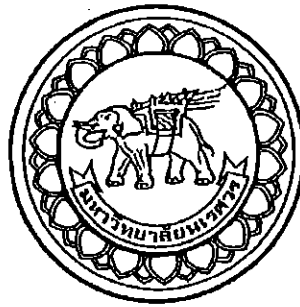




ผลของเถ้าลอยและหินฟอสเฟตต่อรูปแบบของแคดเมียมในดินและตะกอน

ที่บำบัดด้วยวิธีทางเคมี

**EFFECT OF FLY ASH AND PHOSPHATE ROCK ON CADMIUM SPECIATION
IN CHEMICAL AMENDMENT SOILS AND SEDIMENTS**

นายสมภพ ยะปาน รหัสนิสิต 49364981

นางสาวสาวิตรี ศรีพยัคฆ์ รหัสนิสิต 49364998

นางสาววาทิการ์ กริมรัมย์ รหัสนิสิต 49364974

ห้องสมุดคณะวิทยาศาสตร์

วันที่รับ.....14 ก.ค. 2553.....

เลขทะเบียน.....15072700 ๔๔

เลขเรียกหนังสือ.....ส271๓

มหาวิทยาลัยนเรศวร ๒๕๕๒

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา ๒๕๕๒



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ ผลของถั่วลอยและหินฟอสเฟตต่อรูปแบบของแคคเมียมในดินและ
ตะกอนที่บำบัดด้วยวิธีทางเคมี

ผู้ดำเนินโครงการ นายสมภพ ชะปาน รหัสบัณฑิต 49364981
นางสาวศาวิตรี ศรีพิทักษ์ รหัสบัณฑิต 49364998
นางสาววาทีการ์ กริมรัมย์ รหัสบัณฑิต 49364974

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ชัยวัฒน์ โพธิ์ทอง
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์ชัยวัฒน์ โพธิ์ทอง)

.....กรรมการ
(อาจารย์อำพล เตโชวานิชย์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ปองวิทย์ ทองสนิท)

ชื่อหัวข้อโครงการ ผลของเถ้าลอยและหินฟอสเฟตต่อรูปแบบของแคดเมียม
ในดินและตะกอนที่บำบัดด้วยวิธีทางเคมี

ผู้ดำเนินโครงการ นายสมภพ ชะปาน รหัสนิติ 49364981
นางสาวสาวิตรี ศรีพยัคฆ์ รหัสนิติ 49364998
นางสาววาทิการ์ กริมรัมย์ รหัสนิติ 49364974

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ชัยวัฒน์ ไพฑ์ทอง
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาถึงรูปแบบของแคดเมียมของดินและตะกอนที่ปนเปื้อน และการ
บำบัดดินด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้เถ้าลอยและหินฟอสเฟต ตัวอย่างดินและตะกอนถูกเก็บจำนวน 6 จุด
ที่ระดับความลึก 0-15, 15-30 และ 30-45 เซนติเมตร ตามความยาวของลำห้วยแม่ดาว อำเภอแม่สอด
จังหวัดตาก ตัวอย่างถูกนำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย พีเอช,
สภาพความนำไฟฟ้า, การกระจายขนาดคละ, ความถ่วงจำเพาะ, ปริมาณสารอินทรีย์ และปริมาณ
แคดเมียม

ผลการศึกษาพบว่า ตะกอนมีองค์ประกอบที่เป็นดินเหนียวและปริมาณสารอินทรีย์ และ
ปริมาณแคดเมียมสูงกว่าดิน ปริมาณแคดเมียมในดินมีค่าเท่ากับ 1.06, 9.27, 2.44, 2.21, 1.13 และ
1.62 มก./กก.-ดิน และตะกอนมีปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 5.45, 17.57, 13.01, 12.99, 13.11 และ 7.47
มก./กก.-ตะกอน ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มที่ลดลงตามความยาวของลำห้วย

ผลการศึกษา รูปแบบของแคดเมียมด้วยการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified-BCR พบว่า
การบำบัดด้วยเถ้าลอยส่งผลทำให้ร้อยละการบดจับของแคดเมียมและการบดจับมีค่าสูงขึ้น แต่ร้อยละ
การบดจับของแคดเมียมและออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสมีค่าลดลง ขณะที่การบำบัดด้วยหิน
ฟอสเฟตให้ผลในทางตรงกันข้าม

Project title Effect of fly ash and phosphate rock on cadmium speciation
in chemical amendment soils and sediments.

Name Mr.Somphop Yapan ID. 49364981
Miss.Sawitree Sripayak ID. 49364998
Miss. Watika Krimrum ID. 49364974

Project advisor Mr.Chaiwat Photong
Major Environmental Engineering
Department Civil Engineering
Academic year 2009

Abstract

This research aims to study the cadmium speciation of contaminated soils and sediments and chemical amendment by fly ash and phosphate rock. The samples were collected at 6 points at the depth of 0-15, 15-30 and 30-45 cm along the Mae Tao canal, Mae Sod, Tak province. The samples were collected to study the physical and chemical properties in the laboratory include: pH, electrical conductivity, size gradation, specific gravity, organic content, and total cadmium content.

The result found that the sediments had the higher value of clay content, organic content and cadmium content than soils. The cadmium content in the contaminated soils were 1.06, 9.27, 2.44, 2.21, 1.13 and 1.62 mg/kg of soils, and the sediments were 5.45, 17.57, 13.01, 12.99, 13.11 and 7.47 mg/kg of sediments, respectively. They trend to decrease with the length of canal.

The result of cadmium speciation study by modified-BCR sequential extraction found that the chemical amendment by fly ash makes the percentage of the binding of cadmium and carbonate with a higher value but the binding of cadmium and iron and manganese oxide with a lower value. While the chemical amendment by phosphate rock, resulting in opposites.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบุคคลอันจะได้กล่าวต่อไปนี้ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลในด้านต่างๆ จนทำให้ผลการศึกษาโครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อันได้แก่

อาจารย์ชัยวัฒน์ โพธิ์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับเทคนิคการบำบัดดินด้วยวิธีทางเคมี และการย่อยสกลดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified - BCR

คุณวิษญา อิ่มกระจำง เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้ให้คำแนะนำในการปฏิบัติการในทดลอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งเป็นผู้ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำโครงการ และยังเป็นผู้ผลักดันให้เกิดงานวิจัยชิ้นนี้



สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
 บทที่ 1 บทนำ	 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ	2
1.5 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	2
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ	3
 บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	 4
2.1 ข้อมูลเชิงพื้นที่ของอำเภอแม่สอด	4
2.2 โลหะหนัก	6
2.3 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน	9
2.4 การบำบัดดินและตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนัก	10
2.5 การบำบัดดินและตะกอนด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Amendment)	14
2.6 การสกัดลำดับส่วน (Sequential Extraction)	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการงาน	27
3.1 กรอบความคิดของโครงการวิจัย	27
3.2 จุดเก็บตัวอย่าง	29
3.3 การเตรียมตัวอย่างดินและตะกอน	36
3.4 การศึกษาสมบัติของดินและตะกอนทางกายภาพ	36
3.5 การศึกษาสมบัติของดินและตะกอนทางเคมี	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์	59
4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ดิน	59
4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ตะกอน	71
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	85
5.1 สรุปโครงการงาน	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารอ้างอิง	87
ภาคผนวก ก	89
ภาคผนวก ข	141

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การสกัดลำดับส่วนที่ใช้ในงานวิจัยต่างๆ	19
2.2 การสกัดลำดับส่วนที่ใช้ในงานวิจัยต่างๆ (ต่อ)	20
2.3 การสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี BCR และ Modified – BCR	25
2.4 การสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified – BCR	26
3.1 แสดงจุดเก็บตัวอย่างดิน	29
3.2 แสดงจุดเก็บตัวอย่างตะกอน	31
3.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของดินชนิดต่าง ๆ	39
3.4 สัดส่วนการหมักดินและตะกอนด้วยเถ้าลอย	49
3.5 สัดส่วนการหมักดินและตะกอนด้วยหินฟอสเฟต	49
4.1 แสดงผลการทดสอบหาค่าความชื้นดิน	59
4.2 แสดงผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน	61
4.3 แสดงผลการทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน	62
4.4 แสดงผลการทดสอบหาค่าสภาพความเป็นกรด – เบส ของดิน	63
4.5 แสดงผลการทดสอบหาค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของดิน	65
4.6 แสดงผลการทดสอบหาสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method)	66
4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมทั้งหมดในดิน	68
4.8 ผลการทดลองหาปริมาณแอมโมเนียมด้วยวิธีการสกัดลำดับส่วน (Modified – BCR)	69
4.9 ร้อยละของปริมาณแอมโมเนียมจากการทดลองการสกัดลำดับส่วน	70
4.10 แสดงผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของตะกอน	72
4.11 แสดงผลการทดสอบหาขนาดของเม็ดดินตะกอน	73
4.12 แสดงผลการทดสอบหาค่าสภาพความเป็นกรด – เบส ของตะกอน	75
4.13 แสดงผลการทดสอบหาค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของตะกอน	76
4.14 แสดงผลการทดสอบหาสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method) ของตะกอน	77
4.15 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมทั้งหมดในตะกอน	79
4.16 ปริมาณแอมโมเนียมจากการทดสอบการสกัดลำดับส่วน (mg/kg) ของตะกอนจุดที่ 2	80
4.17 ร้อยละของปริมาณแอมโมเนียม จากการทดสอบการสกัดลำดับส่วนของตะกอนจุดที่ 2	81
4.18 ปริมาณแอมโมเนียมจากการทดสอบการสกัดลำดับส่วน(mg/kg) ของตะกอนจุดที่ 3	82
4.19 ร้อยละของปริมาณแอมโมเนียม จากการทดสอบการสกัดลำดับส่วนของตะกอนจุดที่ 3	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

4.20 แสดงผลการวิเคราะห์แคคเมียมทั้งหมดในถั่วลยและหินฟอสเฟต

84



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินการ	3
3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	28
3.2 โรงเรียนบ้านด้าเสือ	29
3.3 แผนที่แสดงจุดเก็บตัวอย่างดิน	30
3.4 แผนที่แสดงจุดเก็บตัวอย่างตะกอน	32
3.5 แสดงการเก็บตัวอย่างดิน	34
3.6 แสดงการเก็บตะกอน	35
3.7 แสดงการตากตัวอย่างดิน	36
3.8 กระป๋องเก็บตัวอย่างและเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง	37
3.9 ชั่งตัวอย่างดินหรือตะกอนหลังอบเสร็จ	38
3.10 ขวดแก้วพลาสติก	39
3.11 เติมน้ำกลั่นในขวดประมาณ 3/4 ของคอขวด	40
3.12 ตรวจสอบอุณหภูมิ	41
3.13 ดูฟองอากาศออก	42
3.14 อบดินที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส โดยทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน	42
3.15 นำดินที่อบแล้วมาชั่ง	43
3.16 ตะแกรงที่ใช้ร่อนตัวอย่างพร้อมตาครอบ และเครื่องเขย่าตะแกรง	44
3.17 เครื่องชั่งน้ำหนัก	44
3.18 ถังดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200	45
3.19 ดินที่เหลือหลังนำไปอบแห้ง	46
3.20 เเผดินด้วยเตาเผาไฟฟ้า อุณหภูมิ $550 \pm 5^{\circ}\text{C}$	46
3.21 นำดินที่เผาแล้วไปชั่งน้ำหนัก	47
3.22 ชั่งดินหรือตะกอนและส่วนผสม	50
3.23 นำส่วนผสมตามตารางที่ 3.4 ไปรวมกัน	50
3.24 ผสมในเครื่องผสม	50
3.25 เทส่วนผสมใส่ถุงพลาสติก PE	50
3.26 มัดปากถุง เก็บไว้ 1 เดือน	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27 ขั้นตอนการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified-BCR	51
3.28 อบดินหรือตะกอนที่อุณหภูมิ $103^{\circ}\text{C} \pm 105^{\circ}\text{C}$	52
3.29 ชั่งดินหรือตะกอนประมาณ 0.5 กรัม	53
3.30 นำดินหรือตะกอนที่ชั่งแล้วใส่หลอด Centrifuge ขนาด 50 ml	53
3.31 เขย่า 30 ± 10 rpm ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง	53
3.32 Centrifuge ที่ 3000 rpm เป็นเวลา 20 นาที	53
3.33 เขย่าที่ $85 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ใน Water bath	54
3.34 นำดินหรือตะกอนในขั้นตอนที่ 3 ใส่ในขวดลูกขมพู่ ขนาด 50 ml	55
3.35 ย่อยดินหรือตะกอนบนเตา ที่ความร้อนเบอร์ 2	55
3.36 นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 42 ด้วยเครื่องดูดอากาศ	55
3.37 ปรับปริมาตรเป็น 50 ml. ใส่ขวดยา นำไปแช่เย็นรอส่งตรวจหาปริมาณแคดเมียม	55
3.38 ชั่งน้ำหนักดินหรือตะกอน 0.5 กรัม	57
3.39 นำดินหรือตะกอนใส่ขวดรูปชมพู่	57
3.40 เติมน้ำเค็ม	57
3.41 ย่อยสลายตัวอย่างดินหรือตะกอนบนเตาให้ความร้อน	57
3.42 ใช้ สารละลาย 5% HNO_3 กลั้ว	57
3.43 กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42	57
3.44 ปรับปริมาตรเป็น 50 ml. ด้วย 5% HNO_3	58
3.45 เก็บในขวดพลาสติกขนาด 60 ml	58
3.46 เครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrometry)	58
4.1 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินแต่ละ	60
4.2 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของดิน	61
4.3 กราฟแสดงขนาดเม็ดดิน	62
4.4 กราฟแสดงสภาพความเป็นกรด – เบส ของดินแต่ละจุด	64
4.5 กราฟแสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของดิน	65
4.6 กราฟแสดงค่าสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method)	67
4.7 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด	68
4.8 กราฟแสดงผลการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified – BCR	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟแสดงค่าความถี่จำเพาะของตะกอน	72
4.10 กราฟขนาดเม็ดดินตะกอน	74
4.11 กราฟแสดงสภาพความเป็นกรด – เบส ของตะกอนแต่ละจุด	75
4.12 กราฟแสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของตะกอน	76
4.13 กราฟแสดงค่าสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method) ของตะกอน	78
4.14 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมทั้งหมด	79
4.15 ร้อยละของปริมาณแอมโมเนียมจากการทดสอบการสกัดลำดับส่วน ของตะกอนจุดที่ 2	81
4.16 ร้อยละของปริมาณแอมโมเนียมจากการทดสอบการสกัดลำดับส่วน ของตะกอนจุดที่ 3	83



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยีและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัด ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงและยากต่อการแก้ไข หนึ่งในผลกระทบนั้นคือการรั่วไหลปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำ โลหะหนักจัดอยู่ในกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไป และส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition metals ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดินและดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ

แกลเลียมเป็นโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยมาจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น โรงงานแบตเตอรี่ โรงงานทำพลาสติก เหมืองสังกะสี การถลุงแร่ ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของดินและน้ำใต้ดิน แม้มีเทคโนโลยีการบำบัดมากมายมารองรับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแต่การป้องกันการรั่วไหลของโลหะหนักจากโรงงานเป็นสิ่งที่ทำได้ยากเพราะการกำจัดของเสียของโรงงานอุตสาหกรรมไม่สามารถควบคุมได้

เทคโนโลยีการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีการขุดดินออกไปบำบัดภายนอกแล้วนำกลับมาถมเข้าที่เดิม การบำบัดโดยอาศัยวิธีทางกายภาพ ทางเคมี ทางไฟฟ้า เพื่อลดความสามารถในการละลายของโลหะหนักหรือเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของอิมมูโนหรือสารประกอบที่อันตรายน้อยที่สุด หรือใช้สารเคมีสกัดโลหะหนักออกจากดิน ซึ่งแต่ละวิธีจำเป็นต้องอาศัยทักษะที่สูงและบางวิธีอาจจะเหมาะสมกับพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนในวงแคบ

การบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยสารเคมี (Chemical Amendment) เป็นวิธีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพดิน เพื่อลดการแพร่กระจายของโลหะหนักในดินและลดการดูดซับโลหะหนักของพืช โดยการทำให้โลหะหนักในอนุภาคดินเปลี่ยนไปอยู่ในรูปหรือสารประกอบคงตัวมากขึ้น โดยใช้อาศัยสารเคมี ได้แก่ แร่ตามธรรมชาติ เช่น หินฟอสเฟต (Phosphate Rock) แร่อะพาไทต์ (Apatite) หรือของเสียหรือผลพลอยได้จากกระบวนการอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน (Coal fly ash) โคลนแดง (Red mud) จากกระบวนการผลิตอลูมิเนียม (Bauxite processing) หรือสารเคมีที่สังเคราะห์ เช่น แกลเลียมคาร์บอเนตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) เป็นต้น

การวิจัยครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดดินและตะกอนด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Amendment) ในการทำให้โลหะหนักในอนุภาคดินเปลี่ยนไปอยู่ในรูปหรือสารประกอบคงตัวมาก

ขึ้น โดยใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน (Coal fly ash) และหินฟอสเฟต (Phosphate rock) บำบัดดินและตะกอนที่ปนเปื้อนแคดเมียมบริเวณลุ่มน้ำแม่ดาว อำเภอแม่สวด จังหวัดตาก

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและตะกอนบริเวณต่างๆ ของห้วยแม่ดาว อำเภอแม่สวด จังหวัดตาก

1.2.2 เพื่อศึกษาการบำบัดดินและตะกอนที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Amendment) โดยใช้เถ้าลอยและหินฟอสเฟต

1.2.3 เพื่อศึกษารูปแบบของแคดเมียมในดินและตะกอนที่ปนเปื้อน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 เพื่อเป็นข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณแคดเมียมในดินและตะกอนของห้วยแม่ดาว อำเภอแม่สวด จังหวัดตาก

1.3.2 เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สารเคมีในการบำบัดแคดเมียมในพื้นที่ต่อไป

1.4 ขอบเขตการทำโครงการ

1.4.1 พื้นที่ศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและตะกอนได้แก่ บริเวณห้วยแม่ดาวที่จุดต่างๆ ทั้งหมด 6 จุด ตามความยาวของลำห้วยแม่ดาว

1.4.2 ศึกษาการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนแคดเมียมในดินและตะกอนด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Amendment) โดยใช้เถ้าลอยและหินฟอสเฟต

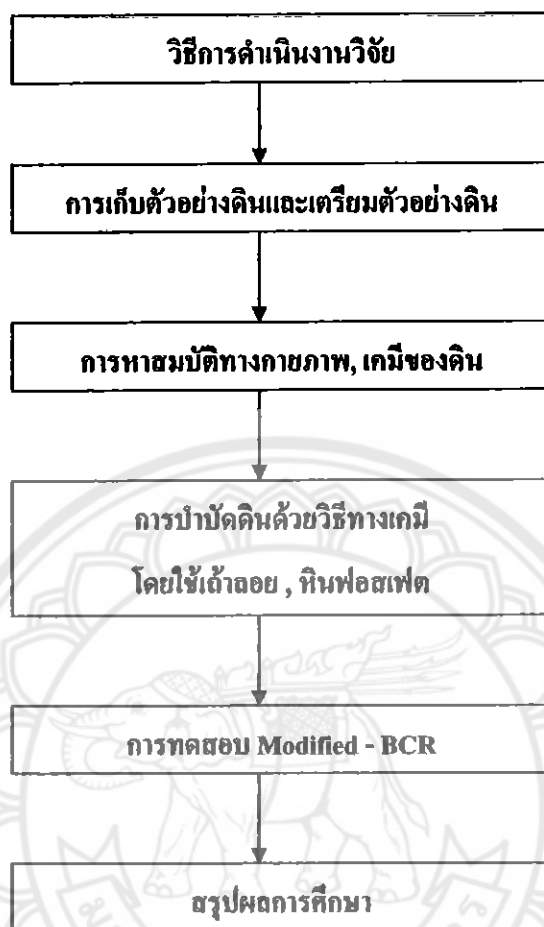
1.4.3 ศึกษารูปแบบของแคดเมียมที่อยู่ในดินและตะกอนโดยใช้วิธี Modified BCR Sequential Extraction

1.4.4 ช่วงเวลาทำการศึกษาระหว่าง ตุลาคม พ.ศ.2552 ถึง 30 เมษายน พ.ศ.2553

1.5 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	พ.ศ. 2552			พ.ศ. 2553			
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1) เก็บตัวอย่างดินและเตรียมดิน							
2) การหาสมบัติทางกายภาพ,เคมีของดิน							
3) ศึกษา Modified -BCR							
4) วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล							
5) จัดทำรูปเล่ม							

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินการ

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

รายการ	งบประมาณ
1.ค่าสารเคมีและเครื่องแก้ว	800 บาท
2. ค่าวัสดุสำนักงาน	500 บาท
3. ค่าถ่ายเอกสารและเข้าเล่ม	3,000 บาท
รวมเป็นเงิน	4,300 บาท

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ข้อมูลเชิงพื้นที่ของอำเภอแม่สวด

อำเภอแม่สวดตั้งอยู่ระหว่างเส้นละติจูดที่ 16 องศา 42 ลิปดา 47 พิลิปดาเหนือ และเส้นลองจิจูดที่ 98 องศา 34 ลิปดา 29 พิลิปดาตะวันออก สูงกว่าระดับน้ำทะเล 116.2 เมตร อำเภอแม่สวดมีพื้นที่ทั้งสิ้น 1,986 ตารางกิโลเมตร สภาพพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นภูเขาสูงชันชันชันสลับกับหุบเขาแคบประมาณร้อยละ 80 ของพื้นที่ ปกครองไปด้วยป่าไผ่ป่าดงดิบและป่าสน สภาพพื้นที่โดยทั่วไปของอำเภอแม่สวด ตั้งอยู่ในภาคเหนือตอนใต้ทางตะวันตกของประเทศไทย มีพื้นที่ราบสำหรับการเกษตรน้อย ส่วนที่เป็นที่ราบต่ำถึงเป็นลอนลาด มีความสูงอยู่ระหว่าง 80-200 เมตรจากระดับน้ำทะเล ครอบคลุมเนื้อที่ร้อยละ 16 ของจังหวัด บริเวณที่เป็นพื้นที่ที่ถูกคลื่นลอนชันมีความสูงอยู่ระหว่าง 200-300 เมตร ครอบคลุมเนื้อที่ร้อยละ 10.5 ของจังหวัด พื้นที่ที่เหลือเป็นเนินเขาเตี้ยไปจนถึงภูเขาสูง ซึ่งมีพื้นที่ที่มีความสูงระหว่าง 300-700 เมตรจากระดับน้ำทะเลอยู่ร้อยละ 34.8 ของจังหวัด และมีความสูงมากกว่า 700-2,200 เมตร อยู่ร้อยละ 38.4 ของจังหวัด ยอดเขาสูงสุดทางตะวันตกของอำเภอท่าสองยางที่เขาค้อได้ มีความสูง 1,752 เมตร และยอดเขาสูงสุด ทางตะวันออกของอำเภออุ้มผางที่เขาค้อได้มีความสูง 1,898 เมตรจากระดับน้ำทะเล

กลุ่มน้ำแม่ดาว ตั้งอยู่บริเวณพื้นที่ด้านตะวันออกของอำเภอแม่สวด จังหวัดตาก อยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเลประมาณ 200 เมตร มีความยาวประมาณ 33 กิโลเมตร มีความกว้างประมาณ 3-4 เมตร และความลึกประมาณ 1.5-2.0 เมตร มีน้ำลึกประมาณ 1.0-1.2 เมตร ในฤดูฝนมีน้ำลึกประมาณ 1.5-2.0 เมตร กลุ่มน้ำแม่ดาวครอบคลุมพื้นที่บางส่วนของ ตำบลแม่ดาว ตำบลแม่ภู ตำบลพระธาตุผาแดง และตำบลท่าสายลวด มีคอยแม่ดาวเป็นคอยสูงสุดของพื้นที่ พื้นที่ราบทางทิศตะวันตกเป็นพื้นที่หลักสำหรับการทำเกษตรกรรม ส่วนพื้นที่ที่เหลือเป็นเนินเขาสูงชัน ห้วยแม่ดาวเป็นแหล่งที่รับน้ำจากบริเวณเทือกเขาด้านตะวันออกไปทางทิศตะวันตก ห้วยแม่ดาวยังไหลผ่านพื้นที่ที่เป็นเขตสัมปทานเหมืองแร่สังกะสีและไหลผ่านพื้นที่ 3 ตำบล คือ ตำบลแม่ภู ตำบลแม่ดาว และตำบลพระธาตุผาแดง ซึ่งเป็นแหล่งน้ำผิวดินสายหลักที่สำคัญที่ใช้ในการเกษตรกรรม มีแหล่งกำเนิดจากคอยแม่ดาวและคอยเรผาโด ในหมู่บ้านต้าเสือ พืชผลทางการเกษตรที่สำคัญในอดีต คือ ข้าว และพืชอื่นๆ ได้แก่ ถั่วเหลืองและกระเทียม ซึ่งจะปลูกหลังการเก็บเกี่ยวข้าว การทำนาส่วนใหญ่จะเป็นแบบนาดำ

จากงานข้อมูลที่ผ่านมาเป็นที่ทราบกันทั่วไปว่าพื้นที่กลุ่มน้ำแม่ดาว อำเภอแม่สวด จังหวัดตาก มีการปนเปื้อนของแควเคมียมในสภาพแวดล้อมในระดับที่เกินมาตรฐานจึงมีหน่วยงานต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นภาครัฐและองค์กรอิสระ ซึ่งประกอบด้วย กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่ กรม

พัฒนาที่ดินและสถาบันการจัดการน้ำนานาชาติ (International Water Management Institute, IWMI) เข้ามาศึกษาและตรวจสอบคุณภาพของดินที่ปนเปื้อน

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่ ได้ทำการศึกษาการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินที่ตำบลพระธาตุผาแดงและตำบลแม่ดาว โดยเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนและพื้นที่รอบๆ ที่ระดับความลึก 60-200 ซม. จากผิวดิน พบว่าดินในลำห้วยแม่ดาวมีความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสี มีค่าสูงเช่นเดียวกับลำห้วยแม่กุ ถึงแม้ว่าดินจากลำห้วยแม่กุจะไม่ได้รับผลกระทบจากการปล่อยน้ำทิ้งจากกิจกรรมการทำเหมือง ทำให้สรุปว่าการปนเปื้อนของแคดเมียมน่าจะเกิดจากกระบวนการทางธรณีวิทยาตามธรรมชาติ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นแหล่งแร่สังกะสี การสึกกร่อนและการทับถมของดินน่าจะเป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินในบริเวณพื้นที่ลุ่ม (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่, 2546)

ปี 2544 กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์การเกษตร ร่วมกับ IWMI ได้เข้ามาศึกษาการปนเปื้อนของแคดเมียมในกลุ่มน้ำแม่ดาว ตลอดปี 2544-2546 ทำการเก็บตัวอย่างดินจำนวน 430 ตัวอย่าง และตัวอย่างเมล็ดข้าวจำนวน 535 ตัวอย่าง จากแปลงนา รวมเนื้อที่ประมาณ 165.5 ไร่ ในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน นอกจากนี้กรมพัฒนาที่ดินร่วมกับ IWMI ได้ทำการตรวจสอบการปนเปื้อนของแคดเมียมบริเวณพื้นที่ดังกล่าว ช่วงเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม ปี 2547 โดยการเก็บตัวอย่างดินจำนวน 600 ตัวอย่าง และตัวอย่างเมล็ดข้าวจำนวน 532 ตัวอย่าง จากแปลงนา รวมเนื้อที่ประมาณ 432 ไร่ จากผลการศึกษาทั้งสองครั้งได้นำเสนอออกมาในรูปของสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Geographic Information System, GIS) พบว่า ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินและเมล็ดข้าวมียกค่าระหว่าง 0.1-284 มก./กก. และ <0.01-7.75 มก./กก. ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ากว่าร้อยละ 85 ของตัวอย่างดินที่ศึกษามีค่าปริมาณแคดเมียมเกินกว่าค่าสูงสุดที่ยอมให้ของ The European Economic Community (EEC) ซึ่งกำหนดไว้ที่ 3 มก./กก. และกว่าร้อยละ 83 ของตัวอย่างเมล็ดข้าวที่ศึกษามีปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวสูงกว่าค่าที่ยอมให้ในร่างมาตรฐานซึ่งกำหนดโดย Codex Committee on Food Additive and Contaminants (CCFAC) ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.2 มก./กก. และเป็นค่าที่แนะนำโดยองค์การอนามัยโลกสำหรับการส่งออก และพบว่ากว่าร้อยละ 75 ของพื้นที่นาที่ใช้ น้ำจากลำห้วยแม่ดาว จะมีปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวสูงกว่าค่ามาตรฐาน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2549)

นอกจากการตรวจสอบการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินและเมล็ดข้าวแล้ว จากข้อมูลของโรงพยาบาลแม่สอดยังพบว่า ประมาณร้อยละ 11.7 ของประชากร 6,802 คน ในพื้นที่นี้มีปริมาณแคดเมียมในร่างกายสูงกว่าค่าปกติ โดยที่ร้อยละ 2.4 อยู่ในภาวะไตเริ่มเสื่อม และร้อยละ 0.5 เป็นโรคไตเสื่อมตามลำดับ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2549)

2.2 โลหะหนัก

โลหะหนักคือกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไป และส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition metals ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน ดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ

โลหะหนักเป็นวัตถุอันตรายที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วน เช่น ในด้านอุตสาหกรรม ใช้โลหะหนักในการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฟ้า สำหรับทางด้านการเกษตร โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีพ

2.2.1 ประโยชน์และความเป็นพิษของโลหะหนักแคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุโลหะหนักที่มีสีเงินแกมขาว มีคุณสมบัติเบา อ่อน ดัดโค้งได้ง่ายและทนต่อการกัดกร่อน มีความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) 8.65 ค่า Mohs hardness 2.0 ค่า refractive index 1.13 จุดหลอมเหลว (m.p.) 302.9 °C จุดเดือด (b.p.) 767 °C มีความดันไอ (vapor pressure) 1.4 mm ที่ 400 °C และ 16 mm ที่ 500 °C ดังนั้นเมื่อมีการใช้ความร้อนสูง เช่น การอบแร่ การบัดกรี การหลอมเหล็ก และการเผาของเสีย จะทำให้มีไอของแคดเมียมออกมาได้ในระหว่างกระบวนการที่มีการให้ความร้อน และไอของแคดเมียมในอากาศจะถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็วไปเป็นแคดเมียมออกไซด์ (CdO)

นอกจากนี้แคดเมียมยังเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก (HNO₃) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เจือจางซึ่งจะทำให้เป็นอันตรายต่อคนแบบเฉียบพลันเมื่อกินเข้าไป โดยทั่วไปจะไม่ค่อยพบแคดเมียมในรูปของแคดเมียมบริสุทธิ์ แต่มักจะพบในรูปของสารประกอบของเกลือ เช่น cadmium sulfate (CdSO₄), cadmium nitrate (CdNO₃), cadmium chloride (CdCl₂) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีสีและละลายได้ดีในน้ำ และแคดเมียมยังสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ โดยเฉพาะเมื่อรวมกับ cyanides และ amines

2.2.1.1 ประโยชน์ของแคดเมียม

แคดเมียมถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ และสินค้าอุปโภคดังนี้

- ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสมอัลลอยด์ (alloy) เพื่อเพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการกัดกร่อน เช่น
 - อัลลอยด์ของทองแดงที่มีแคดเมียม 1% (cadmium bronze) ใช้ในการผลิตเส้นลวดโทรเลขและโทรศัพท์

- อัดลอคซ์ของทองแดงและตะกั่วซึ่งมีแคดเมียมผสมอยู่ 20% ใช้ในการผลิตแบบพิมพ์ (printing plates)

- อัดลอคซ์ของทองแดง แคดเมียม และเซอร์โคเนียม ใช้ในอุปกรณ์การสื่อสารต่างๆ ที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงๆ ทั้งนี้เพราะโลหะผสมประเภทนี้จะมีแข็งแรงและมีแรงดึงได้สูงกว่าโลหะผสมของทองแดงกับแคดเมียม

- แคดเมียมใช้ผสมกับโลหะอื่นในอุตสาหกรรมเพชรพลอยและเครื่องประดับอัญมณีต่างๆ โดยอาจผสมกับโลหะอื่นชนิดเดียว(ผสมทอง) ผสมกับโลหะอื่น 2 ชนิด (ทอง 75%, เงิน 16.6%) ผสมกับโลหะอื่น 3 ชนิด(ทองแดง, เงิน และทอง)

- ใช้แคดเมียมที่มีความบริสุทธิ์สูงๆ ในการผสมกับโลหะอื่น เพื่อให้มีคุณสมบัติกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น cadmium arsenide, cadmium antimonide และ cadmium telluride

- ใช้ในการชุบโลหะ โดยใช้แคดเมียมเคลือบบนแผ่นเหล็ก ทองแดง อะลูมิเนียม โดยการชุบด้วยไฟฟ้า โลหะที่ได้จากการชุบนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วิทยุ เป็นต้น

- ใช้เป็นเม็ดสีในอุตสาหกรรม สารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟซีลีไนด์ใช้ในการให้สีในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น สีอานาเมล เซรามิก ยาง แก้ว ผ้า เส้นใย หนังสือพิมพ์และพลาสติก

- ใช้ผลิตแบตเตอรี่ โดยใช้ร่วมกับโลหะนิกเกิลเป็น Cd – Ni battery ซึ่งนำมาใช้เป็นแบตเตอรี่ในเครื่องคิดเลข แฟลชถ่ายรูป เครื่องโกนหนวด นาฬิกาและวิทยุเล็กๆ เป็นต้น

- ใช้ในกิจการอื่นๆ เช่น

- ใช้ผสมในสารฆ่าเชื้อรา ที่ใช้ในการเกษตร

- ใช้ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นตัวควบคุมอัตราการแตกตัวของนิวเคลียร์

- ใช้ในการผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์

- ใช้ในการถ่ายรูป เช่น Cd – Br, Cd – I

- สารประกอบแคดเมียมบางชนิดใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวของพลาสติก เช่น cadmium stearate

- ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องทนความร้อน เช่น ทำหม้อน้ำรถยนต์ อุปกรณ์ทำความเย็นต่างๆ ที่ต้องระบายความร้อนมากๆ

2.2.1.2 ความเป็นพิษของแคดเมียม

จากการที่แคดเมียมถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมและสินค้าอุปโภคบริโภคแล้วข้างต้น จึงทำให้โลหะแคดเมียมเกิดการปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมบรรยากาศและในอาหาร ทำให้เราได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายได้หลายทางโดยไม่รู้ตัว คนทั่วไปจะได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจากอาหารที่บริโภคเข้าไปเป็นหลัก โดยอาจติดปะปนมากับพืชผักผลไม้ หรือผลิตภัณฑ์จากสัตว์ที่นำมาปรุงเป็นอาหาร แคดเมียมอาจละลายอยู่ในน้ำที่เราดื่มและได้รับจากอากาศโดยการหายใจเอาอากาศที่มีฝุ่นแคดเมียมที่กระจายอยู่ โดยเฉพาะในแหล่งอุตสาหกรรมที่มีการใช้แคดเมียมเป็นวัตถุดิบ เช่น โรงงานทำแบตเตอรี่ หรือบริเวณที่เป็นเหมืองแร่ สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง ที่มักมีแคดเมียมปนอยู่ด้วย การสัมผัสกับสิ่งของที่มีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบและการอยู่ในแหล่งที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในอากาศนานๆจะทำให้แคดเมียมซึมผ่านผิวหนังเข้าสู่ร่างกายเราได้อีกด้วย สำหรับผู้ที่สูบบุหรี่จัดจะทำให้ได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายเพิ่มขึ้น ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในร่างกายครึ่งหนึ่งจะไปสะสมอยู่ที่ตับและไต ทำให้เกิดพิษสะสมได้ในคน การจับแคดเมียมที่ร่างกายดูดซึมเข้าไปแล้วออกจากร่างกายเป็นไปค่อนข้างช้ามาก เพราะวงจรครึ่งชีวิตของแคดเมียมในคนค่อนข้างยาว 16-33 ปี โดยความเป็นพิษของแคดเมียมแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

- ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

- ความเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร เมื่อร่างกายได้รับแคดเมียมโดยการกินซึ่งส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการกินอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีแคดเมียมปนเปื้อนหรือบรรจุในภาชนะที่เคลือบด้วยแคดเมียม อาการที่ปรากฏเริ่มแรกคือ รู้สึกคลื่นเหียนอย่างรุนแรง อาเจียน ท้องร่วง เป็นตะคริว และน้ำลายฟูมปาก ในรายที่เป็นมากอาจเกิดอาการช็อคเนื่องจากร่างกายสูญเสียน้ำมาก ระบบการทำงานของไตล้มเหลวและอาจถึงตายได้

- ความเป็นพิษต่อระบบหายใจ การสูดหายใจเอาไอของแคดเมียมเข้าไปทำให้เกิดอาการระคายเคืองที่หลอดลม ปอด จมูก ลำคอ และยังทำให้เกิดอาการไอ เวียนศีรษะ อ่อนเพลีย หนาวสั่น มีไข้ เจ็บหน้าอก

- ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง ความเป็นพิษจากแคดเมียมที่เกิดกับคนส่วนใหญ่มักเป็นแบบชนิดเรื้อรัง ซึ่งเกิดจากการที่ร่างกายได้รับแคดเมียมเข้าไปเป็นเวลานานติดต่อกัน ได้แก่

- ความเป็นพิษต่อปอดในคนที่หายใจเอาฝุ่นหรือไอ (fume) ของแคดเมียมเข้าไปติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้เกิดการบวมหรือพองของเนื้อเยื่อปอด ประสิทธิภาพในการระบายลมของปอดจะลดลง ทำให้อากาศอยู่ภายในปอดนานกว่าปกติ มีอาการหายใจขัดหรือหายใจไม่ออก นอกจากนี้ยังพบว่า แคดเมียมทำให้เกิดโรคถุงลมโป่งพองและมีพังผืดในปอดจับในทางเดิน

หายใจส่วนล่าง เนื่องจากแคดเมียมจะเป็นตัวไปขัดขวางการสร้าง antitrypsin ซึ่งเป็นตัวควบคุม trypsin ในร่างกายคน ซึ่งสาร trypsin นี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคถุงลมโป่งพองได้

- ความเป็นพิษต่อไต ผู้ที่ได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายนานติดต่อกันจะพบความเป็นพิษที่ไตก่อนที่ปอด จะเกิดแผลที่ไต พิษต่อไตจะปรากฏโดยผู้ป่วยมีอาการของโปรตีนในปัสสาวะ คือ ไตจะมีการขับปัสสาวะที่มีโปรตีนมากกว่าปกติ ซึ่งโปรตีนที่ขับออกมาส่วนใหญ่จะเป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น microglobulin lysozyme ribonuclease retinol binding protein และ immunoglobulin chains โดยชนิดของโปรตีนที่ถูกขับออกมาจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าไตส่วนใดถูกทำลาย เช่น ถ้าโปรตีนขนาดใหญ่ถูกขับออกมา แสดงว่า โกลเมอรูลัส (glomerulus) ถูกทำลาย แต่ถ้าเป็นโปรตีนขนาดเล็กถูกขับออกมา แสดงว่า ส่วนของทิวบูลถูกทำลาย นอกจากโปรตีนแล้วยังอาจมีสารอื่นๆถูกขับออกมากผิดปกติด้วย เช่น กรดอะมิโน ทำให้เกิดอาการ aminoaciduria แคดเมียมทำให้เกิดอาการ แคดเซียม ทำให้เกิดอาการ hypercalcemia และ กลูโคส ทำให้เกิดอาการ glucosuria เป็นต้น

- ความเป็นพิษที่กระดูก ที่ปรากฏเด่นชัดในกรณีการเกิดโรค อีไค อีไค โรคชนิดนี้เป็นโรคกระดูกพรุน กระดูกโค้ง งอโค้งได้ จะทำให้กระดูกเสียรูปทรงแตกหักและหักได้ เนื่องจากร่างกายดูดซึมแคดเมียมได้น้อยลง

