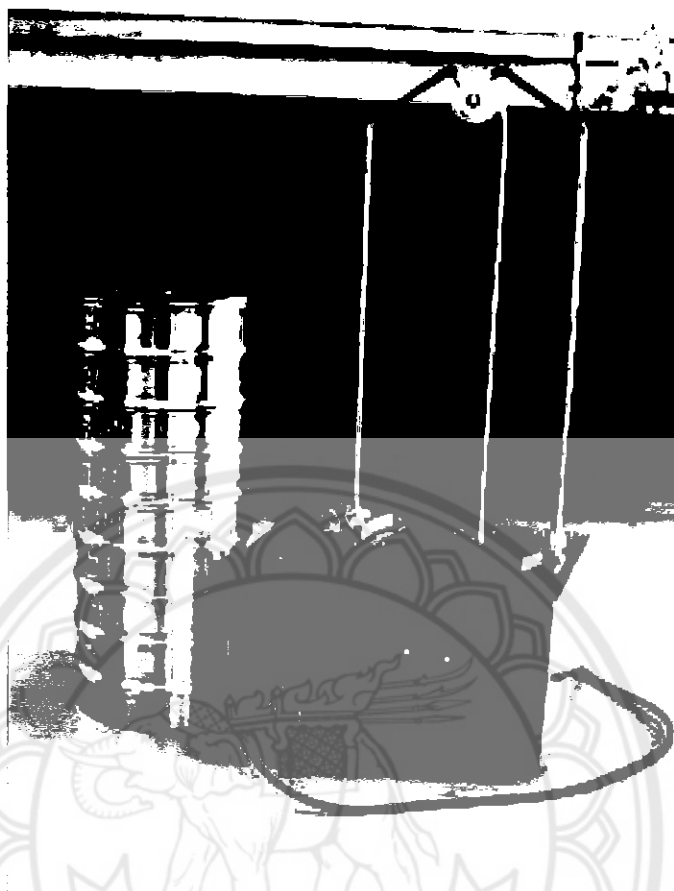
ASTM D - 422 Standard Test Method of Particle Size Analysis of Soils

ขั้นตอนที่ 1 ทำความสะอาดตะแกรงทั้งหมดด้วยแปรงทำความสะอาด แล้วทำการชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละเบอร์บันทึกค่า (ชั่งน้ำหนักของ Pan ด้วย)



รูปที่ 3.22 แสดงการชั่งน้ำหนักตะแกรง

ขั้นตอนที่ 2 นำตะแกรงมาเรียงซ้อนกันโดยให้ตะแกรงที่มีขนาดช่องใหญ่อยู่บน แล้วเรียงขนาดเล็กลงมาตามลำดับจนถึงตะแกรงขนาดเล็กที่สุด ดังนี้ No. 3/8, 4, 10, 20, 40, 100, 200 และ Pan



รูปที่ 3.23 แสดงการเรียงขนาดตะแกรง

ขั้นตอนที่ 3 นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้เทใส่ลงบนตะแกรงชั้นบนสุด ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่องเขย่า ใช้เวลาในการเขย่าอย่างน้อย 10 นาที เสร็จ แล้วนำตะแกรงไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักตะแกรงรวมกับดินที่ค้างบนตะแกรง นำดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงออกทิ้งแล้วทำความสะอาดตะแกรงให้เรียบร้อย



รูปที่ 3.24 แสดงการเขย่าตะแกรง

3.2.1.4 การวัดค่าพีเอช (Dewis and Freitas, 1976)

ขั้นตอนที่ 1 ชั่งตัวอย่างดินมาประมาณ 10 กรัม

ขั้นตอนที่ 2 เติมน้ำกลั่น 20-25 มิลลิลิตร กรณีที่เป็นตัวอย่างตะกอนดินในเขตน้ำจืด ถ้าหากว่าเป็นตัวอย่างที่เก็บจากบริเวณที่น้ำมีความเค็มใช้สารละลายโปแทสเซียมคลอไรด์ 1 นอร์มอล จากนั้นกวนให้เนื้อตะกอนดินผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 3 ทิ้งไว้ประมาณ 20-30 นาที หรือนำไปเหวี่ยงด้วยปั่นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 2000-3000 รอบ/นาที

ขั้นตอนที่ 4 วัดค่าพีเอชจากสารละลายใสที่อยู่ส่วนบนด้วยวิธีการเดียวกันกับการวัดค่าพีเอชของน้ำ

3.2.1.5 การวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 1 ชั่งตัวอย่างดินมาประมาณ 10 กรัม

ขั้นตอนที่ 2 เติมน้ำกลั่น 20-25 มิลลิลิตร

ขั้นตอนที่ 3 ทิ้งไว้ประมาณ 20-30 นาที หรือนำไปเหวี่ยงด้วยปั่นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 2000-3000 รอบ/นาที

ขั้นตอนที่ 4 วัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าด้วยวิธีการเดียวกันกับการวัดค่าพีเอชของน้ำ

3.2.1.6 การวิเคราะห์หาสารอินทรีย์ด้วยวิธีการเผา (Ignition loss method)

ขั้นตอนที่ 1 ชั่งตัวอย่างตะกอนดินแห้งประมาณ 5 กรัม

ขั้นตอนที่ 2 นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง (อบพร้อมกับครุชี-เบล) แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถสุญญากาศ

ขั้นตอนที่ 3 ชั่งน้ำหนักครุชีเบลแล้วจกบันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้

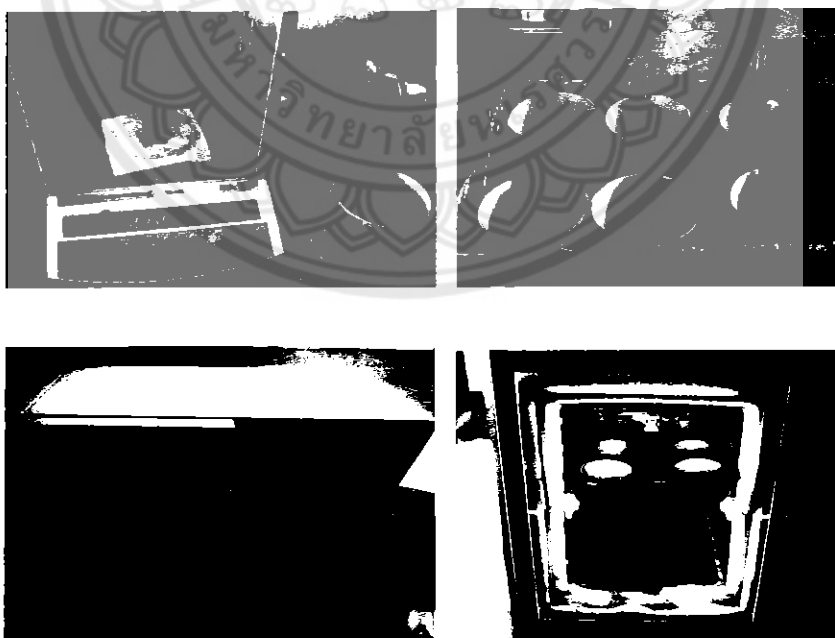
ขั้นตอนที่ 4 ใส่ตะกอนดินที่อบแห้งแล้วลงในครุชีเบลให้ได้น้ำหนักประมาณ 2 กรัม ชั่งน้ำหนักจกบันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้

ขั้นตอนที่ 5 นำไปเผาในเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 6 ตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งเย็น แล้วใส่ในโถสุญญากาศ