- ความเป็นพิษต่อระบบเลือดเข้าสู่หัวใจและระบบการสร้างเม็ดโลหิต จะทำให้เกิดความดันโลหิตสูง เป็นสาเหตุให้เกิดโรคหัวใจ หัวใจเต้นผิดปกติ ในกลุ่มผู้ป่วยที่เป็นโรค อีไค อีไค และกลุ่มคนงานที่ต้องสัมผัสกับแคดเมียมจะพบอาการของโรคโลหิตจางด้วย

- ความเป็นพิษต่อดับ มีรายงานค่อนข้างน้อยเกี่ยวกับความเป็นพิษต่อดับในคน แต่จากการทดลองในสัตว์ทดลองพบว่า แคดเมียมในปริมาณน้อย (ในน้ำดื่ม 1 ppm) มีผลทำให้การทำงานของเอ็นไซม์ในตับเปลี่ยนไป

- จากการทดลองในสัตว์ พบว่า แคดเมียมยังเป็นสารก่อมะเร็ง โดยทำให้เกิดมะเร็งของเนื้อเยื่อที่ต่อกระดูก (sarcoma) เช่น กล้ามเนื้อกระดูกในหนูทดลอง

2.3 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน

ในการเก็บตัวอย่างดินก็เพื่อให้ได้ดินที่เป็นตัวแทนของดินธรรมชาติในสนาม สำหรับนำมาใช้ในการทดลองต่างๆ ในห้องทดลองนั้นเก็บได้ 2 แบบ

2.3.1 การเก็บแบบไม่คงสภาพ (Disturbed Samples)

การเก็บตัวอย่างดินแบบ Disturbed Samples ดินจะไม่อยู่ในสภาพเดิม ภาชนะที่ใส่ตัวอย่าง ดินควรมีสิ่งปกปิด อย่างให้ตัวอย่างดินถูกฝนชะล้างได้ มีวิธีเก็บได้หลายวิธี ดังนี้

2.3.1.1 การเก็บตัวอย่างดินใน Test Pit หรือในที่เปิดหน้าดินไว้

การเก็บตัวอย่างดินใน Test Pit หรือในที่เปิดหน้าดินไว้ มีวิธีการเก็บ 2 วิธี คือ

- เก็บตัวอย่างในแต่ละชั้นดินและแยกกันไว้
- เก็บตัวอย่างตามความลึกของชั้นดิน ตั้งแต่ 2 ชั้น ขึ้นไปรวมกัน จะต้องเก็บดิน

ทุกชั้นรวมกันตลอดความลึกของชั้นดินให้มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน โดยประมาณตลอด ความลึกของชั้นดินขนาดพื้นที่หน้าตัดควรจะอย่างน้อย 4 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางของก้อนกรวดที่ใหญ่ที่สุดในดินนั้น

2.3.1.2 การเก็บตัวอย่างดินจากหลุมเจาะด้วยสว่าน

ดินที่เก็บขึ้นมาจากหลุม จะกองเรียง กันตามความลึกไว้ ถ้าดินต่างกันก็กองแยกกันไว้ใหม่ ดินที่เหมือนกันหลายๆ กองเรียงตามความลึกนั้น จะเอามารวมกันเป็นตัวแทนของดินในแต่ละชั้น หรือความลึกต่างๆ กันเรียกว่า Individual Samples

ถ้าเป็นตัวอย่างดินตามความลึกของชั้นดิน ตั้งแต่ 2 ชั้น ก็เอาดินที่เป็นตัวแทนของดินในแต่ละชั้น ตั้งแต่สองชั้นขึ้นไปมารวมกัน

2.3.1.3 การเก็บตัวอย่างดินจากกองวัสดุ เช่นดินลูกรัง

การเก็บตัวอย่างดินลูกรังจากกองวัสดุนี้ จะต้องเก็บจากส่วนที่อยู่ข้างในกอง โดยวิธีสุ่มตัวอย่าง (Random Sampling) และจะต้องเก็บตามจำนวนที่ระบุไว้ในสัญญาหรือจะต้องเก็บทันทีในกรณีที่สงสัยว่าตัวอย่างจะไม่ได้คุณภาพ โดยดูจากลักษณะของตัวอย่างและเชื้อประสาน

2.3.2 การเก็บแบบคงสภาพ (Undisturbed Samples)

การเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพจะต้องรักษาดตัวอย่างดินให้มีลักษณะและสภาพเหมือนดินธรรมชาติในสนามให้มากที่สุด มีวิธีเก็บได้หลายวิธี วิธี Hand – Cut ซึ่งไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ จะต้องระมัดระวังไม่ให้ก้อนตัวอย่างได้รับการกระทบกระเทือนเวลาขุดขึ้น ยกถลง จะต้องค่อย ๆ วางห้ามโยน หรือกระแทก

- เก็บตัวอย่างดินจากหลุมที่ระดับผิวดิน
- เก็บตัวอย่างดินจากหลุมที่อยู่ด้านข้างของระดับผิวดิน

2.4 การบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

การบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักมี 3 วิธี คือ

2.4.1 วิธีที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหาคาปนเปื้อนของโลหะหนักในดิน คือ การกำจัดดินที่ปนเปื้อนออกไปแล้วแทนที่ด้วยดินที่ไม่มีโลหะหนักปนเปื้อน วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมในการนำไปใช้เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงมาก

2.4.2 กระบวนการทางเคมี,กายภาพ-เคมี หรือกระบวนการทางชีวะ แต่อาจจะส่งผลต่อสมบัติของดินภายหลัง

2.4.3 การบำบัดในดิน คือการใช้สารเคมี Apatite และ Zeolite หรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม โดยการเติมสารเคมีผสมกับดินที่ปนเปื้อน (Chen *et al.*, 2006) ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่เป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ (Chen *et al.*, 2000)

กระบวนการทางความร้อน, ทางชีวะ เป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมในการบำบัดโลหะหนัก วิธีทางกายภาพ คือ การขุดเอาดินออกและถมส่วนบนด้วยดินที่สะอาด แต่งบประมาณสูงเนื่องจากจำเป็นต้องกำจัดดินที่ปนเปื้อนและต้องขนส่งดินที่สะอาดขุดออกไป (Tang *et al.*, 2004) ตัวอย่างของกระบวนการบำบัดดินมีรายละเอียดดังนี้

- Phytoremediation เป็นการใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษ ในบริเวณที่ปนเปื้อน เพื่อลดอันตรายของสารมลพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารมลพิษทั้งที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในตัวกลาง ดิน น้ำ หรือ อากาศ เช่น ไทรไน ไทรโทลูอิน (2,4,6-trinitrotoluene) ไทรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene) เบนซีน (benzene) โทลูอิน (toluene) เอทิลเบนซีน (ethylbenzene) ไซลีน (xylene) โลหะหนัก (heavy metals) นิวไคลด์กัมมันตรังสี (radionuclides)

การบำบัดสารมลพิษโดยใช้เทคโนโลยี phytoremediation สิ่งที่สำคัญคือการเลือกใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษในบริเวณที่มีการปนเปื้อน นอกจากนี้ยังต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมของสารมลพิษที่จะทำการบำบัดในตัวกลางนั้น ๆ และปัจจัยร่วมอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติเพื่อช่วยให้การบำบัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้แก่ กระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี และ ชีววิทยา ดังนั้น phytoremediation จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้บำบัดสารมลพิษโดยการพึ่งพาสิ่งที่มีอยู่แล้วในระบบธรรมชาติ และเป็นวิธีที่ประหยัดต้นทุนในการบำบัดสารมลพิษ โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่มีราคาแพงและเป็นสาเหตุของการทำลายธรรมชาติ เช่น วิธีชะล้างดิน (soil washing) วิธีการขุดลอกหน้าดินซึ่งจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรและต้นทุนในการบำบัดสูง

การบำบัดสารมลพิษโลหะหนัก โดยใช้เทคโนโลยี phytoremediation สามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิด

- Phytoextraction เป็นการใช้พืชเพื่อบำบัดสารมลพิษที่อยู่ในดินและตะกอนดินโดยใช้พืชไปดูดซึมสารมลพิษโดยผ่านราก แล้วไปเก็บสะสมในเนื้อเยื่อพืชส่วนที่เป็น ลำต้น และ ใบ มีปัจจัยหลายประการที่จำกัดการบำบัดสาร โลหะหนัก (metal phytoextraction) เช่น อัตราการดูดซึมสารโลหะหนักโดยราก การนำไปใช้ประโยชน์ของโลหะหนักโดยพืช (metal bioavailability) สัดส่วนของสาร โลหะหนักที่ถูกดูดซึมโดยราก ความทนได้ของเซลล์พืชต่อสาร โลหะหนักที่เป็นพิษ ดังนั้นพืชที่ใช้ในการบำบัดจึงควรมีความสามารถในการสะสมสาร โลหะหนักโดยผ่านรากได้มาก และสามารถเคลื่อนย้ายสาร โลหะหนักไปสู่ส่วนของต้นพืชได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้พืชควรมีกลไกในการลดความเป็นพิษของสาร โลหะหนัก (detoxify) และมีความทนต่อปริมาณสาร โลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูง สาร โลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น เงิน แคดเมียม โคบอลต์

โครเมียม ทองแดง ปรอท แมงกานีส โมลิบดีนัม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี สารกัมมันตรังสีที่สามารถบำบัดโดยวิธีนี้ เช่น สตรอนเชียม-90 (^{90}Sr) ซีเซียม-137 (^{137}Cs) พลูโทเนียม-239 (^{239}Pu) ยูเรเนียม-238 (^{238}U) Phytoextraction ยังแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ Natural phytoextraction และ Induced phytoextraction

- Natural phytoextraction เป็นการบำบัดสารมลพิษโดยวิธีการปลูกพืชในดินที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษ แล้วทำการรดน้ำใส่ปุ๋ยเท่าที่จำเป็น พืชบางชนิด สามารถเจริญเติบโตโดยไม่จำเป็นต้องใส่ปุ๋ยหรือรดน้ำ แต่อาศัยน้ำฝนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ส่วนใบและลำต้นพืช ที่มีการสะสมสารมลพิษ จะถูกเก็บเกี่ยวและทำการบำบัดโดยวิธีที่เหมาะสมต่อไป พืชที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่จะเป็นพืชที่ชอบขึ้นตามธรรมชาติอยู่แล้ว และมีความทนทานต่อความเข้มข้นของโลหะหรือสารมลพิษอื่น ๆ โดยทั่วไปแล้ว พืชเหล่านี้จะเป็นพืชที่เจริญเติบโตไม่รวดเร็วนัก และเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้วจะมีขนาดไม่ใหญ่มากนักและมีรากตื้น

- Induced phytoextraction เป็นการบำบัดสารมลพิษโดยการเลือกใช้พืชที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ตลอดจนการเจริญเติบโต ร่วมกับการเติมสารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ (inducing agent) เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษสู่พืชมากขึ้น ยังผลให้เพิ่มขีดความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ

■ Phytovolatilization เป็นการใช้พืชเพื่อบำบัดสารมลพิษโดยการใช้พืชไปดูดซับสารมลพิษ แล้วด้วยกลไกที่เกิดขึ้นในดินพืชของได้ทำการแปลง (transformation) สารมลพิษให้อยู่ในรูปที่ระเหยได้และมีความเป็นพิษลดลงจากเดิม หลังจากนั้น สารมลพิษที่อยู่ในรูปที่ระเหยได้ สามารถกำจัดออกโดยผ่านทางใบพืช ซึ่งเป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจ และศึกษาค้นคว้าวิจัยเพื่อการปรับปรุงพันธุ์พืชที่สามารถทำหน้าที่พิเศษนี้ได้อย่างยอดเยี่ยม สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดด้วยวิธีนี้ เช่น ปรอท

■ Rizofiltration เป็นการใช้พืชเพื่อบำบัดสารมลพิษ โดยการใช้รากพืชในการดักกรองสารมลพิษ หรือ ดูดซึมสารมลพิษในน้ำ เช่น น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ ซึ่งวิธีนี้สามารถช่วยในการลดปริมาณสารมลพิษได้มาก ทั้งนี้เนื่องจากเฉพาะส่วนของรากพืช ที่สะสมสารมลพิษเท่านั้น ที่จำเป็นต้องบำบัดในขั้นตอนต่อไป ส่วนของใบและลำต้นที่ไม่ปนเปื้อน หลังจากการเก็บเกี่ยว ก็จะทิ้งไปหรือนำไปทำประโยชน์อย่างอื่นได้ ขึ้นกับชนิดของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัด เช่น พืชบางชนิดมีดอกที่สวยงาม จึงสามารถเก็บดอกไปขายในช่วงเวลาระหว่างการบำบัดได้อีกด้วย สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี โครเมียม สำหรับสารกัมมันตรังสีที่สามารถบำบัดโดยวิธีนี้ เช่น ^{137}Cs และ ^{238}U

- Soil washing เป็นวิธีที่ใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนที่ดูดติดบนผิวของอนุภาคดิน และถูกแยกออกมาในของเหลวที่ใช้ อาจใช้ความดันสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัด น้ำที่ใช้ล้าง อาจเป็นกรดหรือด่าง หรือ Chelating agent เพื่อช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์หรือโลหะหนัก นอกจากนี้ อาจจะต้องคำนึงถึงการทำให้เป็นกลางของดินที่ผ่านการบำบัดแล้วร่วมด้วย ประสิทธิภาพของการบำบัดถูกจำกัดโดยค่าความซึมผ่านของดิน (Permeability) ดินที่มีค่าความซึมผ่านน้อยกว่า 10^{-4} ซม./วินาที ไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีนี้บำบัด (Abumaizar and Smith, 1999) การล้างดินไม่สามารถนำไปใช้กับดินได้ทุกชนิด แต่เหมาะกับดินที่เป็นเม็ดหยาบหรือดินทราย ดินเม็ดละเอียด เช่น ตะกอน และดินเหนียว ขาดต่อการแยกออกจากของเหลว และมักจะติดจับกับสารปนเปื้อน ปริมาณสูง ผลผลิตสุดท้ายอาจจะเหลือเป็นสัณฐานละเอียด ปริมาณน้อยแต่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนสูงและจำเป็นต้องคำนึงถึงการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น สารปนเปื้อนที่มีความซับซ้อนอาจเป็นการยากที่จะใช้การล้างเพียงขั้นตอนเดียว (United Nation, 2000)

- Solvent Extraction การสกัดด้วยตัวทำละลายสามารถนำมาใช้กับสารปนเปื้อนหลายชนิด ได้แก่ Semi-volatile halogenated และ Non-halogenated organics, สารกำจัดศัตรูพืชและโลหะหนัก โดยดินที่ปนเปื้อนและตัวทำละลายหรือกรดจะถูกผสมในถังปฏิกรณ์ เมื่อสารปนเปื้อนถูกละลายโดยตัวทำละลาย ของเหลวจะถูกนำไปกำจัดสารปนเปื้อนออกเพื่อนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง การสกัดด้วยตัวทำละลายถูกนำมาใช้ได้ดีในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหย (Halogenated หรือ Non-halogenated) เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ตัวทำละลายอาจตกค้างและปนเปื้อนในดินที่ผ่านการบำบัดแล้วเล็กน้อย จำเป็นต้องคำนึงถึงการใช้อย่างปลอดภัยและพิษของตัวทำละลายที่ใช้ด้วย แต่ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้กับสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง หรือ Hydrophilic substances และอาจไม่เหมาะสมกับดินที่มีความชื้นปริมาณสูงๆ นอกจากนี้การบำบัดและกำจัดตัวทำละลายที่ใช้แล้วอาจเป็นปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย (United Nation, 2000)

- Electroreclamation เป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดโลหะหนักความเข้มข้นสูงในที่สามารถกำจัดโลหะหนักได้หลายชนิด จั้วไฟฟ้าจะถูกฝังลงในดินบริเวณที่ปนเปื้อน ทำการป้อนกระแสไฟฟ้ากระแสตรง สารมลพิษจะเกิดการเคลื่อนย้ายไปยังขั้วไฟฟ้า กลไกการกำจัดอาจเกิดจากการตกตะกอน การเกาะติดกับขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของสารมลพิษ ของเหลว ซึ่งบางครั้งอาจจำเป็นต้องเติมและป้อนหมุนเวียนเข้าไปเพื่อลดพันธะระหว่างดินและสารมลพิษทำให้สารมลพิษเคลื่อนที่ได้ดียิ่งขึ้น วิธีนี้ยังคงต้องถูกพัฒนาต่อไป การประยุกต์ใช้มักก่อให้เกิดภาวะความเป็นกรดของดิน (pH 2-4) จำเป็นต้องทดสอบก่อนนำไปใช้กับสถานที่จริง รวมทั้งต้องพิจารณาปฏิกิริยา Oxidation/Reduction อื่นๆร่วมด้วย (United Nation, 2000)

- Stabilization/Solidification เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ เป็นเทคโนโลยีที่ง่าย สารปนเปื้อนจะถูกยึดติดทางกายภาพหรือถูกห่อหุ้มภายในวัสดุที่เสถียร ปฏิริยาเคมีระหว่างสารปนเปื้อนและสารเคมีจะลดการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อน การทำ

ให้เป็นก้อนแข็งมักประสบความสำเร็จโดยการผสมดินที่ปนเปื้อนกับซีเมนต์ เพื่อให้ได้วัสดุที่จะถูกชะละลายออกมาน้อย ส่วนของสารเคมีที่ใช้และดินที่ปนเปื้อนที่เหมาะสมต้องพิจารณาจากสมบัติของผลผลิตสุดท้ายที่ได้ การทำให้เป็นก้อนแข็งอาจส่งผลทำให้ปริมาณของผลผลิตสุดท้ายเพิ่มขึ้นถึงเท่าตัวได้เมื่อเทียบกับปริมาณเดิม ผลผลิตที่ได้ยังคงต้องถูกควบคุมเช่นเดียวกับของเสียอันตราย จำเป็นต้องมีการทดสอบความเข้ากันได้ของกระบวนการกับสารมลพิษและสิ่งแวดล้อม (United Nation, 2000)

- **Vitrification** เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก, สารประกอบอินทรีย์และสารกัมมันตรังสี โดยใช้ความร้อนที่เพียงพอจนทำให้เกิดการหลอมเป็นแก้วและเย็นตัวลง เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในที่ (In-situ) และนอกที่ (Ex-situ) โดยการแทรก Graphite electrodes ลงในพื้นที่ที่เป็นลักษณะปิดในการให้พลังงานเข้าไป ผลของการให้พลังงานเข้าไป ผลของการให้พลังงานไฟฟ้าจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นถึงกว่า 1,700 °C ทำให้เกิดการหลอมตัว สามารถนำมาใช้ได้กับสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ สารกัมมันตรังสี สารอินทรีย์มักจะถูกทำลายขณะที่สารอนินทรีย์จะถูกตรึงอยู่ในโครงสร้าง ดินที่ผ่านกระบวนการนี้แล้วจะไม่สามารถนำมาใช้เพื่อการเกษตรได้อีก เป็นการจำกัดประโยชน์ในอนาคต (United Nation, 2000)

ข้อได้เปรียบของการทำเสถียร คือ ใช้การผสมแบบธรรมดาในการผสมดินและสารเคมีที่เติมลงไป โดยใช้เครื่องมือทางการเกษตรทั่วไป ส่วนข้อจำกัด คือ ผลผลิตสุดท้ายประกอบด้วยโลหะหนักที่ถูกตรึงอยู่ในดิน ไม่ได้ถูกกำจัดออกจากดินโดยตรง แต่อยู่ในรูปที่เสถียรในดิน (United Nation, 2000)

2.5 การบำบัดดินด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Amendment)

การบำบัดด้วยสารเคมีเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโดยการเติมวัสดุที่สังเคราะห์หรือวัสดุธรรมชาติ เช่นสารเคมีที่สังเคราะห์, วัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรม, ของเสียอุตสาหกรรม, สลัดจากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ, แร่ต่าง ๆ กับดินหรือตะกอนที่ปนเปื้อนเพื่อป้องกันการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนลงสู่ชั้นดินที่ลึกลงไป หรือปนเปื้อนสู่น้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน และลดส่วนของโลหะหนักที่จะนำไปใช้ทางชีวะ (Bioavailable fraction) ขณะที่ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดยังคงอยู่เท่าเดิมเพียงแต่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่เสถียรมากขึ้น สารที่เติม (Amendments) จะทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปของของแข็งมากขึ้นผ่านกระบวนการตกตะกอนเป็นแร่หรือกระบวนการดูดซับ (Brown *et al.*, 2005)

2.5.1 การตรึงโลหะหนักจะสามารถลดการชะละลายและลดส่วนที่จะนำไปใช้โดยพืชผ่านกระบวนการดูดซับ, การแลกเปลี่ยนไอออน, การตกตะกอน, (K_2HPO_4 , DAP) ฟอสฟอรัสบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วจะก่อให้เกิด Pyromorphite เป็นรูปซึ่งมีความสามารถในการละลายได้ต่ำและละลายได้น้อยกว่าตะกั่วที่อยู่ในดินรวมทั้ง PbO และ $PbCO_3$ (Brown *et al.*, 2005) ขณะที่การใช้หิน

ฟอสเฟต (Phosphate rock, PR) เป็นสารที่เติมเพื่อบำบัดดินที่ประสบความสำเร็จ แม้จะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้น้อย แต่อาจจะปล่อยฟอสฟอรัสออกมาในปริมาณที่เพียงพอเพื่อบำบัดดิน, การใช้สารสังเคราะห์ Hydroxyapatite กับดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว สามารถทำให้เกิดเป็น Pyromorphite แต่การนำ Hydroxyapatite มาใช้ในภาคสนามมักไม่ค่อยเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ (Chen *et al.*, 2006) ขณะที่การศึกษาบางฉบับรายงานว่า การใช้ไฮดรอกซีอะพาทิตหรือแมงกานีสออกไซด์สามารถลดความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่วละลายในดิน (Chen *et al.*, 2000)

2.5.2 การเติมสารเคมีบางชนิดเพื่อตรึงโลหะหนักในดินด้วย โคลโลอิด, ฟอสเฟต, สารอินทรีย์ลงในดินที่ปนเปื้อน สามารถลดการละลายของโลหะหนักด้วยกระบวนการตกตะกอน, การดูดซับ หรือการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Chen *et al.*, 2000)

2.5.3 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 นักวิจัยบางคนคาดว่ามีการบวนการที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่างตะกั่วและอะพาไทต์ ได้แก่ การเกิดสารประกอบตะกั่วฟอสเฟตที่มีเสถียรภาพมากขึ้น เช่น $\text{Ca}_{10-x}\text{Pb}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างตะกั่วและแคดเมียมใน 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)

2.5.4 สารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่สามารถลดการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักด้วยกระบวนการดูดซับ ได้แก่ เหล็กออกไซด์ สามารถลดตะกั่วและอาร์เซนิกที่จะถูกชะออกมา, โคลนแดง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมอลูมิเนียม ได้มาจากเครื่องกำจัดฝุ่นแบบไซโคลน และสัณฐานจากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดการชะของโลหะหนักออกมา และลดส่วนที่พืชจะนำไปใช้ เนื่องจากองค์ประกอบที่มีอะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์ปริมาณสูง, ภูเขาอกที่มีเหล็กปริมาณสูง สามารถลดการนำตะกั่วไปใช้โดยพืช เช่นเดียวกับสังกะสีและแคดเมียม (Brown *et al.*, 2005) กลไกที่สำคัญในการตรึงโลหะหนักยังคงยากที่จะอธิบายได้ชัดเจน แม้ว่ากลไกที่ถูกเสนอจะอยู่บนพื้นฐานของกระบวนการดูดซับบนพื้นผิวและตามด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนของแคลเซียม งานวิจัยส่วนมากเสนอแนะว่าการละลายของสารประกอบฟอสเฟต ปล่อยไอออนลบของฟอสเฟต

ออกมาแล้วเกิดกระบวนการตกตะกอนในรูปของแข็งซึ่งมีค่าความสามารถในการละลายต่ำมีเสถียรภาพสูงกว่า (Raicevic *et al.*, 2005) สารเคมีสามารถตรึงโลหะหนักได้จาก

2.5.4.1 ความเป็นต่างจากการละลายของสารเคมีต่อดินที่เป็นกรด ทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งประกอบด้วยโลหะหนัก เช่น โลหะฟอสเฟต, โลหะคาร์บอเนต เป็นองค์ประกอบหลักหรือการตกตะกอนร่วมในไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบรอง

2.5.4.2 การเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นต่างกับการดูดซับของโลหะหนักผ่านกระบวนการ Surface complexation ซึ่งปกติบนผิวของแร่จะมีประจุเป็นบวกในสถานะที่ PH ต่ำ เนื่องจากการดูดติดกับโปรตอน และต้องการประจุลบเมื่อ pH สูงขึ้นนำไปสู่การ Deprotonation ของพื้นผิวดังนั้นเมื่อ PH สูงขึ้นอ็อกซิเจนบวกจึงก่อรูปเป็นสารประกอบที่มีเสถียรภาพกับอ็อกซิเจน บนผิว อนุภาคดินเหนียวในดินธรรมชาติจะแสดงให้เห็นกระบวนการ Surface complexation เนื่องจากมีพื้นผิวจำเพาะที่สูง อย่างไรก็ตาม อ็อกซิเจนลบของอาร์เซนิกในสารละลาย ก็อาจถูกตรึงด้วยเมื่อ PH สูงขึ้นจากการเติมสารเคมีที่ใช้บำบัด

2.5.4.3 การตรึงโลหะหนักจากกระบวนการแลกเปลี่ยนอ็อกซิเจน เช่น ซีโอไลต์ ซึ่งเป็นผลึกของ Aluminum-silicates มีธาตุหมู่ 1 และ 2 เป็น Counter ion เป็นโครงข่ายกรวยสามเหลี่ยมของ $[\text{SiO}_4]^-$ และ $[\text{AlO}_4]^-$ และยึดติดด้วยการแชร์ออกซิเจน การแทนที่ของซิลิกา ด้วยอลูมิเนียมทำให้เกิดประจุลบในโครงสร้างซึ่งอาจมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนอ็อกซิเจนบวก (cation exchange capacity, CEC) มีค่าสูงการดูดซับโลหะหนักบน Hydroxyapatite ได้แก่ Cd, Cu, Ni, Si และ Zn ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนอ็อกซิเจนของแคลเซียมบนอนุภาคของ Apatite ในดิน การตกตะกอนในรูปของโลหะฟอสเฟตเป็นกลไกหลักในการตรึงโลหะหนัก ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำบนช่วง PH ที่กว้าง ทำให้การใช้ฟอสเฟตในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักเป็นเทคโนโลยีที่ได้เปรียบในการบำบัดโลหะหนักในดิน (Adriano *et al.*, 2004)

2.4.5 การใช้สารประกอบฟอสเฟตที่มีความสามารถในการละลายสูง เช่น Diammonium phosphate (DAP อัตรา 2,300 มก. P/กก.) มีประสิทธิภาพสูงในการตรึงแคลเซียม, ตะกั่ว และสังกะสีในดิน 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) สารที่มีสมบัติเป็นด่าง ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์, แคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนต สามารถลดการละลายได้ของโลหะหนักและเพื่อความเป็นด่างให้แก่ดิน พร้อมกับการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของอนุภาคดิน (Base McGowan, 2004) ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ทางเทอร์โมไดนามิกของการละลายได้ของ แคลไซต์, ตะกั่ว และสังกะสี และปฏิกิริยาการละลาย แคลไซต์ฟอสเฟต, มีค่า $\log K_{sp}$ ต่ำที่สุดเป็น -38.1, Lead chloropyromorphite มีค่า $\log K_{sp}$ ต่ำที่สุดเป็น -76.8 และ Zinc pyromorphite มีค่า $\log K_{sp}$ ต่ำที่สุดเป็น -63.1 ตามลำดับ

2.6 การสกัดลำดับส่วน (Sequential Extraction)

วิธีการสกัดลำดับส่วนถูกนำมาใช้เพื่อศึกษารูปแบบทางเคมีของโลหะหนักที่อยู่ในดินและตะกอนที่ปนเปื้อนโดยใช้สารสกัดเฉพาะ และถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการศึกษาความเป็นไปได้และการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักในโครงสร้างของดิน (Hullebusch *et al.*, 2005)

สารที่ใช้ในการสกัดตัวอย่างดินสามารถแบ่งออกเป็น สารอิเล็กโตรไลต์, กรดอ่อน, สารรีดิวซ์ซิง, สารเชิงซ้อน, สารออกซิไดซ์ซิง, กรดแก่ (Tessier *et al.*, 1979) ตัวอย่างและสารที่ใช้ในการสกัดจะถูกนำมาแช่ในช่วงระยะเวลาที่ต้องการด้วยสารสกัดเริ่มต้น หลังจากนั้นจะถูกนำไปเหวี่ยงแยกของแข็งและของเหลวออกจากกัน ของแข็งที่เหลือจะถูกล้างด้วยน้ำกลั่น ของเหลวที่ได้จะถูกทิ้งไป ตัวอย่างจะถูกสกัดด้วยสารสกัดตัวถัดไปด้วยกระบวนการเดียวกัน สุดท้ายจะใช้กรดเป็นสารสกัดเพื่อให้ได้ Residual fraction โลหะหนักที่ได้จากการสกัดแต่ละครั้งจะถูกวิเคราะห์ด้วย Atomic absorption spectroscopy (AAS), Inductively couple plasma (ICP) หรืออื่นๆ มีการพัฒนาวิธีสกัดและสารละลายที่ใช้ในการสกัดอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับดิน ตะกอน และสลัดจ์ (Mulligan and Azma, 2003)

การสกัดลำดับส่วนเป็นวิธีที่ใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์รูปแบบของโลหะหนักในดิน ตะกอน และอื่นๆ โดยการใช้สารสกัดแต่ละชนิดทำการสกัดโลหะหนักออกมาเป็นส่วน (Mossop and Davidson, 2003) วิธีที่ถูกใช้มากได้แก่ การสกัดแยก 5 ขั้นตอน (Tessier *et al.*, 1979) และการสกัดลำดับส่วน 6 ขั้นตอน (Kersten and Förstner, 1986) หลังจากนั้นก็ถูกปรับปรุงโดยนักวิจัยอื่นๆ เรื่อยมาเพื่อลดความคลาดเคลื่อน และพยายามที่จะแยกโลหะหนักในส่วนที่ยึดติดกับสารอินทรีย์และซิลิเฟตในส่วนของ Oxidisable fraction ออกจากกัน (Cuong and Obbard, 2006)

ตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดของกระบวนการสกัดลำดับส่วนวิธีต่างๆ ได้แก่ สารสกัดที่ใช้ สภาพที่ใช้ในการสกัด ระยะเวลาการแช่และอุณหภูมิที่ใช้ เป็นต้น

วิธีการสกัดลำดับส่วนไม่ใช่วิธีมาตรฐาน และผลที่ได้จากการสกัดมีโอกาสที่จะแตกต่างกันได้ แม้ว่าจะใช้สารสกัดและสภาวะในการสกัด ได้แก่ pH, ความเข้มข้นของสารสกัด, ปริมาณสารที่ใช้, สกัดส่วนตัวอย่างต่อสารสกัด เป็นต้น ไม่มีวิธีสกัดใดที่สามารถสกัดได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม สารสกัดที่ถูกใช้จะต้องสามารถสกัดโลหะหนักเฉพาะส่วนที่ต้องการออกมาและไม่ไปสกัดโลหะหนักในส่วนอื่นออกมาด้วย(Mulligan *et al.*, 2001; Mulligan and Azma, 2003) ซึ่งโดยทั่วไปสามารถแบ่งส่วนของโลหะหนักที่ยึดติดในตัวอย่างดินได้ 6 ส่วน ตามที่เกิพ่นระในดิน ได้แก่ Water soluble, Exchangeable, Sulfide/carbonate-bound, Oxide-bound, Organically bound และ Residual fraction ดังรายละเอียดดังตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 การสกัดลำดับส่วนที่ใช้ในงานวิจัยต่างๆ

Authors	Exchangeable	Bound to carbonate	Bound to Fe-Mn oxide	Bound to Organic Matter	Residual
Tessier <i>et al.</i> , (1979)	1-MgCl ₂	2-NaOH/HOAc	3-NH ₂ OH.HCl in 5%HOAc	4-H ₂ O ₂ /HNO ₃ + NH ₄ OAc	5-HF + HClO ₄
Chester and Hughes (1967)	1-NH ₃ OHCl + CH ₃ COOH	2-NH ₃ OHCl + CH ₃ COOH	3-NH ₃ OHCl + CH ₃ COOH		
Chang <i>et al.</i> , (1984)	1-KNO ₃	4-Na ₂ EDTA		3-NaOH	5-HNO ₃ (70-80°C)
Emmerich <i>et al.</i> , (1982)	1-KNO ₃	4-Na ₂ EDTA		3-NaOH	5-HNO ₃
Gibson and Farmer (1986)	1-CH ₃ COOH pH 7	2-CH ₃ COOH pH 5	3-4-Hydroxyl-ammonium + HNO ₃ /CH ₃ COOH	5-H ₂ O ₂ + HNO ₃ 85°C	6-Aqua regia + HF + Boric acid
Yanful <i>et al.</i> , (1988)	1-MgCl ₂ + Ag thiourea	2-CH ₃ COONa + CH ₃ COOH	3-NH ₂ OH.HCl	4- + Sulfides H ₂ O ₂ + HNO ₃	5-HNO ₃ + HClO ₄ + HF
Clevenger (1990)	1-MgCl ₂	2-NaOAc/HOAc		3- HNO ₃ /H ₂ O ₂	4-HNO ₃ (boiled)

ตารางที่ 2.2 การสกัดลำดับส่วนที่ใช้ในงานวิจัยต่างๆ (ต่อ)

Authors	Exchangeable	Bound to carbonate	Bound to Fe-Mn oxide	Bound to Organic Matter	Residual
Belzile <i>et al.</i> , (1986)	1-MgCl ₂	2CH ₃ COONa /NH ₄ OH.HCl/HNO ₃ Room temp	3-MnOxide NH ₄ OH.HCl/HNO ₃ NH ₄ OAc/HNO ₃	4- Sulf H ₂ O ₂ /HNO ₃ , NH ₄ OAc + HNO ₃	
Guy <i>et al.</i> , (1978)	1-(exch. + adsor. + org) CaCl ₂ + CH ₃ COOH + K- pyrophosphate	4-(carb. + adsor. + Fe- Mn nodules) NH ₄ OH.HCl + CH ₃ COOH	2-(metal oxides + org.) H ₂ O ₂ + Dithionite + Bromoethanol		
Engler <i>et al.</i> , (1977)	1-(exch. + adsor.) NH ₄ OAc	2-NH ₄ OH.HCl		3-HNO ₃ /H ₂ O ₂	4-Na ₂ S ₂ O ₄ /HF/HNO ₃
Yong <i>et al.</i> , (1993)	1-KNO ₃	2-NaOAc pH 5	3-NH ₄ OH.HCl	4-H ₂ O ₂ (3 steps)	5-HF/HClO ₄ + HCl

1, 2, 3, 4, 5 indicates the sequence of the extraction.

ที่มา: Raymond (2001)

- **Water soluble fraction** ส่วนที่ละลายน้ำได้ เป็นส่วนที่เกิดการเคลื่อนย้ายได้ง่ายที่สุด สามารถสกัดได้ด้วยน้ำกลั่น แล้วทำการเหวี่ยงแยกของแข็งและของเหลวออกจากกัน แล้วนำไปวิเคราะห์โลหะหนัก

- **Exchangeable fraction** ส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ เป็นส่วนที่สามารถถูกดูดซับทางชีวะได้ทันที อาจรวมโลหะหนักที่เกาะที่ไม่แข็งแรงบนผิวของอนุภาคดินเหนียวและออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส หรือที่ปกคลุมสารอินทรีย์ (Mulligan *et al.*, 2001) สามารถสกัดแยกโลหะหนักส่วนนี้ออกมาด้วยการแทนที่ด้วยอออนบวก สารสกัดทั่วไปที่ใช้ ได้แก่ $MgCl_2$, $CaCl_2$, KNO_3 , และ $NaNO_3$ โลหะหนักที่ยึดติดอนุภาคดินด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic) กับประจุลบบนอนุภาคของดิน โดยเฉพาะดินที่มีองค์ประกอบเป็น ดินเหนียว สารอินทรีย์ และ Amorphous material สารสกัดอื่นเช่น NH_4Cl และ NH_4OAc อาจละลายบางส่วนของ $CaCO_3$, $MgCO_3$, $BaCO_3$, และ $MgSO_4$ หากใช้ $CaSO_4$ และตามด้วย NH_4OAc อาจทำให้ Mn oxyhydrates และโลหะออกไซด์บางส่วนละลายออกมาด้วย (Raymond, 2001)

- **Carbonates fraction** ส่วนของคาร์บอเนต คาร์บอเนตในดินและตะกอนปรากฏในรูปกล้ายซีเมนต์และเคลือบบนผิว ทำให้เกิดการตกตะกอนร่วมกับโลหะหนัก ภายใต้สภาวะ pH ต่ำ ก่อให้เกิดการละลายของคาร์บอเนตและการชะของโลหะหนักสารสกัดที่เป็นที่ยอมรับได้แก่ Sodium acetate/acetic acid ที่ pH 5.0 แม้ว่าโลหะที่ยึดติดแบบไม่แข็งแรงกับเหล็กไฮดรอกไซด์และแมงกานีสออกไซด์จะปรากฏออกมาบ้างก็ตาม (Tessier *et al.*, 1979) ขณะที่ไม่ก่อให้เกิดการละลายของสารอินทรีย์ ออกไซด์ และองค์ประกอบดินเหนียวออกมา (Mulligan *et al.*, 2001)

- **Hydrous iron and manganese oxide fraction** เหล็กไฮดรอกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ จะปรากฏเป็นลักษณะกล้ายซีเมนต์ยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของดิน หรือเคลือบบนอนุภาคของดิน (Tessier *et al.*, 1979) โลหะออกไซด์ประกอบด้วย Ferromanganese nodules มีทั้งรูปผลึกที่สมบูรณ์ และผลึกที่ไม่สมบูรณ์ ปรากฏเป็นส่วนที่เคลือบบนอนุภาคหรือเป็นแบบบริสุทธ์ ระดับดักการเกิดผลึกมีผลต่อการยึดติดกับโลหะหนัก เช่น รูปที่แลกเปลี่ยนได้ผ่านทางกระบวนการผิวเชิงซ้อน (Surface complexation) กับหมู่ฟังก์ชัน Hydroxyls, Carbonyls, Carboxyls, Amines เป็นต้น หรือผ่านกระบวนการตกตะกอน และตกตะกอนร่วมในรูปออสติฐาน เกิดเป็นพันธะที่แข็งแรง (Raymond, 2001)

โลหะหนักในส่วนนี้จะยึดติดด้วยพันธะที่แข็งแรงกว่าส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้และส่วนคาร์บอเนต และมักปรากฏบนพื้นผิวและตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ สามารถสกัดด้วย Hydroxylamine hydrochloride ที่ pH 2.0 ด้วยกรดอะซิดิก Hydroxylamine hydrochloride จะรีดิวซ์

เฟอรัสและแมงกานีสไฮดรอกไซด์ให้อยู่ในรูปที่ละลายได้ สารอินทรีย์และองค์ประกอบของดินเหนียว จะไม่ถูกชะออกมาด้วย (Mulligan *et al.*, 2001)

- **Organic fraction:** ส่วนของสารอินทรีย์ โลหะหนักสามารถเกิดพันธะบิเคติคกับ สารอินทรีย์ สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก หรือเคลือบบนผิว สมบัติของสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ ได้แก่ Complexation และ Peptization โดยเฉพาะกรดฮิวมิกและฟูลวิก เป็นที่ทราบดีว่าเกี่ยวข้องกับการ สะสมทางชีวะ (Bioaccumulation) ในสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ภายได้สภาวะที่มีออกซิเจนในน้ำธรรมชาติ สารอินทรีย์สามารถถูกย่อยสลายและทำให้โลหะหนักละลายออกมาได้ (Tessier *et al.*, 1979) กลไก การยึดจับของโลหะหนักและสารอินทรีย์ประกอบด้วย กระบวนการเชิงซ้อน การดูดซับ การคีเลชัน โดยทั่วไปวิธีที่ใช้ในการชะโลหะหนักออกมาจากการบิเคติคกับสารอินทรีย์ จะอาศัยการออกซิไดซ์ สารอินทรีย์ (Raymond, 2001) สารสกัดที่ใช้ ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในกรดไนตริก ซึ่งถูกใช้ ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์และซัลไฟด์ละลาย (Mulligan *et al.*, 2001)

- **Residual fraction:** หลังจากที่ถูกสกัดออกไปทั้ง 4 ขั้นตอน ของแข็งที่เหลือจะเหลือ เฉพาะส่วนที่เป็นแร่ ซึ่งอาจจะกักโลหะหนักไว้ได้บางส่วนภายในโครงสร้างผลึก ซึ่งปกติจะไม่ถูกชะ ออกมาในสารละลายภายได้สภาวะปกติในธรรมชาติ (Tessier *et al.*, 1979) โลหะหนักส่วนนี้มักมีปริ มาน ไม่มาก และจะถูกชะออกมาจากซิลิเกตด้วยการย่อยด้วยกรดเข้มข้นที่อุณหภูมิสูง (Raymond, 2001) สารสกัดที่ใช้ ได้แก่ Aqua regia (HCl: HNO₃, 3: 1) (Mulligan *et al.*, 2001)

การสกัดลำดับส่วนแต่ละวิธีซึ่งมีรูปแบบและวิธีการที่แตกต่างกันทำให้เป็นการยาก ที่จะนำผลการศึกษามาเปรียบเทียบกันได้ จนกระทั่งปี 2536 กลุ่มของนักวิจัยได้ทำงานภายใต้การ สนับสนุนของ BCR ได้พัฒนาวิธีการสกัดของ European Standard, Measurements and Testing Programme และถูกมาใช้สกัดแยกโลหะหนัก Cd, Cr, Cu, Ni, Pb และ Zn ในตะกอน จากผล การศึกษาดังกล่าวทำให้ได้มาซึ่ง

- วิธีการสกัดแยก BCR sequential extraction ซึ่งถูกพัฒนาเพื่อสกัดแยกโลหะ ออกจากตะกอน

- วัตถุประสงค์ ตะกอนทะเลสาบ (BCR CRM 601) กระบวนการสกัดแบบ 3 ขั้นตอนนี้ (BCR sequential extraction) มีพื้นฐานมาจากวิธีของ Tessier เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจาก กระบวนการดูดซับย้อนกลับ และการตกตะกอน กระบวนการสกัดแยกนี้จะใช้สารสกัดที่มี pH ต่ำ กว่า และมีสัดส่วนของเหลวต่อของแข็งสูงกว่า รวมทั้งใช้เวลาในการสกัดที่ยาวนานถึง 16 ชั่วโมง (Hirner and Sulkowski, 1999) โลหะหนักที่สกัดได้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ Exchangeable fraction, Reducible fraction, และ Oxidisable fraction

การสกัดลำดับส่วนแบบ BCR ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างประสบความสำเร็จกับตัวอย่างดิน, ตะกอน และสไลด์ ในงานวิจัยต่างๆ เช่น ตะกอนจากทะเลสาบ (Hjorth, 2004), ตะกอนในบ่อ, ตะกอนชายฝั่งทะเล (Cuong and Obbard, 2006, Adamo, 2005, Morillo *et al.*, 2004, Usero *et al.*, 1998), สไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสีย (Fuentet *et al.*, 2004, Hullebusch *et al.*, 2005) ดิน ดินที่ปนเปื้อนจากอุตสาหกรรม (Davidson *et al.*, 1998), เถ้า และปุ๋ยคอก (Mossop and Davidson, 2003) สไลด์จากโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Wang *et al.*, 2005) นักวิจัยเลือกใช้วิธีการสกัดแบบนี้มากขึ้นในระบะหลังเป็นต้นมา (Mester *et al.*, 1998)

Sahuquillo *et al.*, (1999) ได้ศึกษาแหล่งที่มาของ Irreproducibility ของการสกัดแบบ BCR three-stage sequential extraction โดยใช้วัสดุอ้างอิง CRM 601 พบว่า pH ของสารละลาย Hydroxylamine hydrochloride ในขั้นตอนที่ 2 เป็นปัจจัยสำคัญ ปัจจัยอื่น ได้แก่ ชนิดของกรดที่ใช้ในการปรับ pH, อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด, ระยะเวลาในการสกัด, และการสกัดภายใต้สภาวะที่เป็นไนโตรเจน ไม่ส่งผลกระทบต่อความเที่ยงตรง (Precision) ในการวิเคราะห์ แม้ว่าจะมีค่าโลหะที่ถูกสกัดออกมาต่างกัน การเพิ่มความเที่ยงตรงของการวิเคราะห์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความเข้มข้นของ Hydroxylamine hydrochloride ในขั้นตอนที่ 2 จาก 0.1 โมล/ลิตร เป็น 0.5 โมล/ลิตร และเพิ่มความเร็วของเครื่องเหวี่ยงแยกจาก 1500 รอบ/นาที เป็น 3000 รอบ/นาที ส่วนการใช้ $MgCl_2$ เป็นสารที่ใช้ล้างระหว่างขั้นตอนที่สกัดแยกจะก่อให้เกิดความไม่แน่นอนมากขึ้น, ไม่แนะนำให้ใช้การใส่กระดาษกรองในการแยกระหว่างของแข็งและของเหลว เนื่องจากอาจก่อให้เกิดการละลายของ Non-target phases

Mossop and Davidson, (2003) ศึกษาและเปรียบเทียบการสกัดแบบ Original BCR sequential extraction (step 2: 0.1 mol/L hydroxylammonium chloride pH 2) และ Modified BCR sequential extraction (step 2: 0.5 mol/L hydroxylammonium chloride pH 1.5) ในขั้นตอนที่ 2 ของการสกัดแยกดินและตะกอน 5 ตัวอย่าง ได้แก่ ดินที่บำบัดสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน 1 ตัวอย่าง, ดินที่ปนเปื้อนจากอุตสาหกรรม 2 ตัวอย่าง, ตะกอนแม่น้ำ และตะกอนปากอ่าว เมื่อพิจารณาปริมาณเหล็กและแมงกานีสและโลหะหนักที่ถูกสกัดออกมา ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าการสกัดด้วย Modified BCR sequential extraction สกัดออกมาได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับวิธี Original BCR sequential extraction ทองแดงและเหล็กมีพฤติกรรมเหมือนกัน ตะกั่วมีการ

นำกลับมาได้สูงขึ้น ขณะไม่ค่อยมีผลต่อที่แมงกานีสและสังกะสี และสรุปว่าวิธี Modified BCR sequential extraction เหมาะสำหรับดินและตะกอนที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบของ Reducible matrix

กระบวนการสกัดแบบ BCR และแบบ Modified BCR มีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 การศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีสกัดแบบ Modified BCR sequential extraction ใน การศึกษาการตรึงโลหะหนักในดินที่ปนเปื้อนด้วยการใช้สารเคมี ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.3 และ ตารางที่ 2.4

● ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (Pseudo-total metal contents) ปริมาณโลหะหนัก ทั้งหมดในตัวอย่าง อาจทำการวิเคราะห์โดยการย่อยตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างจำนวน 0.5 กรัม 3 ตัวอย่าง ย่อยด้วยสารละลายกรดเข้มข้น แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic adsorption spectroscopy โดยมีรายละเอียดการย่อยดังที่กล่าวแล้ว

การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของการใช้เครื่องย่อยแบบไมโครเวฟ, การสกัดแยก และการ วิเคราะห์ด้วย Atomic adsorption spectroscopy โดยการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 4 ขั้นตอน (Acid-soluble + Reducible + Oxidisable + Residual) จากขั้นตอนการสกัดแยกกับการปริมาณโลหะหนัก ทั้งหมดที่ได้จากการใช้ เครื่องย่อยแบบไมโครเวฟ สามารถคำนวณค่า Recovery ได้จากสมการ

$$\% \text{ Recovery} = (\sum \text{Fraction}) \times 100 / \text{Total digestion}$$

ฟร.

๓๓๗๑๔

๒๖๕๒

๔.๒

ตารางที่ 2.3 การสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี BCR และ Modified - BCR

Step	Fraction	Nominal target phase(s)	BCR	Modified BCR
I	Exchangeable, water and acid-soluble	Soluble species, carbonates, cation exchange sites	0.11 mol/L CH_3COOH	0.11 mol/L CH_3COOH
II	Reducible	Iron and manganese oxyhydroxides	0.1 mol/L $\text{NH}_2\text{OH.HCl}$ at pH 2	0.5 mol/L $\text{NH}_2\text{OH.HCl}$ at pH 1.5
III	Oxidisable	Organic matter and sulphides	H_2O_2 followed by 1.0 mol/L $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ at pH 2	H_2O_2 followed by 1.0 mol/L $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ at pH 2
IV	Residual		Aqua regia	Aqua regia

ที่มา: ปรับปรุงจาก Mossop and Davidson (2003)

ตารางที่ 2.4 การสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified - BCR

Fraction	Associated form	Extraction solution	Process
I	Acid-soluble fraction-bound to carbonates	0.11 mol/L CH_3COOH	Shake for 16 h at a room temperature, 30±10 rpm
II	Reducible fraction-bound to Fe and Mn oxides	0.5 mol/L $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ (pH 1.5 with 2 mol/L HNO_3)	Shake for 16 h at a room temperature, 30±10 rpm
III	Oxidisable fraction-bound to organic matter and sulfides	8.8 mol/L H_2O_2 (pH of 2-3) 1.0 mol/L $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (pH 2 with HNO_3)	Digested for 1 h at 85±2 °C in a water bath with occasional shaking Shaken for 16 h at room temperature
IV	Residual fraction-strongly associated to the crystalline structures of the minerals	$\text{HNO}_3 + \text{HF}$ (3:1)	Heated in the microwave unit 180±5 °C and remained for 9.5 min.
Total of metal speciation = Fraction I + II + III + IV			

บทที่ 3

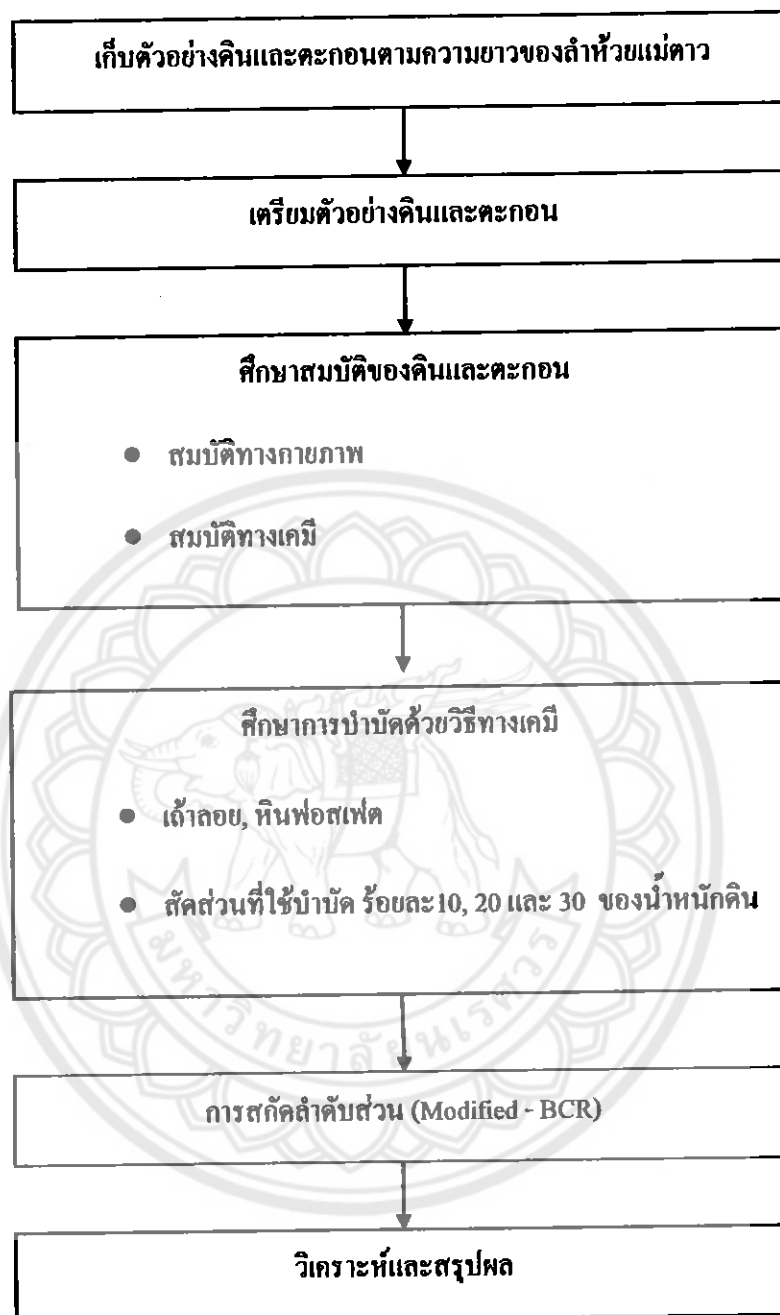
วิธีดำเนินโครงการ

การดำเนินการทดลองโครงการการบำบัดดินและตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้เถ้าลอยและหินฟอสเฟตในการบำบัด ที่ลำห้วยแม่ดาว อำเภอแม่สอ จังหวัดตาก โดย การเก็บตัวอย่างดินและตะกอนจะเริ่มเก็บตัวอย่างตามแนวลำห้วยแม่ดาวรวมทั้งหมด 6 จุด ระยะห่างระหว่างจุดเก็บแต่ละจุดประมาณ 1 กิโลเมตร มีรายละเอียดและวิธีการทดลองดังนี้

3.1 กรอบความคิดของโครงการวิจัย

ตัวอย่างดินและตะกอนปนเปื้อนแอมโมเนียมตามความยาวของลำห้วย ซึ่งไหลจากทิศตะวันตก- ตะวันออก โดยเก็บตัวอย่างดิน ใช้วิธีเก็บแบบไม่เลือก ที่ระดับความลึก 0-15, 15-30, 30-45 เซนติเมตร จำนวน 6 จุด ทั้งแต่ก่อนผ่านเหมือง และจุดถัดมาเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงบริเวณท้ายลำน้ำ นำมาวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมทั้งหมด หลังจากนั้นก็จะทำการบำบัดด้วยวิธีทางเคมีโดยอาศัยเถ้าลอย และหินฟอสเฟต และทำการศึกษารูปแบบของแอมโมเนียมในดินทั้งก่อนและหลังการบำบัด โดยใช้วิธีสกัดค่าด้วยวิธี Modified - BCR

ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 จุดเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างดินและตะกอนทั้งหมด 6 จุด จุดละ 3 ตัวอย่าง ที่ระดับความลึก 0-15, 15-30 และ 30-45 เซนติเมตร ตามความยาวของลำห้วยแม่ดาวจากทิศตะวันออกไปทางทิศตะวันตก โดยอ้างอิงจุดเก็บตัวอย่างในแผนที่และอาศัยเครื่องกำหนดพิกัด ซึ่งจุดเก็บตัวอย่างดินและตะกอนได้แสดงดังรูปที่ 3.3, 3.4 และตารางที่ 3.1, 3.2 ตามลำดับ แสดงหมู่บ้านที่เก็บตัวอย่างและพิกัดทางภูมิศาสตร์



รูปที่ 3.2 โรงเรียนบ้านถ้ำเสือ

ตารางที่ 3.1 แสดงจุดเก็บตัวอย่างดิน

จุดที่เก็บตัวอย่าง	พิกัดทางภูมิศาสตร์ E	พิกัดทางภูมิศาสตร์ N
1. หมู่บ้านถ้ำเสือ (SS-1)	E 47 Q 0465624	N 47 Q 1842443
2. หมู่บ้านพะเค๊ะ (SS-2)	E 47 Q 0460488	N 47 Q 1843180
3. หมู่บ้านแม่ดาวใหม่ (SS-3)	E 47 Q 0457669	N 47 Q 1843052
4. หมู่บ้านแม่ดาวแพะ (SS-4)	E 47 Q 0455578	N 47 Q 1843484
5. หมู่บ้านแม่ดาวใต้ (SS-5)	E 47 Q 0453742	N 47 Q 1844327
6. หมู่บ้านหนองกิ่งฟ้า (SS-6)	E 47 Q 0451965	N 47 Q 1845317

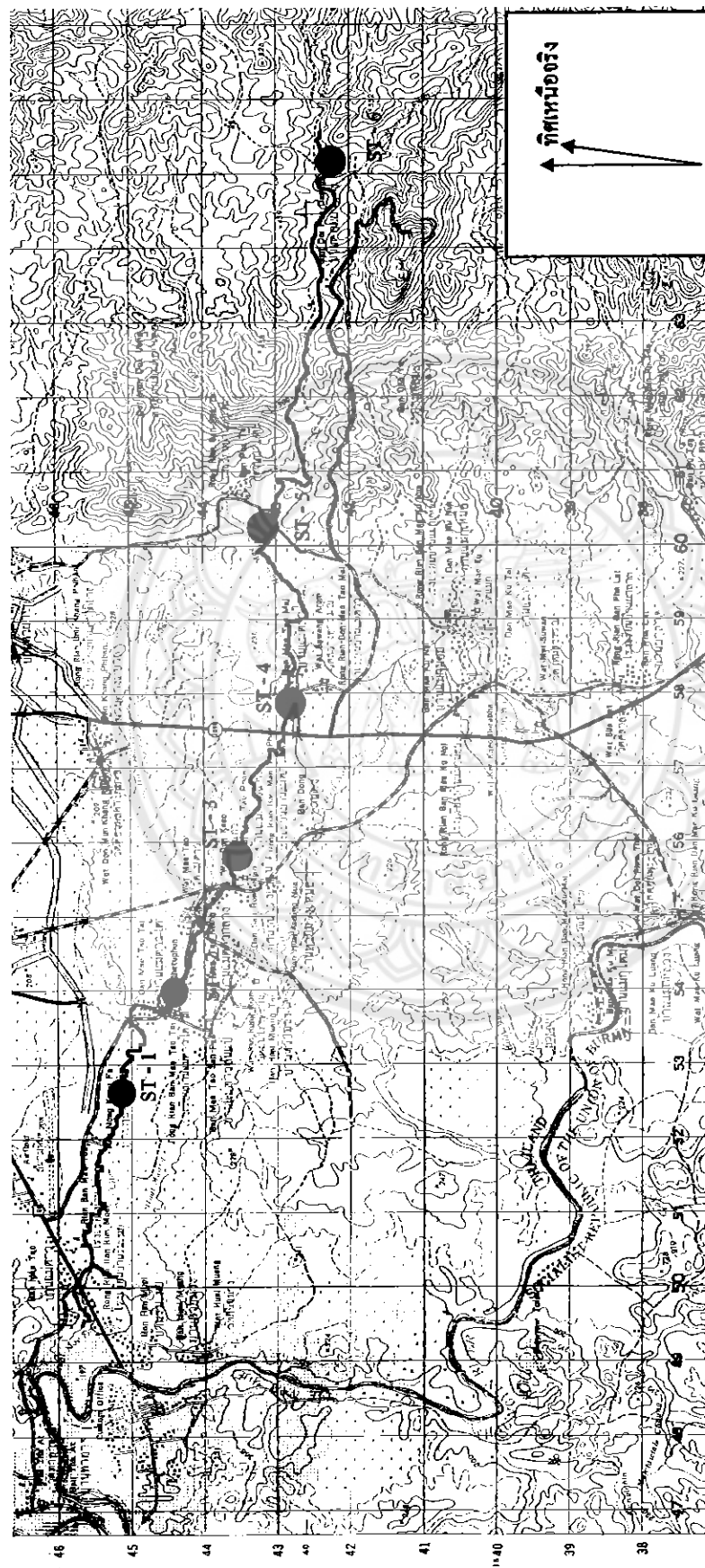


รูปที่ 3.3 แผนที่แสดงจุดเก็บตัวอย่างดิน

ตารางที่ 3.2 แสดงจุดเก็บตัวอย่างตะกอน

จุดที่เก็บตัวอย่าง	พิกัดทางภูมิศาสตร์ E	พิกัดทางภูมิศาสตร์ N
1. หมู่บ้านถ้ำเสือ (ST-1)	E 47 Q 0465624	N 47 Q 1842443
2. หมู่บ้านพะเค๊ะ (ST-2)	E 47 Q 0460521	N 47 Q 1842992
3. หมู่บ้านแม่ดาวใหม่ (ST-3)	E 47 Q 0457481	N 47 Q 1842903
4. หมู่บ้านแม่ดาวแพะ (ST-4)	E 47 Q 0455565	N 47 Q 1843564
5. หมู่บ้านแม่ดาวใต้ (ST-5)	E 47 Q 0453760	N 47 Q 1844460
6. หมู่บ้านหนองกิ้งฟ้า (ST-6)	E 47 Q 0451985	N 47 Q 1845294





รูปที่ 3.4 แผนที่แสดงจุดเก็บตัวอย่างตะกอน

3.2.1 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน ในสนาม

ในการเก็บตัวอย่างดินนั้นจะใช้วิธีการเก็บแบบ Disturb Sampling ในการเก็บตัวอย่างดิน ในภาคสนาม

3.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บดินและตะกอน

- เครื่องมือสำหรับขุดดิน เช่น จอบ เสียม พลั่ว
- ภาชนะสำหรับเก็บตัวอย่างดิน เช่น ถุงพลาสติก ถัง

3.2.1.2 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างดินและตะกอน

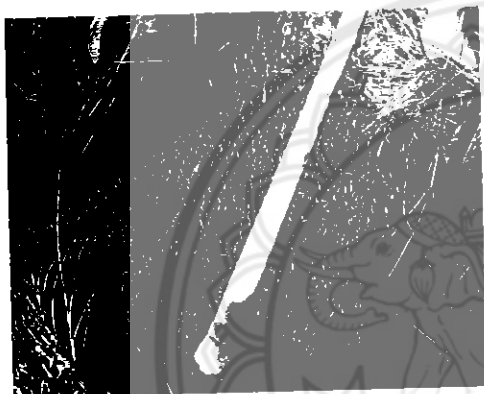
- เตรียมอุปกรณ์ในการเก็บดินให้พร้อม
- ขุดดินในหนึ่งหลุมเป็นสามระดับ
 - ระดับแรกทำการขุดดิน ลึกลงไปประมาณ 15 เซนติเมตร ใส่ลงในภาชนะ หรือถุงพลาสติกสำหรับใส่ดิน พร้อมทั้งเขียนกำกับที่ข้างถุงด้วยว่าเป็นดินระดับที่เท่าไรและจุดที่เท่าไร
 - ระดับที่สองทำการขุดดินลึกลงไปจากระดับแรกอีก 15 เซนติเมตร คือที่ความลึกประมาณ 30 เซนติเมตร ใส่ลงในภาชนะหรือถุงพลาสติกสำหรับใส่ดิน พร้อมทั้งเขียนกำกับไว้ที่ข้างถุงแบบระดับแรก
 - ระดับที่สามทำการขุดดินลึกลงไปอีก 15 เซนติเมตร จากความลึกเดิมคือที่ความลึกประมาณ 45 เซนติเมตร ใส่ลงในภาชนะหรือถุงพลาสติกสำหรับใส่ดิน พร้อมทั้งเขียนกำกับไว้ที่ข้างถุงแบบระดับแรก
- ในขณะที่เก็บดินในแต่ละจุดนั้นจะต้องทำการเก็บพิกัดของจุดที่เก็บดิน ด้วยเครื่อง Garmin 3Plus (GPS) พร้อมทั้งจดบันทึกค่าพิกัดที่อ่านได้จากเครื่อง GPS ในแต่ละจุดนั้น
- ทำการเก็บดินตามแบบข้อ 2 แต่เปลี่ยนจุดในการเก็บดินโดยขุดเก็บตัวอย่างดินในตำแหน่งแม่ดาวไปเรื่อยๆ จนครบ 6 จุด



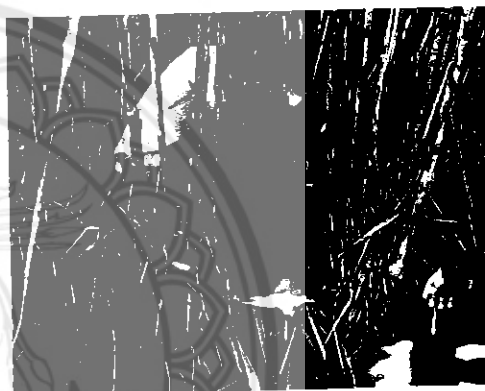
จุดที่ 1 หมู่บ้านถ้ำเสือ



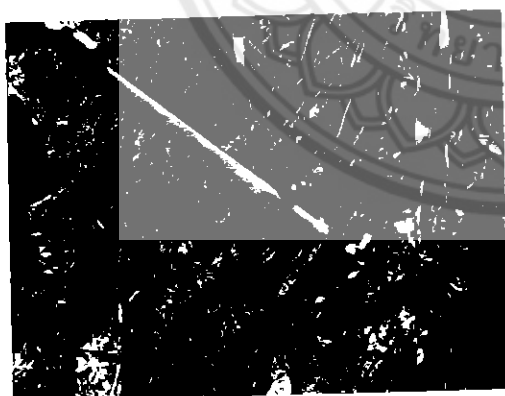
จุดที่ 2 หมู่บ้านพะเคะ



จุดที่ 3 หมู่บ้านแม่ดาวไหม



จุดที่ 4 หมู่บ้านแม่ดาวพะ



จุดที่ 5 หมู่บ้านแม่ดาวใต้



จุดที่ 6 หมู่บ้านหนองกิ่งฟ้า

รูปที่ 3.5 แสดงการเก็บตัวอย่างดิน



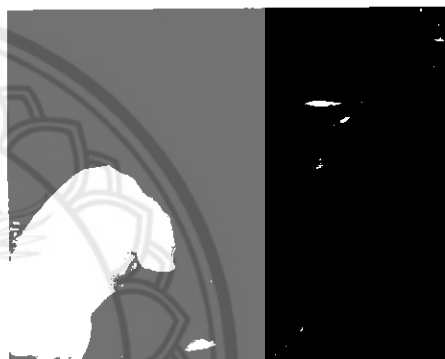
จุดที่ 1 หมู่บ้านถ้ำเสือ



จุดที่ 2 หมู่บ้านพะเคะ



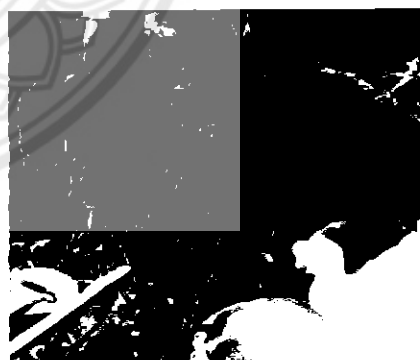
จุดที่ 3 หมู่บ้านแม่ดาวใหม่



จุดที่ 4 หมู่บ้านแม่ดาวแพะ



จุดที่ 5 หมู่บ้านแม่ดาวใต้



จุดที่ 6 หมู่บ้านหนองกิ่งฟ้า

รูปที่ 3.6 แสดงการเก็บตะกอน

3.3 การเตรียมตัวอย่างดินและตะกอน

ขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างดินและตะกอน

- นำดินและตะกอนที่ได้จากภาคสนามมาทำการเทลงในภาชนะสำหรับตากดินพร้อมทั้งเขียนกำกับด้วยว่าเป็นดินระดับที่เท่าไร และจุดที่เท่าไร จากนั้นนำดินไปตากแดด ประมาณ 1 สัปดาห์
- เมื่อดินและตะกอนแห้งแล้วจากนั้นทำการทุบดินด้วยค้อนยางแล้วทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อแยกขนาดของดินและเศษซากใบไม้และกิ่งไม้ เปลือกหอย และเศษขยะต่างๆ ออกจากดิน
- นำดินและตะกอนที่ร่อนผ่านตะแกรงแล้วใส่ในถุงพลาสติกทำการปิดปากถุงให้สนิทพร้อมทั้งเขียนกำกับด้วยว่าเป็นดินระดับและจุดที่เท่าไร
- เก็บตัวอย่างดินและตะกอนที่ทำเตรียมไว้ให้เรียบร้อยพร้อมที่จะนำไปใช้ทำการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 3.7 แสดงการตากตัวอย่างดิน

3.4 การศึกษาสมบัติของดินและตะกอนทางกายภาพ

3.4.1 วิธีทดสอบหาความชื้น(Water content)

3.4.1.1 มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ

ASTM D 2216-90 Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass

3.4.1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อให้ทราบวิธีการหาปริมาณน้ำที่มีอยู่ในมวลดินธรรมชาติ

3.4.1.3 ทฤษฎีและหลักการ

การหาปริมาณความชื้นในมวลดิน (Water Content, w) คือ การหาอัตราส่วนระหว่างมวลหรือน้ำหนักของน้ำต่อมวลหรือน้ำหนักของเม็ดดินที่มีอยู่ในมวลดินวิธีการทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลดินจะมีวิธีการทดสอบ ดังนี้

การคำนวณหาปริมาณความชื้นในดินโดยวิธีตู้อบธรรมดา (Conventional Oven – Method)

3.4.1.4 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- กระป๋องใส่ดิน (Can)
- ตาชั่งที่ชั่งได้ละเอียด 0.01 กรัม
- ตู้อบที่สามารถควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ $110 \pm 50^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.8 กระป๋องเก็บตัวอย่างและเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.4.1.5 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 1 ทำความสะอาดและเช็ดกระป๋องเก็บตัวอย่างดินพร้อมฝาปิดให้แห้ง แล้วนำกระป๋องเก็บตัวอย่างดินพร้อมฝาปิดไปชั่งน้ำหนักบนที่กผลน้ำหนักกระป๋องที่ได้

ขั้นตอนที่ 2 เลือกตัวอย่างดินหรือตะกอนที่จะทำการทดลองตัวอย่างบรรจุลงในกระป๋องเก็บตัวอย่างแล้วปิดฝาทันทีนำไปชั่งน้ำหนัก (ควรให้น้ำหนักของแต่ละตัวอย่างมีความใกล้เคียงกันและไม่ควรน้อยกว่า 100 กรัม) บนที่กผลน้ำหนักกระป๋องกับน้ำหนักดินเปียกที่ได้

ขั้นตอนที่ 3 นำกระป๋องเก็บตัวอย่างดินหรือตะกอนเข้าตู้อบโดยนำฝากระป๋องวางไว้ได้กระป๋องก่อนและใช้อุณหภูมิในการอบที่ 105°C อย่างน้อย 16 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักของดินหรือตะกอนไม่เปลี่ยนแปลง

ขั้นตอนที่ 4 นำกระป๋องเก็บตัวอย่างดินหรือตะกอนออกจากตู้อบแล้วนำฝากระป๋องมาปิดไว้ โดยทิ้งไว้ให้กระป๋องเย็นก่อน (สามารถจับได้ด้วยมือเปล่า) จึงนำมาชั่งน้ำหนัก บันทึกผลน้ำหนักกระป๋องกับน้ำหนักดินหรือตะกอนแห้งที่ได้



รูปที่ 3.9 ชั่งตัวอย่างดินหรือตะกอนหลังอบเสร็จ

3.4.2 วิธีทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดินและตะกอน

3.4.2.1 มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ

ASTM D 854 – 00 Standard Test Methods for Specific Gravity Of Soil Solids

By Water Pycnometer

3.4.2.2 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

เพื่อหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) โดยใช้ Volumetric Flask ขนาด 500 ml

3.4.2.3 ทฤษฎีและหลักการ

ดิน ตามธรรมชาติ (Natural Soil) จะประกอบด้วย อากาศ น้ำ และเม็ดดินโดยเม็ดดินจะเกิดจากการรวมตัวกันของแร่ธาตุที่แตกต่างกันออกไปดังนั้นจึงเป็นผลให้ดินในแต่ละพื้นที่มีความถ่วงจำเพาะต่างกัน ในขณะที่น้ำจะมีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกันแต่ก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

ความถ่วงจำเพาะของดินคืออัตราส่วนของน้ำหนักดินต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับดินในอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่แสดงให้ทราบถึงลักษณะทั่วไปของดินได้ และยังสามารถที่จะนำคุณสมบัตินี้ไปใช้ ในการคำนวณค่าคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความพรุน (Porosity) อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ของดิน ระดับความอิ่มตัว (Saturation) ความหนาแน่น (Density) เป็นต้น ทั้งยังสามารถนำค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินไปใช้สำหรับวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีไฮโครมิเตอร์แบบ 151 H ได้ด้วย

โดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของดินจะมีค่าอยู่ในช่วง 2.6 - 2.8 ถ้าค่าต่ำกว่านี้ก็อาจจะมีพวกอินทรีย์สารหรือพวกธาตุเบาต่างๆปะปนอยู่ และถ้าค่าสูงกว่านี้ก็อาจมีธาตุหนักปะปนอยู่ สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะโดยทั่วไปของดินชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง ที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 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

3.4.2.4 อุปกรณ์และเครื่องมือ

ร้อนได้สูง

- ขวดแก้วฟลาส (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
- เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.01 กรัม
- เตาและภาชนะต้มน้ำ หรือเครื่องปั๊มสุญญากาศ
- น้ำกลั่น



รูปที่ 3.10 ขวดแก้วฟลาส

3.4.2.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

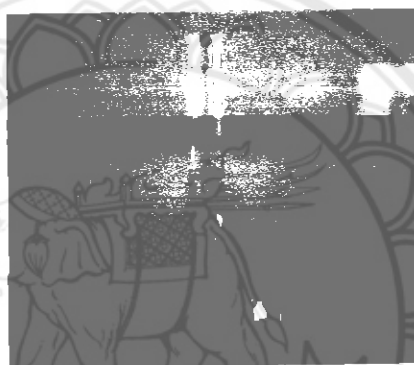
- การเตรียมตัวอย่างตัวอย่างดิน หรือตะกอน ประมาณ 50 กรัม
- ขั้นตอนทดสอบการสอบเทียบ (Calibrate) ขวดฟลาส ก่อนหรือหลังการ

ทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำในขวดฟลาส (ที่ขีดปริมาตร 500 ซม³) และน้ำหนักขวดที่อุณหภูมิต่างๆ กัน (ในช่วงที่ทำการทดลอง) สำหรับอ่านค่าน้ำหนักของน้ำในขวดฟลาสที่อุณหภูมิทดลอง

3.4.2.6 วิธีหาด้วยการทดลอง

- ทำความสะอาดขวดแก้วฟลาสที่จะใช้ทำการทดลอง
- เติมน้ำกลั่นในขวดประมาณ 3/4 ของคอขวด (เพื่อไม่ให้ น้ำเดือดขวดแก้วจะ

แตก)

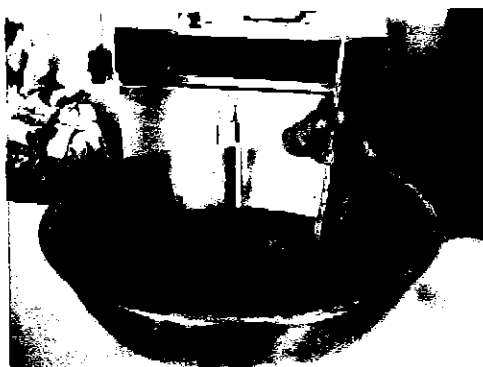


รูปที่ 3.11 เติมน้ำกลั่นในขวดประมาณ 3/4 ของคอขวด

- ไล่อากาศในน้ำด้วยการต้มน้ำให้เดือดในเตาบนเตา หรือ เตาแผ่นร้อน (Hot Plate) ประมาณ 10 นาที นำขวดแก้วลงจากเตา เติมน้ำกลั่นที่ต้มไล่ฟองอากาศทิ้งไว้แล้วลงในขวดแก้วฟลาสให้เต็มด้วยวิธีการกลักน้ำ (Siphon) จุ่มปลายสายยางลงใต้ผิวน้ำเพื่อไม่ให้อากาศเข้าไปผสมในน้ำอีก ปล่อยให้เย็น ถ้าต้องการให้เย็นเร็ว อาจแช่ในอ่างน้ำ (Water Bath) จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 40 (50) องศา ตรวจสอบว่าอุณหภูมิของน้ำในขวดแก้วเท่ากันทุกระดับถ้าไม่เท่ากันกลักขวดเอียงไปมาหรือใช้หลอดแก้วคน

- แต่งขอบน้ำให้อยู่ที่ขีดบอกริมาตร 500 ซม. สังเกตขอบล่างของโค้งผิวน้ำ เช็ดขวดภายนอกและภายในเหนือผิวน้ำให้แห้ง

- นำขวดแก้วและน้ำ ขึ้นชั่ง และวัดอุณหภูมิ น้ำ ตรวจสอบอีกครั้งว่าอุณหภูมิของน้ำในขวดเท่ากันทุกระดับหรือไม่



รูปที่ 3.12 ตรวจสอบอุณหภูมิ

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

3.4.2.7 ขั้นตอนการหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินและตะกอน

ขั้นตอนที่ 1 นำดินหรือตะกอนใส่ในขวดแก้วพลาสติกและใส่น้ำลงไปประมาณ 3 ใน 4 ส่วนของปริมาตรขวดโดยให้ดินจมอยู่ใต้น้ำทั้งหมดและอย่าให้ดินติดอยู่ข้างๆ ขวด

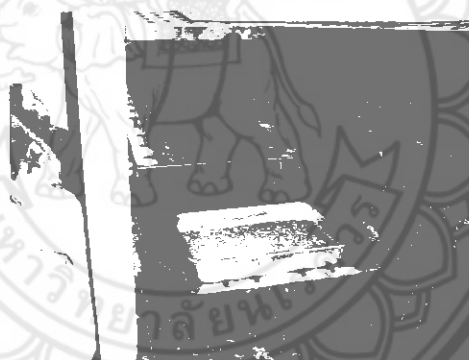
ขั้นตอนที่ 2 ทำการไล่ฟองอากาศโดยใช้ ปัมสูญอากาศ (Vacuum Pump) แรงดูด 10 - 20 นิ้วปรอท ประมาณ 4 - 5 ชั่วโมงหรือนำไปกวนในน้ำร้อนอย่างน้อย 10 นาที หรือจะทำทั้งสองอย่างควบคู่กันไปก็ได้โดยใช้ ปัมสูญอากาศไม่น้อยกว่า 10 นาทีแล้วจึงกวนในน้ำร้อนอีกประมาณ 10 นาที พร้อมกับกลิ้งขวดไปมาหลายรอบทำเช่นนี้สลับกันไปเรื่อยๆ และคอยสังเกตว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นอีกหรือไม่ ทำจนกระทั่งฟองอากาศหมดไปซึ่งต้องใช้เวลาและความละเอียดในการสังเกต

ขั้นตอนที่ 3 หลังจากไล่ฟองอากาศหมดแล้ว ทำการเติมน้ำกลั่นให้ระดับท้องน้ำอยู่ที่ขีด 500 มิลลิลิตรพอดี ในการเติมน้ำกลั่นนี้ควรใช้หลอด และปล่อยน้ำกลั่นจากหลอดโดยจุ่มปากหลอดให้อยู่ใต้ระดับน้ำในขวดพลาสติกเพื่อป้องกันอากาศลงไปอีก แล้วตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องทดสอบ จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำใน Flask เท่ากับอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิที่ต้องการ (โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์คอยเช็คว่าอุณหภูมิ) และคอยสังเกตว่าถ้าระดับในขวดพลาสติกต่ำกว่าขีด 500 มิลลิลิตร ก็ให้เติมน้ำกลั่นให้ท้องน้ำพอดีกับขีดอยู่เสมอ