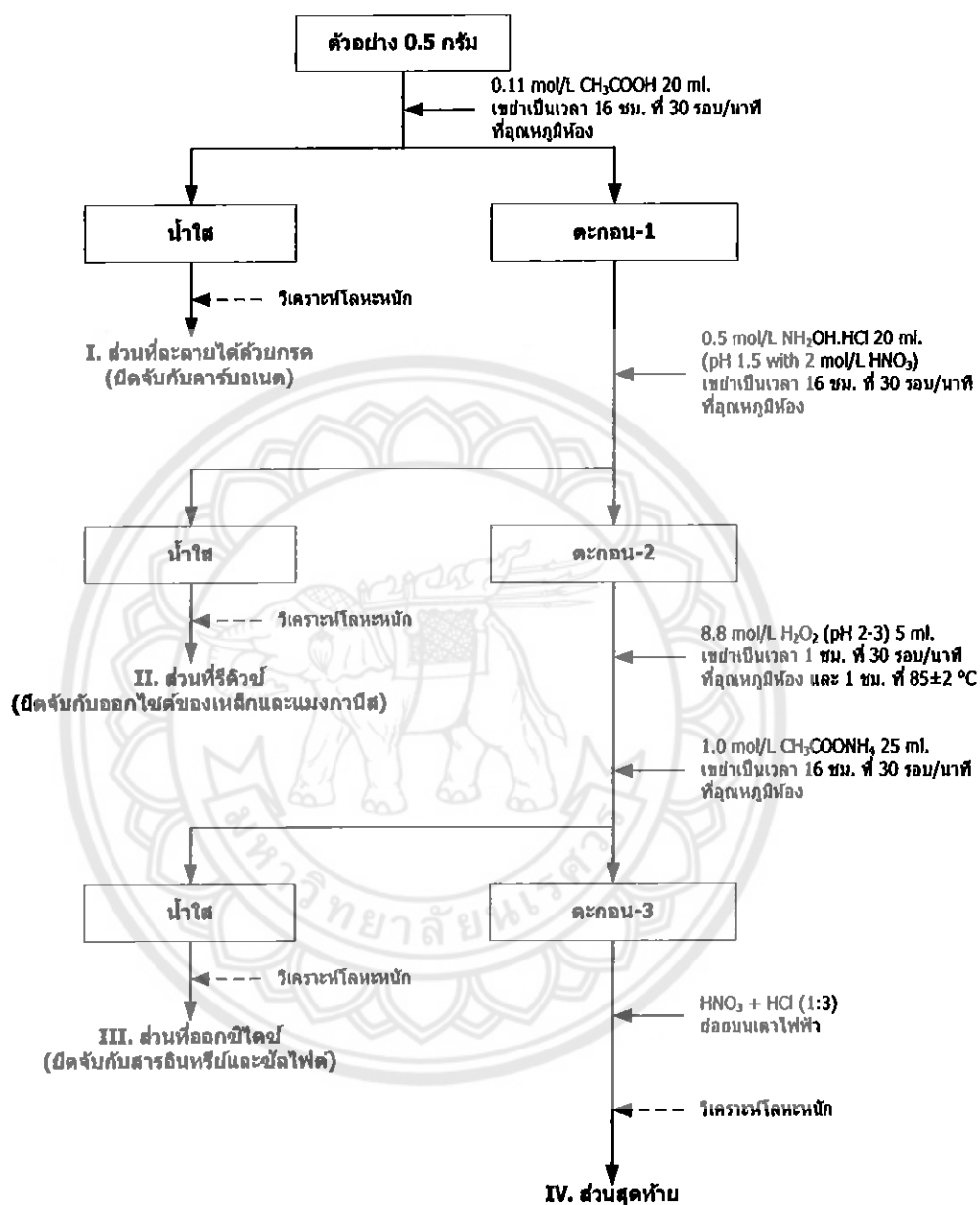
ขั้นตอนที่ 7 ชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้

ขั้นตอนที่ 8 นำไปคำนวณหาปริมาณสารอินทรีย์



รูปที่ 3.25 แสดงขั้นตอนการหาสารอินทรีย์ด้วยวิธีการเผา

3.2.3 การสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified-BCR



รูป 3.26 การสกัดด้วยวิธี Modified-BCR Sequential extraction

3.2.3.1 วิธีการทดลองการสกัดแยกด้วยวิธี Modified –BCR Sequential extraction

ขั้นตอนที่ 1

- นำดินมา 0.5 g ใส่ในหลอด Centrifuge ขนาด 50 ml
- เติม 20 ml ของ 0.11 mol/L CH_3COOH
- เขย่า 30 ± 10 rpm ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
- นำไป Centrifuge ที่ 3000 rpm เป็นเวลา 20 นาที
- แยกของเหลวใสๆ ใส่ในหลอดต่างหาก ปรับให้มีปริมาตรเป็น 50 ml ด้วย 5%

HNO_3 เก็บที่อุณหภูมิ 4 °C

- ล้างดิน โดยการเติมน้ำ DI ลงในหลอดเดิมที่มีดิน 10 ml
- เขย่าเป็นเวลา 15 นาที
- นำไป Centrifuge ที่ 3000 rpm เป็นเวลา 20 นาที
- ค่อยๆ เทน้ำ DI ทิ้งไป ให้เหลือแต่ดิน

ขั้นตอนที่ 2

- นำหลอดดินจากขั้นตอนที่ 1 เติม 0.5 mol/L $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ ปริมาณ 20 ml
- เขย่า 30 ± 10 rpm เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
- แยกของเหลวใสๆ ด้วยการ Centrifuge เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1
- ทำการล้างดินด้วยขั้นตอนเดียวกับขั้นตอนที่ 1

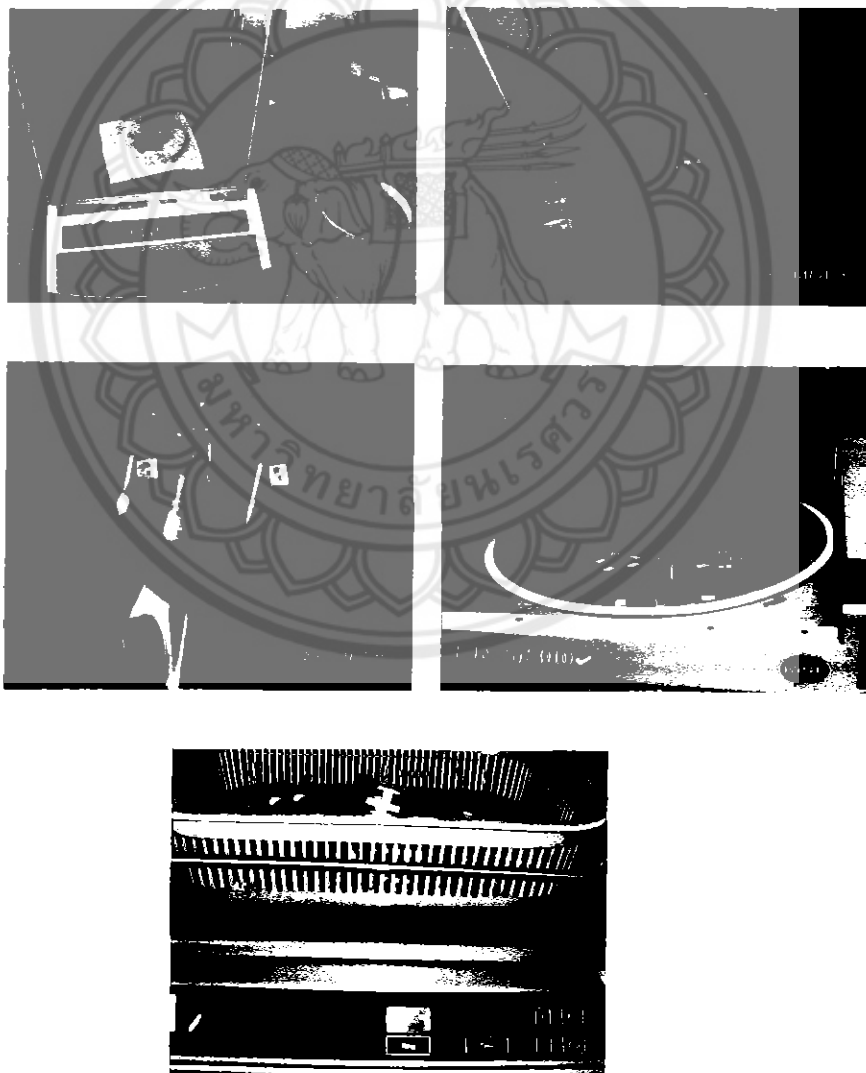
ขั้นตอนที่ 3

- นำหลอดดินจากขั้นตอนที่ 2 เติม 5 ml 8.8 mol/L H_2O_2
- ปิดฝาหลวมๆ เขย่าทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง
- และเขย่าอีก 1 ชั่วโมง ที่ 85 ± 2 °C ใน Water bath
- เมื่อครบ 30 นาที ให้เติม 8.8 mol/L อีก 5 ml จนครบ 1 ชั่วโมง
- จนกระทั่งเกือบแห้ง แล้วเอาตัวอย่างออกทิ้งไว้ให้เย็น
- เติม 25 ml 1.0 mol/L $\text{CH}_3\text{COONH}_4$
- เขย่าเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- แยกของเหลวใสๆ ด้วยการ Centrifuge เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1

- ทำการล้างดิน ด้วยขั้นตอนเดียวกับขั้นตอนที่ 1

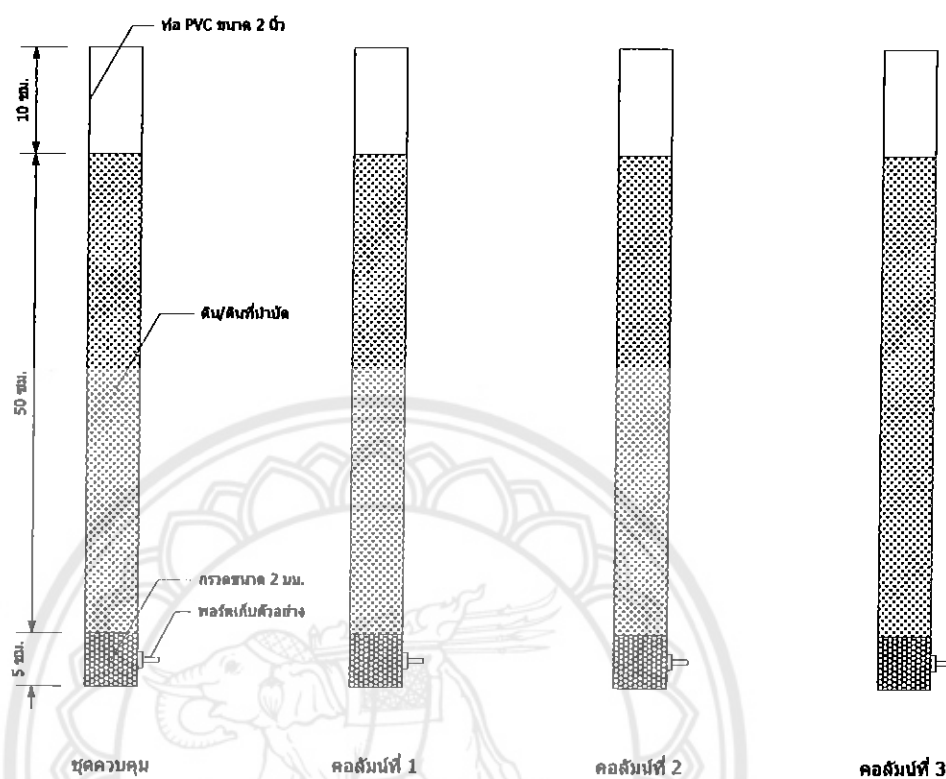
ขั้นตอนที่ 4

- นำดินจากขั้นตอนที่ 3 ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 ml (ให้หมด)
- ทำการย่อยดินด้วย $\text{HNO}_3 : \text{HCl}$ (1 : 3) เช่นเดียวกับการย่อยดิน
- นำไปย่อยบนเตา ปล่อยให้สารละลายค่อยๆ เคี้ยว
- เติม $\text{HNO}_3 : \text{HCl}$ เข้าไปอีก และทำการย่อยต่ออีก ทั้งหมด 3 รอบ
- นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 42
- ปรับปริมาตรให้เป็น 50 ml ด้วย 5% NH_4OH เก็บที่อุณหภูมิ 4°C