รูปที่ 3.13 ดูดฟองอากาศออก

ขั้นตอนที่ 4 นำขวดพลาสติกไปซัง จะได้เป็นน้ำหนักของขวดพลาสติก + น้ำ + ดิน (Flask + Water + Soil) แล้วจึงทำการวัดอุณหภูมิโดยจุ่มเทอร์โมมิเตอร์ให้อยู่ประมาณกึ่งกลางกระเปาะของขวด Flask คอยจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ แล้วจึงบันทึกค่าอุณหภูมินี้ไว้ หลังจากนั้นนำไปเทใส่ภาชนะโดยต้องเทดินออกให้หมด จนกระทั่งขวด Flask สะอาด เสร็จแล้วจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส โดยทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน



รูปที่ 3.14 อบดินที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส โดยทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน

ขั้นตอนที่ 5 นำดินหรือตะกอนที่อบแห้งแล้วไปซังแล้วบันทึกค่า เมื่อตบน้ำหนักภาชนะออก จะได้เป็นน้ำหนักของดินแห้ง



รูปที่ 3.15 นำดินที่อบแล้วมาชั่ง

3.4.3 การหาขนาดของเม็ดดินและตะกอน

3.4.3.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

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

3.4.3.2 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

เพื่อหาขนาดของเม็ดดินและการกระจายส่วนกละของเม็ดดินโดยใช้วิธีการร่อนผ่าน

ตะแกรง

3.4.3.3 ทฤษฎีและหลักการ

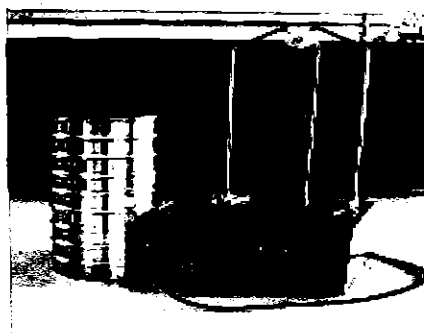
เป็นหว่าดินมีขนาดความกละกันอย่างไรนั้นจะต้องทำการหาขนาดของเม็ดดิน โดยดินเม็ดหยาบใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน และนำขนาดกละของดินมาใช้ในการจำแนกประเภทของดินต่อไป

การหาขนาดของเม็ดดินโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงจะใช้ตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันออกไป สำหรับเบอร์ตะแกรงที่นิยมใช้กันก็คือขนาด 3/8 นิ้ว เบอร์ 4, 10, 20, 40, 100 และ 200 โดยเบอร์ตะแกรงที่จะขาดไม่ได้ก็คือ เบอร์ 4, 100, 200 ซึ่งตะแกรงที่มีช่องเปิดใหญ่ที่สุดจะอยู่บน และไล่ตามลำดับลงมา ดินหรือหินที่เล็กกว่าช่องเปิดของตะแกรงก็จะหล่นลงมาในชั้นต่อไป ดินที่ใหญ่กว่าช่องเปิดของตะแกรงก็จะค้างอยู่บนตะแกรง แต่ก็ไม่น่าสนใจไปเพราะว่าตะแกรงนั้นไม่สามารถแบ่งแยกความแบนความยาวได้ บางครั้งหินหรือดินเม็ดเล็กแต่มีความยาวกว่าขนาดของตะแกรงก็สามารถค้างอยู่บนตะแกรงนั้นได้

3.4.3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- ตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว เบอร์ 4, 10, 20, 40, 100 และ 200 พร้อมถาดรอง
- เครื่องเขย่าตะแกรง
- เครื่องชั่งขนาด 2 กิโลกรัม อ่านละเอียด 0.1 กรัม
- แปรงทำความสะอาดตะแกรง

- ตู้อบ (Drying Oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.16 ตะแกรงที่ใช้ร้อนตัวอย่างพร้อมถาดรอง และเครื่องเขย่าตะแกรง

3.4.3.5 การเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนการทดสอบ

- การเตรียมตัวอย่างดิน

เอาดินตัวอย่างที่เตรียมไว้อบหรือตากแดดให้แห้ง ถ้ายังจับตัวกันเป็นก้อนให้ใช้ค้อนยางทุบให้แตกเสียก่อน นำตัวอย่างมาถูกเกล้าให้เข้ากันบนผืนผ้าใบหรือบนพื้นเรียบแล้วเกลี่ยดินให้กระจายและแยกด้วยวิธีแบ่งสี่ หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่างดินโดยเอา 2 ใน 4 ส่วน สำหรับปริมาณของตัวอย่างดินที่จะนำมาทดสอบจะขึ้นอยู่กับขนาดเมล็ดดินใหญ่สุด

- ขั้นตอนการทดสอบ
 - วิธีการทดสอบแบบไม่ล้างตะแกรง



รูปที่ 3.17 เครื่องชั่งน้ำหนัก

- ทำความสะอาดตะแกรงทั้งหมดด้วยแปรงทำความสะอาด แล้วทำการชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละเบอร์บันทึกค่า (ชั่งน้ำหนักของ Pan ด้วย)

- นำตะแกรงมาเรียงซ้อนกันโดยให้ตะแกรงที่มีขนาดช่องใหญ่อยู่บน แล้วเรียงขนาดเล็กลงมาตามลำดับจนถึงตะแกรงขนาดเล็กสุด ดังนี้ No. 3/8 นิ้ว เบอร์ 4, 10, 20, 40, 100, 200 และ Pan

- นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้เทใส่ลงบนตะแกรงชั้นบนสุด ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่องเขย่า ใช้เวลาในการเขย่าอย่างน้อย 10 นาที เสร็จ แล้วนำตะแกรงไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักตะแกรงรวมกับดินที่ค้างบนตะแกรง นำดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงออกทิ้งแล้วทำความสะอาดตะแกรงให้เรียบร้อย

- วิธีการทดสอบแบบล้างน้ำ

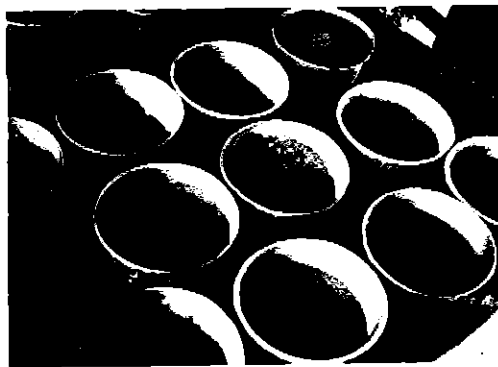
- นำตัวอย่างดินใส่ตะแกรงเบอร์ 200 แล้วนำไปล้างโดยการเปิดน้ำให้ไหลจากด้านบนของตะแกรง ซึ่งจะทำให้ดินเม็ดเล็ก ๆ ที่ติดอยู่กับดินก้อนใหญ่ไหลผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ออกไป แล้วคอยสังเกตจนกระทั่งว่าไม่มีดินไหลออกจากตะแกรงแล้วจึงหยุดล้าง



รูปที่ 3.18 ล้างดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200

- นำตัวอย่างดินที่ยังเหลือค้างอยู่บนตะแกรงไปใส่ภาชนะ แล้วนำไปเข้าสู่อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอบ 8 – 12 ชั่วโมง

- นำตัวอย่างดินที่อบแห้งแล้วไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาน้ำหนักดินที่เหลือจากการล้าง ซึ่งน้ำหนักดินที่หายไปจากการล้างนี้ ให้คิดเป็นดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วนำดินที่เหลือไปทดสอบตามหัวข้อที่ 1 (การทดสอบแบบไม่ล้างตะแกรง)



รูปที่ 3.19 ดินที่เหลือหลังจากนำไปอบแห้ง

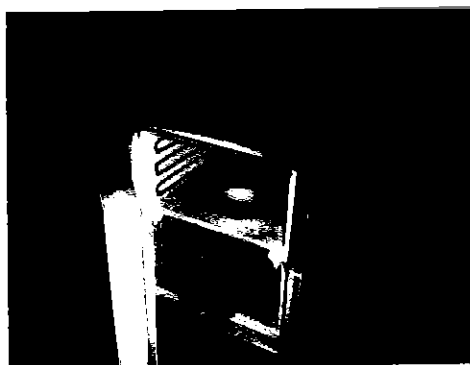
3.4.4 การวิเคราะห์หาสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method)

3.4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เตาอบ (Oven)
- กรูซีเบล (Crucible)
- เตาเผาไฟฟ้า
- จานเพาะเชื้อ (Petri dish)

3.4.4.2 ขั้นตอนวิเคราะห์

- ชั่งตัวอย่างดินแห้งประมาณ 5 กรัม ใส่ลงในจานเพาะเชื้อ
- นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ $105-110^{\circ}\text{C}$ นาน 1 ชั่วโมง (อบพร้อมกับกรูซีเบล) แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถสุญญากาศ
- ชั่งน้ำหนักกรูซีเบล แล้วจดบันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้ (W_1)
- ใส่ตะกอนดินที่อบแห้งแล้วลงในกรูซีเบล ให้ได้น้ำหนักประมาณ 2 กรัม ชั่งน้ำหนัก แล้วจดบันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้ (W_2)
- นำไปเผาในเตาเผาไฟฟ้า อุณหภูมิ $550 \pm 5^{\circ}\text{C}$ นาน 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.20 เผาดินด้วยเตาเผาไฟฟ้า อุณหภูมิ $550 \pm 5^{\circ}\text{C}$

- ตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งเย็น แล้วใส่โหลดูความชื้น
- ชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้ (W3)



รูปที่ 3.21 นำดินที่นำไปชั่งน้ำหนัก

- นำไปคำนวณหาปริมาณสารอินทรีย์

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

W1 = น้ำหนักครุชเบ็ด (กรัม)

W2 = น้ำหนักดินแห้ง + น้ำหนักครุชเบ็ดก่อนอบ (กรัม)

W3 = น้ำหนักดินแห้ง + น้ำหนักครุชเบ็ดหลังอบ (กรัม)

3.4.5 หาความเป็นกรดค่า (pH)

3.4.5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องวัดพีเอช
- เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- เครื่องหมุนเหวี่ยง
- บีกเกอร์ ขนาด 100 ml.
- แท่งแก้วกวนสารละลาย

3.4.5.2 สารเคมี

- สารละลายโปแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) 1 N โดยการละลายโปแทสเซียมคลอไรด์ 7.16 กรัม ลงในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
- สารละลายบัฟเฟอร์ พีเอช 4 และ 7 สำหรับการสอบเทียบเครื่องวัด

พีเอช

3.4.5.3 วิธีการวิเคราะห์

- ชั่งตัวอย่างดินเปียกมาประมาณ 10 กรัม
- เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร (สัดส่วน ดิน: น้ำกลั่น = 2.5:1) จากนั้นกวนให้เนื้อตะกอนดินผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
- ทิ้งไว้ประมาณ 20-30 นาที หรือนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 2,000-3,000 รอบ/นาที
- วัดค่าพีเอชจากสารละลายที่อยู่ที่ส่วนบน

3.4.6 หาสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)

3.4.6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องวัดการนำไฟฟ้า
- เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- เครื่องหมุนเหวี่ยง
- บีกเกอร์ ขนาด 100 ml.
- แท่งแก้วกวนสารละลาย

3.4.6.2 สารเคมี

สารละลายมาตรฐานการนำไฟฟ้า 84 $\mu\text{S/cm}$ และ 1,413 $\mu\text{S/cm}$ สำหรับการสอบเทียบเครื่องวัดการนำไฟฟ้า

3.4.6.3 วิธีการวิเคราะห์

- ชั่งตัวอย่างดินเปียกมาประมาณ 10 กรัม
 - เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร (สัดส่วน ดินตะกอน: น้ำกลั่น = 2.5:1)
- จากนั้นกวนให้เนื้อตะกอนดินผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
- ทิ้งไว้ประมาณ 20-30 นาที หรือนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 2,000-3,000 รอบ/นาที
 - วัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า จากสารละลายที่อยู่ที่ส่วนบนด้วยวิธีการเดียวกันกับการวัดค่าพีเอชของน้ำ

3.5 การศึกษาสมบัติของดิน ตะกอนทางเคมี

3.5.1 ขั้นตอนการบ่มดินและตะกอนด้วยวิธีทางเคมีด้วย แด้ลอย และ หินฟอสเฟต

- ชั่งน้ำหนักดินหรือ ตะกอน, หินฟอสเฟต และแด้ลอยตามสัดส่วนในตารางที่ 3.4
- นำมาผสมในเครื่องผสม และผสมน้ำเพื่อควบคุมความชื้นให้อยู่ที่ 30%
- เมื่อผสมเข้ากันเสร็จแล้ว เทใส่ถุงพลาสติก PE

- มัดปากถุงด้วยยางรัด เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 เดือน

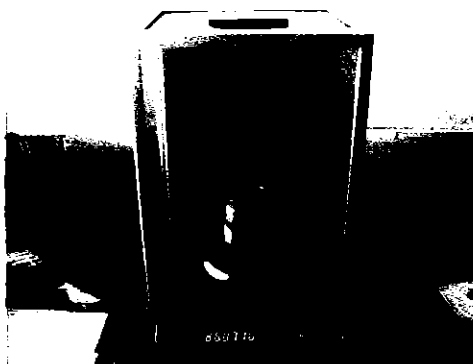
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนการหมักดินและตะกอนด้วยถ้ำลอย

สัดส่วน	ถ้ำลอย (g)	ดิน (g)	น้ำ (cc)
0	-	100	30
10	10	90	30
20	20	80	30
30	30	70	30

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนการหมักดินและตะกอนด้วยหินฟอสเฟต

สัดส่วน	หินฟอสเฟต (g)	ดิน (g)	น้ำ (cc)
0	-	100	30
10	10	90	30
20	20	80	30
30	30	70	30

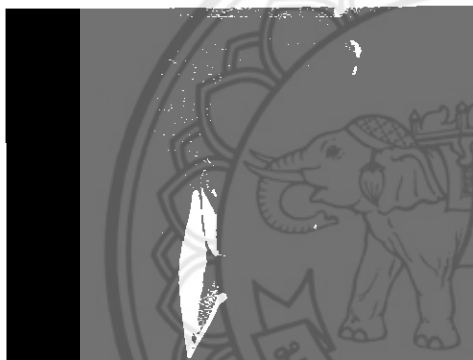
ขั้นตอนการบำบัดดินด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้หินฟอสเฟต และถ้ำดอย



รูปที่ 3.22 ชั่งดินหรือตะกอนและส่วนผสม



รูปที่ 3.23 นำส่วนผสมใส่รวมกัน



รูปที่ 3.24 ผสมในเครื่องผสม



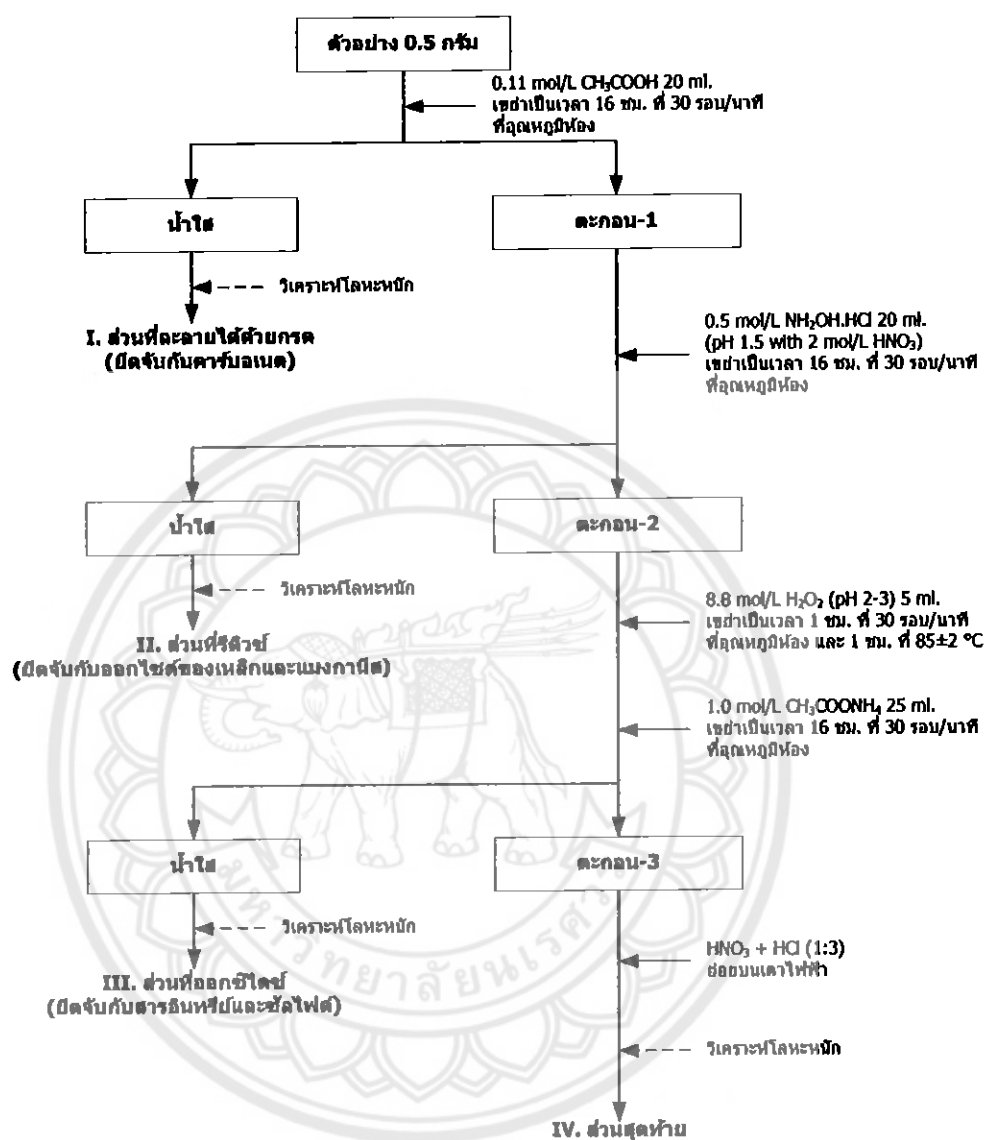
รูปที่ 3.25 เทส่วนผสมใส่ถุงพลาสติก PE



รูปที่ 3.26 มัคปากถุง เก็บไว้ 1 เดือน

3.5.2 วิธีการสกัดแยกด้วยวิธี Modified BCR Sequential extraction

กระบวนการสกัดแบบ Modified - BCR มีรายละเอียดและขั้นตอนดังรูป



รูปที่ 3.27 ขั้นตอนการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified-BCR

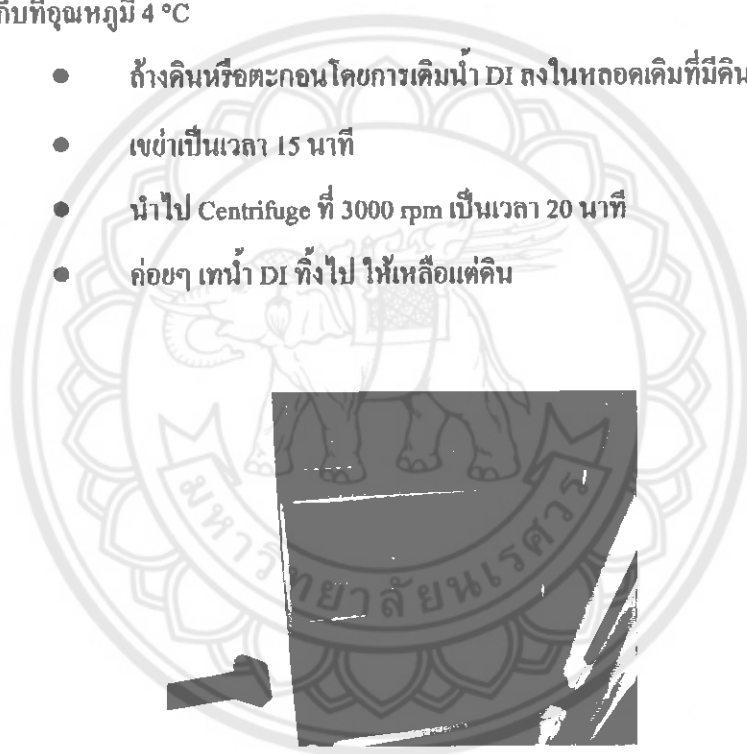
วิธีการทดลองการสกัดแยกด้วยวิธี Modified – BCR Sequential extraction

ขั้นตอนที่ 1

- นำดินหรือตะกอนที่หมักมาอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ $103^{\circ}\text{C} \pm 105^{\circ}\text{C}$
- นำดินหรือตะกอนมา 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
- แยกของเหลวสีใสๆ ใส่ในหลอดต่างหาก ปรับให้มีปริมาตรเป็น 50 ml ด้วย 5%

HNO_3 เก็บที่อุณหภูมิ 4°C

- ถ้างดินหรือตะกอนโดยการเติมน้ำ DI ลงในหลอดเดิมที่มีดิน 10 ml
- เขย่าเป็นเวลา 15 นาที
- นำไป Centrifuge ที่ 3000 rpm เป็นเวลา 20 นาที
- ถ้อยๆ เทน้ำ DI ทิ้งไป ให้เหลือแต่ดิน



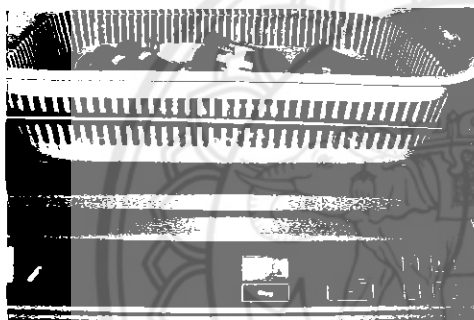
รูปที่ 3.28 อบดินหรือตะกอนที่อุณหภูมิ $103^{\circ}\text{C} \pm 105^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.29 ชั่งดินหรือตะกอนประมาณ 0.5 กรัม



รูปที่ 3.30 นำดินหรือตะกอนที่ชั่งแล้วใส่
หลอด Centrifuge ขนาด 50 ml



รูปที่ 3.31 เหย้า 30 ± 10 rpm ที่อุณหภูมิห้อง
เป็นเวลา 16 ชั่วโมง



รูปที่ 3.32 Centrifuge ที่ 3000 rpm
เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2

- นำหลอดคินหรือตะกอนจากขั้นตอนที่ 1 เติม 0.5 mol/L $\text{NH}_4\text{OH} \cdot \text{HCl}$ ปริมาณ 20 ml

- เขย่า 30 ± 10 rpm เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
- แยกของเหลวใส ด้วยการ Centrifuge เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1
- ทำการล้างคินหรือตะกอนด้วยขั้นตอนเดียวกับขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 3

- นำหลอดคินหรือตะกอนจากขั้นตอนที่ 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
- แยกของเหลวใส ด้วยการ Centrifuge เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1
- ทำการล้างคินหรือตะกอน ด้วยขั้นตอนเดียวกับขั้นตอนที่ 1



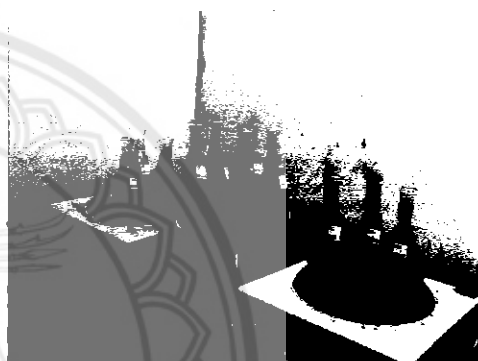
รูปที่ 3.33 เขย่าที่ 85 ± 2 °C ใน Water bath

ขั้นตอนที่ 4

- นำดินจากขั้นตอนที่ 3 ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 ml (ให้หมด)
- ทำการย่อยดินหรือตะกอนด้วย HNO_3 : HCl (1: 3) เช่นเดียวกับการย่อยดิน
- นำไปย่อยบนเตา ปลดปล่อยให้สารละลายค่อยๆ เคี้ยว
- เติม HNO_3 : HCl เข้าไปอีก และทำการย่อยต่ออีก ทั้งหมด 3 รอบ
- นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 42
- ปรับปริมาตรให้เป็น 50 ml ด้วย 5% NH_4OH เก็บที่อุณหภูมิ 4°C



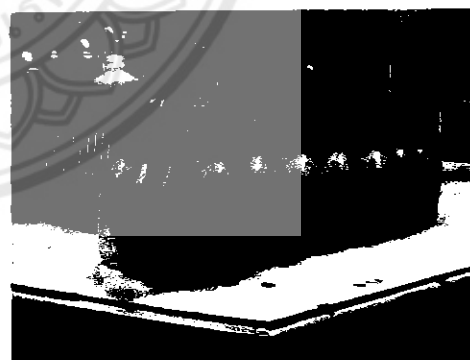
รูปที่ 3.34 นำดินหรือตะกอนในขั้นตอน
ที่ 3 ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 ml



รูปที่ 3.35 ย่อยดินหรือตะกอนบนเตา
ที่ความร้อนเบอร์ 2



รูปที่ 3.36 นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง
Whatman No. 42 ด้วยเครื่องดูดอากาศ



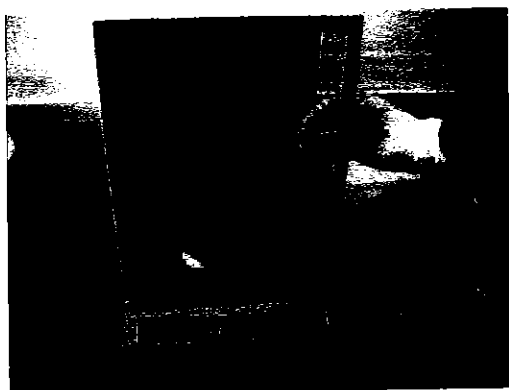
รูปที่ 3.37 ปรับปริมาตรเป็น 50 ml.
ใส่ขวดชา นำไปแช่เย็นรอส่งตรวจหา
ปริมาณแคดเมียม

3.5.3 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดินหรือตะกอน (Total Metal Content)

โดยทำการย่อยตัวอย่างดินหรือตะกอนด้วยวิธีการย่อยดินด้วย Aqua Regia (3:1 mixture of HCl: HNO₃) (Ure, 1995) ก่อนแล้วจึงนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrometry) ซึ่งมีขั้นตอนการย่อยดินดังนี้

- ชั่งตัวอย่างดินหรือตะกอนที่เตรียมไว้ประมาณ 0.5 กรัม และบันทึกน้ำหนักที่แน่นอนทศนิยม 4 ตำแหน่ง เติลงในขวดรูปขนาด 100 ml.
- เติมสารละลายกรด Aqua Regia (3:1 Mixture of: HCl: HNO₃) จำนวน 20 ml. ลงในขวดรูปชมพู
- ทำการย่อยดินหรือตะกอนด้วยเครื่องย่อยสลายตัวอย่างดินบนเตาให้ความร้อนในตู้ดูดควัน จนกระทั่งสารละลายเกือบแห้ง ค่อยๆ เติมกรด Aqua Regia ที่ละ 20 ml และย่อยซ้ำจนกระทั่งการย่อยสมบูรณ์ได้สารละลายเป็นสีใส
 - นำขวดรูปชมพูออกจากเตา และทิ้งไว้ให้เย็น
 - ใช้สารละลาย 5% HNO₃ ละลายสารละลายที่ได้จากการย่อยดินบริเวณข้างๆ ขวดรูปชมพู
 - นำกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml. และปรับปริมาตรครบ 50 ml. ด้วยสารละลาย 5% HNO₃
 - นำสารละลายที่ได้เทเก็บในขวดพลาสติกขนาด 60 ml. และเก็บรักษาตัวอย่างในตู้แช่ที่อุณหภูมิ 4 °C จนกว่าจะทำการวิเคราะห์โลหะหนัก
 - วิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในสารละลายด้วยเครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrometry)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดินและตะกอน (Total Metal Content)



รูปที่ 3.38 ชั่งน้ำหนักดินหรือตะกอน 0.5 กรัม



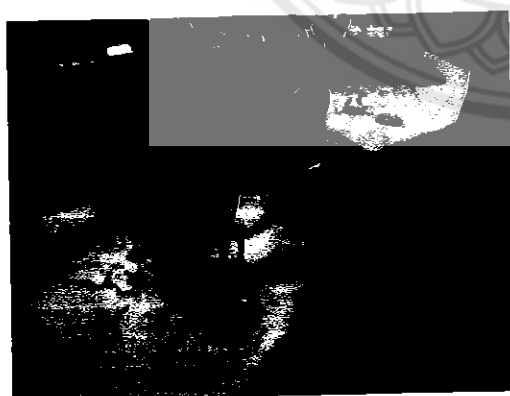
รูปที่ 3.39 นำดินหรือตะกอนใส่ขวดรูปชมพู่



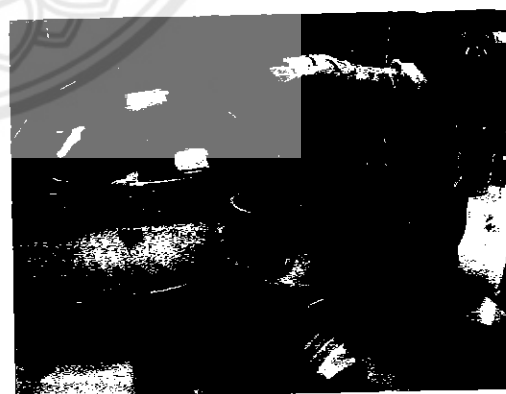
รูปที่ 3.40 เติมน้ำเค็ม



รูปที่ 3.41 บ่อยดินหรือตะกอนบน
เตาที่ความร้อนเบอร์ 2



รูปที่ 3.42 ใช้ สารละลาย 5% HNO_3 กลั้ว

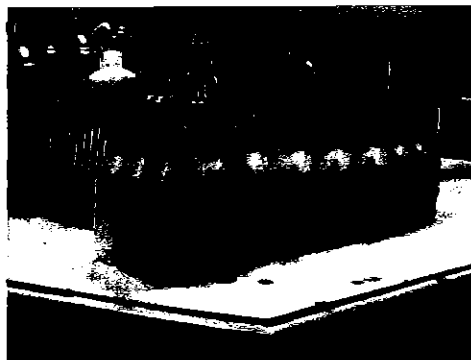


รูปที่ 3.43 กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42

ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดินและตะกอน (Total Metal Content) (ต่อ)



รูปที่ 3.44 ปรับปริมาตรเป็น 50 ml ด้วย 5% HNO_3



รูปที่ 3.45 เก็บในขวดพลาสติกขนาด 60 ml



รูปที่ 3.46 เครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrometry)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

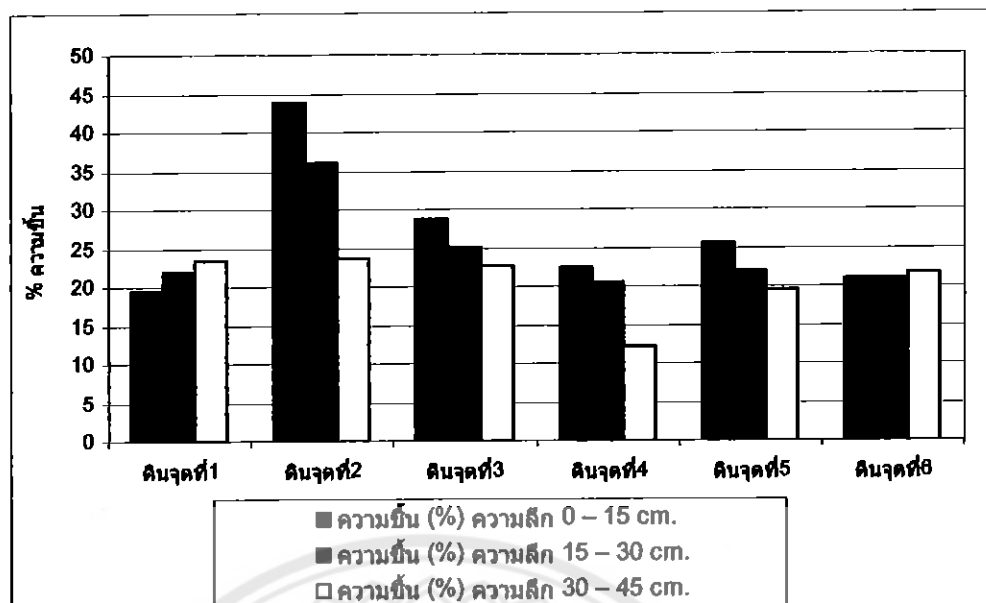
4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ดิน

4.1.1 ผลการทดลองหาค่าความชื้นดิน

ทำความสะอาดกระป๋องเช็ดให้แห้ง ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า นำตัวอย่างดินบรรจุลงในกระป๋องเก็บตัวอย่างแล้วปิดฝาทันทีนำไปชั่งน้ำหนัก นำไปอบใช้อุณหภูมิในการอบที่ 105 °C อย่างน้อย 16 ชั่วโมง นำกระป๋องเก็บตัวอย่างดินออกจากตู้อบแล้วนำฝากระป๋องมาปิดไว้ โดยทิ้งไว้ให้กระป๋องเย็นก่อน จึงนำมาชั่งน้ำหนัก บันทึกผลน้ำหนักกระป๋องกับน้ำหนักดินแห้งที่ได้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบหาค่าความชื้นดิน

ดินจุดที่	ความชื้น (%)		
	ความลึก 0 – 15 cm.	ความลึก 15 – 30 cm.	ความลึก 30 – 45 cm.
1	19.5	22.0	23.3
2	43.8	36.1	23.6
3	28.7	25.1	22.8
4	22.5	20.6	12.3
5	25.7	21.9	19.5
6	21.0	20.9	21.6



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินแต่ละจุด

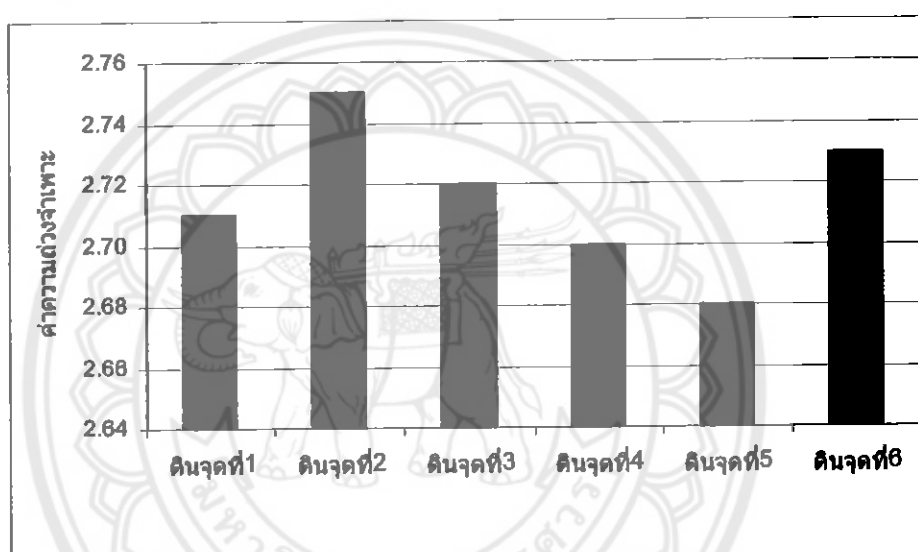
จากกราฟรูปที่ 4.1 โดยนำเปอร์เซ็นต์ความชื้นแต่ละจุดที่ความลึก 0 – 15 ซม. , 15 – 30 ซม. , และ 30 – 45 ซม. พบว่า ดินจุดที่ 1 เปอร์เซ็นต์ความชื้นจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบมีค่าเท่ากับ 19.5%, 22.0% และ 23.3% ตามลำดับ ดินจุดที่ 2 - 5 เปอร์เซ็นต์ความชื้นจะลดลงตามความลึกของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบมีค่าดังนี้ ดินจุดที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ 43.8%, 36.1% และ 23.6% ตามลำดับ ดินจุดที่ 3 มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ 28.7%, 25.1% และ 22.8% ตามลำดับ ดินจุดที่ 4 มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ 22.5%, 20.6% และ 12.3% ตามลำดับ ดินจุดที่ 5 มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ 25.7%, 21.9% และ 19.5% ตามลำดับ ส่วนดินจุดที่ 6 มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นใกล้เคียงกันเท่ากับ 21.0%, 20.9% และ 21.6% ตามลำดับ

4.1.2 ผลการทดสอบหาค่าความอิ่มตัวของดิน

นำดินความลึก 15 – 30 ซม. ที่เตรียมไว้(ตัวแทนของดินแต่ละจุด)ใส่ในขวดแก้วฟลาสและใส่น้ำลงไปประมาณ 3 ใน 4 ส่วน ทำการไล่ฟองอากาศโดยใช้ ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) พร้อมกับกลิ้งขวดไปมาหลายรอบทำเช่นนี้สลับกันไปเรื่อยๆ ทำจนกระทั่งฟองอากาศหมดไปเติมน้ำกลั่นให้ระดับท้องน้ำอยู่ที่ขีด 500 มิลลิเมตร พอดี ตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องทดสอบจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำใน Flask เท่ากับอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิที่ต้องการ นำขวดฟลาสไปชั่ง จะได้เป็น น้ำหนักของขวดฟลาส + น้ำ + ดิน (Flask + Water + Soil) หลังจากนั้นนำไปเทใส่ภาชนะโดยต้องเทดินออกให้หมด จนกระทั่งขวด Flask สะอาด เสร็จแล้วจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส โดยทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน นำดินที่อบแห้งแล้วไปชั่งแล้วบันทึกค่า

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

ดินจุดที่	ค่าความถ่วงจำเพาะ
1	2.71
2	2.75
3	2.72
4	2.70
5	2.68
6	2.73



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

จากกราฟที่ 4.2 โดยนำค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละจุดจะพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินทั้ง 6 จุดมีค่าต่างกันตามคุณสมบัติของดินแต่ละชนิด โดยดินแต่ละจุดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.71, 2.75, 2.72, 2.70, 2.68 และ 2.73 ตามลำดับ

4.1.3 ผลการทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน

4.3.1 การทดสอบการหาขนาดเม็ดดินด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่อ้างตะแกรง

เตรียมตัวอย่างดิน 500 กรัม ทำความสะอาดตะแกรงทั้งหมดด้วยแปรงทำความสะอาด แล้วทำการชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละเบอร์บันทึกค่า เรียงตะแกรงดังนี้ No. 3/8 เบอร์ 4, 10, 20, 40, 100, 200 และ Pan นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้เทใส่ลงบนตะแกรงชั้นบนสุด ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่อง

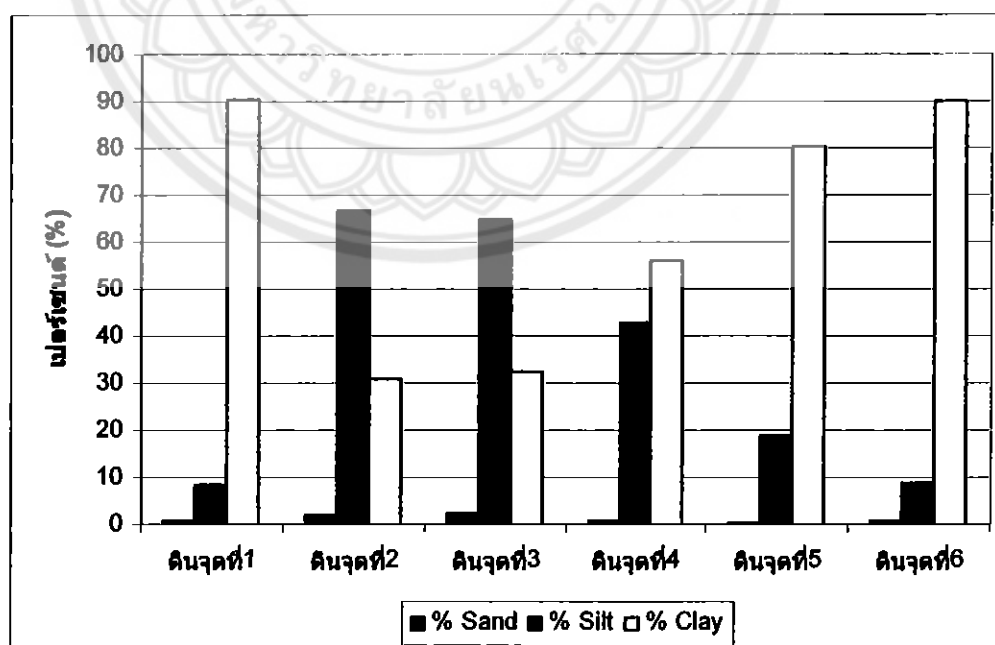
เขย่า ใช้เวลาในการเขย่าอย่างน้อย 10 นาที เสร็จ แล้วนำตะแกรงไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักตะแกรงรวมกับดินที่ค้างบนตะแกรง