รูปที่ 3.27 วิธีการทดลองการสกัดแยกด้วยวิธี Modified-BCR

3.2.4 การทดสอบชะละลาย



รูปที่ 3.28 คอลัมน์การทดสอบชะละลาย

3.2.3.1 วิธีการทดลองการชะละลาย

นำดินที่ผสมตัวอย่างตามสัดส่วนแล้วจากรูปที่ 3.2.1 ในถุงหลังจากหมักครบ 1 เดือนแล้วมาใส่ในคอลัมน์สูง 50 เซนติเมตร ประมาณ 2.6 กิโลกรัม ที่ได้คำนวณปริมาตรไว้ขั้นตอนต่อไปคือการชะน้ำ โดยน้ำที่ทำการชะมีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง คือ น้ำกลั่น pH เท่ากับ 8.27, สารละลาย EDTA 5 มิลลิโมล, สารละลาย EDTA 10 มิลลิโมล

ปริมาตรน้ำที่ใช้ชะตัวอย่างดินคิดจากปริมาณน้ำฝนสูงสุดรายปีของจังหวัดพิษณุโลกเท่ากับ 2428.4 มิลลิเมตร (ที่มา: ศูนย์อุทกวิทยาและบริหารน้ำภาคเหนือตอนล่าง จังหวัดพิษณุโลก) แล้วนำค่าน้ำฝนสูงสุดรายปีมาคำนวณปริมาตรน้ำที่ใช้ชะในคอลัมน์เท่ากับ 55 มิลลิลิตร โดยคิดว่าฝนตกประมาณ 3 เดือนต่อปี ขั้นตอนการชะน้ำมี ดังนี้

สัปดาห์ที่ 1 เริ่มต้นด้วยการชะน้ำกลั่นโดยใช้ปริมาตรน้ำชะเท่ากับ 55 มิลลิลิตร ทำการชะทุกวันและเก็บน้ำ 2 วันต่อ 1 ครั้ง โดยจะเก็บน้ำทั้งหมด 4 ตัวอย่างจลปริมาตรน้ำที่ได้จากการชะทุกครั้งหลังเก็บจากนั้นนำน้ำที่ได้จากการชะมารองด้วยกระดาษกรองโดยเติมกรด HNO_3 2.50 มิลลิลิตร เพื่อรักษาระดับ pH ให้เป็นกรด และปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตรแล้วเก็บใส่ขวดพลาสติกขนาด 60 มิลลิลิตรนำไปแช่ตู้เย็นเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารละลายแคลเซียมด้วยเครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrometry)

สัปดาห์ที่ 2 หลังจากชะน้ำกลั่นเสร็จแล้วต่อไปทำการชะสารละลาย EDTA 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยใช้ปริมาตรสารละลาย EDTA ชะเท่ากับ 55 มิลลิลิตรทำการชะทุกวันและเก็บน้ำ 2 วันต่อ 1 ครั้ง โดยจะเก็บน้ำทั้งหมด 4 ตัวอย่างจลปริมาตรน้ำที่ได้จากการชะทุกครั้งหลังเก็บจากนั้นนำน้ำที่ได้จากการชะมารองโดยเติมกรด HNO_3 2.50 มิลลิลิตร เพื่อรักษาระดับ pH ให้เป็นกรด และปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตรแล้วเก็บใส่ขวดพลาสติกขนาด 60 มิลลิลิตรนำไปแช่ตู้เย็นเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารละลายแคลเซียมด้วยเครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrometry)

สัปดาห์ที่ 3 หลังจากชะสารละลาย EDTA 5 มิลลิโมลเสร็จแล้วต่อไปทำการชะสารละลาย EDTA 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยใช้ปริมาตรสารละลาย EDTA ชะเท่ากับ 55 มิลลิลิตรทำการชะทุกวันและเก็บน้ำ 2 วันต่อ 1 ครั้ง โดยจะเก็บน้ำทั้งหมด 4 ตัวอย่างจลปริมาตรน้ำที่ได้จากการชะทุกครั้งหลังเก็บจากนั้นนำน้ำที่ได้จากการชะมารองโดยเติมกรด HNO_3 2.50 มิลลิลิตร เพื่อรักษาระดับ pH ให้เป็นกรด และปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตรแล้วเก็บใส่ขวดพลาสติกขนาด 60 มิลลิลิตรนำไปแช่ตู้เย็นเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารละลายแคลเซียมด้วยเครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrometry)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ / เกล็ดของดิน

4.1.1 การทดลองหาความชื้นในมวลดิน

จากการวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นในมวลดิน ที่ได้ทำการทดลองตัวอย่างดินทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ได้ผลดังนี้ คือ ตัวอย่างที่ 1 เท่ากับ 14.17, ตัวอย่างที่ 2 เท่ากับ 16.25 และ ตัวอย่างที่ 3 เท่ากับ 16.23 ผลค่าเฉลี่ยทั้งหมด เท่ากับ 16.16 % ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาความชื้นในมวลดิน

Sample No.	1	2	3
Moisture Content (%)	14.17	16.25	16.23
Average			16.16

4.1.2 การทดลองหาสารอินทรีย์ในดิน

จากการวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในดิน ที่ได้ทำการทดลองตัวอย่างดินทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ได้ค่าตามตารางที่ 4.2 ดังนี้ คือ ตัวอย่างที่ 1 เท่ากับ 2.47, ตัวอย่างที่ 2 เท่ากับ 2.53 และ ตัวอย่างที่ 3 เท่ากับ 2.48 ผลค่าเฉลี่ยทั้งหมด เท่ากับ 2.49 % ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์หาสารอินทรีย์ในดิน

ตัวอย่าง	ปริมาณสารอินทรีย์ (%)
1	2.47
2	2.53
3	2.48
Average	2.49

4.1.3 การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของดิน

จากการวิเคราะห์หาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน ที่ได้ทำการทดลองตัวอย่างดินทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ได้ค่าตามตารางที่ 4.3 ดังนี้ คือ ตัวอย่างที่ 1 เท่ากับ 2.576, ตัวอย่างที่ 2 เท่ากับ 2.537 และ ตัวอย่างที่ 3 เท่ากับ 2.566 ผลค่าเฉลี่ยทั้งหมด เท่ากับ 2.560 % ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หาความถ่วงจำเพาะของดิน

Trial No.	1	2	3
Specific Gravity	2.576	2.537	2.566
Average Specific Gravity	2.560		

4.1.4 การทดลองหาค่า pH ของดิน

จากการวิเคราะห์หาค่า pH ของดิน ที่ได้ทำการทดลองด้วยดินทั้งหมด 3 ตัวอย่างได้ค่าตามตารางที่ 4.4 ดังนี้ คือ ตัวอย่างที่ 1 เท่ากับ 7.30, ตัวอย่างที่ 2 เท่ากับ 7.07 และ ตัวอย่างที่ 3 เท่ากับ 7.15 ผลค่าเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 7.17 ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์หาค่า pH ของดิน

ตัวอย่างที่	ค่า PH
1	7.30
2	7.07
3	7.15
Average	7.17

4.1.5 การทดลองหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดิน

จากการวิเคราะห์หาค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดิน ที่ได้ทำการทดลองด้วยดินทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ได้ค่าตามตารางที่ 4.5 ดังนี้ คือ ตัวอย่างที่ 1 เท่ากับ 70.20, ตัวอย่างที่ 2 เท่ากับ 72.10 และ ตัวอย่างที่ 3 เท่ากับ 71.40 ผลค่าเฉลี่ยทั้งหมด เท่ากับ 71.20 $\mu\text{s/cm}$ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์หาค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดิน

ตัวอย่างที่	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ($\mu\text{s/cm}$)
1	70.20
2	72.10
3	71.40
Average	71.20

4.1.6 การทดลองหาขนาดของเม็ดดิน

จากการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดิน ที่ได้ทำการทดลองตัวอย่างทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ได้ค่า % Sand, % Silt และ % Clay ตามตารางที่ 4.6 ดังนี้ คือ ตัวอย่างที่ 1, ตัวอย่างที่ 2 และ ตัวอย่างที่ 3 มีผลค่าเฉลี่ยทั้งหมด เท่ากับ % Sand เท่ากับ 0, % Silt เท่ากับ 87 และ % Clay เท่ากับ 13 % ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดิน

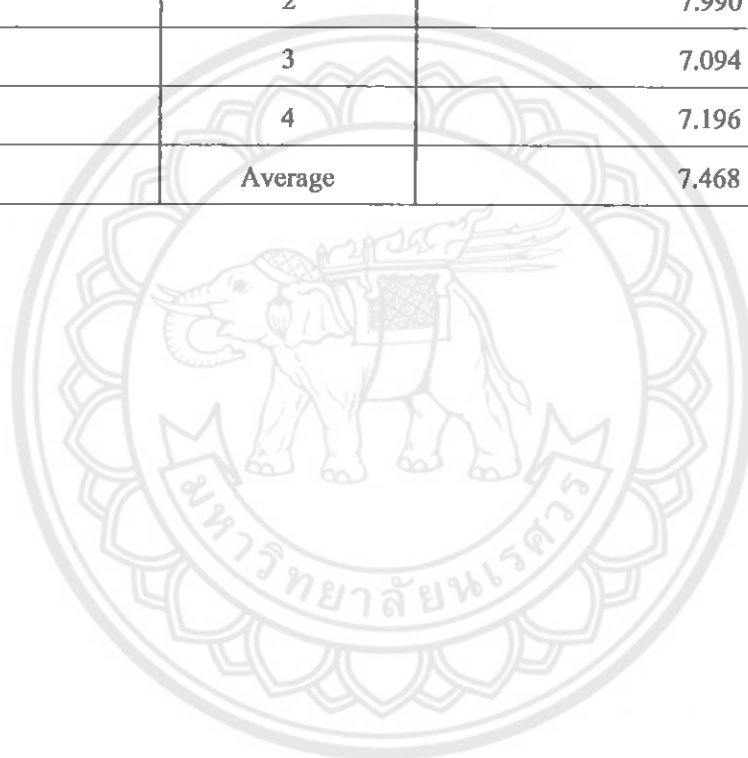
ตัวอย่างที่	% Sand	% Silt	% Clay
1	0	87	13
2	0	87	13
3	0	87	13
Average	0	87	13

4.1.7 การทดลองหาปริมาณแคลเซียมทั้งหมดใน เถ้าลอย และ หินฟอสเฟต

จากการวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมทั้งหมดใน เถ้าลอย และ หินฟอสเฟต ที่ได้ทำการทดลองตัวอย่างทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้ค่าตามตารางที่ 4.7 ดังนี้ คือ เถ้าลอยตัวอย่างที่ 1 เท่ากับ 2.399, เถ้าลอยตัวอย่างที่ 2 เท่ากับ 3.098, เถ้าลอยตัวอย่างที่ 3 เท่ากับ 1.799, ตัวอย่างที่ 4 เท่ากับ 1.400, หินฟอสเฟตตัวอย่างที่ 1 เท่ากับ 7.594, เถ้าลอยตัวอย่างที่ 2 เท่ากับ 7.990, เถ้าลอยตัวอย่างที่ 3 เท่ากับ 7.094 และ ตัวอย่างที่ 4 เท่ากับ 7.196 ผลค่าเฉลี่ยทั้งหมดของเถ้าลอย และ หินฟอสเฟต เท่ากับ 1.824 และ 7.196 ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดใน FA และ PR

	ตัวอย่างที่	ปริมาณแคดเมียม
FA	1	2.399
	2	3.098
	3	1.799
	4	1.400
	Average	1.824
PR	1	7.594
	2	7.990
	3	7.094
	4	7.196
	Average	7.468



4.2 การทดลอง Modified – BCR

นำดินตัวอย่างที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคดเมียมผสม แกลบ และหินฟอสเฟตตามสัดส่วน คือ Control , 10% FA , 20% FA , 30% FA , 10% PR , 20% PR และ 30% PR หลังจากหมักทิ้งไว้ เป็นระยะเวลา 1 เดือน นำมาอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 0.5 g ใส่ในหลอด Centrifuge ทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ขั้นตอนแรก เติม 0.11 mol/L CH_3COOH ปริมาณ 20 ml ทำการเขย่า เป็นเวลา 16 ชั่วโมง แล้วนำไป Centrifuge ที่ 3000 rpm เป็นเวลา 20 นาที แยกของเหลวใสๆ ใส่ในหลอดต่างหาก ปรับให้มี ปริมาตรเป็น 50 ml ด้วย 5% HNO_3 และทำการล้างดินโดยการเติมน้ำ DI , ขั้นตอนที่ 2 นำหลอดดิน จากขั้นตอนที่ 1 เติม 0.5 mol/L $\text{NH}_4\text{OH} \cdot \text{HCl}$ ปริมาณ 20 ml และทำตามขั้นตอนที่ 1 , ขั้นตอนที่ 3 นำหลอดดินจากขั้นตอนที่ 2 เติม 5 ml 8.8 mol/L H_2O_2 ปิดฝาหลวมๆ เขย่าทิ้งไว้ใน Water bath เมื่อ ครบ 30 นาที ให้เติม 8.8 mol/L อีก 5 ml จนครบ 1 ชั่วโมง แล้วเติม 25 ml 1.0 mol/L $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ และทำตามขั้นตอนที่ 1 สุดท้ายขั้นตอนที่ 4 นำดินจากขั้นตอนที่ 3 ทำการย่อยดินด้วย $\text{HNO}_3 : \text{HCl}$ (1 : 3) ทำทั้งหมด 3 รอบ นำไปกรอง ปรับปริมาตรให้เป็น 50 ml ด้วย 5% HNO_3

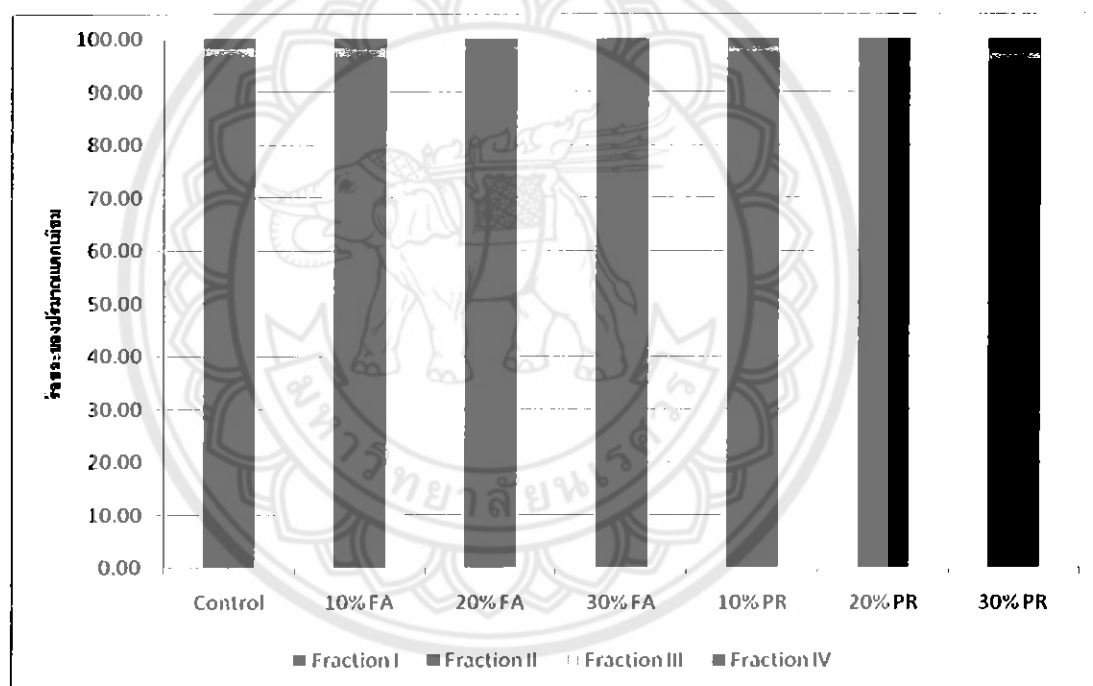
4.1.1 ผลการทดลองการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified - BCR

ตารางที่ 4.8 ปริมาณแคดเมียมจากการสกัดลำดับส่วน มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

	Fraction I	Fraction II	Fraction III	Fraction IV	Total
Control	56.42	18.85	1.43	1.27	77.97
10% FA	55.56	9.06	1.53	1.07	67.21
20% FA	58.45	7.76	0.50	0.90	67.60
30% FA	59.13	8.16	0.07	1.23	68.59
10% PR	54.71	17.15	0.90	1.00	73.75
20% PR	51.22	15.21	0.77	3.05	70.25
30% PR	43.02	17.12	1.00	1.60	62.74

ตารางที่ 4.9 ร้อยละของปริมาณแคะเมียมจากการทดลองการสกัดลำค้ำส่วน

	Fraction I	Fraction II	Fraction III	Fraction IV	Total
Control	72.36	24.18	1.84	1.62	100.00
10% FA	82.66	13.48	2.28	1.59	100.00
20% FA	86.45	11.48	0.74	1.33	100.00
30% FA	86.21	11.89	0.10	1.80	100.00
10% PR	74.18	23.25	1.22	1.35	100.00
20% PR	72.92	21.66	1.09	4.34	100.00
30% PR	68.58	27.28	1.59	2.55	100.00