4.3.2 การทดสอบการหาขนาดเม็ดดินด้วยวิธีการทดสอบแบบล้าง

เตรียมตัวอย่างดิน 500 กรัม นำตัวอย่างดินใส่ตะแกรงเบอร์ 200 แล้วนำไปล้างโดย การเปิดน้ำให้ไหลจากด้านบนของตะแกรง ซึ่งจะทำให้ดินเม็ดเล็ก ๆ ที่ติดอยู่กับดินก้อนใหญ่ไหล ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ออกไป แล้วคอยสังเกตจนกระทั่งว่าไม่มีดินไหลออกจากตะแกรงแล้วจึง หยุดล้าง นำตัวอย่างดินที่ยังเหลือค้างอยู่บนตะแกรงไปใส่ภาชนะ แล้วนำไปเข้าตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอบ 8 – 12 ชั่วโมง นำตัวอย่างดินที่อบแห้งแล้วไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำดินที่เหลือไปทดสอบตามหัวข้อที่ 4.3.1 (การทดสอบแบบไม่ล้างตะแกรง)

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน

ดินจุดที่	% Sand	% Silt	% Clay
1	1	8.5	90.5
2	2	67	31
3	2.5	65	32.5
4	1	43	56
5	0.5	19	80.5
6	1	9	90



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงขนาดเม็ดดิน

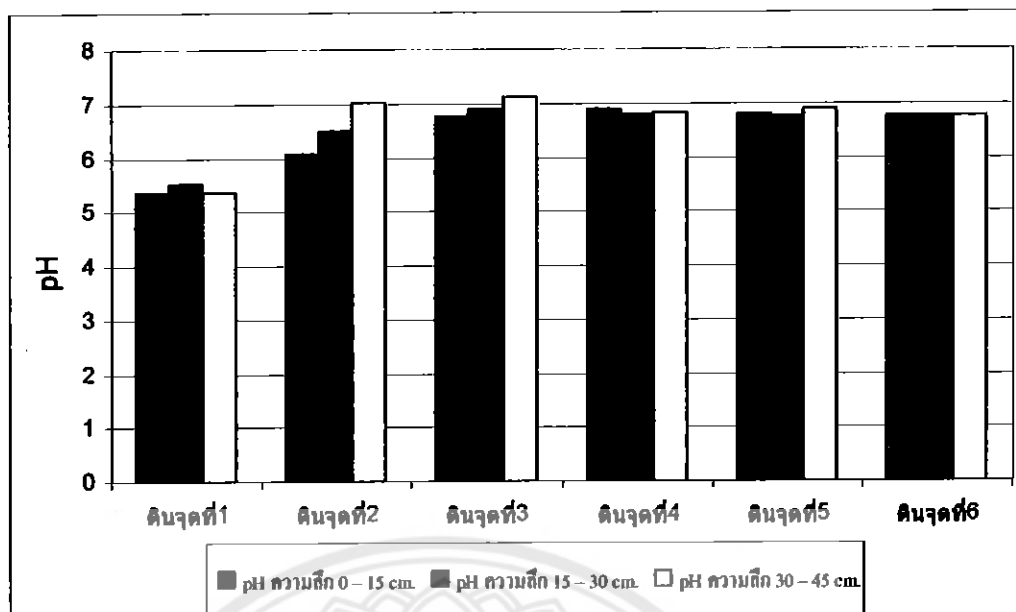
จากกราฟรูปที่ 4.3 พบว่าขนาดดินแต่ละจุดมีเปอร์เซ็นต์ของ Sand, Silt และ Clay ดังนี้ ดินจุดที่ 1 มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดินเท่ากับ 1, 8.5 และ 90.5 ตามลำดับ ดินจุดที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดินเท่ากับ 2, 67 และ 31 ตามลำดับ ดินจุดที่ 3 มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดินเท่ากับ 2.5, 65 และ 32.5 ตามลำดับ ดินจุดที่ 4 มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดินเท่ากับ 1, 43 และ 56 ตามลำดับ ดินจุดที่ 5 มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดินเท่ากับ 0.5, 19 และ 80.5 ตามลำดับ ดินจุดที่ 6 มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดินเท่ากับ 1, 9 และ 90 ตามลำดับ

4.1.4 ผลการทดสอบหาค่าสภาพความเป็นกรด – เบส ของดิน

ซึ่งตัวอย่างดินเปียกมาประมาณ 10 กรัม เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตรจากนั้นกวนให้เนื้อตะกอนดินผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ทิ้งไว้ประมาณ 20 - 30 นาที หรือนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 2,000 - 3,000 รอบ/นาที วัดค่าพีเอชจากสารละลายที่อยู่ส่วนบน

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบหาค่าสภาพความเป็นกรด – เบส ของดิน

ดินจุดที่	pH		
	ความลึก 0 – 15 cm.	ความลึก 15 – 30 cm.	ความลึก 30 – 45 cm.
1	5.35	5.53	5.36
2	6.09	6.51	7.02
3	6.77	6.89	7.12
4	6.91	6.81	6.84
5	6.79	6.77	6.88
6	6.78	6.75	6.77



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงสภาพความเป็นกรด - เบส ของดินแต่ละจุด

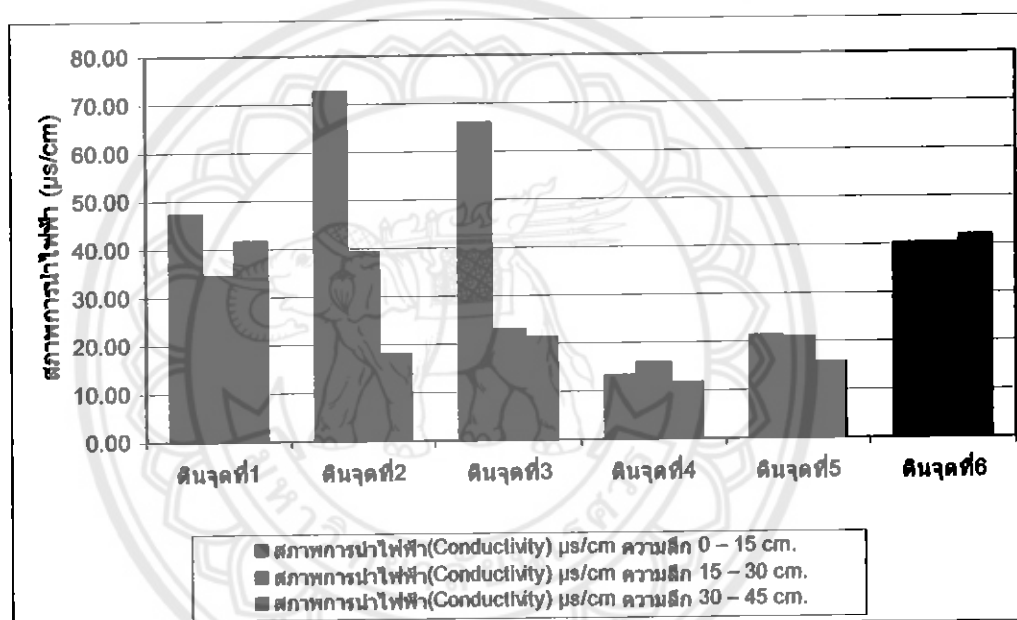
จากกราฟรูปที่ 4.4 โดยนำค่าจากผลการทดสอบหาสภาพความเป็นกรด - เบส ของดินแต่ละจุดมาเปรียบเทียบกับในแต่ละความลึกของดิน ของแต่ละจุด พบว่าจุดที่ 1 ดินมีสภาพความเป็นกรด - เบส อยู่ในสภาพที่เป็นกรดในทุกชั้นความลึก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.35, 5.53, และ 5.36 ตามลำดับ ส่วนดินจุดที่ 2 - 6 พบว่าในทุกชั้นความลึกของดินมีสภาพความเป็นกรด - เบส อยู่ในระดับกลาง โดยมีค่าดังนี้ ดินจุดที่ 2 มีค่าสภาพความเป็นกรด - เบส เท่ากับ 6.09, 6.51, และ 7.02 ตามลำดับ ดินจุดที่ 3 มีค่าสภาพความเป็นกรด - เบส เท่ากับ 6.77, 6.89 และ 7.12 ตามลำดับ ดินจุดที่ 4 มีค่าสภาพความเป็นกรด - เบส เท่ากับ 6.91, 6.81 และ 6.84 ตามลำดับ ดินจุดที่ 5 มีค่าสภาพความเป็นกรด - เบส เท่ากับ 6.79, 6.77 และ 6.88 ตามลำดับ ดินจุดที่ 6 มีค่าสภาพความเป็นกรด - เบส เท่ากับ 6.78, 6.75 และ 6.77 ตามลำดับ

4.1.5 ผลการทดสอบหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดิน

ชั่งตัวอย่างดินเปียกมาประมาณ 10 กรัม เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตรจากนั้นกวนให้เนื้อตะกอนดินผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ทิ้งไว้ประมาณ 20-30 นาที หรือนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 2,000-3,000 รอบ/นาทีวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า จากสารละลายที่อยู่ส่วนบน

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดิน

ดินจุดที่	สภาพการนำไฟฟ้า ($\mu\text{s}/\text{cm}$)		
	ความลึก 0 – 15 cm.	ความลึก 15 – 30 cm.	ความลึก 30 – 45 cm.
1	47.4	34.5	41.6
2	72.6	39.2	17.9
3	66.1	23.1	21.4
4	13.4	16.1	11.8
5	21.5	21	15.6
6	40.2	40.4	41.9



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดิน

จากกราฟที่ 4.5 เมื่อนำค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินแต่ละระดับความลึกของทั้ง 6 จุด มาเปรียบเทียบกันในแต่ละจุดซึ่งมีหน่วยเป็น $\mu\text{s}/\text{cm}$ พบว่า ดินจุดที่ 1 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้า ของดินแต่ละระดับความลึก เท่ากับ 47.4 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 34.5 $\mu\text{s}/\text{cm}$ และ 41.6 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ตามลำดับ ดินจุดที่ 2 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินลดลงตามระดับความลึก มีค่าเท่ากับ 72.6 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 39.2 $\mu\text{s}/\text{cm}$ และ 17.9 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ตามลำดับ ดินจุดที่ 3 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินลดลงตามระดับความลึก เท่ากับ 66.1 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 23.1 $\mu\text{s}/\text{cm}$ และ 21.4 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ตามลำดับ ดินจุดที่ 4 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินแต่ละระดับความลึก เท่ากับ 13.4 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 16.1 $\mu\text{s}/\text{cm}$ และ 11.8 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ตามลำดับ ดินจุดที่ 5 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินลดลงตามระดับความลึก เท่ากับ 21.5 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 21.0 $\mu\text{s}/\text{cm}$ และ 15.6 $\mu\text{s}/\text{cm}$

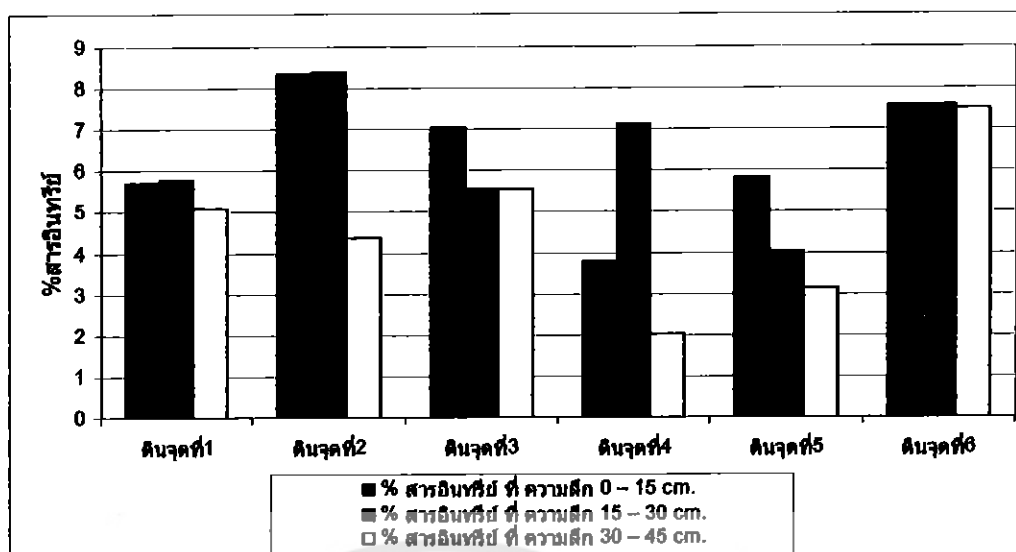
ตามลำดับ ดินจุดที่ 6 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละระดับความลึก เท่ากับ 40.2 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 40.4 $\mu\text{s}/\text{cm}$ และ 41.9 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ตามลำดับ

4.1.6 การวิเคราะห์หาสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method)

ซึ่งตัวอย่างตะกอนดินแห้งประมาณ 5 กรัม ใส่ลงในจานเพาะเชื้อ นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105-110 °C นาน 1 ชั่วโมง (อบพร้อมกับ crucible) แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก crucible แล้วคำนวณตักน้ำหนักที่ชั่งได้ (W1) ใส่ตะกอนดินที่อบแห้งแล้วลงใน crucible ให้ได้น้ำหนักประมาณ 2 กรัม ชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณตักน้ำหนักที่ชั่งได้ (W2) นำไปเผาในเตาเผาไฟฟ้า อุณหภูมิ 700 °C นาน 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งเย็น แล้วใส่โถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณตักน้ำหนักที่ชั่งได้ (W3) นำไปคำนวณหาปริมาณสารอินทรีย์

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบหาสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method) ของดิน

ดินจุดที่	% สารอินทรีย์		
	ความลึก 0 – 15 cm.	ความลึก 15 – 30 cm.	ความลึก 30 – 45 cm.
1	5.70	5.79	5.09
2	8.36	8.38	4.37
3	7.05	5.57	5.56
4	3.78	7.14	2.04
5	5.81	4.03	3.15
6	7.60	7.58	7.49



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method) ของดิน

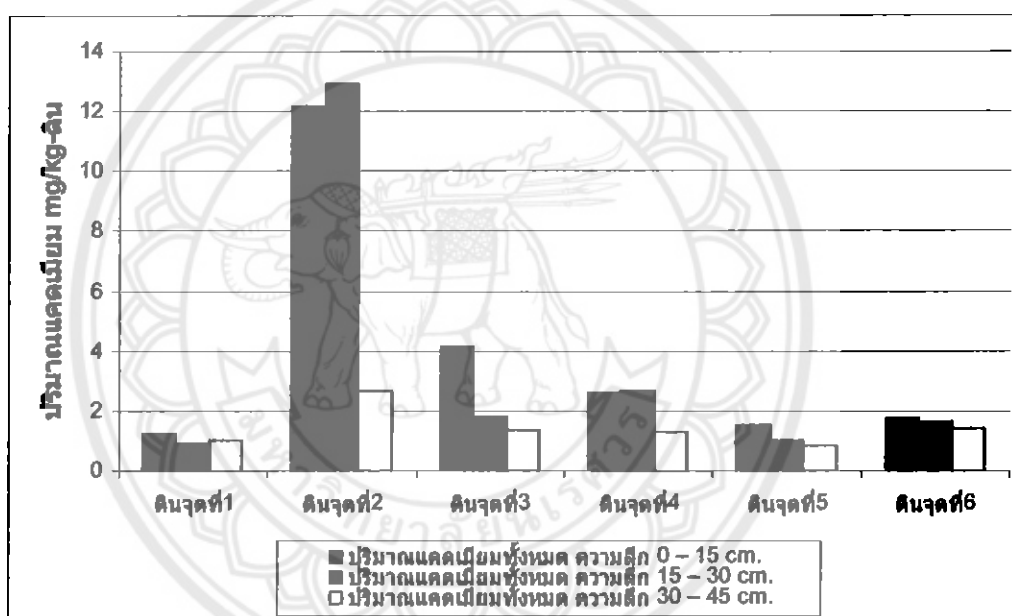
จากกราฟรูปที่ 4.6 เป็นการนำค่าสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method) ที่ระดับความลึกต่างกัน มาเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในดินแต่ละจุด พบว่า สารอินทรีย์ในจุดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 5.70%, 5.79% และ 5.09% ตามลำดับ สารอินทรีย์ในจุดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 8.36%, 8.38% และ 4.37% ตามลำดับ สารอินทรีย์ในจุดที่ 3 มีค่าลดลงตามระดับความลึกที่ลดลง มีค่าเท่ากับ 7.05%, 5.57% และ 5.56% ตามลำดับ สารอินทรีย์ในจุดที่ 4 มีค่าเท่ากับ 3.78%, 7.14% และ 2.04% ตามลำดับ สารอินทรีย์ในจุดที่ 5 มีค่าลดลงตามระดับความลึกที่ลดลง มีค่าเท่ากับ 5.81%, 4.03% และ 3.15% ตามลำดับ สารอินทรีย์ในจุดที่ 6 มีค่าลดลงตามระดับความลึกที่มากขึ้น มีค่าเท่ากับ 7.60%, 7.58% และ 7.49% ตามลำดับ

4.1.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

ซึ่งตัวอย่างดินที่เตรียมไว้ประมาณ 0.5 กรัม เติลงในขวดรูปขนาด 100 ml. เติมน้ำกลั่น กรด Aqua Regia (3:1 Mixture of: HCl: HNO₃) จำนวน 20 ml. บ่อยสลายตัวอย่างดินบนเตาให้ความร้อนในตู้ดูดควัน จนกระทั่งสารละลายเกือบแห้ง ค่อยๆ เติมน้ำกลั่น Aqua Regia ที่ละ 20 ml และบดขยี้จนกระทั่งการย่อยสมบูรณ์ได้สารละลายเป็นสีใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ใช้สารละลาย 5% HNO₃ จะสารละลายที่ได้จากการย่อยดินบริเวณข้างๆ ขวดรูปชมพู นำกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml. และปรับปริมาตรครบ 50 ml. ด้วยสารละลาย 5% HNO₃ เทเก็บในขวดพลาสติกขนาด 60 ml. และเก็บรักษาตัวอย่างในตู้แช่ที่อุณหภูมิ 4 °C วิเคราะห์ปริมาณ Cd ในสารละลายด้วยเครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrometry)

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

ดินจุดที่	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (มก./กก.)			ค่าเฉลี่ย (มก./กก.)
	ความลึก 0-15 cm.	ความลึก 15-30 cm.	ความลึก 30-45 cm.	
1	1.23	0.91	1.04	1.06
2	12.19	12.91	2.70	9.27
3	4.13	1.83	1.35	2.44
4	2.61	2.70	1.32	2.21
5	1.55	1.00	0.84	1.13
6	1.75	1.65	1.45	1.62



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดของดิน

จากกราฟรูปที่ 4.7 พบว่าดินแต่ละจุดนั้นจะมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดสูงในความลึก 0 – 15 cm. แล้วลดลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น และจะเห็นว่าจุดที่ 2 มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดสูงที่สุด โดยแต่ละจุดมีค่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ดังนี้ จุดที่ 1 มีค่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมด เท่ากับ 1.21, 0.91, 1.04 มก./กก.- ดิน ตามลำดับ จุดที่ 2 มีค่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมด เท่ากับ 12.19, 12.91, 2.70 มก./กก.- ดิน ตามลำดับ จุดที่ 3 มีค่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมด เท่ากับ 4.13, 1.83, 1.35 มก./กก.- ดิน ตามลำดับ จุดที่ 4 มีค่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมด เท่ากับ 2.62, 2.70, 1.32 มก./กก.- ดิน ตามลำดับ ดิน

จุดที่ 5 มีค่าปริมาณแคลเซียมทั้งหมด เท่ากับ 1.55, 1.00, 0.84 มก./กก.- ดิน ตามลำดับ และดินจุดที่ 6 มีค่าปริมาณแคลเซียมทั้งหมด เท่ากับ 1.75, 1.65, 1.45 มก./กก.- ดิน ตามลำดับ

4.1.8 ผลการทดสอบ Modified – BCR

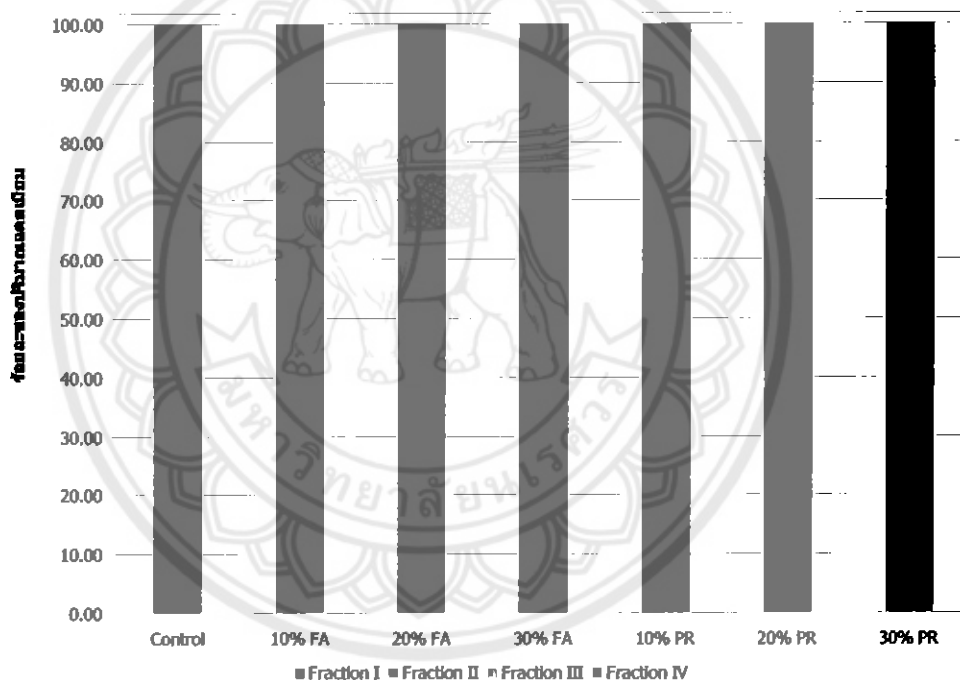
นำดินตัวอย่างที่ผสม เถ้าลอย หินฟอสเฟต ตามสัดส่วนคือ 100% ดิน, 10% FA, 20% FA, 30% FA, 10% PR, 20% PR และ 30% PR และน้ำ 30 มิลลิลิตรต่อ 1 ตัวอย่าง แล้วจากผสมใน จุกพลาสติก (PE) ปิดปากจุกให้สนิททิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 เดือน นำมาอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่ง ตัวอย่างดิน 0.5 g ใส่ในหลอด Centrifuge ทั้งหมด 7 ตัวอย่าง เพื่อเป็นตัวแทนของดินแต่ละ สัดส่วน 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 นำ หลอดดินจากขั้นตอนที่ 2 เติม 5 ml 8.8 mol/L H_2O_2 ปิดฝาหลอดๆ เขย่าทิ้งไว้ใน Water bath ที่ อุณหภูมิ 80 °C เมื่อครบ 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 ทำการย่อย ดินด้วย HNO_3 : HCl (1 : 3) ทำทั้งหมด 3 รอบ นำไปกรอง ปรับปริมาตรให้เป็น 50 ml ด้วย 5% HNO_3

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองหาปริมาณแคลเซียมด้วยวิธีการสกัดลำดับส่วน (Modified-BCR)

อัตราส่วนผสม	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 3	ขั้นตอนที่ 4	รวม(มก./กก.)
ดิน	3.33	4.75	0.34	0.24	8.66
FA 10%	4.11	2.87	0.38	0.48	7.84
FA 20%	3.29	1.67	0.00	0.00	4.96
FA 30%	2.83	1.03	0.03	0.06	3.95
PR 10%	2.59	3.63	0.00	0.05	6.27
PR 20%	2.91	3.82	0.00	0.29	7.02
PR 30%	2.89	4.13	0.05	0.06	7.67

ตารางที่ 4.9 ร้อยละของปริมาณแคลเซียมจากการทดลองการสกัดลำดับส่วนของดิน

	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 3	ขั้นตอนที่ 4	รวม(%)
ดิน	38.42	54.81	3.95	2.82	100.00
FA 10%	52.39	36.61	4.89	6.11	100.00
FA 20%	66.32	33.68	0.00	0.00	100.00
FA 30%	71.52	26.03	0.84	1.62	100.00
PR 10%	41.38	57.88	0.00	0.74	100.00
PR 20%	41.49	54.42	0.00	4.08	100.00
PR 30%	37.66	53.89	0.65	7.79	100.00



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified – BCR ของดิน

จากกราฟในรูปที่ 4.8 ผลการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified – BCR ขั้นตอนแรกเพื่อศึกษาปริมาณแคลเซียมที่สกัดกับ Carbonate โดยใช้ 0.11 mol/L CH_3COOH นั้นเมื่อนำทุกค่าของแต่ละสัดส่วนการผสมมาเปรียบเทียบกันโดยใช้ ดิน เป็นตัวเป็นมาตรฐาน พบว่าที่สัดส่วน FA 10%, FA 20% และ FA 30% ส่งผลให้แคลเซียมที่สกัดกับ Carbonate มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ FA ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 52.39, 66.32 และ 71.52 เมื่อเทียบกับ ดิน ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 38.42

และที่สัดส่วน PR 10%, PR 20% และ PR 30% พบว่าแคดเมียมที่ดูดซับกับ Carbonate มีค่าน้อยลงตามปริมาณ PR ที่เพิ่มขึ้น คือ 41.38, 41.49 และ 37.66 ตามลำดับ

ผลการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified – BCR ขั้นตอนที่สอง เพื่อศึกษาปริมาณแคดเมียมที่ดูดซับกับออกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีส โดยใช้ $0.5 \text{ mol/L NH}_4\text{OH.HCl}$ พบว่า ดิน มีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 54.81 ขณะที่สัดส่วน FA 10%, FA 20% และ FA 30% มีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้เท่ากับร้อยละ 36.61, 33.68 และ 26.03 ขณะที่สัดส่วน PR 10%, PR 20% และ PR 30% มีแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุม คือเท่ากับร้อยละ 57.88, 54.42 และ 53.89 ตามลำดับ

ผลการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified – BCR ขั้นตอนที่สาม เพื่อศึกษาปริมาณแคดเมียมที่ดูดซับกับสารอินทรีย์ และซัลไฟด์ โดยใช้ กรด H_2O_2 และ $0.11 \text{ mol/L CH}_3\text{COONH}_4$ พบว่า ดิน มีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.95 ขณะที่สัดส่วน FA 10%, FA 20% และ FA 30% มีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้เท่ากับร้อยละ 4.89, 0.00 และ 0.84 ขณะที่สัดส่วน PR 10%, PR 20% และ PR 30% มีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.00, 0.00 และ 0.6 ตามลำดับ

ผลการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified – BCR ขั้นตอนที่สี่ เพื่อศึกษาปริมาณแคดเมียมที่เหลือน้ำโดยใช้กรด HNO_3 , HCl ในอัตราส่วน 1:3 พบว่าดินมีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.82 ขณะที่สัดส่วน FA 10%, FA 20% และ FA 30% มีปริมาณแคดเมียมในส่วนนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.11, 0.00 และ 1.62 ขณะที่สัดส่วน PR 10%, PR 20% และ PR 30% มีปริมาณแคดเมียมเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน PR ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 0.74, 4.08 และ 7.79 ตามลำดับ

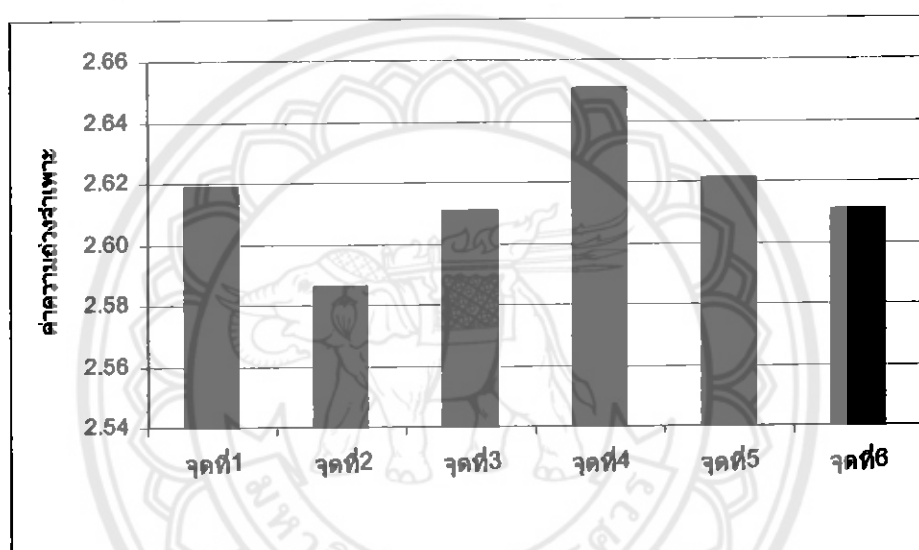
4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ตะกอน

4.2.1 ผลการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของตะกอน

นำตะกอนที่ระดับความลึก 15 – 30 ซม. ที่เตรียมไว้ (ตัวแทนของตะกอนแต่ละจุด) ใส่ในขวดแก้วพลาสติกและเติมน้ำลงไปประมาณ 3 ใน 4 ส่วน ทำการไล่ฟองอากาศโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) พร้อมกับกลิ้งขวดไปมาหลายรอบทำเช่นนี้สลับกันไปเรื่อยๆ ทำจนกระทั่งฟองอากาศหมดไปเติมน้ำกลั่นให้ระดับท้องน้ำอยู่ที่ขีด 500 มิลลิลิตรพอดี ตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำใน Flask เท่ากับอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิที่ต้องการ นำขวดพลาสติกไปซึ่งจะได้น้ำหนักของขวดพลาสติก + น้ำ + ดิน (Flask + Water + Soil) จากนั้นนำไปเทใส่ภาชนะโดยต้องเทตะกอนออกให้หมด จนกระทั่งขวด Flask สะอาด เสร็จแล้วจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน นำตะกอนที่อบแห้งแล้วไปชั่งน้ำหนักค่า

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของตะกอน

ตะกอนจุดที่	ค่าความถ่วงจำเพาะ
1	2.619
2	2.586
3	2.611
4	2.651
5	2.621
6	2.611



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของตะกอน

จากกราฟรูปที่ 4.9 กราฟจะพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างตะกอนทั้ง 6 จุดมีค่าต่างกันตามคุณสมบัติของตะกอนแต่ละชนิด โดยตะกอนแต่ละจุดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.619, 2.586, 2.611, 2.651, 2.621 และ 2.611 ตามลำดับ

4.2.2 ผลการทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน

4.2.2.1 การทดสอบการหาขนาดเม็ดดินตะกอนด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ล้างตะแกรง

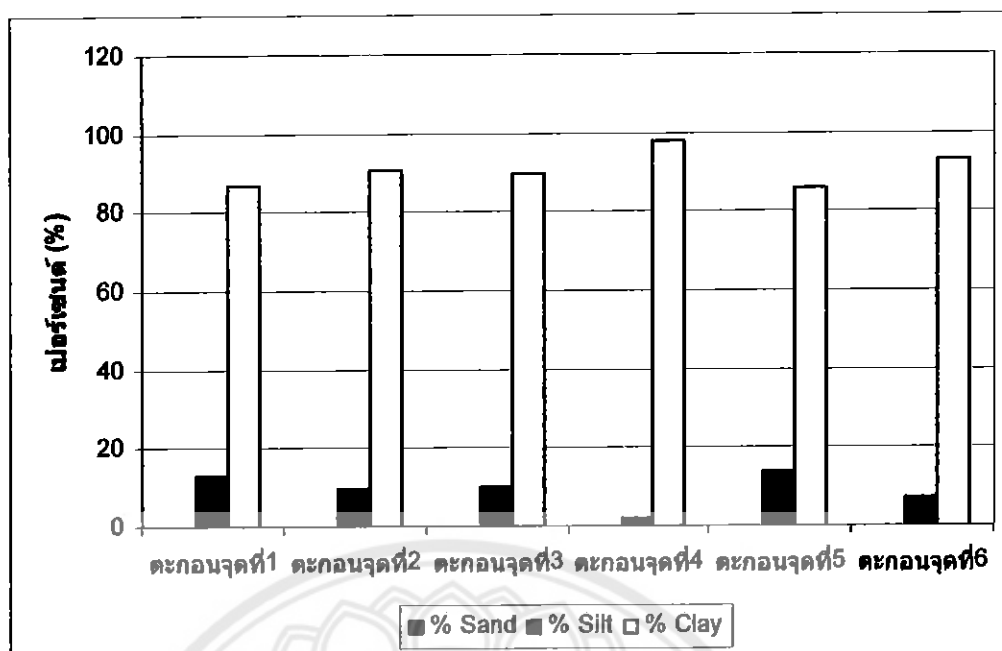
เตรียมตัวอย่างตะกอน 500 กรัม ทำความสะอาดตะแกรงทั้งหมดด้วยแปรงทำความสะอาด แล้วทำการชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละเบอร์บันทึกค่า เรียงตะแกรงดังนี้ No. 3/8 เบอร์ 4, 10, 40, 100, 200 และ Pan นำตัวอย่างตะกอนที่เตรียมไว้เทใส่ลงบนตะแกรงชั้นบนสุด ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่องเขย่า ใช้เวลาในการเขย่าอย่างน้อย 15 นาที เสร็จ แล้วนำตะแกรงไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักตะแกรงรวมกับดินตะกอนที่ค้างบนตะแกรง

4.2.2.2 การทดสอบการหาขนาดเม็ดดินตะกอนด้วยวิธีการทดสอบแบบล้าง

เตรียมตัวอย่างตะกอน 500 กรัม นำตัวอย่างตะกอนใส่ตะแกรงเบอร์ 200 แล้วนำไปล้างโดยการเปิดน้ำให้ไหลจากด้านบนของตะแกรง ซึ่งจะทำให้ดินตะกอนเม็ดเล็ก ๆ ที่ติดอยู่กับดินตะกอนก้อนใหญ่ไหลผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ออกไป แล้วคอยสังเกตจนกระทั่งว่าไม่มีดินไหลออกจากตะแกรงแล้วจึงหยุดล้าง นำตัวอย่างดินตะกอนที่ยังเหลือค้างอยู่บนตะแกรงไปใส่ภาชนะ แล้วนำไปเข้าตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอบ 8 – 12 ชั่วโมง นำตัวอย่างดินตะกอนที่อบแห้งแล้วไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำดินตะกอนที่เหลือไปทดสอบตามหัวข้อที่ 4.3.1 (การทดสอบแบบไม่ล้างตะแกรง)

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบหาขนาดของเม็ดดินตะกอน

ตะกอนจุดที่	% Sand	% Silt	% Clay
1	0	13	87
2	0	9.5	90.5
3	0	10	90
4	0	2	98
5	0	14	86
6	0	7	93



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงขนาดเม็ดตะกอน

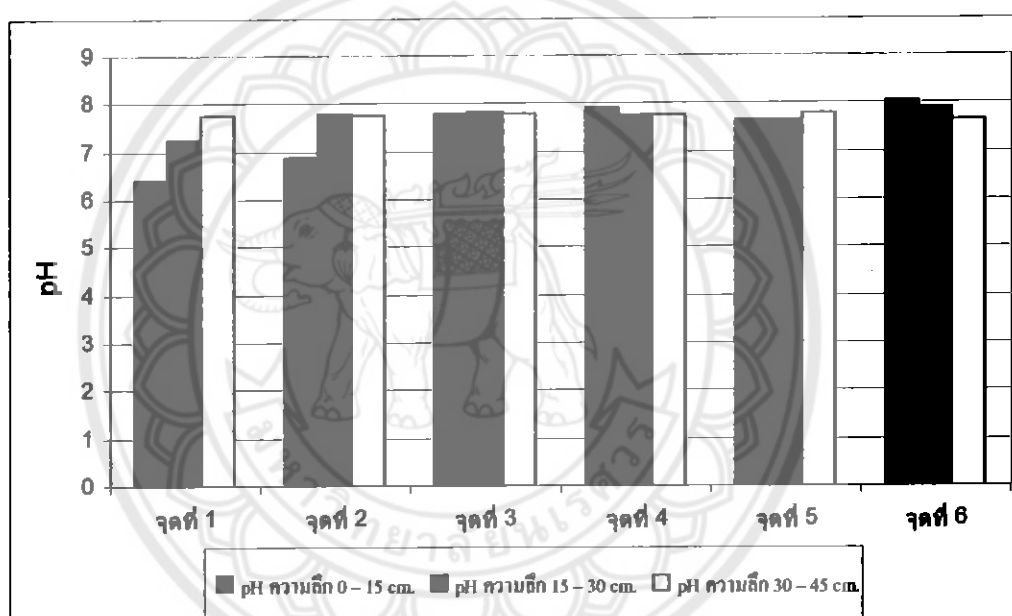
จากกราฟรูปที่ 4.10 Sand, Silt และ Clay ดังนี้ ดินตะกอนจุดที่ 1 มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดินตะกอนเท่ากับ 0, 13 และ 87 ตามลำดับ ดินตะกอนจุดที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดินตะกอนเท่ากับ 0, 9.5 และ 90.5 ตามลำดับ ดินตะกอนจุดที่ 3 มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดินตะกอนเท่ากับ 0, 10 และ 90 ตามลำดับ ดินตะกอนจุดที่ 4 มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดินตะกอนเท่ากับ 0, 2 และ 98 ตามลำดับ ดินตะกอนจุดที่ 5 มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดินตะกอนเท่ากับ 0, 14 และ 86 ตามลำดับ ดินตะกอนจุดที่ 6 มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดดินตะกอนเท่ากับ 0, 7 และ 93 ตามลำดับ

4.2.3 ผลการทดสอบหาค่าสภาพความเป็นกรด - เบส ของตะกอน

ซึ่งตัวอย่างตะกอนเปียกมาประมาณ 10 กรัม เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตรจากนั้นกวนให้เนื้อตะกอนดินผสมเป็นเนื้อเดียวกันทิ้งไว้ประมาณ 20 - 30 นาที หรือนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 2,000 - 3,000 รอบ/นาที วัดค่าพีเอชจากสารละลายที่ได้อยู่ส่วนบน

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบหาค่าสภาพความเป็นกรด – เบส ของตะกอน

ตะกอนจุดที่	pH		
	ความลึก 0 – 15 cm.	ความลึก 15 – 30 cm.	ความลึก 30 – 45 cm.
1	6.40	7.26	7.77
2	6.86	7.79	7.74
3	7.81	7.82	7.81
4	7.92	7.75	7.76
5	7.66	7.63	7.78
6	8.05	7.90	7.65



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงสภาพความเป็นกรด – เบส ของตะกอนแต่ละจุด

จากกราฟรูปที่ 4.11 ค่าจากการทดสอบหาสภาพความเป็นกรด – เบส ของตะกอนแต่ละจุดมาเปรียบเทียบกันในแต่ละความลึกของตะกอน ของแต่ละจุด พบว่าจุดที่ 1 ตะกอนมีสภาพความเป็นกรด – เบส อยู่ในสภาพที่เป็นกรดในชั้นความลึก 0-15 cm. ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.40 และมีค่าความเบสที่ความลึก 15-30 และที่ความลึก 30-45 cm. ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.26 และ 7.77 ตามลำดับ ส่วนตะกอนจุดที่ 2 พบว่ามีค่าความเป็นกรดที่ความลึก 0-15 cm. มีค่าเท่ากับ 6.86 ส่วนที่ความลึกตั้งแต่ 15-45 cm. มีค่าความเป็นเบส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.79 และ 7.74 จุดที่ 3 มีค่าสภาพความเป็น เบส ทั้งสามระดับความลึก เท่ากับ 7.81, 7.82 และ 7.81 ตามลำดับ ตะกอนจุดที่ 4 มีค่าสภาพความเป็น เบส ทั้ง