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการสกัดลำค้ำส่วนด้วยวิธี Modified – BCR

จากรูปที่ 4.1 ผลการสกัดขั้นตอนที่ 1 เพื่อศึกษาปริมาณแคะเมียมที่ติดจับกับ Carbonate โดยใช้ 0.11 mol/L CH_3COOH พบว่าที่สัดส่วน FA 10%, FA 20% และ FA 30% ส่งผลให้แคะเมียมที่ติดจับกับ Carbonate มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ FA ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 82.66, 86.45 และ 86.21 เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 72.36 และที่สัดส่วน 10% PR, 20% PR และ 30% PR พบว่าแคะเมียมที่ติดจับกับ Carbonate มีค่าน้อยลงตามปริมาณ PR ที่เพิ่มขึ้น คือ 74.18, 72.92 และ 68.58 ตามลำดับ

ผลการสกัดขั้นตอนที่ 2 เพื่อศึกษาปริมาณแคดเมียมที่ขี้นจับกับออกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีส โดยใช้ $0.5 \text{ mol/L NH}_4\text{OH.HCl}$ พบว่าชุดควบคุมมีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 24.18 ขณะที่สัดส่วน FA 10% FA 20% และ FA 30% มีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 13.48, 11.48 และ 11.89 ขณะที่สัดส่วน 10% PR, 20% PR และ 30% PR มีแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุม คือเท่ากับร้อยละ 23.25, 21.66, และ 27.28 ตามลำดับ

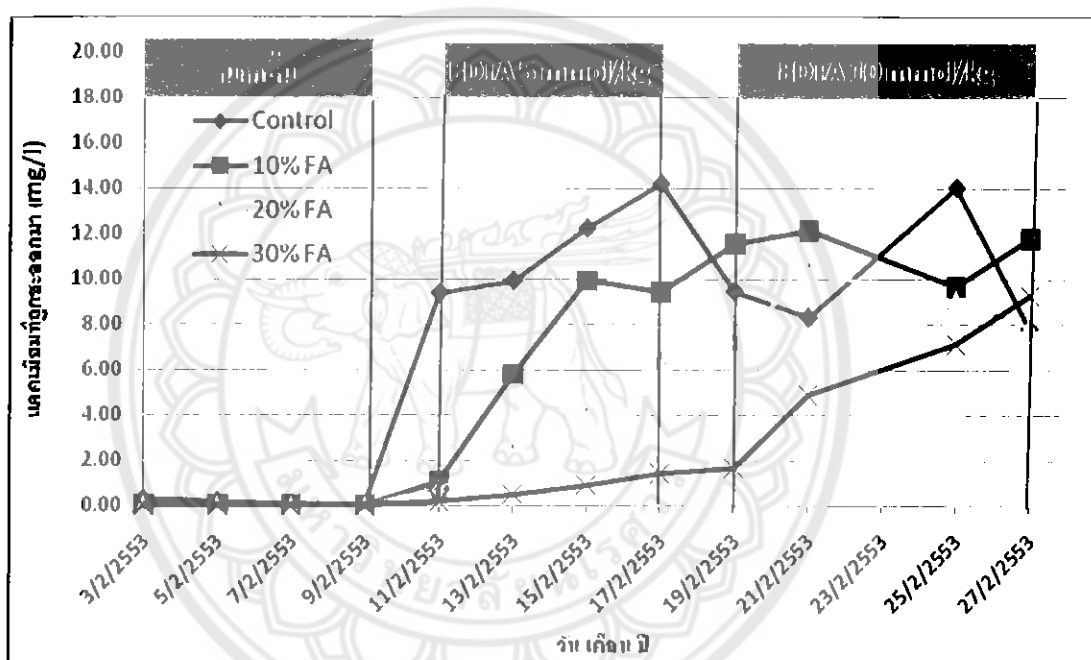
ผลการสกัดขั้นตอนที่ 3 เพื่อศึกษาปริมาณแคดเมียมที่ขี้นจับกับสารอินทรีย์ และซัลไฟด์ โดยใช้ กรด H_2O_2 และ $0.11 \text{ mol/L CH}_3\text{COONH}_4$ พบว่าชุดควบคุมมีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.84 ขณะที่สัดส่วน FA 10%, FA 20% และ FA 30% มีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.28, 0.74 และ 0.10 ขณะที่สัดส่วน 10% PR, 20% PR และ 30% PR มีแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุม คือ เท่ากับร้อยละ 1.22, 1.09 และ 1.59 ตามลำดับ

ผลการสกัดขั้นตอนที่ 4 เพื่อศึกษาปริมาณแคดเมียมที่เหลือสุดท้ายโดยใช้กรด HNO_3 : HCl ในอัตราส่วน 1:3 พบว่าชุดควบคุมมีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.62 ขณะที่ สัดส่วน FA 10%, FA 20% และ FA 30% มีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุม เท่ากับร้อยละ 1.59, 1.33 และ 1.80 ขณะที่สัดส่วน 10% PR, 20% PR และ 30% PR มีแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.35, 4.34 และ 2.55 ตามลำดับ

4.3 การทดสอบชะละลาย

นำดินตัวอย่างที่สังเคราะห์การปนเปื้อนแคดเมียม, ดินที่บำบัดด้วยถ้ำลอย และหินฟอสเฟต ตามสัดส่วน ใส่ถุงพลาสติก PE หมักเป็นระยะเวลา 1 เดือน ใส่ในคอลัมน์สูง 50 เซนติเมตร ประมาณ 2.6 กิโลกรัม ทั้งหมด 7 คอลัมน์ คือ Control, 10% FA, 20% FA, 30% FA, 10% PR, 20% PR และ 30% PR มาทำการชะละลายด้วยน้ำกลั่น, สารละลาย EDTA 5 mmol/kg และสารละลาย EDTA 10 mmol/kg โดยชะที่ปริมาณ 55 มิลลิลิตรทุกวันและเก็บน้ำ 2 วันต่อ 1 ครั้ง

4.2.1 ผลการทดสอบการชะละลายของ Control, 10% FA, 20% FA และ 30% FA

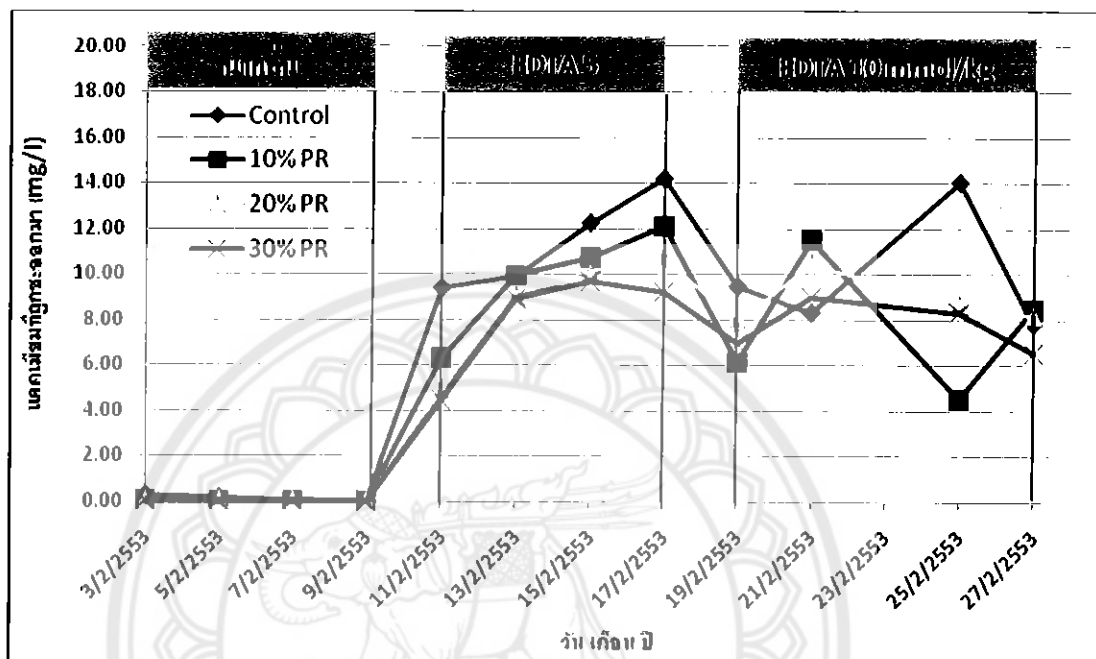


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกจากของ Control, 10% FA, 20% FA และ 30% FA

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าในช่วงที่ใช้การชะละลายด้วยน้ำกลั่น ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกจากคอลัมน์ Control, 10% FA, 20% FA และ 30% FA แทบจะไม่มีแคดเมียมถูกชะออกมาเลย ในช่วงที่ใช้การชะละลายด้วย EDTA 5 mmol/kg ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกมีปริมาณมากขึ้นเรื่อย ๆ และเมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกจากคอลัมน์เรียงจากค่ามากไปหาน้อยจะได้ คือ Control, 10% FA, 20% FA และ 30% FA เรียงตามลำดับ และช่วงที่ใช้ การชะละลายด้วย EDTA 10 mmol/kg ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกจากคอลัมน์ 30% FA มีความเข้มข้นน้อยกว่าจากคอลัมน์ Control, 10% FA, 20% FA ขณะที่คอลัมน์ Control, 10% FA และ 20% FA มีความเข้มข้นอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเป็นผลจากการตกผลึกของ EDTA ในระหว่างที่

ทดสอบการชะละลายที่ความเข้มข้นสูง นอกจากนั้นยังพบว่าดินที่ไม่ได้ทำการบำบัดจะมีความเข้มข้นของแคดเมียมที่ถูกชะละลายออกมามากกว่าดินที่บำบัดด้วยถ้ำลอย

4.2.2 ผลการทดสอบการชะละลายของ Control, 10% PR , 20% PR และ 30% PR



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกของ Control, 10% PR, 20% PR และ 30% PR

จากรูปที่ 4.5 เราจะเห็นได้ว่าในช่วงที่ใช้การชะละลายด้วยน้ำกลั่น ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกจากคอลัมน์ Control, 10% PR, 20% PR และ 30% PR แทบจะไม่มีแคดเมียมถูกชะออกมาเลย ในช่วงที่ใช้การชะละลายด้วย EDTA 5 mmol/kg ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกมีปริมาณมากขึ้นเรื่อย ๆ และเมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกจากคอลัมน์เรียงจากค่ามากไปหาน้อยจะได้ คือ Control, 10% PR, 20% PR และ 30% PR เรียงตามลำดับ และช่วงที่ใช้การชะละลายด้วย EDTA 10 mmol/kg จะ ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกมาจากคอลัมน์ Control , 10% PR , 20% PR และ 30% PR ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำชะละลายมีความเข้มข้นใกล้เคียงกัน ไม่เห็นความแตกต่างชัดเจน นอกจากนั้นยังพบว่าดินที่ไม่ได้ทำการบำบัดจะมีความเข้มข้นของแคดเมียมที่ถูกชะละลายออกมามากกว่าดินที่บำบัดด้วยดินที่บำบัดด้วยหินฟอสเฟต

ผลจากการทดสอบการชะละลาย โดยเฉพาะที่ EDTA 5 mmol/kg พบว่าที่สัดส่วน 30% FA เกิดการชะละลายของแคดเมียมออกมาจากดินในคอลัมน์น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการบำบัดดินด้วย 10% FA และ 20% FA นั้นอาจเป็นเพราะ FA ที่เติมเข้าไปส่งผลให้แคดเมียมในดินยึดจับกับ Carbonates เพิ่มขึ้น ขณะที่แคดเมียมยึดจับกับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส และยึดจับกับสารอินทรีย์และ

ซัลไฟด์มีค่าลดลงตามสัดส่วนของ FA ที่เติมเข้าไป ขณะที่การใช้หินฟอสเฟตในการบำบัด พบว่า การเพิ่มสัดส่วนของหินฟอสเฟตที่เติมเข้าไปส่งผลให้แอมโมเนียถูกชะละลายออกมาน้อยกว่า เล็กน้อยเมื่อเทียบกับชุดควบคุม



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากการสังเคราะห์การปนเปื้อนแอมโมเนียมโดยอาศัยสารละลายแอมโมเนียมไนเตรท ซึ่งจะทำให้ได้ดินที่มีแอมโมเนียมเป็นองค์ประกอบประมาณ 100 มิลลิกรัมแอมโมเนียมต่อกิโลกรัมดิน โดยดินมีคุณสมบัติทางกายภาพ/เคมี คือความถ่วงจำเพาะของดินเท่ากับ 2.56, สภาพการนำไฟฟ้าของดินเท่ากับ 71.20 $\mu\text{s/cm}$, ความชื้นของดินเท่ากับ 16.16 และขนาดของเม็ดดินโดยมี เปอร์เซ็นต์ Silt เท่ากับ 87 เปอร์เซ็นต์, เปอร์เซ็นต์ Sand เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ และ เปอร์เซ็นต์ Clay เท่ากับ 13 เปอร์เซ็นต์, pH เท่ากับ 7.17 และสารอินทรีย์ในดินเท่ากับ 2.49 เปอร์เซ็นต์

5.1.1 การทดสอบ Modified - BCR

5.1.1.1 การสกัดขั้นตอนที่ 1 ประสิทธิภาพในการยึดจับ Carbonate ของถ้ำลอย แปรผันตามกับปริมาณของถ้ำลอย คือ ปริมาณของถ้ำลอยยิ่งสูง ประสิทธิภาพในการยึดจับ Carbonate ก็สูงตาม แต่ประสิทธิภาพในการยึดจับ Carbonate ของ PR แปรผกผันกับปริมาณของหินฟอสเฟต คือ ปริมาณของหินฟอสเฟต ยิ่งสูงประสิทธิภาพในการยึดจับออกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีสยิ่งต่ำ ประสิทธิภาพในการยึดจับ Carbonate ของถ้ำลอย สูงกว่า หินฟอสเฟต

5.1.1.2 การสกัดขั้นตอนที่ 2 ประสิทธิภาพในการยึดจับออกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีสของ FA แปรผกผันกับปริมาณของถ้ำลอย คือ ปริมาณของถ้ำลอยยิ่งสูง ประสิทธิภาพในการยึดจับออกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีสยิ่งต่ำ แต่ประสิทธิภาพในการยึดจับออกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีสของหินฟอสเฟตแปรผันตามกับปริมาณของหินฟอสเฟต คือ ปริมาณของหินฟอสเฟตยิ่งสูง ประสิทธิภาพในการยึดจับออกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีสก็สูงตาม ประสิทธิภาพในการยึดจับออกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีสของหินฟอสเฟต สูงกว่า ถ้ำลอย

5.1.1.3 การสกัดขั้นตอนที่ 3 ประสิทธิภาพในการยึดจับสารอินทรีย์ และซัลไฟด์ ของถ้ำลอย แปรผกผันกับปริมาณของถ้ำลอย คือ ปริมาณของถ้ำลอยยิ่งสูง ประสิทธิภาพในการยึดจับสารอินทรีย์ และซัลไฟด์ยิ่งต่ำ แต่ประสิทธิภาพในการยึดจับสารอินทรีย์ และซัลไฟด์ของหินฟอสเฟต แปรผันตามกับปริมาณของหินฟอสเฟต คือ ปริมาณของหินฟอสเฟตยิ่งสูง ประสิทธิภาพในการยึดจับสารอินทรีย์ และซัลไฟด์ก็สูงตาม

5.1.1.4 การสกัดขั้นตอนที่ 4 ปริมาณของแอมโมเนียมที่เหลือสุดท้ายจากการบำบัดด้วยถ้ำลอย มีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุม ขณะที่ปริมาณของแอมโมเนียมที่เหลือสุดท้ายจากการบำบัดด้วยหินฟอสเฟต มีค่าสูงกว่าจากการบำบัดด้วย ถ้ำลอย

5.1.2 การทดสอบการชะละลาย

5.1.2.1 เถ้าลอย มีประสิทธิภาพในการยึดจับแคลเซียม ทำให้แคลเซียมถูกชะละลายออกจากดินได้น้อยลง

5.1.2.2 การใช้เถ้าลอยบำบัดมีประสิทธิภาพในการยึดจับแคลเซียมสูงกว่าใช้หินฟอสเฟตบำบัด

5.1.2.3 การชะละลายด้วย EDTA ส่งผลให้แคลเซียมชะละลายออกมามากกว่าการใช้น้ำกลั่น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาการชะละลายที่ความเข้มข้นของ EDTA ต่ำ ๆ เพิ่มเติม

5.2.2 การตกผลึกของ EDTA ในระหว่างการทดสอบการชะละลายที่ความเข้มข้น 10 mmol/Kg อาจส่งผลให้ผลการทดสอบคลาดเคลื่อน

5.2.3 การสังเคราะห์การปนเปื้อนแคลเซียม ควรทำการบำบัดดินด้วยวิธีทางเคมี

5.2.4 เปอร์เซ็นต์ Recovery ควรอยู่ในเกณฑ์ 80 – 90 เปอร์เซ็นต์

5.2.5 ควรทำการทดสอบด้านเคมีกับดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่จริง

5.2.6 ควรทำการศึกษาการบำบัดด้วยวิธีอื่น ๆ และศึกษาการชะละลายของโลหะหนักนั้น ๆ เพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

งบประมาณการวิจัย ปีงบประมาณ (2547-2548).คู่มือการทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์. สำนักงาน
กองทุนการวิจัยแห่งชาติ(สกว.)

Abumaizar R.J. and Smith E.H. 1999. Heavy metal contaminants removal by soil washing.
Journal of Hazardous Material. B70: 71-86.

Adriano D.C., Wenzel W.W., Vangronsveld J. and Bolan N.S. 2004. Role of assisted natural
remediation in environmental cleanup. **Geoderma**. 122: 121-142.

Basta N.T. and McGowen S.L. 2004. Evaluation of chemical immobilization treatments for
reducing metal transport in a smelter- contaminated soil. **Environmental Pollution**. 127:
73-82.

Brown S., Christensin B., Lombi E., McLughlin., McGrath S., Colpaert J. and Vangronsveld J.
2005. An inter-laboratory study to test the ability of amendments to reduce the
availability of Cd, Pb, and Zn in situ. **Environmental Pollution**. 138: 34-45.

Cao X., Ma L.Q., Rhue D.R., Appel C.S. 2004. Mechanism of lead, copper and zinc retention by
phosphate rock. **Environmental Pollution**. 131: 435-444.