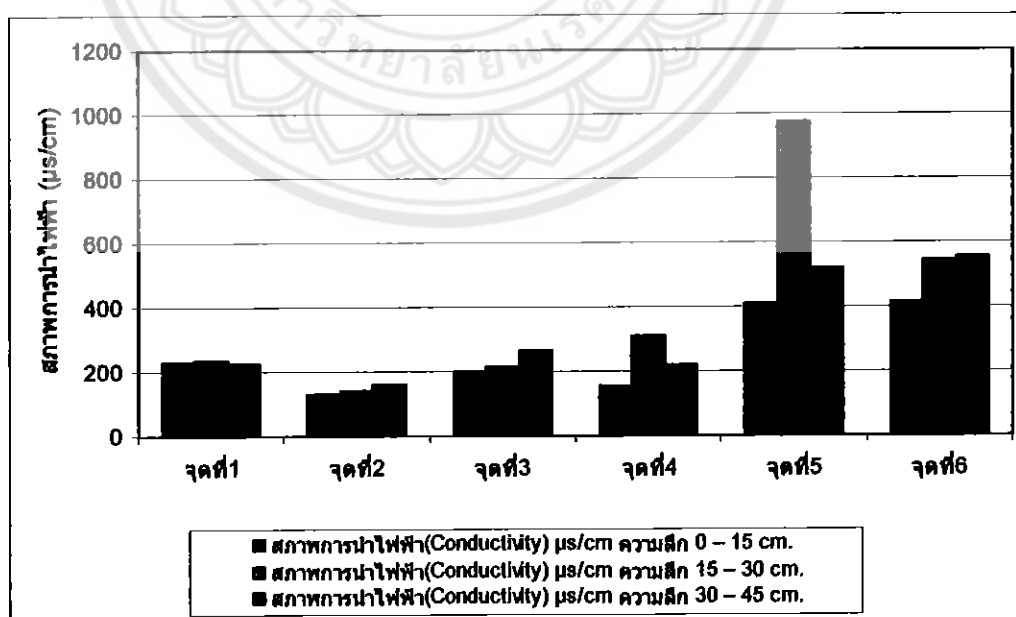
ตามระดับความลึก เท่ากับ 7.92, 7.75 และ 7.76 ตามลำดับ ตะกอนจุดที่ 5 มีค่าสภาพความเป็น เบส
ทุกระดับความลึก เท่ากับ 7.66, 7.63 และ 7.78 ตามลำดับ ตะกอนจุดที่ 6 มีค่าสภาพความเป็น เบส
ทุกระดับความลึก เท่ากับ 8.05, 7.90 และ 7.65 ตามลำดับ

4.2.4 การทดสอบหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าของตะกอน

ซึ่งตัวอย่างตะกอนมาประมาณ 10 กรัม เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตรจากนั้นกวนให้เนื้อ
ตะกอนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ทิ้งไว้ประมาณ 20-30 นาที หรือนำไปเหยียงด้วยเครื่องปั่นด้วยเครื่อง
หมุนเหวี่ยงความเร็ว 2,000-3,000 รอบ/นาทีวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าจากสารละลายที่ได้อยู่
ส่วนบน

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าของตะกอน

ตะกอนจุดที่	สภาพการนำไฟฟ้า ($\mu\text{s}/\text{cm}$)		
	ความลึก 0 – 15 cm.	ความลึก 15 – 30 cm.	ความลึก 30 – 45 cm.
1	232	237	224
2	128	142	160
3	201	217	267
4	154	310	219
5	412	974	518
6	417	543	553



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าของตะกอน

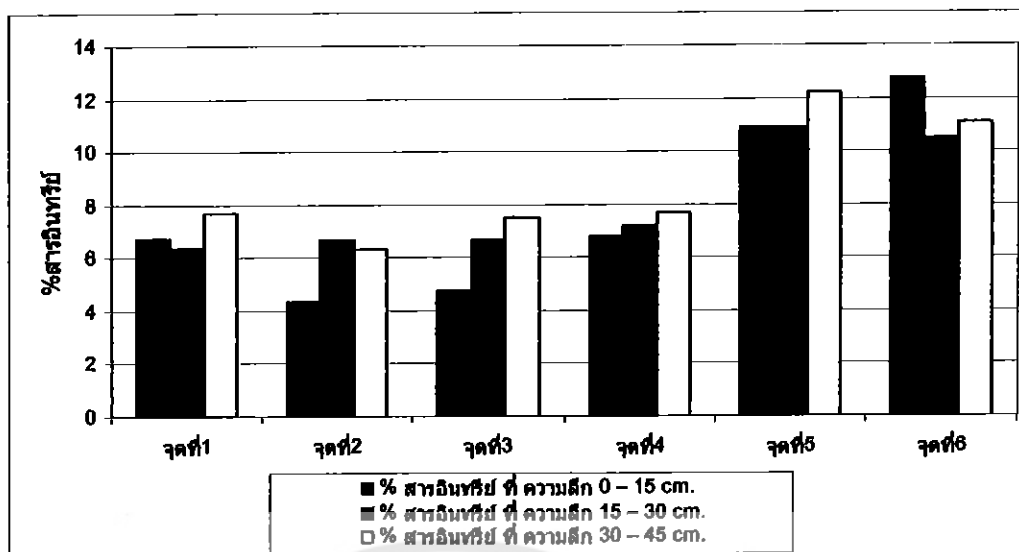
จากกราฟที่ 4.12 เมื่อนำค่าสภาพการนำไฟฟ้าของตะกอนแต่ละระดับความลึกของทั้ง 6 จุด มาเปรียบเทียบกันในแต่ละจุดซึ่งมีหน่วยเป็น $\mu\text{S/cm}$ พบว่า ตะกอนจุดที่ 1 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าของแต่ละระดับความลึก เท่ากับ 232 $\mu\text{S/cm}$, 237 $\mu\text{S/cm}$ และ 224 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ ตะกอนจุดที่ 2 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามระดับความลึก มีค่าเท่ากับ 128 $\mu\text{S/cm}$, 142 $\mu\text{S/cm}$ และ 160 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ ตะกอนจุดที่ 3 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามระดับความลึก เท่ากับ 201 $\mu\text{S/cm}$, 217 $\mu\text{S/cm}$ และ 267 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ ตะกอนจุดที่ 4 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าของแต่ละระดับความลึก เท่ากับ 154 $\mu\text{S/cm}$, 310 $\mu\text{S/cm}$ และ 219 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ ตะกอนจุดที่ 5 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าของแต่ละระดับความลึก เท่ากับ 412 $\mu\text{S/cm}$, 974 $\mu\text{S/cm}$ และ 518 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ ตะกอนจุดที่ 6 มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามระดับความลึก เท่ากับ 417 $\mu\text{S/cm}$, 543 $\mu\text{S/cm}$ และ 553 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ

4.2.5 การวิเคราะห์หาสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method) ของตะกอน

ซึ่งตัวอย่างตะกอนแห้งประมาณ 5 กรัม ใส่ลงในจานเพาะเชื้อ นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105-110 °C นาน 1 ชั่วโมง (อบพร้อมกับครุชชีเบล) แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักครุชชีเบล แล้วจลบนที่ก้นน้ำหนักที่ชั่งได้ (W1) ใส่ตะกอนที่อบแห้งแล้วลงในครุชชีเบล ให้ได้น้ำหนักประมาณ 2 กรัม ชั่งน้ำหนัก แล้วจลบนที่ก้นน้ำหนักที่ชั่งได้ (W2) นำไปเผาในเตาเผาไฟฟ้า อุณหภูมิ 700 °C นาน 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งเย็น แล้วใส่โถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักแล้วจลบนที่ก้นน้ำหนักที่ชั่งได้ (W3) นำไปคำนวณหาปริมาณสารอินทรีย์

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบหาสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method) ของตะกอน

ตะกอนจุดที่	% สารอินทรีย์		
	ความลึก 0 – 15 cm.	ความลึก 15 – 30 cm.	ความลึก 30 – 45 cm.
1	6.734	6.357	7.712
2	4.322	6.699	6.323
3	4.753	6.700	7.535
4	6.807	7.182	7.694
5	10.883	10.883	12.238
6	12.734	10.503	11.062



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method) ของตะกอน

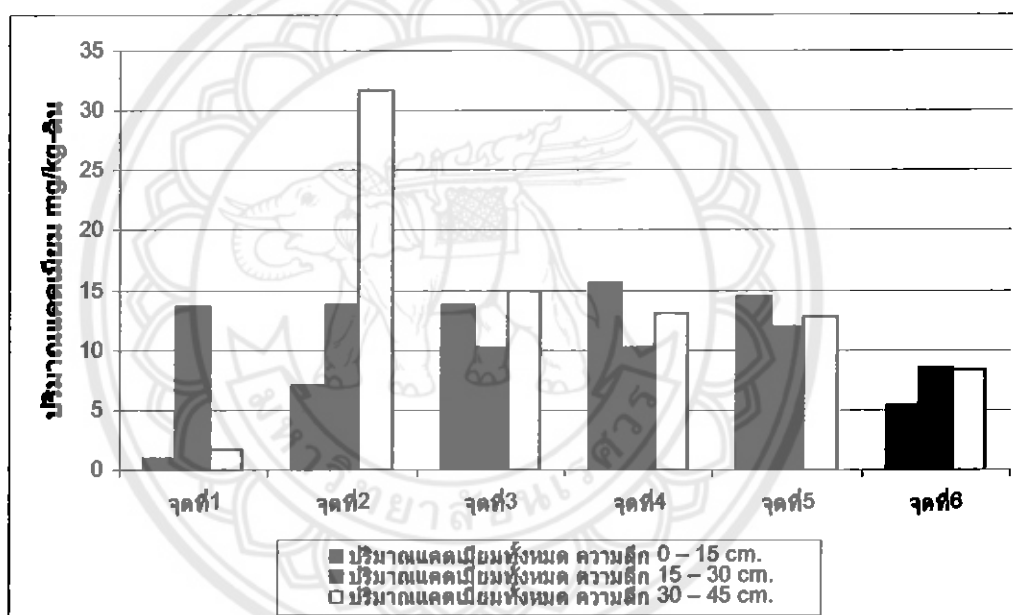
จากกราฟรูปที่ 4.13 เป็นการนำค่าสารอินทรีย์ด้วยการเผา (Ignition loss method) ที่ระดับความลึกต่างกัน มาเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในตะกอนแต่ละจุด พบว่า สารอินทรีย์ในจุดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 6.734 %, 6.357 % และ 7.712 % ตามลำดับ สารอินทรีย์ในจุดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 4.322 %, 6.699 % และ 6.323 % ตามลำดับ สารอินทรีย์ในจุดที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกที่มีค่าเท่ากับ 4.753 %, 6.700 % และ 7.694 % ตามลำดับ สารอินทรีย์ในจุดที่ 4 มีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกเท่ากับ 6.807 %, 7.182 % และ 7.694 % ตามลำดับ สารอินทรีย์ในจุดที่ 5 มีค่าเท่ากับ 10.883 %, 10.883 % และ 12.238 % ตามลำดับ สารอินทรีย์ในจุดที่ 6 มีค่าเท่ากับ 12.734 %, 10.503% และ 11.062 % ตามลำดับ

4.2.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดของตะกอน

ซังตัวอย่างตะกอนที่เตรียมไว้ประมาณ 0.5 กรัม เติลงในขวดรูปขนาด 100 ml. เติมน้ำกลั่นกรด Aqua Regia (3:1 Mixture of: HCl: HNO₃) จำนวน 20 ml. บ่อยสลายตัวอย่างตะกอนบนเตาให้ความร้อนในตู้สุญญากาศ จนกระทั่งสารละลายเกือบแห้ง ก่อขย เติมน้ำกลั่น Aqua Regia ที่ละ 20 ml และบ่อยซ้ำจนกระทั่งการย่อยสมบูรณ์ได้สารละลายเป็นสีใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ใช้สารละลาย 5% HNO₃ ชะสารละลายที่ได้จากการย่อยตะกอนบริเวณข้างๆ ขวดรูปชมพู นำกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml. และปรับปริมาตรครบ 50 ml. ด้วยสารละลาย 5% HNO₃ เติมน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 60 ml. และเก็บรักษาตัวอย่างในตู้แช่ที่อุณหภูมิ 4 °C วิเคราะห์ปริมาณ Cd ในสารละลายด้วยเครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrometry)

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดของตะกอน

ตะกอนจุดที่	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (มก./กก.)			ค่าเฉลี่ย (มก./กก.)
	ความลึก 0-15 cm.	ความลึก 15-30 cm.	ความลึก 30- 45 cm.	
1	0.98	13.63	1.73	5.45
2	7.09	13.87	31.74	17.57
3	13.80	10.26	14.98	13.01
4	15.70	10.20	13.07	12.99
5	14.58	11.98	12.77	13.11
6	5.42	8.57	8.43	7.47



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดของตะกอน

จากกราฟรูปที่ 4.14 พบว่าตะกอนในจุดที่ 1 จะมีปริมาณแคดเมียมค่อนข้างน้อยเนื่องจากเป็นจุดเหนือเหมืองมีค่าปริมาณแคดเมียมแต่ละระดับความลึกเท่ากับ 0.98, 13.63 และ 1.73 มก./กก.- ตะกอน ตามลำดับ ในจุดที่ 2 มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดสูงที่สุด โดยค่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมด เท่ากับ 7.09, 13.87, และ 31.74 มก./กก.- ตะกอน ตามลำดับ จุดที่ 3 มีค่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมด เท่ากับ, 12.91, 14.98 มก./กก.- ตะกอน ตามลำดับ จุดที่ 4 มีค่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมด เท่ากับ 15.70, 10.20 และ 13.07 มก./กก.- ตะกอน ตามลำดับ จุดที่ 5 มีค่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมด เท่ากับ 14.58,

11.98 และ 12.77 มก./กก.- ตะกอน ตามลำดับ ตะกอนจุดที่ 6 มีค่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมด เท่ากับ 5.42, 8.57 และ 8.43 มก./กก.- ตะกอน ตามลำดับ

4.2.7 การทดลอง Modified – BCR

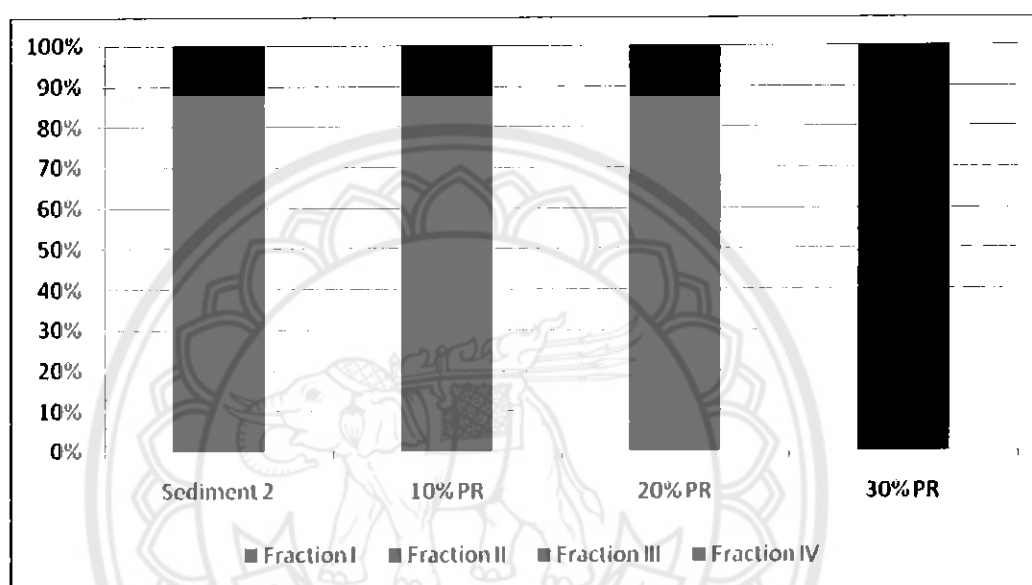
จากการทดลองนำตัวอย่างตะกอนที่ปนเปื้อนแคดเมียมที่เก็บมาจากลำห้วยแม่ควา มาทำการหมักด้วยหินฟอสเฟตในอัตราส่วน ตะกอน 100 %, 10 % PR, 20 % PR และ 30 % PR ทั้งไว้เป็นเวลา 1 เดือน เมื่อครบกำหนดทำการเลือกตะกอนจุดที่มีแคดเมียมทั้งหมดมากที่สุดมาทำการทดลอง Modified – BCR นั่นคือตะกอนในจุดที่ 2 และ 3 นำตะกอนที่หมักแล้วมาอบด้วยอุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการชั่งตะกอน 0.5 g ใส่ในหลอด Centrifuge จำนวน 8 ตัวอย่าง ทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง รวมทั้งหมด 24 หลอด ในขั้นตอนแรกทำการเติม 0.11 mol/L CH_3COOH ปริมาณ 20 ml นำไปเขย่าเป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำไป Centrifuge ที่ 3000 rpm เป็นเวลา 20 นาที ทำการแยกของเหลวใสๆ ใส่ในหลอดต่างหาก ปรับให้มีปริมาตรเป็น 50 ml ด้วย 5% HNO_3 สังเกตดูว่าในของเหลวใสมีตะกอนลอยอยู่หรือไม่ ถ้ามีตะกอนให้นำไปกรอง แล้วทำการล้างดินโดยการเติมน้ำกลั่นสองครั้ง, ขั้นตอนที่ 2 นำหลอดตะกอนจากขั้นตอนที่ 1 เติม 0.5 mol/L $\text{NH}_4\text{OH} \cdot \text{HCl}$ ปริมาณ 20 ml และทำตามขั้นตอนที่ 1, ขั้นตอนที่ 3 นำหลอดตะกอนจากขั้นตอนที่ 2 เติม 5 ml 8.8 mol/L H_2O_2 ปิดฝาหลวมๆ เขย่าทิ้งไว้ใน Water bath เมื่อครบ 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 ขั้นตอนสุดท้ายขั้นตอนที่ 4 นำดินจากขั้นตอนที่ 3 ทำการบดดินด้วย HNO_3 : HCl (1 : 3) ทำทั้งหมด 3 รอบ นำไปกรอง ปรับปริมาตรให้เป็น 50 ml ด้วย 5% HNO_3

ตารางที่ 4.16 ปริมาณแคดเมียมจากการทดสอบการสกัดลำดับส่วน (mg/kg) ของตะกอนจุดที่ 2

อัตราส่วน	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 3	ขั้นตอนที่ 4	รวม (มก./กก.)
Sediment	5.74	20.72	0.00	0.00	26.45
10% PR	2.44	8.78	0.10	0.20	11.52
20% PR	2.05	7.68	3.54	0.96	14.23
30% PR	2.05	4.63	8.45	1.67	16.80

ตารางที่ 4.17 ร้อยละของปริมาณแคะเมียม จากการทดสอบการสกัดลำดับส่วนของตะกอนจุดที่ 2

อัตราส่วน	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 3	ขั้นตอนที่ 4	รวม (%)
Sediment	21.68	78.32	0.00	0.00	100.00
10% PR	21.21	76.19	0.87	1.73	100.00
20% PR	14.41	53.97	24.89	6.73	100.00
30% PR	12.22	27.56	50.31	9.92	100.00



รูปที่ 4.15 ร้อยละของปริมาณแคะเมียมจากการทดสอบการสกัดลำดับส่วน ของตะกอนจุดที่ 2

จากกราฟรูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified – BCR ผลในขั้นตอนที่ 1 เป็นการศึกษาน้ำหนักแคะเมียมที่สกัดด้วย Carbonate โดยใช้ $0.11 \text{ mol/L CH}_3\text{COOH}$ ที่สัดส่วน 10% PR, 20% PR และ 30% PR พบว่า แคะเมียมที่สกัดด้วย Carbonate มีค่าน้อยลงตามปริมาณ PR ที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 21.21, 14.41 และ 12.22 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตะกอนซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 21.68

ผลในขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาปริมาณแคะเมียมที่สกัดด้วยออกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีสโดยใช้ $0.5 \text{ mol/L NH}_4\text{OH.HCl}$ พบว่าที่ตะกอน 100% มีค่าปริมาณแคะเมียมเป็น 78.32 และที่สัดส่วน 10% PR, 20% PR และ 30% PR พบว่า ปริมาณแคะเมียมที่สกัดด้วยออกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีสมีค่าลดลงตามปริมาณสัดส่วนของ PR ที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 76.19, 53.97 และ 27.56 ตามลำดับ

ผลในขั้นตอนที่ 3 เป็นการศึกษาปริมาณแคะเมียมที่บดจับกับสารอินทรีย์ และซัลไฟด์ โดยใช้กรด H_2O_2 และ $0.11 \text{ mol/L } CH_3COONH_4$ พบว่าที่ตะกอน 100% มีค่าปริมาณแคะเมียมเป็นศูนย์ และที่สัดส่วน 10% PR, 20% PR และ 30% PR พบว่า ปริมาณแคะเมียมที่บดจับกับสารอินทรีย์ และซัลไฟด์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของ PR ที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.87, 24.89 และ 50.31 ตามลำดับ

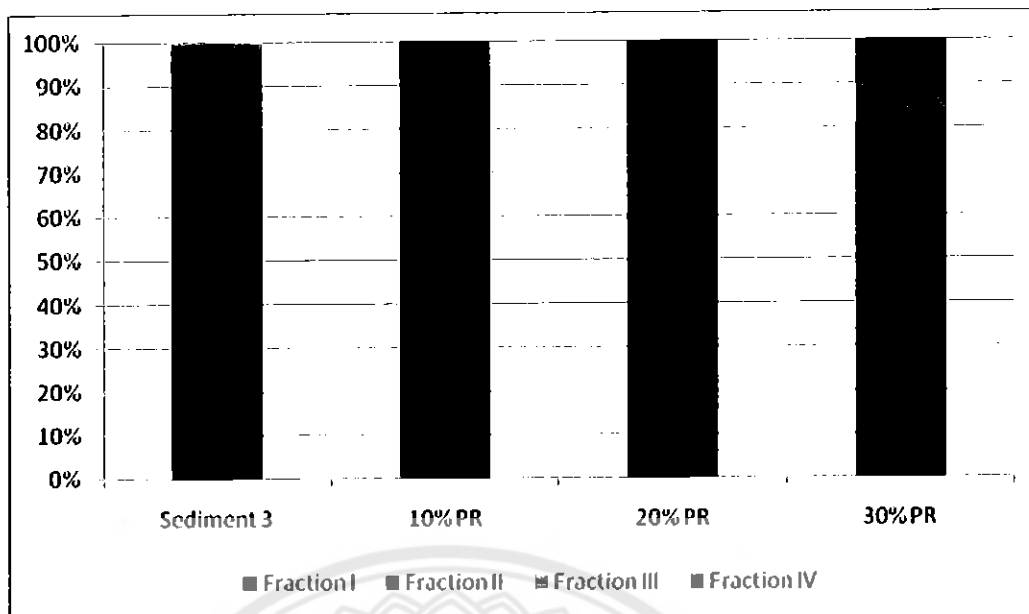
ผลในขั้นตอนที่ 4 เป็นการศึกษาปริมาณแคะเมียมที่เหลือสุดท้ายโดยใช้กรด HNO_3 , HCl ในอัตราส่วน 1:3 พบว่าที่ตะกอน 100% มีค่าปริมาณแคะเมียมเป็นศูนย์ และที่สัดส่วน 10% PR, 20% PR และ 30% PR พบว่า ปริมาณแคะเมียมที่บดจับกับสารอินทรีย์ และซัลไฟด์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของ PR ที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.73, 6.73 และ 9.92 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 ปริมาณแคะเมียมจากการทดสอบการสกัดลำดับส่วน (mg/kg) ของตะกอนจุดที่ 3

อัตราส่วน	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 3	ขั้นตอนที่ 4	รวม (มก./กก.)
Sediment	6.09	5.03	0.20	0.00	11.32
10% PR	3.51	7.76	0.00	0.00	11.27
20% PR	1.41	9.76	0.00	0.05	11.22
30% PR	1.26	5.77	0.75	0.90	8.69

ตารางที่ 4.19 ร้อยละของปริมาณแคะเมียมจากการทดสอบการสกัดลำดับส่วนของตะกอนจุดที่ 3

อัตราส่วน	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 3	ขั้นตอนที่ 4	รวม(%)
Sediment	53.77	44.48	1.75	0.00	100.00
10% PR	31.16	68.84	0.00	0.00	100.00
20% PR	12.56	87.00	0.00	0.44	100.00
30% PR	14.50	66.44	8.65	10.41	100.00



รูปที่ 4.16 ร้อยละของปริมาณแคลเซียมจากการทดสอบการสกัดลำดับส่วน ของตะกอนจุดที่ 3

จากรูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified – BCR ผลในขั้นตอนที่ 1 เป็นการศึกษาปริมาณแคลเซียมที่สกัดด้วย Carbonate โดยใช้ $0.11 \text{ mol/L CH}_3\text{COOH}$ พบว่าที่ตะกอน 100% มีค่าปริมาณแคลเซียมเป็น 53.77 และที่ลำดับส่วน 10% PR และ 20% PR พบว่าแคลเซียมที่สกัดด้วย Carbonate มีค่าน้อยลงตามปริมาณ % PR คือมีค่าเท่ากับร้อยละ 31.16 และ 12.56 แต่ที่ 30% PR พบว่าร้อยละแคลเซียมเพิ่มขึ้น คือ 14.50

ผลในขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาปริมาณแคลเซียมที่สกัดด้วยออกไซด์ของเหล็ก และแอมโมเนียโดยใช้ $0.5 \text{ mol/L NH}_4\text{OH.HCl}$ พบว่าที่ตะกอน 100% มีค่าปริมาณแคลเซียมเป็นร้อยละ 44.48 และที่ลำดับส่วน 10% PR และ 30% PR พบว่า ปริมาณแคลเซียมที่สกัดด้วยออกไซด์ของเหล็ก และแอมโมเนียมีค่าลดลง คือมีค่าเท่ากับร้อยละ 68.84, 66.44 แต่ที่ 20% PR พบว่ามีปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นคือมีค่าเท่ากับร้อยละ 87.00

ผลในขั้นตอนที่ 3 เป็นการศึกษาปริมาณแคลเซียมที่สกัดด้วยสารอินทรีย์ และซัลไฟด์ โดยใช้กรด H_2O_2 และ $0.11 \text{ mol/L CH}_3\text{COONH}_4$ พบว่าที่ตะกอน 100% มีค่าปริมาณแคลเซียมเป็นร้อยละ 1.75 และที่ลำดับส่วน 10% PR และ 20% PR พบว่า ปริมาณแคลเซียมที่สกัดด้วยสารอินทรีย์ และซัลไฟด์ มีค่าเป็นร้อยละ 0 แต่ที่ 30% PR มีค่าปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 8.65

ผลในขั้นตอนที่ 4 เป็นการศึกษาปริมาณแคลเซียมที่สกัดด้วยกรด HNO_3 , HCl ในอัตราส่วน 1:3 พบว่าที่ตะกอน 100% และ 10 % PR มีค่าปริมาณแคลเซียมเป็นร้อยละ 0 และที่ลำดับส่วน 20% PR และ 30% PR พบว่า ปริมาณแคลเซียมที่สกัดด้วยสารอินทรีย์ และซัลไฟด์ มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.44 และ 10.41

4.3 ผลการวิเคราะห์หาแคดเมียมทั้งหมดในถั่วลันเตาและหินฟอสเฟต

ทดลองโดยการชั่งตัวอย่างถั่วลันเตาและหินฟอสเฟตตัวอย่างละ 0.5 กรัม เติมน้ำในขวดรูป ขนาด 100 ml. เติมน้ำกรด Aqua Regia (3:1 Mixture of: HCl: HNO₃) จำนวน 20 ml. บ่อยบนเตาให้ความร้อนในตู้ดูดควัน จนกระทั่งสารละลายเกือบแห้ง ค่อยๆ เติมน้ำกรด Aqua Regia ที่ละ 20 ml บ่อยจนกระทั่งได้สารละลายเป็นสีใส ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วใช้สารละลาย 5% HNO₃ ชะสารละลายที่ได้จากการย่อยดินบริเวณข้างๆ ขวดรูปชมพู นำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ลงในขวดวัด ปริมาตรขนาด 50 ml. และปรับปริมาตรครบ 50 ml. ด้วยสารละลาย 5% HNO₃ วิเคราะห์ปริมาณ Cd ในสารละลายด้วยเครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrometry)

ตารางที่ 4.20 แสดงผลการวิเคราะห์แคดเมียมทั้งหมดในถั่วลันเตาและหินฟอสเฟต

ถั่วลันเตา	ตัวอย่างที่	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (มก./กก.)
	1	2.391
	2	3.098
	3	1.799
	4	1.400
	เฉลี่ย	1.824
หินฟอสเฟต	1	7.594
	2	7.990
	3	7.094
	4	7.196
	เฉลี่ย	7.468

จากตารางที่ 4.10 พบว่า ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในถั่วลันเตา เท่ากับ 1.824 มก./กก.- ถั่วลันเตา และ ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในหินฟอสเฟต เท่ากับ 7.468 มก./กก.- หินฟอสเฟต

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปโครงการ

โครงการการบำบัดดินและตะกอนด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้หินฟอสเฟตและเถ้าลอยโดยทำการเก็บตัวอย่างดินและตะกอนทั้งหมด 6 จุด จุดละ 3 ตัวอย่าง ที่ระดับความลึก 0-15, 15-30 และ 30-45 เซนติเมตร ตามความยาวของลำห้วยแม่ตาจากทิศตะวันออกไปทางทิศตะวันตก โดยอ้างอิงจุดเก็บตัวอย่างในแผนที่และอาศัยเครื่องกำหนดพิกัด มาศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี ประกอบด้วย ความชื้น, ค่าความถ่วงจำเพาะ, ขนาดเม็ดดิน สภาพความเป็นกรด – เบส, สภาพการนำไฟฟ้า และสารอินทรีย์ทั้งหมด รวม 7 พารามิเตอร์ และทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ใช้ดินจุดที่ 2 เป็นตัวอย่างในการทำการทดสอบการบำบัดดินด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้หินฟอสเฟต และเถ้าลอย และการสกัดแยกด้วยวิธี Modified BCR Sequential extraction สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของดินตัวอย่างทั้ง 6 จุด มีสมบัติทั้ง 7 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความชื้น, ค่าความถ่วงจำเพาะ, ขนาดเม็ดดิน สภาพความเป็นกรด – เบส, สภาพการนำไฟฟ้า และสารอินทรีย์ทั้งหมดพบว่า มีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 18.74 – 34.50 เปอร์เซ็นต์, ความถ่วงจำเพาะ 2.68 – 2.75, ขนาดของเม็ดดินแบ่งออกเป็น Sand 0.5 – 2 เปอร์เซ็นต์, Silt 8 – 67 เปอร์เซ็นต์, Clay 31 – 90.5 เปอร์เซ็นต์, มีสภาพความเป็นกรด – เบส อยู่ในช่วง 5.35 – 6.97, ความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 11.8 – 72.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, และปริมาณสารอินทรีย์ 4 – 8 เปอร์เซ็นต์ ส่วนตะกอนมีคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของตะกอนตัวอย่างทั้ง 6 จุด มีสมบัติทั้ง 6 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ, ขนาดเม็ดดินตะกอน, สภาพความเป็นกรด – เบส, สภาพการนำไฟฟ้า และสารอินทรีย์ทั้งหมดพบว่า มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.59 – 2.65, ขนาดของเม็ดดินแบ่งออกเป็น Sand 0 เปอร์เซ็นต์, Silt 2 – 14 เปอร์เซ็นต์, Clay 86 – 98 เปอร์เซ็นต์, มีสภาพความเป็นกรด – เบส อยู่ในช่วง 6.40 – 8.05, ความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 128 – 974 $\mu\text{S}/\text{cm}$, และปริมาณสารอินทรีย์ 4.32 – 12.73 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อดูจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆของดินและตะกอนจะเห็นได้ว่าดินจะมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าตะกอนเล็กน้อย ส่วนขนาดของเม็ดดินของดินและตะกอนพบว่าเปอร์เซ็นต์ Clay ของตะกอนจะมีค่ามากกว่าดิน และดินมี PH ต่ำกว่าตะกอนเล็กน้อย ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินจะมีค่าน้อยกว่าตะกอนซึ่งแสดงว่าดินสามารถนำไฟฟ้าได้น้อยกว่าตะกอน ตะกอนสามารถนำไฟฟ้าได้ดี และค่าสุดท้ายค่าปริมาณสารอินทรีย์จะพบว่าปริมาณสารอินทรีย์ของดินจะมีปริมาณน้อยกว่าตะกอน

5.1.2 ปริมาณโลหะหนักในดินและตะกอนจะมีแคดเมียมน้อยเมื่อยังไม่ผ่านบริเวณที่มีการทำเหมืองแร่ แต่จะมีปริมาณแคดเมียมมากที่สุดบริเวณใกล้เหมืองแร่ แล้วค่อยๆ ลดลงเมื่อห่างจาก

บริเวณที่มีการทำเหมืองแร่ ซึ่งดินแต่ละจุดมีค่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมดดังนี้ จุดที่ 1 เท่ากับ 1.06 มก./กก.- ดิน, จุดที่ 2 เท่ากับ 9.27 มก./กก.- ดิน, ดินจุดที่ 3 เท่ากับ 2.44 มก./กก.- ดิน, ดินจุดที่ 4 เท่ากับ 2.21 มก./กก.- ดิน, ดินจุดที่ 5 เท่ากับ 1.13 มก./กก.- ดิน และ ดินจุดที่ 6 เท่ากับ 1.62 มก./กก.- ดิน ส่วนตะกอนแต่ละจุดมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดดังนี้ ตะกอนจุดที่ 1 เท่ากับ 5.45 มก./กก.- ตะกอน, จุดที่ 2 เท่ากับ 17.57 มก./กก.- ตะกอน, ตะกอนจุดที่ 3 เท่ากับ 13.01 มก./กก.- ตะกอน, ตะกอนจุดที่ 4 เท่ากับ 12.99 มก./กก.- ตะกอน, ตะกอนจุดที่ 5 เท่ากับ 13.11 มก./กก.- ตะกอน และ ตะกอนจุดที่ 6 เท่ากับ 7.47 มก./กก.- ตะกอน เมื่อเปรียบเทียบดินและตะกอนแต่ละจุดจะพบว่าดินและตะกอนในจุดที่ใกล้กับเหมืองแร่จะมีค่าแคดเมียมมากที่สุดและค่อยๆ ลดลงไปตามแนวลำห้วยที่ถัดออกไป

5.1.3 การบำบัดดินโดยใช้ถ้ำลอยส่งผลให้ร้อยละของแคดเมียมที่บดคึกกับคาร์บอนเคมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการบำบัดดินและตะกอนโดยใช้หินฟอสเฟตส่งผลให้ร้อยละของแคดเมียมที่บดคึกกับคาร์บอนเคมีค่าลดลง

5.1.4 สมบัติและองค์ประกอบของดินและตะกอน อาจมีผลโดยตรงดังรูปแบบของแคดเมียมทั้งในรูปที่บดคึกกับคาร์บอน, ออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส, สารอินทรีย์และซัลไฟด์ และส่วนสุดท้าย ซึ่งอาจเป็นตัวแปรหลักที่จำเป็นต้องพิจารณาในการเลือกใช้สารเคมีในการบำบัดดินและตะกอน เพื่อลดโอกาสการชะละลายของแคดเมียมออกสู่สิ่งแวดล้อม

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองครั้งนี้จะเป็นการศึกษาปริมาณแคดเมียมเพียงอย่างเดียว ขณะที่โลหะหนักชนิดอื่นที่สำคัญอีกมากที่อาจปนเปื้อนมาด้วยดินตัวอย่าง ที่ควรทำการทดลอง เพื่อให้ทราบถึงปริมาณและแนวทางในการแก้ไขปัญหาโลหะหนักที่อาจเป็นอันตรายต่อการดำเนินชีวิตและการเกษตร จำเป็นต้องใช้เวลา เครื่องมือและความรู้ขั้นสูงในการวิเคราะห์และทดลอง จึงจำเป็นต้องติดตามและตรวจสอบอย่างต่อเนื่องต่อไป

การหาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดและการทดสอบหาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธี Modified BCR Sequential extraction 4 ขั้นตอน ควรมีผลรวมปริมาณแคดเมียมทุกขั้นตอนเปรียบเทียบกับปริมาณแคดเมียมทั้งหมดแล้ว เปอร์เซ็นต์ Recovery ควรอยู่ในเกณฑ์ 80 – 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การศึกษากการบำบัดดินด้วยวิธีทางเคมี โดยใช้หินฟอสเฟต และถ้ำลอย ควรทำการศึกษาด้วยวิธีอื่นๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด และหาข้อบกพร่องของแต่ละวิธี เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการบำบัดโลหะหนักชนิดอื่นต่อไป

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., Christensen 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.

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-contamintc 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.vet.chula.ac.th/~nuclear/symposium44/Orawan.htm>
- <http://www.cte.kmutt.ac.th:8080/civillabpro/soillab3.htm>
- http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_txR_search.asp?info_id=258
- <http://www.most.go.th>
- http://www.flyashconcrete.in/fly_ash/nature_composition.htm
- <http://www.patchra.net/minerals/MinDesc/sediment11.php>

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ตารางที่ ก.1 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดินจุดที่ 1 ความลึก 0 – 15 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	89.3	130.7	134.2
Mass of Can + Dry soil (g)	77.0	113.6	116.5
Mass of Can (g)	15.5	24.9	24.1
Moisture of soil (%)	20.0	19.3	19.1
Average	19.5		

ตารางที่ ก.2 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดินจุดที่ 1 ความลึก 15 - 30 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	86.4	84.2	87.3
Mass of Can + Dry soil (g)	74.6	72.0	74.0
Mass of Can (g)	20.3	14.9	15.4
Moisture of soil (%)	21.8	21.4	22.7
Average	22.0		

ตารางที่ ก.3 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดินจุดที่ 1 ความลึก 30 - 45 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	76.1	78.7	80.9
Mass of Can + Dry soil (g)	64.4	66.6	68.7
Mass of Can (g)	14.6	14.8	15.8
Moisture of soil (%)	23.5	23.3	23.1
Average	23.3		

ตารางที่ ก.4 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดินจุดที่ 2 ความลึก 0 - 15 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	76.3	107.1	79.0
Mass of Can + Dry soil (g)	56.5	84.1	58.7
Mass of Can (g)	14.6	24.3	14.7
Moisture of soil (%)	47.1	38.4	46.0
Average	43.8		

ตารางที่ ก.5 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 2 ความลึก 15 - 30 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	84.3	82.4	82.1
Mass of Can + Dry soil (g)	65.3	63.6	66.0
Mass of Can (g)	15.0	14.9	15.3
Moisture of soil (%)	37.8	38.6	31.8
Average	36.1		

ตารางที่ ก.6 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 2 ความลึก 30 - 45 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	72.6	88.6	123.5
Mass of Can + Dry soil (g)	63.1	72.7	104.6
Mass of Can (g)	14.5	14.7	25.1
Moisture of soil (%)	19.5	27.3	23.8
Average	23.6		

ตารางที่ ก.7 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 3 ความลึก 0 - 15 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	92.3	99.0	90.2
Mass of Can + Dry soil (g)	75.8	79.8	74.3
Mass of Can (g)	15.1	15.1	20.2
Moisture of soil (%)	27.1	29.8	29.3
Average	28.7		

ตารางที่ ก.8 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 3 ความลึก 15 - 30 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	85.9	94.3	140.0
Mass of Can + Dry soil (g)	71.2	78.5	117.4
Mass of Can (g)	15.2	14.7	24.7
Moisture of soil (%)	26.3	24.8	24.3
Average	25.1		

ตารางที่ ก.9 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 3 ความลึก 30 - 45 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	107.1	111.8	107.7
Mass of Can + Dry soil (g)	89.5	93.3	91.6
Mass of Can (g)	14.6	14.7	15.4
Moisture of soil (%)	23.5	23.6	21.2
Average	22.8		

ตารางที่ ก.10 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 4 ความลึก 0 - 15 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	163.8	139.1	131.1
Mass of Can + Dry soil (g)	137.6	116.0	110.7
Mass of Can (g)	24.4	14.6	15.6
Moisture of soil (%)	23.1	22.8	21.5
Average	22.5		

ตารางที่ ก.11 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 4 ความลึก 15 - 30 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	114.3	91.0	107.5
Mass of Can + Dry soil (g)	97.9	78.4	90.8
Mass of Can (g)	14.8	15.3	15.0
Moisture of soil (%)	19.8	20.0	22.0
Average	20.6		

ตารางที่ ก.12 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 4 ความลึก 30 - 45 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	106.4	107.9	158.6
Mass of Can + Dry soil (g)	96.5	97.8	143.8
Mass of Can (g)	15.9	15.0	25.7
Moisture of soil (%)	12.3	12.2	12.5
Average	12.3		

ตารางที่ ก.13 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 5 ความลึก 0 - 15 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	151.8	106.2	137.3
Mass of Can + Dry soil (g)	126.4	87.8	115.3
Mass of Can (g)	24.8	21.1	25.3
Moisture of soil (%)	25.0	27.6	24.4
Average	25.7		

ตารางที่ ก.14 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 5 ความลึก 15 - 30 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	119.7	151.4	103.6
Mass of Can + Dry soil (g)	101.3	128.6	87.5
Mass of Can (g)	15.2	25.0	14.9
Moisture of soil (%)	21.3	22.0	22.2
Average	21.9		

ตารางที่ ก.15 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 5 ความลึก 30 - 45 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	102.9	112.7	94.6
Mass of Can + Dry soil (g)	88.7	96.7	81.4
Mass of Can (g)	14.7	15.2	14.7
Moisture of soil (%)	19.2	19.6	19.7
Average	19.5		

ตารางที่ ก.16 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 6 ความลึก 0 - 15 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	83.1	129.4	76.2
Mass of Can + Dry soil (g)	71.6	111.5	65.2
Mass of Can (g)	15.4	24.4	15.2
Moisture of soil (%)	20.5	20.5	22.0
Average	21.0		

ตารางที่ ก.17 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 6 ความลึก 15 - 30 cm.

Sample No.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	93.5	87.4	97.8
Mass of Can + Dry soil (g)	79.9	75.0	83.3
Mass of Can (g)	15.0	14.6	15.0
Moisture of soil (%)	20.9	20.6	21.2
Average	20.9		

ตารางที่ ก.18 ผลของการวิเคราะห์หาความชื้นในมวลดิน จุดที่ 6 ความลึก 30 - 45 cm.

Sample N8.	1	2	3
Moisture Can No.	A-1	A-2	A-3
Moisture of Can + Wet soil (g)	80.1	89.7	89.8
Mass of Can + Dry soil (g)	68.7	76.2	76.5
Mass of Can (g)	14.7	14.9	15.1
Moisture of soil (%)	21.1	22.1	21.7
Average	21.6		

วิธีการคำนวณ

ปริมาณความชื้นในมวลดิน คิดเป็นร้อยละ (Water Content, W %)

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

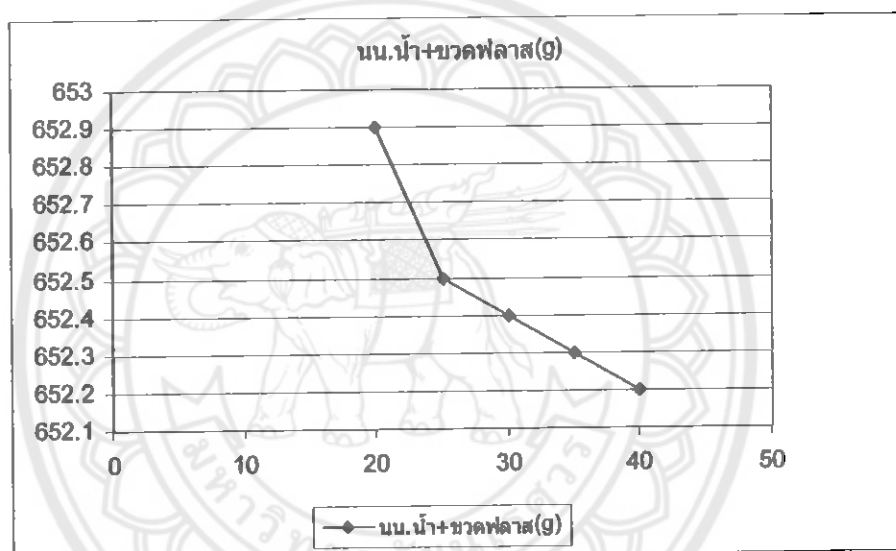
เมื่อ WC = น้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่างดิน

W1 = น้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่างดินรวมกับน้ำหนักดินเปียก

W2 = น้ำหนักกระป๋องเก็บตัวอย่างดินรวมกับน้ำหนักดินแห้ง

ตารางที่ ก.19 ผลของการสอบเทียบสารก่อนหาค่าความถ่วงจำเพาะ

ลำดับที่	อุณหภูมิ (°C)	นน. น้ำ+ขวดพลาสติก(g)
1	20	652.9
2	25	652.5
3	30	652.4
4	35	652.3
5	40	652.2



รูปที่ ก.1 กราฟการสอบเทียบสาร

ตารางที่ ก.20 ผลของการวิเคราะห์หาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

Trial No.	ดินจุด1ชั้น2	ดินจุด2ชั้น2	ดินจุด3ชั้น2	ดินจุด4ชั้น2	ดินจุด5ชั้น2	ดินจุด6ชั้น2
1. Temperature °C	30	30	30	30	30	30
2. Flask + water g	652.3	652.4	652.4	652.3	652.5	652.4
3. Flask + water + Soil g	684	684.3	684.1	683.9	684.1	684.2
4. Container No.	1	2	3	4	5	6
5. Dry Soil + Container g	297.03	213.28	206.1	297.06	837.57	210.86
6. Weight of Container g	246.9	163.2	156	246.9	787.2	160.8
7. Dry Soil (Ws) g	50.13	50.08	50.10	50.16	50.37	50.06
8. Correction Factor (G _r)	0.9974	0.9974	0.9974	0.9974	0.9974	0.9974
9. Specific Gravity	2.71	2.75	2.72	2.70	2.68	2.73

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 ที่อุณหภูมิ W_{FW}

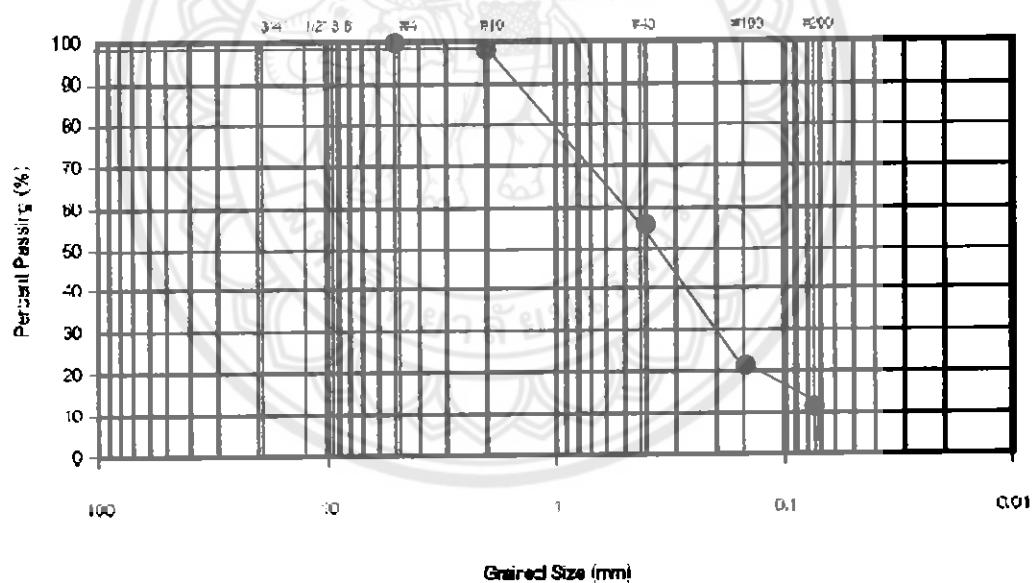
K = เป็นค่าตัวแปรปรับแก้เนื่องจากอุณหภูมิ



ตารางที่ ก.21 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 1 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	500	5	1	1	99
# 20	0.84	450	620	185	34	35	65
# 40	0.425	380	475	95	19	54	46
# 100	0.15	305	430	125	25	79	21
# 200	0.075	290	345	55	11	90	10
Pan	-	270	320	50	10	100	0



รูปที่ ก.2 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 1 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 1

% Sand = 1 %

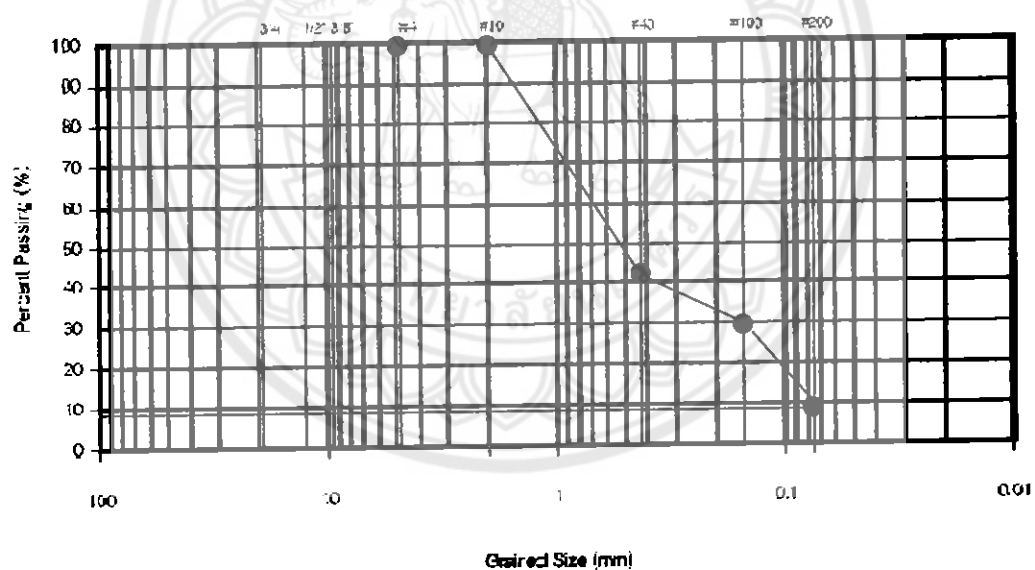
% Silt = 9 %

% Clay = 90 %

ตารางที่ ก.22 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 1 ความลึก 15 – 30 cm. 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	500	5	1	1	99
# 20	0.84	450	635	185	37	38	62
# 40	0.425	380	475	95	19	57	43
# 100	0.15	305	420	115	25	80	20
# 200	0.075	290	345	55	11	91	9
Pan	-	270	315	45	10	100	0



รูปที่ ก.3 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 1 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 2

% Sand = 1 %

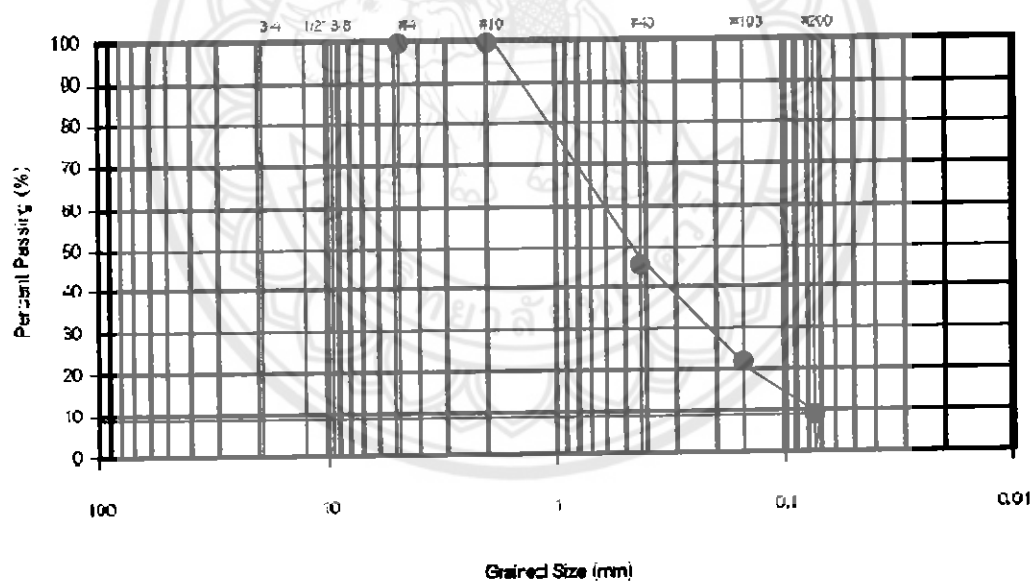
% Silt = 8 %

% Clay = 91 %

ตารางที่ ก.23 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 2 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	505	10	2	2	99
# 20	0.84	450	465	15	3	5	65
# 40	0.425	380	405	25	5	10	46
# 100	0.15	305	360	55	11	21	21
# 200	0.075	290	340	50	10	31	9
Pan	-	270	615	345	69	100	0



รูปที่ ก.3 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 2 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 1

% Sand = 2 %

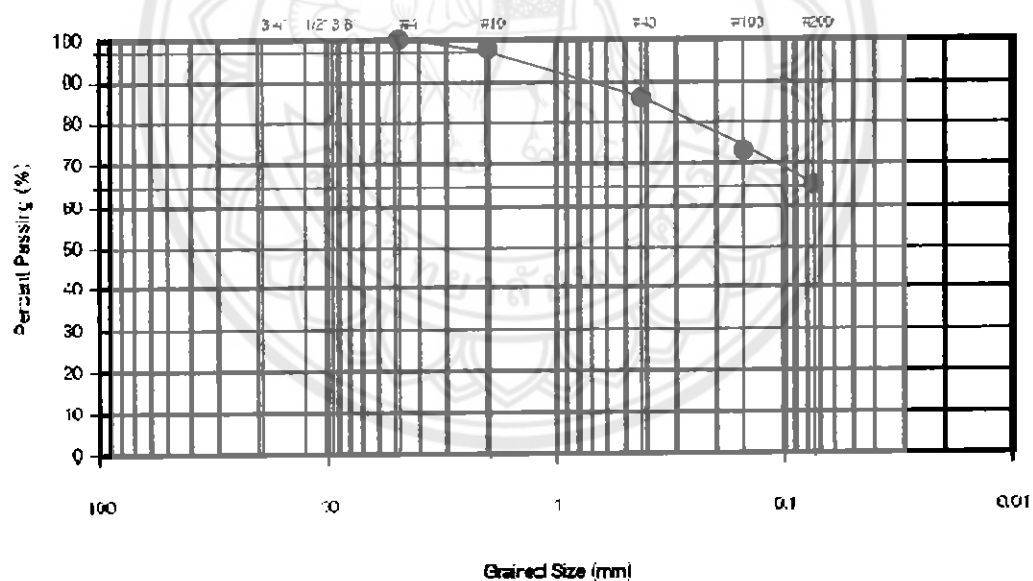
% Silt = 67 %

% Clay = 31 %

ตารางที่ ก.24 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 2 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	505	10	2	2	98
# 20	0.84	450	475	25	5	5	93
# 40	0.425	380	415	35	7	10	86
# 100	0.15	305	370	65	13	21	73
# 200	0.075	290	335	45	9	31	64
Pan	-	270	590	320	64	100	0



รูปที่ ก.4 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 2 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 2

% Sand = 2 %

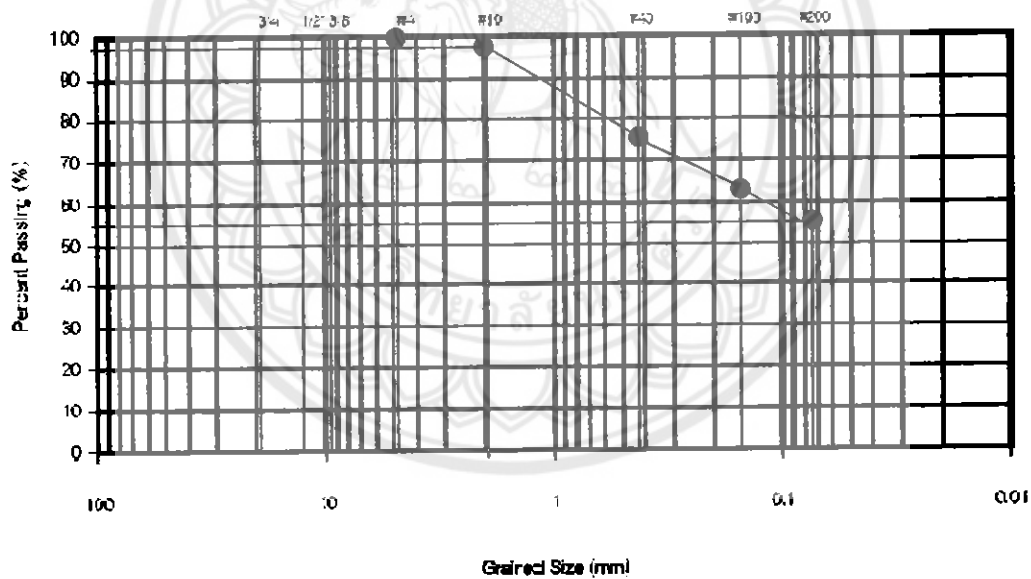
% Silt = 67 %

% Clay = 31 %

ตารางที่ ก.25 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 3 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	510	15	3	3	97
# 20	0.84	450	495	45	9	12	88
# 40	0.425	380	445	65	13	25	75
# 100	0.15	305	370	65	13	38	62
# 200	0.075	290	320	30	6	44	56
Pan	-	270	605	280	56	100	0



รูปที่ ก.5 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 3 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 1

% Sand = 3 %

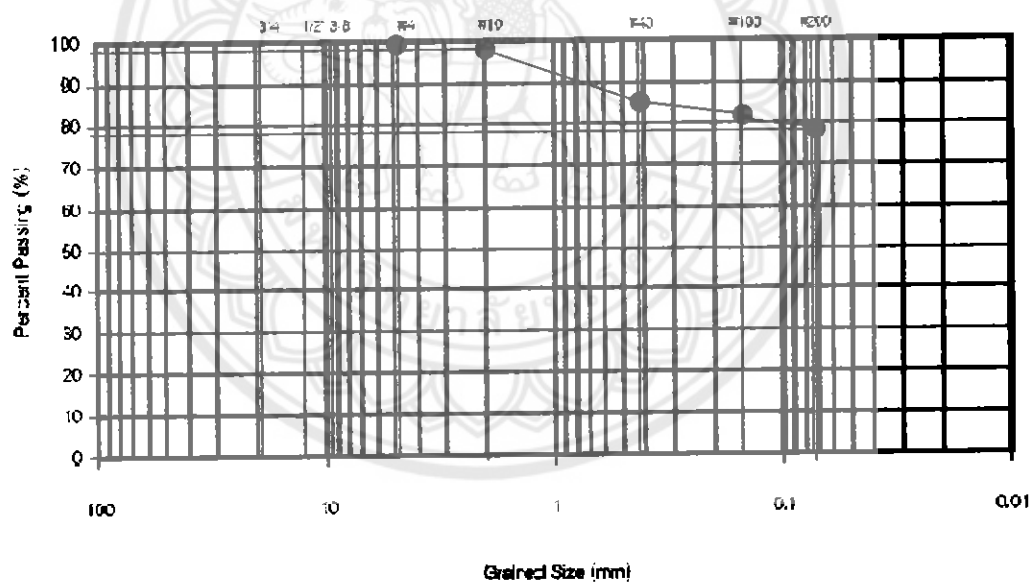
% Silt = 53 %

% Clay = 44 %

ตารางที่ ก.26 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 3 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	505	10	2	2	98
# 20	0.84	450	490	40	8	10	90
# 40	0.425	380	400	20	4	14	86
# 100	0.15	305	325	20	4	18	82
# 200	0.075	290	305	15	3	21	79
Pan	-	270	665	395	79	100	0



รูปที่ ก.7 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 3 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 2

% Sand = 2 %

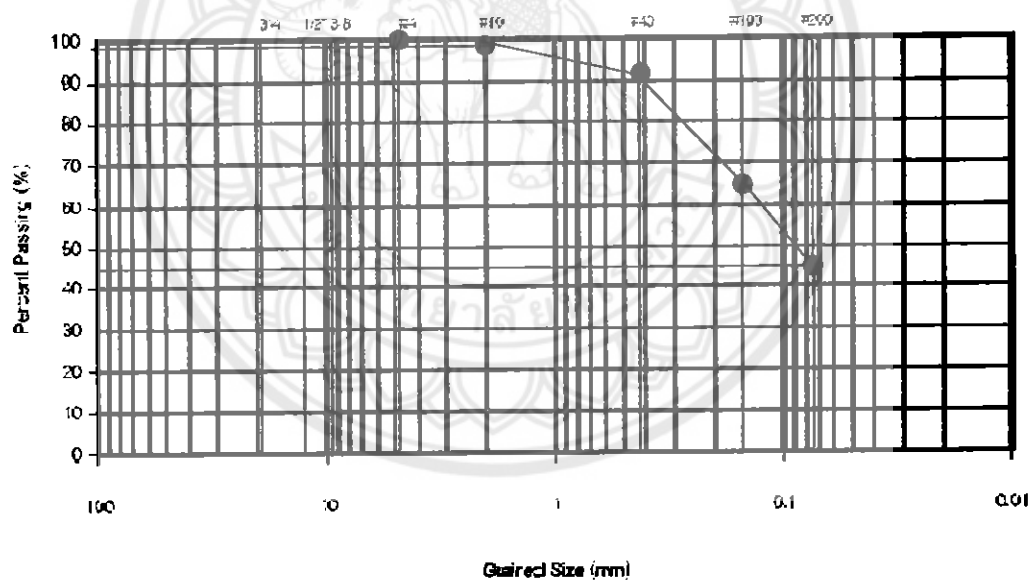
% Silt = 76 %

% Clay = 21 %

ตารางที่ ก.27 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 4 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	500	5	1	1	99
# 20	0.84	450	46	10	2	3	97
# 40	0.425	380	400	20	4	7	93
# 100	0.15	305	440	135	27	34	66
# 200	0.075	290	400	110	22	56	44
Pan	-	270	490	220	44	100	0



รูปที่ ก.8 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 4 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 1

% Sand = 1 %

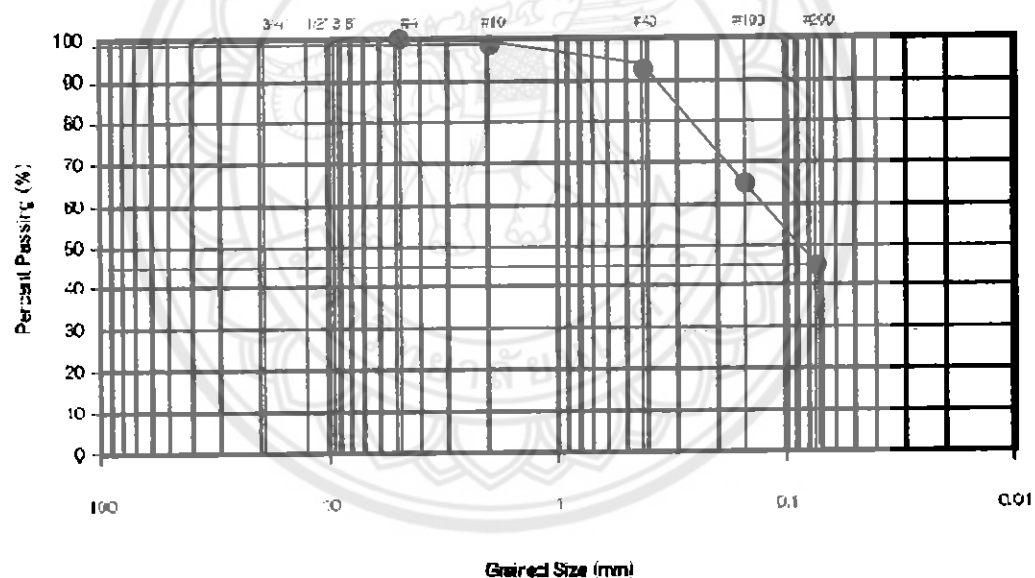
% Silt = 43 %

% Clay = 56 %

ตารางที่ ก.28 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 4 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	500	5	1	1	99
# 20	0.84	450	46	10	2	3	97
# 40	0.425	380	400	20	4	7	93
# 100	0.15	305	440	135	27	34	66
# 200	0.075	290	400	110	22	56	44
Pan	-	270	490	220	44	100	0



รูปที่ ก.9 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 4 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 2

% Sand = 1 %

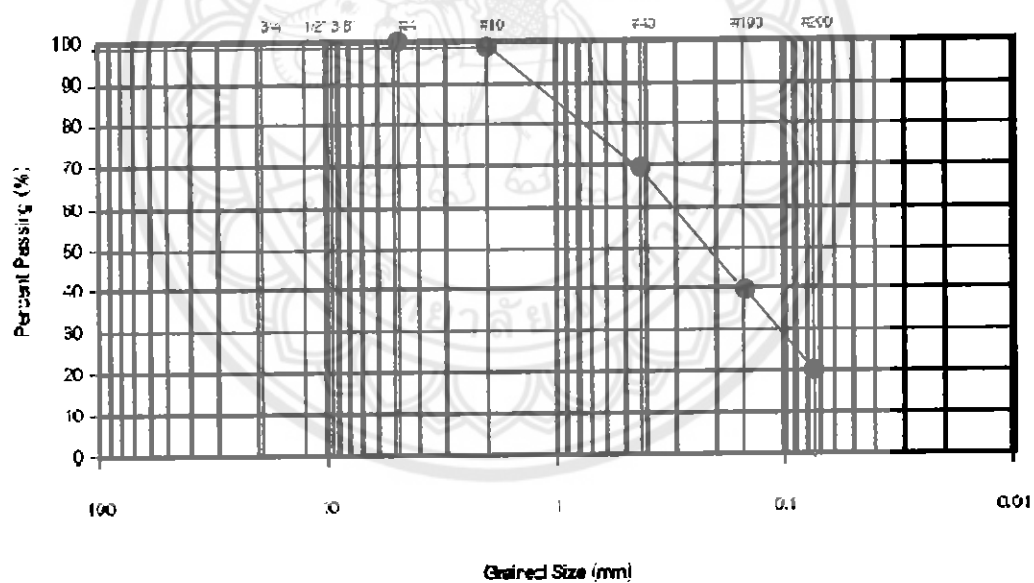
% Silt = 43 %

% Clay = 56 %

ตารางที่ ก.29 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 5 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	500	5	1	1	99
# 20	0.84	450	540	90	18	19	81
# 40	0.425	380	440	60	12	31	69
# 100	0.15	305	455	150	30	61	39
# 200	0.075	290	385	95	19	80	20
Pan	-	270	370	100	20	100	0



รูปที่ ก.10 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 5 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 1

% Sand = 1 %

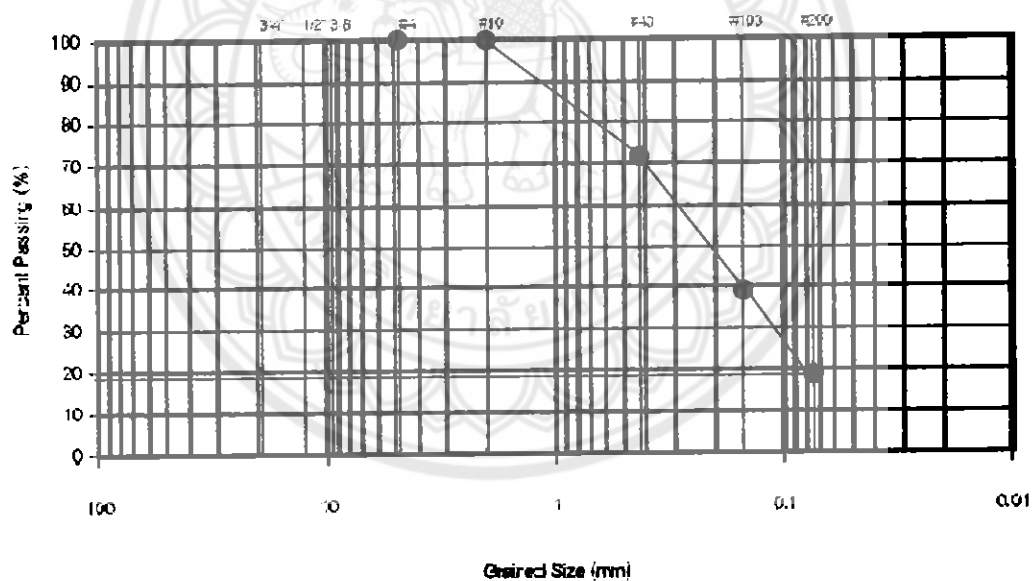
% Silt = 19 %

% Clay = 80 %

ตารางที่ ก.30 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 5 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 20	0.84	450	535	85	17	17	83
# 40	0.425	380	440	60	12	29	71
# 100	0.15	305	465	160	32	61	39
# 200	0.075	290	390	100	20	81	19
Pan	-	270	365	95	19	100	0



รูปที่ ก.11 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 5 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 2

% Sand = 0 %

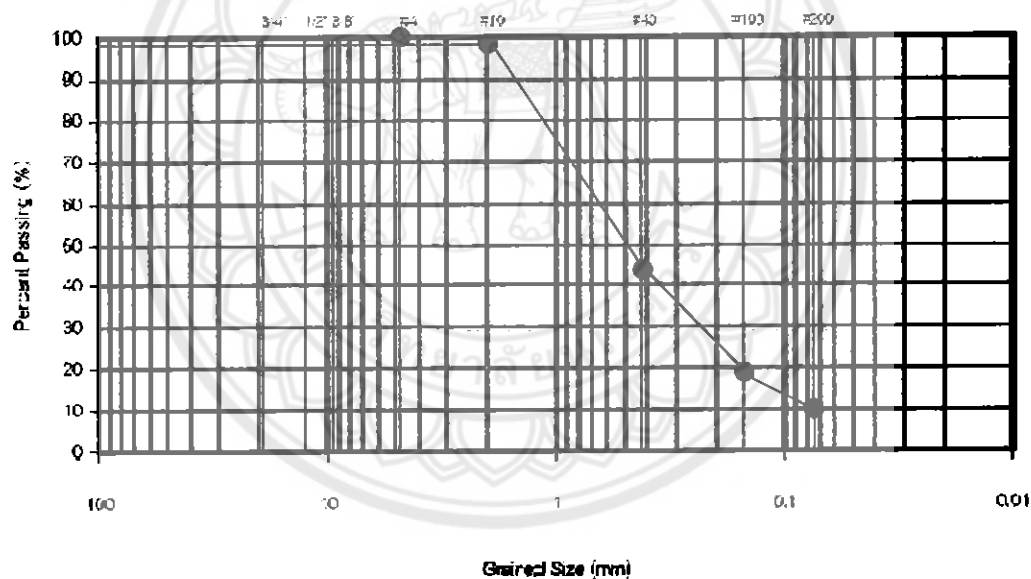
% Silt = 19 %

% Clay = 81 %

ตารางที่ ก.31 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 6 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	500	5	1	1	99
# 20	0.84	450	630	180	36	37	63
# 40	0.425	380	480	100	20	57	43
# 100	0.15	305	425	120	24	81	19
# 200	0.075	290	335	45	9	90	10
Pan	-	270	320	50	10	100	0



รูปที่ ก.12 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 6 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 1

% Sand = 1 %

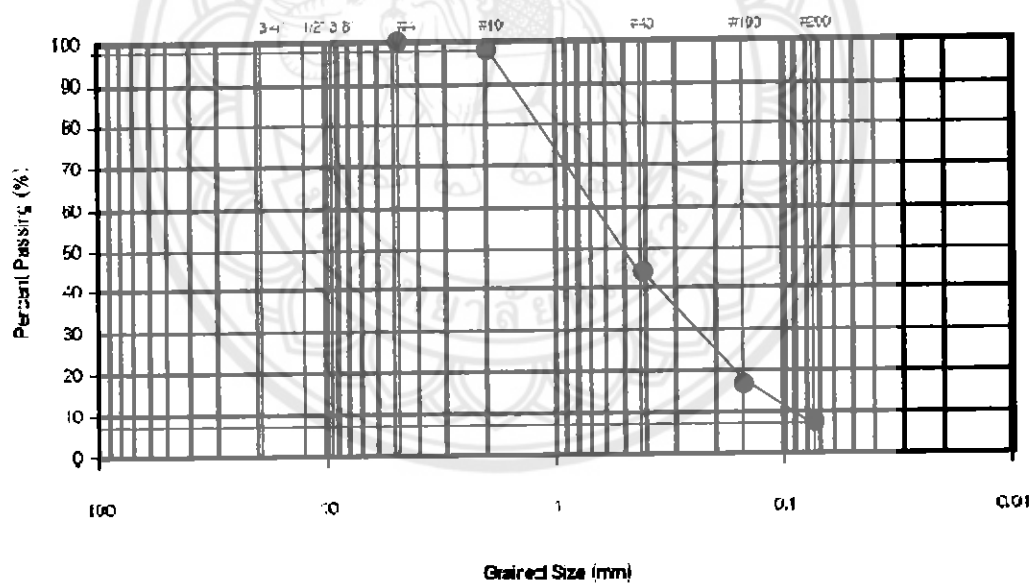
% Silt = 9 %

% Clay = 90 %

ตารางที่ ก.32 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 6 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	500	5	1	1	99
# 20	0.84	450	625	175	35	36	64
# 40	0.425	380	485	105	21	57	43
# 100	0.15	305	435	130	26	81	17
# 200	0.075	290	335	45	9	90	8
Pan	-	270	310	40	8	100	0



รูปที่ ก.13 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 6 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 2

% Sand = 1 %

% Silt = 9 %

% Clay = 90 %

ตารางที่ ก.33 ผลของการวิเคราะห์หาค่า pH ของดิน

จุดที่	ความลึก (ซม.)	ผลการวิเคราะห์ pH		เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	
1	0 - 15	5.5	5.19	5.35
	15 - 30	5.2	5.85	5.53
	30 - 45	5.25	5.47	5.36
2	0 - 15	6.08	6.1	6.09
	15 - 30	6.62	6.4	6.51
	30 - 45	6.97	7.07	7.02
3	0 - 15	6.87	6.67	6.77
	15 - 30	6.84	6.94	6.89
	30 - 45	7.13	7.11	7.12
4	0 - 15	6.89	6.93	6.91
	15 - 30	6.86	6.75	6.81
	30 - 45	7	6.68	6.84
5	0 - 15	6.69	6.88	6.79
	15 - 30	6.87	6.67	6.77
	30 - 45	6.87	6.89	6.88
6	0 - 15	6.68	6.88	6.78
	15 - 30	6.77	6.73	6.75
	30 - 45	6.78	6.75	6.77

ตารางที่ ก.34 ผลของการวิเคราะห์หาค่าสภาพการนำไฟฟ้า

จุดที่	ความลึก (ซม)	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
1	0 - 15	47.4
	15 - 30	34.5
	30 - 45	41.6
2	0 - 15	72.6
	15 - 30	39.2
	30 - 45	17.9
3	0 - 15	66.1
	15 - 30	23.1
	30 - 45	21.4
4	0 - 15	13.4
	15 - 30	16.1
	30 - 45	11.8
5	0 - 15	21.5
	15 - 30	21
	30 - 45	15.6
6	0 - 15	40.2
	15 - 30	40.4
	30 - 45	41.9

ตารางที่ ก.35 ผลของการวิเคราะห์หาค่าสารอินทรีย์ในดิน ครั้งที่ 1

จุดที่	ความลึก (ซม)	นน.ถ้วย (กรัม)	นน.ดิน (กรัม)	รวม นน. (กรัม)	นน.หลังอบ (กรัม)	นน.ที่หายไป (กรัม)	% สารอินทรีย์
1	0 - 15	100.5419	1.1342	101.6761	101.6118	0.0643	5.67
	15 - 30	70.2326	1.3215	71.5541	71.4803	0.0738	5.58
	30 - 45	95.8287	1.0786	96.9073	96.8493	0.058	5.38
2	0 - 15	110.7796	1.005	111.7846	111.6982	0.0864	8.60
	15 - 30	99.1801	1.024	100.2041	100.1148	0.0893	8.72
	30 - 45	109.2327	1.0245	110.2572	110.2109	0.0463	4.52
3	0 - 15	66.1781	1.0633	67.2414	67.1643	0.0771	7.25
	15 - 30	61.1572	1.1926	62.3498	62.2805	0.0693	5.81
	30 - 45	102.0519	1.2581	103.31	103.2375	0.0725	5.76
4	0 - 15	67.6574	1.1735	68.8309	68.7867	0.0442	3.77
	15 - 30	58.6111	1.187	59.7981	59.7515	0.0466	3.93
	30 - 45	98.7936	1.1868	99.9804	99.9548	0.0256	2.16
5	0 - 15	97.144	1.0498	98.1938	98.1325	0.0613	5.84
	15 - 30	65.7022	1.077	66.7792	66.7341	0.0451	4.19
	30 - 45	98.5369	1.2907	99.8276	99.7888	0.0388	3.01
6	0 - 15	104.4266	1.0036	105.4302	105.3554	0.0748	7.45
	15 - 30	99.702	1.0393	100.7413	100.6638	0.0775	7.46
	30 - 45	89.6314	1.0009	90.6323	90.5594	0.0729	7.28

ตารางที่ ก.36 ผลของการวิเคราะห์หาค่าสารอินทรีย์ในดิน ครั้งที่ 2

จุดที่	ความลึก (ซม)	นน.ถ้วย (กรัม)	นน.ดิน (กรัม)	รวม นน. (กรัม)	นน.หลังอบ (กรัม)	นน.ที่หายไป (กรัม)	% สารอินทรีย์
1	0 - 15	98.5356	1.0145	99.5501	99.4919	0.0582	5.74
	15 - 30	98.7911	1.096	99.8871	99.8213	0.0658	6.00
	30 - 45	65.6972	1.0138	66.711	66.6623	0.0487	4.80
2	0 - 15	109.231	1.0043	110.2353	110.1537	0.0816	8.13
	15 - 30	99.6984	1.0809	100.7793	100.6924	0.0869	8.04
	30 - 45	100.5385	1.0143	101.5528	101.5099	0.0429	4.23
3	0 - 15	99.174	1.0011	100.1751	100.1065	0.0686	6.85
	15 - 30	95.8227	1.0365	96.8592	96.8039	0.0553	5.34
	30 - 45	70.2294	1.0806	71.31	71.2522	0.0578	5.35
4	0 - 15	104.4242	1.043	105.4672	105.4277	0.0395	3.79
	15 - 30	67.6555	1.0658	68.7213	68.611	0.1103	10.35
	30 - 45	66.1771	1.0067	67.1838	67.1644	0.0194	1.93
5	0 - 15	89.6305	1.0105	90.641	90.5825	0.0585	5.79
	15 - 30	97.1423	1.0023	98.1446	98.1057	0.0389	3.88
	30 - 45	58.6109	1.0166	59.6275	59.594	0.0335	3.30
6	0 - 15	110.7747	1.0649	111.8396	111.7572	0.0824	7.74
	15 - 30	102.0488	1.0621	103.1109	103.029	0.0819	7.71
	30 - 45	61.1556	1.007	62.1626	62.085	0.0776	7.71

ตารางที่ ก.37 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

จุดที่	ความลึก (ซม.)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักดิน (กรัม)	ความเข้มข้น Cd (มก./ล)	ปริมาณ Cd (มก./กก.ดิน)
1	0 - 15	1	1.0093	0.031	1.5357
		2	1.0233	0.019	0.9284
		Average			1.2320
1	15 - 30	1	1.0682	0.022	1.0298
		2	1.0801	0.017	0.7870
		Average			0.9084
1	30 - 45	1	1.0145	0.022	1.0843
		2	1.0116	0.02	0.9885
		Average			1.0364