Chen H.M., Zheng C.R., Tu C. and Shen Z.G. 2000. Chemical method and phytoremediation of
soil contaminated with metals. **Chemosphere**. 41: 229-234.

Chen S.B., Zhu Y.G., Ma Y.B. 2005. The effective of grain size of rock phosphate amendment on
metal immobilization in contaminated soils. **Journal of Harzardous Materials**.

Chen S.B., Zhu Y.G., Ma Y.B. and McKay G. 2006. Effect of bone char application on Pb
bioavailability in Pb-contaminte soil. **Environmental Pollution**. 139: 433-439.

Chen S., Xu M., Ma Y. and Yang J. 2006. Evaluation of different phosphate amendment on
availability of metals in contaminated soil. **Ecotoxicology and Environment Safety**.

Chen Z.S., Lee G.J., Liu J.C. 2000. The effects of chemical remediation treatment on the
extractability and speciation of cadmium and lead in contaminated soils. **Chemosphere**.
41: 235-242.

Hodson M.E., Valsami-Jones E., Cotter-Howells J.D., Dubbin W.E., Kemp A.J., Thornton I.,
Waren A. 2001. Effect of bone meal (calcium phosphate) amendment on metal release
from contaminated soils-a leaching column study. **Environmental Pollution**. 112: 233-
243

- Lee T., Lai H., Chen Z. 2004. Effects of chemical amendments on the concentration of cadmium and lead in long term contaminated soils. **Chemosphere**. 57: 1459-1471.
- Raicevic S., Tadoicic T.K. and Zouboulis A.I. 2005. In situ stabilization of toxic metal in polluted soils using phosphates: theoretical prediction and experiment verification. **Journal of Hazardous Materials**. B117: 41-53.
- Sawyer, C., McCarty, P. and Parkin, G (2003)., "Chemistry for environmental engineering and science", (5th ed)., McGrawhill, Singapore.
- Tang X.Y., Zhu Y.G., Chen S.B., Tang L.L. and Chen X.P. 2004. Assessment of the different phosphorus fertilizers to remediate Pb-contaminated soil using in vitro test. **Environment International**. 30: 531-537.
- United Nation, 2000. **Compendium of soil clean-up technologies and soil remediation companies**. 2nd.
- <http://www.cte.kmutt.ac.th:8080/civillabpro/soillab3.htm>
- <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=7>
- http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=79
- http://www.flyashconcrete.in/fly_ash/nature_composition.htm
- <http://www.thaiengineering.com/webboardold/question.asp?QID=7312>
- <http://www.patchra.net/minerals/MinDesc/sediment11.php>

ภาคผนวก ก

วิธีการทดสอบทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ตารางที่ ก1 แสดงปริมาณน้ำหนักดินแห้งซึ่งใช้ในการร่อนผ่านตะแกรง

ขนาดเม็คดินใหญ่สุด	น้ำหนักตัวอย่างดินอย่างน้อย (กรัม)
3/8 นิ้ว (9.5 มม.)	500
3/4 นิ้ว (19.0 มม.)	1000
1 นิ้ว (25.0 มม.)	2000
1 1/2 นิ้ว (37.5 มม.)	3000
2 นิ้ว (50.0 มม.)	4000
3 นิ้ว (75.0 มม.)	5000

ตารางที่ ก2 ค่าความถ่วงจำเพาะของดินชนิดต่าง ๆ

ชนิดของดิน	ค่าความถ่วงจำเพาะของดิน , Gs
Sand	2.65 - 2.67
Silty Sand	2.67 - 2.70
Inorganic Clay	2.70 - 2.80
Soil with Mica or Iron	2.75 - 3.00
Organic Soil	1.00 - 2.60

ตารางที่ ก3 แสดงค่าตัวแปรปรับแก้, K

อุณหภูมิ °C	ความหนาแน่นของน้ำ, กรัม/ซม ³	ค่าตัวแปรปรับแก้, K
16	0.99897	1.0007
17	0.99880	1.0006
18	0.99862	1.0004
19	0.99843	1.0002
20	0.99823	1.0000
21	0.99802	0.9998
22	0.99780	0.9996
23	0.99757	0.9993
24	0.99732	0.9991
25	0.99707	0.9989
26	0.99681	0.9986
27	0.99654	0.9983
28	0.99626	0.9980
29	0.99597	0.9977
30	0.99567	0.9974

ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ตารางที่ ข1 บันทึกผลการทดลองหาความชื้นในมวลดิน

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	75.6	78.9	76.3
Mass of Can + Dry soil (g)	67.2	69.9	67.7
Mass of Can (g)	14.17	16.25	16.23
Average			16.16

วิธีการคำนวณ

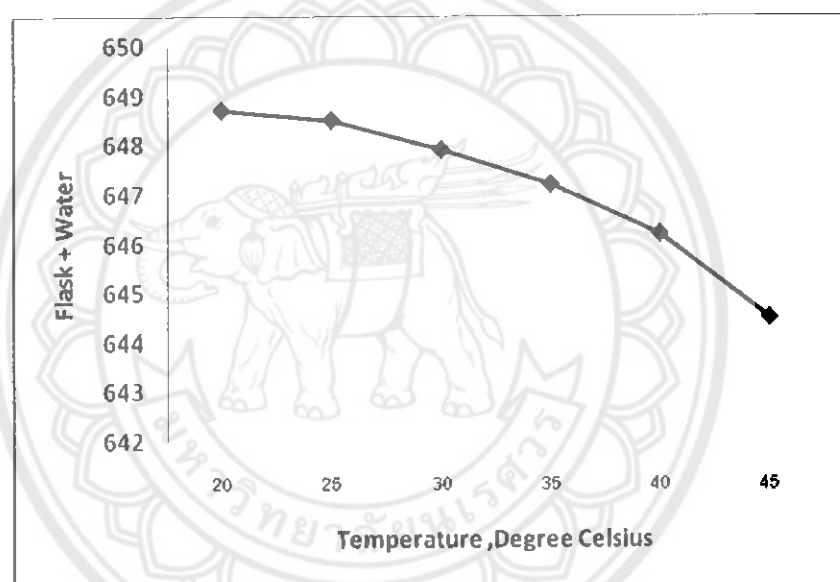
ปริมาณความชื้นในมวลดิน คิดเป็นร้อยละ (Water Content, W %)

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} \times 100 (\%)$$

เมื่อ W_c = น้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่างดิน W_1 = น้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่างดินรวมกับน้ำหนักดินเปียก W_2 = น้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่างดินรวมกับน้ำหนักดินแห้ง

ตารางที่ ข2 บันทึกผลการทดลอง Calibration Data ก่อนหาค่าความถ่วงจำเพาะ

No.	Flask + Water (g)	Temperature (g)
1	644.5	45
2	646.2	40
3	647.2	35
4	647.9	30
5	648.5	25
6	648.7	20



รูปที่ ข1 กราฟ Calibration Data

ตารางที่ ข3 บันทึกผลการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

Trial No.	1	2	3
1. Temperature °C	384	385	480
2. Flask + water g	333.8	334.8	428.2
3. Flask + water + Soil g	50.2	50.2	51.8
4. Container No.	1	2	3
5. Dry Soil + Container g	384	385	480
6. Weight of Container g	333.8	334.8	428.2
7. Dry Soil (W _s) g	50.2	50.2	51.8
8. Correction Factor (G _T)	0.9957	0.9957	0.9957
9. Specific Gravity	2.576	2.537	2.566
10. Average Specific Gravity	2.560		

วิธีการคำนวณ

$$G_s = \frac{W_s K}{W_s + W_{FW} - W_{FWS}}$$

เมื่อ G_s = ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินที่อุณหภูมิ น้ำ 20°C

W_s = น้ำหนักของตัวอย่างดินที่อบแห้ง

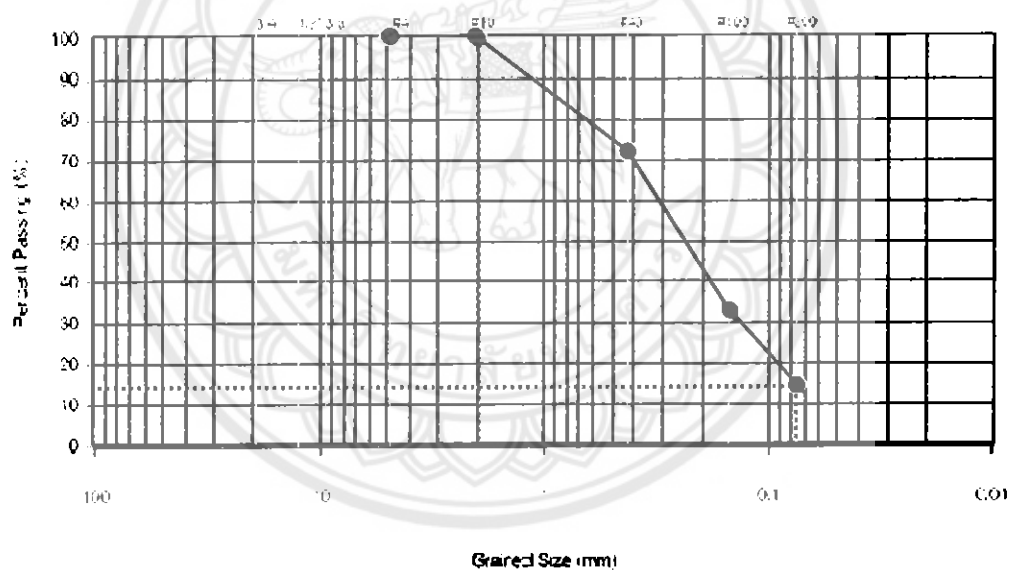
W_{FW} = น้ำหนักของ Volumetric Flask + น้ำ ที่อุณหภูมิหนึ่ง

W_{FWS} = น้ำหนักของ Volumetric Flask + น้ำ + ดินแห้ง ที่อุณหภูมิเท่ากับ W_{FW}

K = เป็นค่าตัวแปรปรับแก้เนื่องจากอุณหภูมิ

ตารางที่ ข4 บันทึกผลการทดลองหาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ครั้งที่ 1

Sieve No.	Sieve Opening (mm)	Weight Sieve (g)	Wt. Sieve + Soil (g)	Wt. Soil Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained	Percent Passing (%)
# 4	4.75	470	470	0	0	0	100
# 10	2	430	430	0	0	0	100
# 40	0.425	380	529	149	29.8	29.8	70.2
# 100	0.15	305	491	186	37.2	67	33
# 200	0.075	290	377	87	17.4	84.4	15.6
Pan		270	348	78	15.6	100	0



รูปที่ ข2 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองครั้งที่ 1

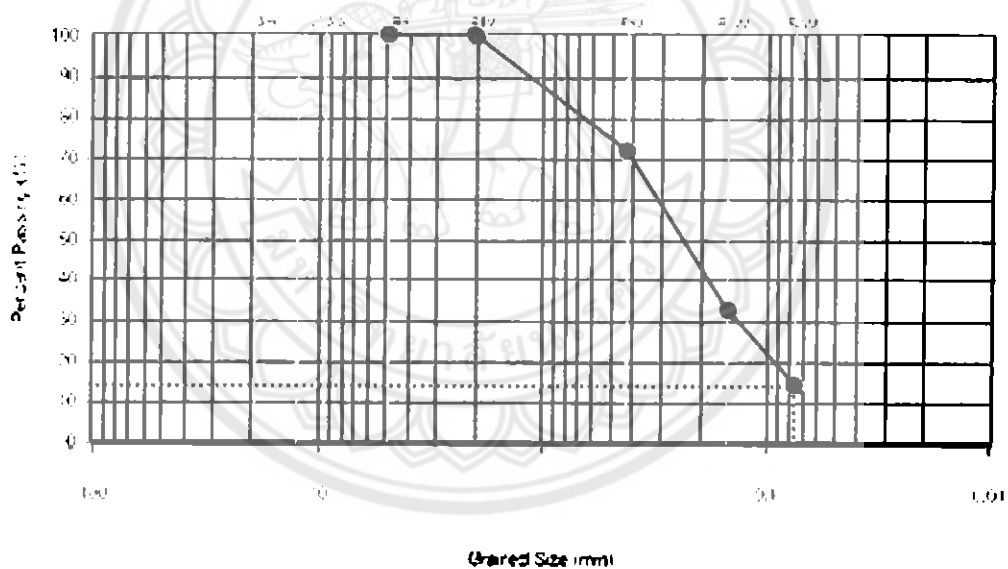
% Sand = 0 %

% Silt = 87 %

% Clay = 13 %

ตารางที่ ข5 บันทึกผลการทดลองหาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ครั้งที่ 2

Sieve No.	Sieve Opening (mm)	Weight Sieve (g)	Wt. Sieve + Soil (g)	Wt. Soil Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained	Percent Passing (%)
# 4	4.75	470	470	0	0	0	100
# 10	2	430	430	0	0	0	100
# 40	0.425	380	532	152	30.4	30.4	69.6
# 100	0.15	305	498	193	38.6	69	31
# 200	0.075	290	375	85	17	86	14
Pan		270	340	70	14	100	0



รูปที่ ข3 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองครั้งที่ 2

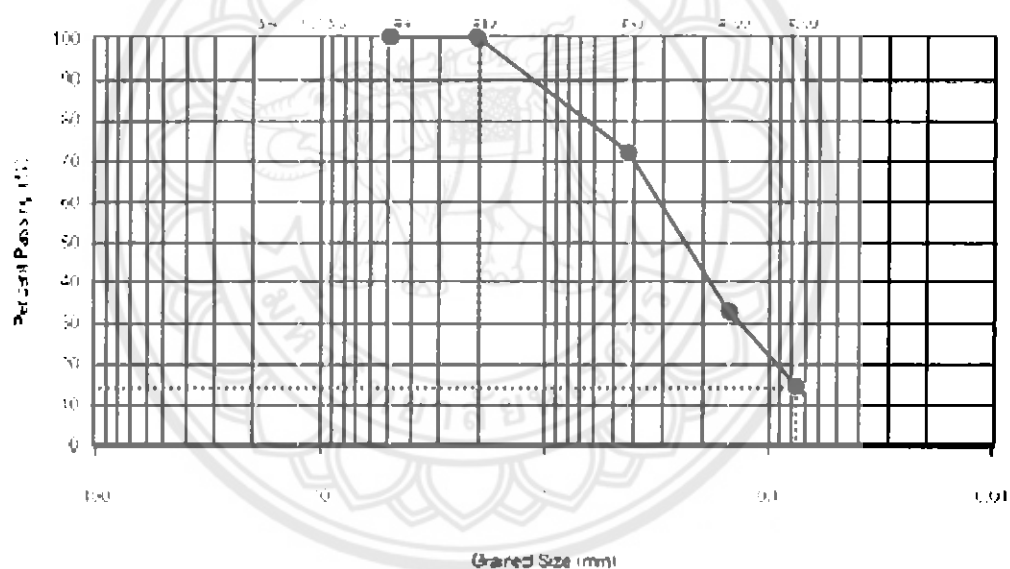
% Sand = 0 %

% Silt = 87 %

% Clay = 13 %

ตารางที่ ข6 บันทึกผลการทดลองหาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ครั้งที่ 3

Sieve No.	Sieve Opening (mm)	Weight Sieve (g)	Wt. Sieve + Soil (g)	Wt. Soil Retained (g)	Percent Retained (%)	Cumulative Percent Retained	Percent Passing (%)
# 4	4.75	470	470	0	0	0	100
# 10	2	430	430	0	0	0	100
# 40	0.425	380	545	165	33	33	67
# 100	0.15	305	485	180	36	69	31
# 200	0.075	290	375	85	17	86	14
Pan		270	345	70	14	100	0



รูปที่ ข4 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองครั้งที่ 3

% Sand = 0 %

% Silt = 87 %

% Clay = 13 %

ตารางที่ ข7 สรุปค่าเฉลี่ย % Silt, % Sand และ % Cray จากการทดลองหาขนาดดินทั้ง 3 ครั้ง

ตัวอย่างที่	% Silt	% Sand	% Cray
1	87	0	13
2	87	0	13
3	87	0	13
Average	87	0	13

ตารางที่ ข8 ผลของการวิเคราะห์หาค่า pH ของดิน

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	ค่า PH
1	10.0075	7.30
2	10.0090	7.07
3	10.0047	7.15
Average		7.17

ตารางที่ ข9 ผลของการวิเคราะห์หาค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดิน

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ($\mu\text{s/cm}$)
1	10.0000	70.20
2	10.0015	72.10
3	10.0095	71.40
Average		71.20

ตารางที่ ข10 ผลของการวิเคราะห์หาค่าสารอินทรีย์ในดิน

ตัวอย่าง	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	ปริมาณสารอินทรีย์ (%)
1	68.4671	70.4677	70.4182	2.47
2	64.6146	66.6162	66.5655	2.53
3	62.4422	62.4422	64.3927	2.48
Average				2.49

วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณสารอินทรีย์ (\%)} = \frac{W2 - W3}{W2 - W1} \times 100 (\%)$$



ตารางที่ ข 11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

ลำดับที่	สัดส่วน	ตัวอย่างที่	นน. (g)	ความเข้มข้น Cd (mg/l)	ปริมาณ Cd (mg/kg)
1	ชุดควบคุม	1	1.0008	1.892	94.52
		2	1.0011	1.869	93.35
		Average			93.94
2	10% FA	1	1.0007	1.881	93.98
		2	1.0001	1.817	90.84
		Average			92.41
3	20% FA	1	1.0000	1.862	93.10
		2	1.0005	1.786	89.26
		Average			91.18
4	30% FA	1	1.0004	1.963	98.11
		2	1.0009	1.803	90.07
		Average			94.09
5	10% PR	1	1.0007	1.916	95.73
		2	1.0006	1.802	90.05
		Average			92.89
6	20% PR	1	1.0011	1.868	93.30
		2	1.0003	1.851	92.52
		Average			92.91
7	30% PR	1	1.0008	1.893	94.57
		2	1.0008	1.865	93.18
		Average			93.87

ตารางที่ ข 12 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดใน FA และ PR

FA	1	0.5002	0.024	2.399
	2	0.5003	0.031	3.098
	3	0.5003	0.018	1.799
	4	0.5001	0.014	1.400
	Average			1.824
PR	1	0.5004	0.076	7.594
	2	0.5006	0.080	7.990
	3	0.5004	0.071	7.094
	4	0.5004	0.072	7.196
	Average			7.468