ตารางที่ ก.38 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

จุดที่	ความลึก (ซม.)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักดิน (กรัม)	ความเข้มข้น Cd (มก./ล)	ปริมาณ Cd (มก./กก.ดิน)
2	0 - 15	1	1.0716	-	-
		2	1.0297	0.251	12.1880
		Average			12.1880
2	15 - 30	1	1.0035	0.238	11.8585
		2	1.0309	0.288	13.9684
		Average			12.9134
2	30 - 45	1	1.0127	0.061	3.0118
		2	1.0298	0.049	2.3791
		Average			2.6954

ตารางที่ ก.39 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

จุดที่	ความลึก (ซม.)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักดิน (กรัม)	ความเข้มข้น Cd (มก/ล)	ปริมาณ Cd (มก./กก.ดิน)
3	0 - 15	1	1.0355	0.084	4.0560
		2	1.0104	0.085	4.2063
		Average			4.1311
3	15 - 30	1	1.0201	0.041	2.0096
		2	1.035	0.034	1.6425
		Average			1.8261
3	30 -45	1	1.1444	0.03	1.3107
		2	1.0144	0.028	1.3801
		Average			1.3454

ตารางที่ ก. 40 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

จุดที่	ความลึก (ซม.)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักดิน (กรัม)	ความเข้มข้น Cd (มก/ล)	ปริมาณ Cd (มก./กก.ดิน)
4	0 - 15	1	1.024	0.054	2.6367
		2	1.0097	0.052	2.5750
		Average			2.6059
4	15 - 30	1	1.0082	0.058	2.8764
		2	1.0136	0.051	2.5158
		Average			2.6961
4	30 -45	1	1.0066	0.019	0.9438
		2	1.0004	0.034	1.6993
		Average			1.3215

ตารางที่ ก.41 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

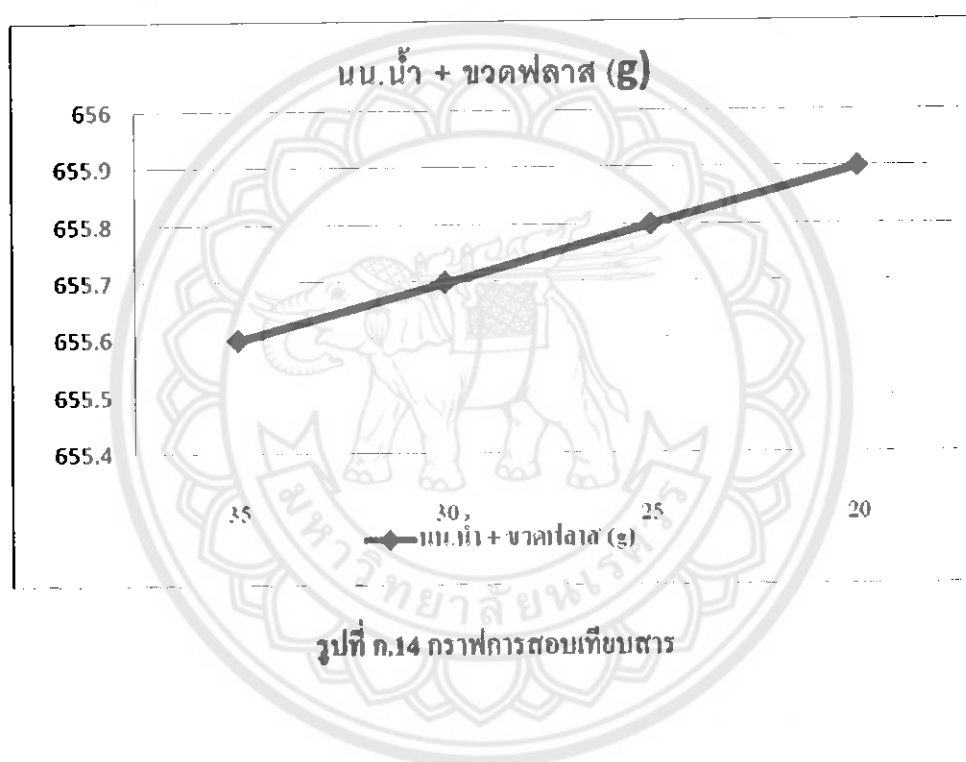
จุดที่	ความลึก (ซม.)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักดิน (กรัม)	ความเข้มข้น Cd (มก/ก)	ปริมาณ Cd (มก./กก.ดิน)
5	0 - 15	1	1.0115	0.043	2.1256
		2	1.0356	0.02	0.9656
		Average			1.5456
5	15 - 30	1	1.0338	0.025	1.2091
		2	1.0101	0.016	0.7920
		Average			1.0006
5	30 -45	1	1.0643	0.022	1.0335
		2	1.0695	0.014	0.6545
		Average			0.8440

ตารางที่ ก.42 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

จุดที่	ความลึก (ซม.)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักดิน (กรัม)	ความเข้มข้น Cd (มก/ก)	ปริมาณ Cd (มก./กก.ดิน)
6	0 - 15	1	1.0127	0.032	1.5799
		2	1.119	0.043	1.9214
		Average			1.7506
6	15 - 30	1	1.006	0.034	1.6899
		2	1.0808	0.035	1.6192
		Average			1.6545
6	30 -45	1	1.023	0.032	1.5640
		2	1.0061	0.027	1.3418
		Average			1.4529

ตารางที่ ก.43 ผลของการสอบเทียบสารก่อนหาค่าความถ่วงจำเพาะของตะกอน

ลำดับที่	อุณหภูมิ (°C)	นน. น้ำ+ขวดพลาสติก(g)
1	20	655.9
2	25	655.8
3	30	655.7
4	35	655.6



ตารางที่ ก.44 ผลของการวิเคราะห์หาค่าความถ่วงจำเพาะของตะกอน

ตัวอย่างตะกอน	จุดที่ 1 ชั้น 2	จุดที่ 2 ชั้น 3	จุดที่ 3 ชั้น 2	จุดที่ 4 ชั้น 2	จุดที่ 5 ชั้น 2	จุดที่ 6 ชั้น 2
1.Temperature (c)	35	35	35	35	35	35
2.Flask +Water (g)	656.6	656.6	656.6	656.6	656.6	656.6
3.Flask +Water + Soil (g)	838.4	840.3	839.6	845	839.3	837.2
4.Container No.	1	2	3	4	5	6
5.Dry Soil + Container (g)	653.1	546	657.8	656.8	655.4	538.8
6.Weight of container (g)	360.1	247.6	362.3	359.1	361.1	247.2
7.dry Soil (g)	293	298.4	295.5	297.7	294.3	291.6
8.Correction Factor	0.99395	0.99395	0.99395	0.99395	0.99395	0.99395
9.Specific Gravity	2.619	2.586	2.611	2.651	2.621	2.611
10.Average Specific Gravity	2.619	2.586	2.611	2.651	2.621	2.611

วิธีการคำนวณ

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

เมื่อ G_s = ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินที่อุณหภูมิ 20°C

W_s = น้ำหนักของตัวอย่างดินที่อบแห้ง

W_{FW} = น้ำหนักของ Volumetric Flask + น้ำ ที่อุณหภูมิหนึ่ง

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

W_{FW}

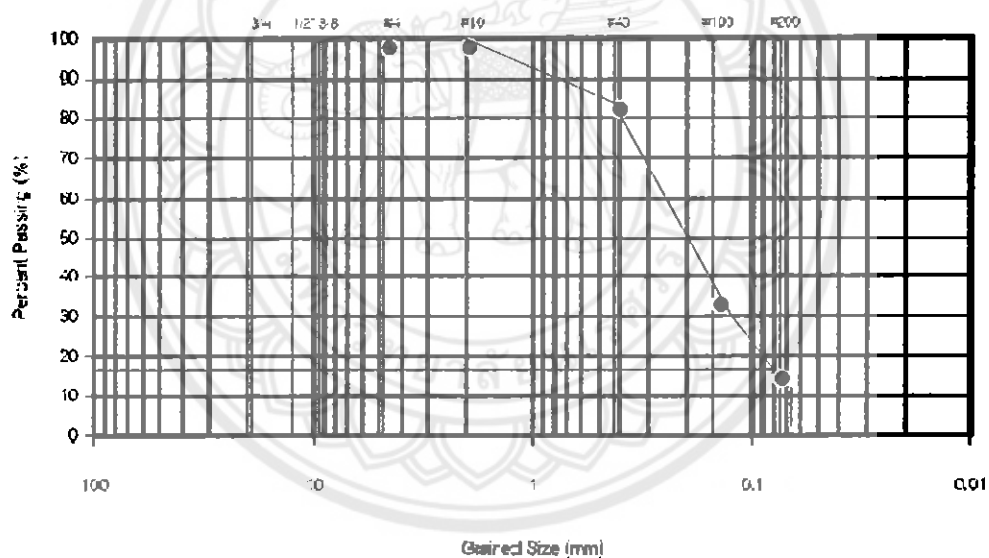
K = เป็นค่าตัวแปรปรับแก้เนื่องจากอุณหภูมิ



ตารางที่ ก.45 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 1 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 40	0.425	380	475	95	19	19	81
# 100	0.15	305	540	235	47	66	34
# 200	0.075	290	390	100	20	86	14
Pan	-	270	340	70	14	100	0



รูปที่ ก.15 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 1 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 1

% Sand = 0 %

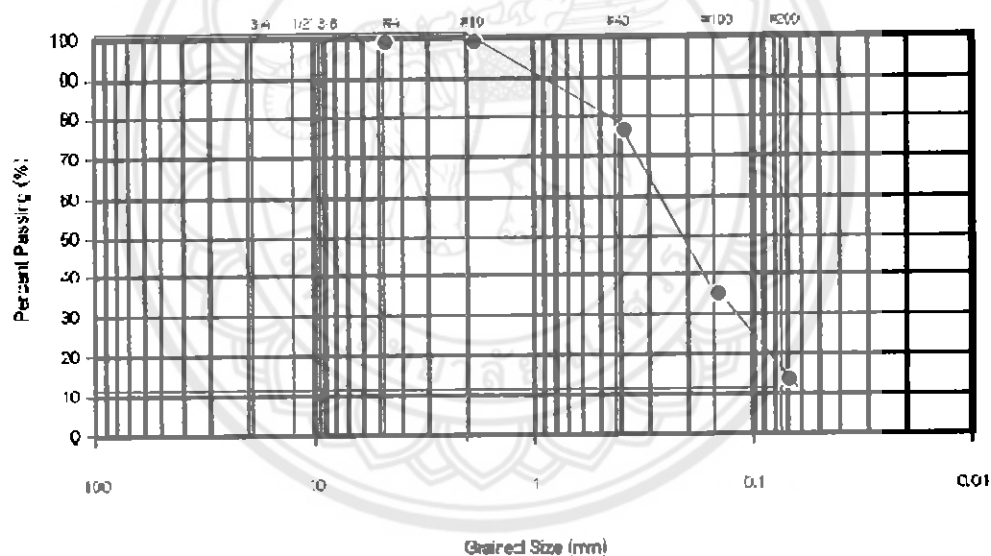
% Silt = 14 %

% Clay = 86 %

ตารางที่ ก.46 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 1 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 40	0.425	380	485	105	21	21	79
# 100	0.15	305	530	225	45	66	34
# 200	0.075	290	400	110	22	88	12
Pan	-	270	330	60	12	100	0



รูปที่ ก.16 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 1 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 2

% Sand = 0 %

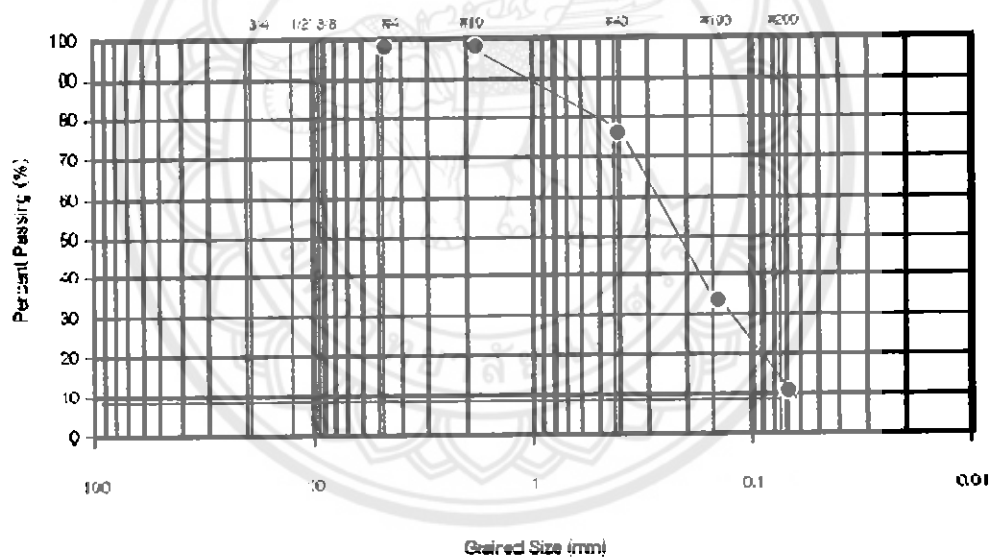
% Silt = 12 %

% Clay = 88 %

ตารางที่ ก.47 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 2 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 40	0.425	380	490	110	22	22	78
# 100	0.15	305	530	225	45	67	33
# 200	0.075	290	405	115	23	90	10
Pan	-	270	320	50	10	100	0



รูปที่ ก.17 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 2 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 1

% Sand = 0 %

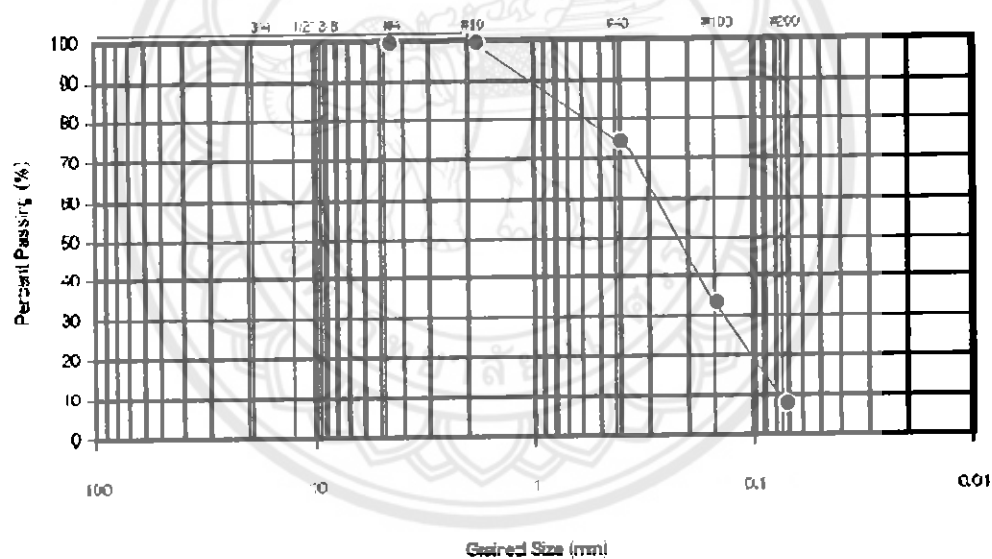
% Silt = 10 %

% Clay = 90 %

ตารางที่ ก.48 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 2 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 40	0.425	380	500	120	24	24	76
# 100	0.15	305	530	225	45	69	31
# 200	0.075	290	400	110	22	91	9
Pan	-	270	315	45	9	100	0



รูปที่ ก.18 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 2 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 2

% Sand = 0 %

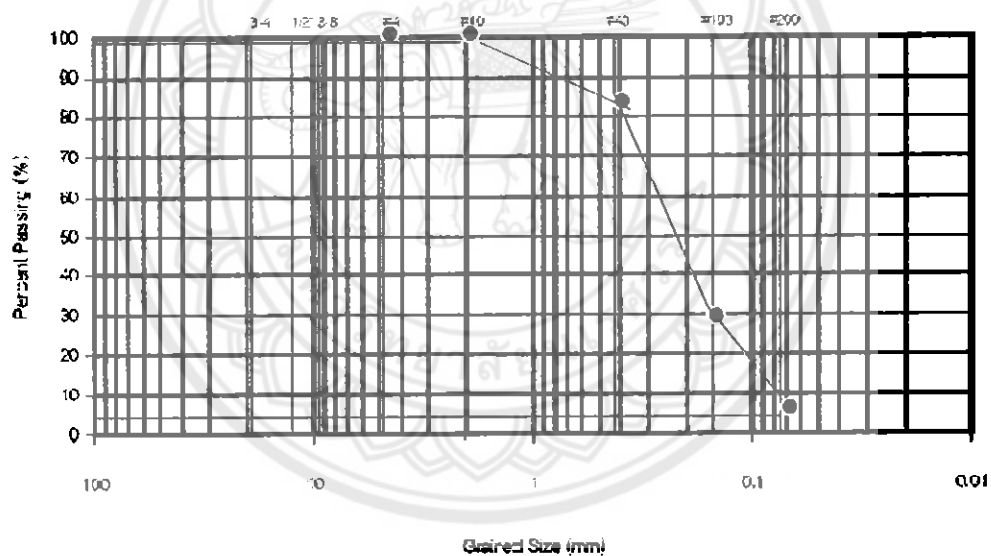
% Silt = 9 %

% Clay = 91 %

ตารางที่ ก.49 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 3 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 40	0.425	380	450	70	14	14	86
# 100	0.15	305	585	280	56	70	30
# 200	0.075	290	405	115	23	93	7
Pan	-	270	310	40	7	100	0



รูปที่ ก.19 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 3 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 1

% Sand = 0 %

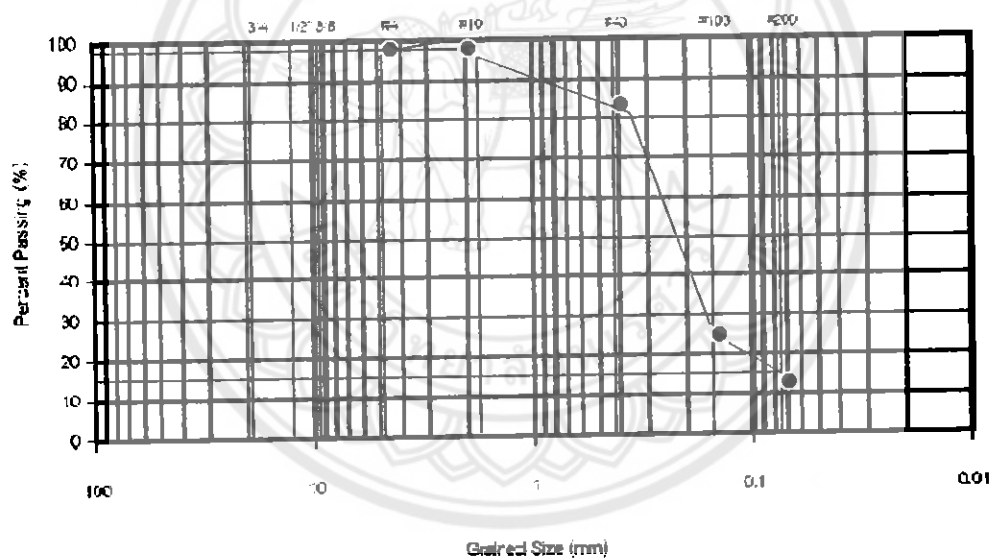
% Silt = 7 %

% Clay = 93 %

ตารางที่ ก.50 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 3 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 40	0.425	380	440	60	12	12	88
# 100	0.15	305	620	315	63	75	25
# 200	0.075	290	350	60	12	87	13
Pan	-	270	335	65	13	100	0



รูปที่ ก.20 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 3 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 2

% Sand = 0 %

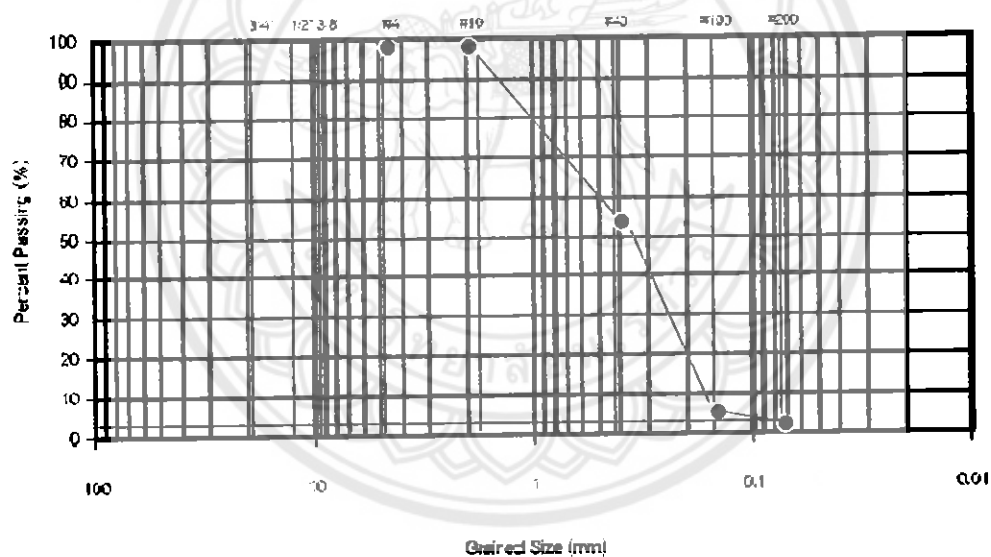
% Silt = 13 %

% Clay = 87 %

ตารางที่ ก.51 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 4 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 40	0.425	380	600	220	44	44	56
# 100	0.15	305	560	255	51	95	5
# 200	0.075	290	305	15	3	98	2
Pan	-	270	280	10	2	100	0



รูปที่ ก.21 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 4 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 1

% Sand = 0 %

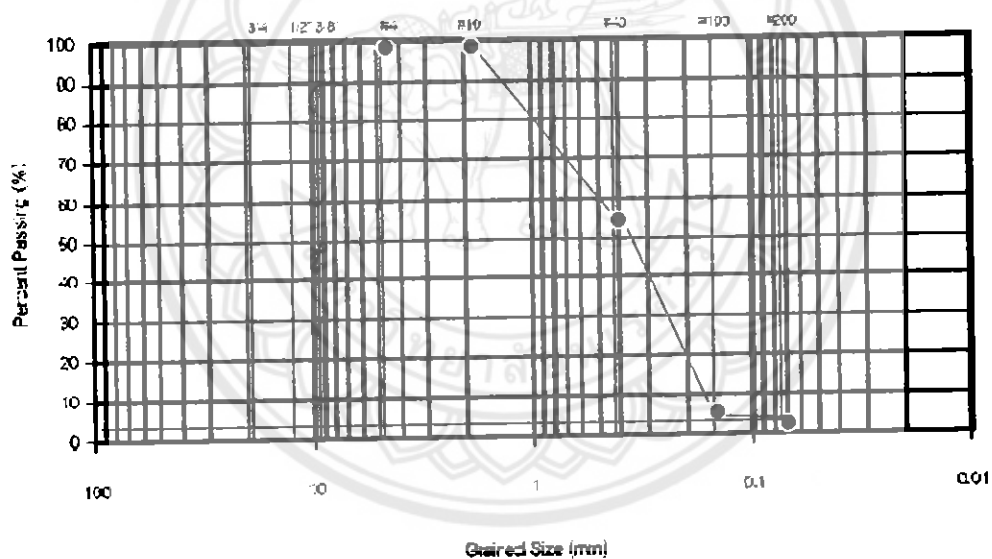
% Silt = 2 %

% Clay = 98 %

ตารางที่ ก.52 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 4 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 40	0.425	380	600	220	44	44	56
# 100	0.15	305	560	255	51	95	5
# 200	0.075	290	305	15	3	98	2
Pan	-	270	280	10	2	100	0



รูปที่ ก.22 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 4 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 2

% Sand = 0 %

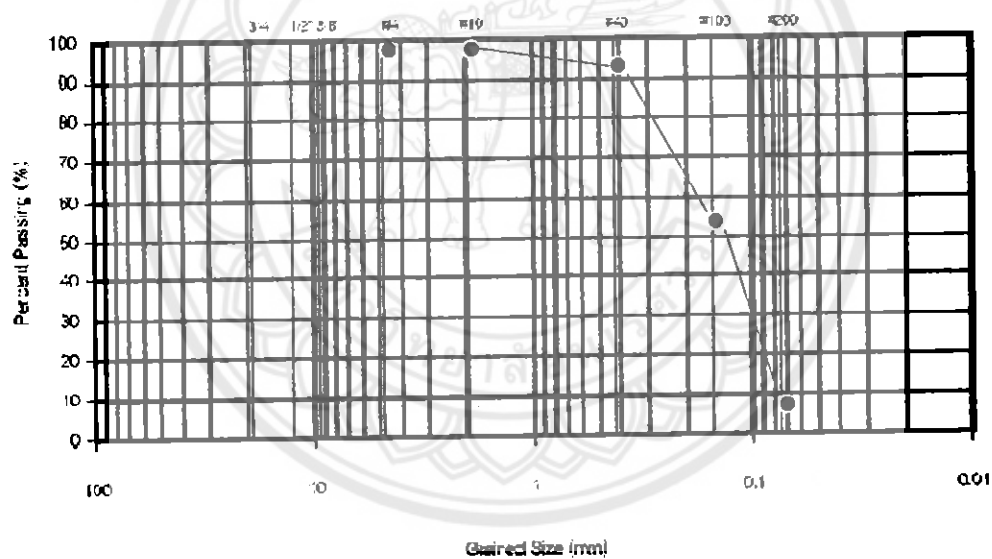
% Silt = 2 %

% Clay = 98 %

ตารางที่ ก.53 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 5 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 40	0.425	380	390	10	8	8	92
# 100	0.15	305	350	45	38	46	54
# 200	0.075	290	345	55	46	92	8
Pan	-	270	280	10	8	100	0



รูปที่ ก.23 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 5 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 1

% Sand = 0 %

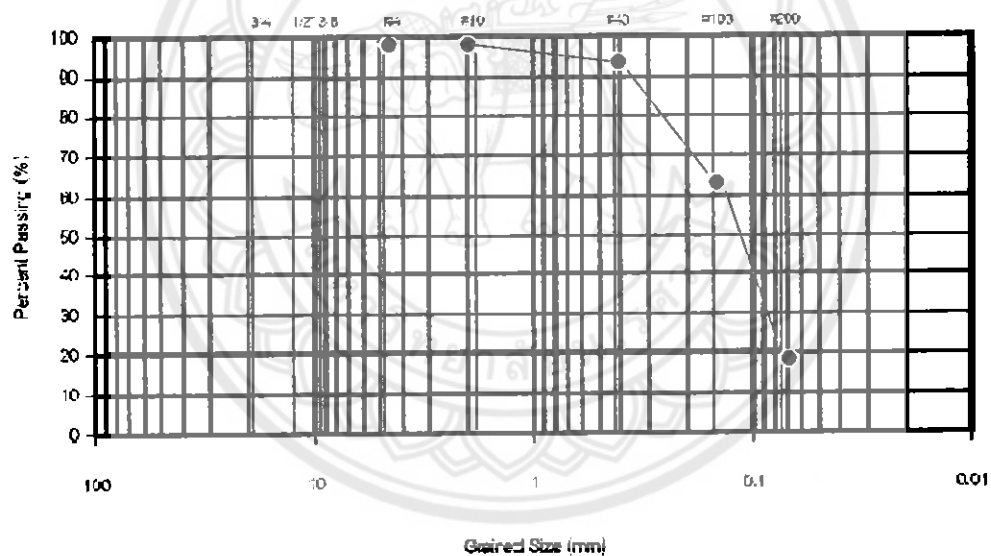
% Silt = 8 %

% Clay = 92 %

ตารางที่ ก.54 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 5 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 40	0.425	380	390	10	8	8	92
# 100	0.15	305	340	35	28	36	64
# 200	0.075	290	345	55	44	80	20
Pan	-	270	295	25	20	100	0



รูปที่ ก.24 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 5 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 2

% Sand = 0 %

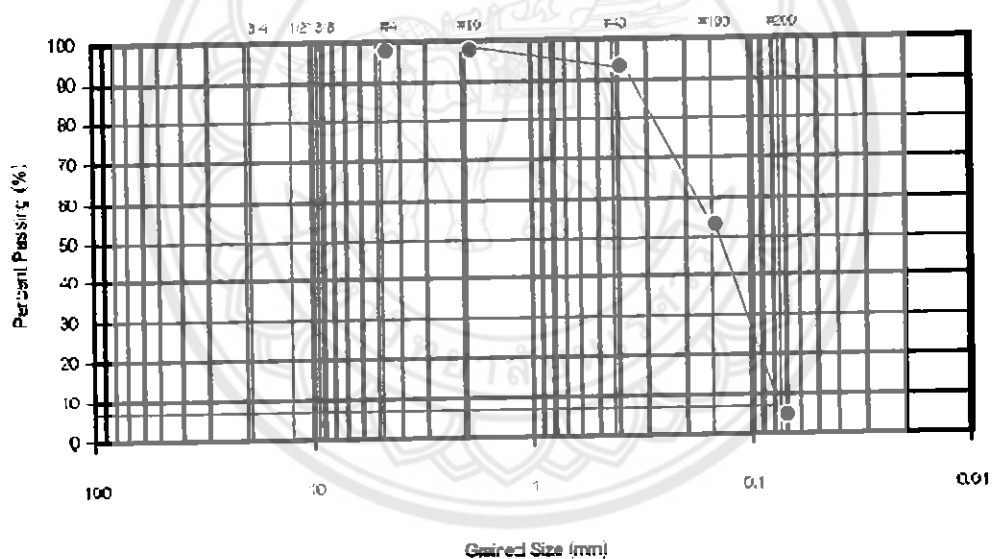
% Silt = 20 %

% Clay = 80 %

ตารางที่ ก.55 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 6 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 40	0.425	380	385	5	5	5	95
# 100	0.15	305	345	40	42	47	53
# 200	0.075	290	335	45	48	95	5
Pan	-	270	275	5	5	100	0



รูปที่ ก.25 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 6 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 1

% Sand = 0 %

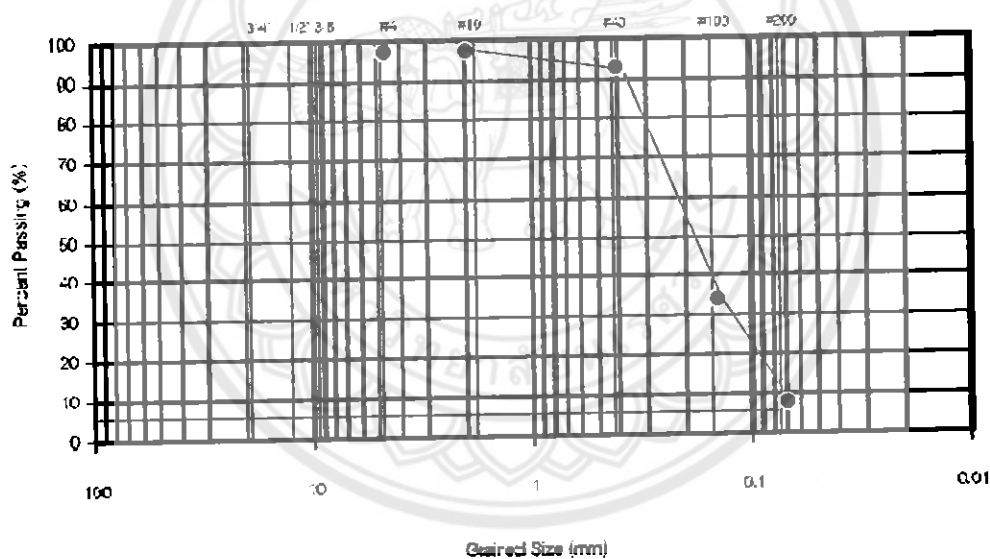
% Silt = 5 %

% Clay = 95 %

ตารางที่ ก.56 ผลของการวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

จุดที่ 6 ความลึก 15 – 30 cm 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	510	510	0	0	0	100
# 10	2	495	495	0	0	0	100
# 40	0.425	380	385	5	9	9	91
# 100	0.15	305	335	30	55	64	36
# 200	0.075	290	305	15	27	91	9
Pan	-	270	275	5	9	100	0



รูปที่ ก.26 Particle Size Distribution Curve ของผลการทดลองจุดที่ 6 ความลึก 15 – 30 cm ครั้งที่ 2

% Sand = 0 %

% Silt = 9 %

% Clay = 91 %

ตารางที่ ก.57 ผลของการวิเคราะห์หาค่า pH ของตะกอน

จุดที่	ความลึก(ซม)	pH
1	0 - 15	6.40
	15 - 30	7.26
	30 - 45	7.77
2	0 - 15	6.86
	15 - 30	7.79
	30 - 45	7.74
3	0 - 15	7.81
	15 - 30	7.82
	30 - 45	7.81
4	0 - 15	7.92
	15 - 30	7.75
	30 - 45	7.76
5	0 - 15	7.66
	15 - 30	7.63
	30 - 45	7.78
6	0 - 15	8.05
	15 - 30	7.90
	30 - 45	7.65

ตารางที่ ก.58 ผลของการวิเคราะห์หาค่าสภาพการนำไฟฟ้าของตะกอน

จุดที่	ความลึก (ซม)	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า ($\mu\text{s}/\text{cm.}$)
1	0 - 15	232
	15 - 30	237
	30 - 45	224
2	0 - 15	128
	15 - 30	142
	30 - 45	160
3	0 - 15	201
	15 - 30	217
	30 - 45	267
4	0 - 15	154
	15 - 30	310
	30 - 45	219
5	0 - 15	412
	15 - 30	974
	30 - 45	518
6	0 - 15	417
	15 - 30	543
	30 - 45	553

วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณสารอินทรีย์ (\%)} = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100$$

ตารางที่ ก.59 ผลของการวิเคราะห์หาค่าสารอินทรีย์ในตะกอน ครั้งที่ 1

จุดที่	ความลึก (ซม)	นน.ถ้วย (กรัม)	นน.ตะกอน (กรัม)	รวม นน. (กรัม)	นน.หลังอบ (กรัม)	นน.ที่หายไป (กรัม)	% สารอินทรีย์
1	0 - 15	61.1614	2.0033	63.1647	63.0299	0.1348	6.7289
	15 - 30	109.2342	2.0024	111.2366	111.1099	0.1267	6.32741
	30 - 45	66.187	2.0102	68.1972	68.0434	0.1538	7.65098
2	0 - 15	65.7131	2.003	67.7161	67.6321	0.084	4.19371
	15 - 30	81.5574	2.0039	83.5613	83.4361	0.1252	6.24782
	30 - 45	98.1066	2.0011	100.1077	99.9718	0.1359	6.79126
3	0 - 15	70.2383	2.0066	72.2449	72.1508	0.0941	4.68952
	15 - 30	110.8011	2.0088	112.8099	112.6655	0.1444	7.18837
	30 - 45	97.1513	2.0006	99.1519	98.9982	0.1537	7.6827
4	0 - 15	98.5419	2.0127	100.5546	100.435	0.1196	5.94227
	15 - 30	89.6393	2.0016	91.6409	91.4872	0.1537	7.67886
	30 - 45	107.9025	2.011	109.9135	109.7651	0.1484	7.37941
5	0 - 15	67.6666	2.0034	69.67	69.4614	0.2086	10.4123
	15 - 30	68.4917	2.0072	70.4989	70.2581	0.2408	11.9968
	30 - 45	100.5566	2.0074	102.564	102.3226	0.2414	12.0255
6	0 - 15	98.7975	2.0062	100.8037	100.5554	0.2483	12.3766
	15 - 30	58.6133	2.0092	60.6225	60.4138	0.2087	10.3872
	30 - 45	104.4357	2.001	106.4367	106.2123	0.2244	11.2144

ตารางที่ ก.60 ผลของการวิเคราะห์หาค่าสารอินทรีย์ในตะกอน ครั้งที่ 2

จุดที่	ความลึก (ซม)	นน.ถ้วย (กรัม)	นน.ตะกอน (กรัม)	รวม นน. (กรัม)	นน.หลังอบ (กรัม)	นน.ที่หายไป (กรัม)	% สารอินทรีย์
1	0 - 15	109.2294	2.0005	111.2299	111.0951	0.1348	6.73832
	15 - 30	68.43	2.0045	70.4345	70.3065	0.128	6.38563
	30 - 45	107.8943	2.0069	109.9012	109.7452	0.156	7.77318
2	0 - 15	98.0935	2.0018	100.0953	100.0062	0.0891	4.45099
	15 - 30	81.5502	2.007	83.5572	83.4137	0.1435	7.14998
	30 - 45	89.6314	2.0053	91.6367	91.5193	0.1174	5.85449
3	0 - 15	97.1449	2.0012	99.1461	99.0497	0.0964	4.81711
	15 - 30	61.1542	2.0075	63.1617	63.037	0.1247	6.21171
	30 - 45	58.6092	2.0104	60.6196	60.4711	0.1485	7.38659
4	0 - 15	70.2301	2.0011	72.2312	72.0777	0.1535	7.67078
	15 - 30	98.7909	2.0047	100.7956	100.6616	0.134	6.68429
	30 - 45	100.5388	2.0006	102.5394	102.3792	0.1602	8.0076
5	0 - 15	67.6561	2.0056	69.6617	69.434	0.2277	11.3532
	15 - 30	66.1786	2.0024	68.181	67.9854	0.1956	9.76828
	30 - 45	65.7051	2.0097	67.7148	67.4646	0.2502	12.4496
6	0 - 15	98.5353	2.0083	100.5436	100.2807	0.2629	13.0907
	15 - 30	110.7828	2.0013	112.7841	112.5716	0.2125	10.6181
	30 - 45	104.4247	2.0396	106.4643	106.2418	0.2225	10.909

ตารางที่ ก.61 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในตะกอน

จุดที่	ความลึก (ซม.)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักตะกอน (กรัม)	ความเข้มข้น Cd (มก./ล)	ปริมาณ Cd (มก./กก.ดิน)
1	0 - 15	1	0.51	0.011	1.08
		2	0.507	0.009	0.89
		Average			0.98
1	15 - 30	1	0.5024	0.124	12.34
		2	0.5029	0.15	14.91
		Average			13.63
1	30 -45	1	0.5088	0.018	1.77
		2	0.5048	0.017	1.68
		Average			1.73

ตารางที่ ก.62 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในตะกอน

จุดที่	ความลึก (ซม.)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักตะกอน (กรัม)	ความเข้มข้น Cd (มก./ล)	ปริมาณ Cd (มก./กก.ดิน)
2	0 - 15	1	0.5082	0.082	8.07
		2	0.5069	0.062	6.12
		Average			7.09
2	15 - 30	1	0.5065	0.159	15.70
		2	0.5027	0.121	12.04
		Average			13.87
2	30 -45	1	0.5119	0.502	49.03
		2	0.5122	0.148	14.45
		Average			31.74

ตารางที่ ก.63 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในตะกอน

จุดที่	ความลึก (ซม.)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักตะกอน (กรัม)	ความเข้มข้น Cd (มก/ล)	ปริมาณ Cd (มก./กก.ดิน)
3	0 - 15	1	0.5101	0.117	11.47
		2	0.5084	0.164	16.13
		Average			13.80
3	15 - 30	1	0.5045	0.109	10.80
		2	0.5047	0.098	9.71
		Average			10.26
3	30 -45	1	0.507	0.149	14.69
		2	0.5111	0.156	15.26
		Average			14.98

ตารางที่ ก. 64 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในตะกอน

จุดที่	ความลึก (ซม.)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักตะกอน (กรัม)	ความเข้มข้น Cd (มก/ล)	ปริมาณ Cd (มก./กก.ดิน)
4	0 - 15	1	0.5146	0.216	20.99
		2	0.5134	0.107	10.42
		Average			15.70
4	15 - 30	1	0.5079	0.114	11.22
		2	0.5121	0.094	9.18
		Average			10.20
4	30 -45	1	0.5117	0.162	15.83
		2	0.5139	0.106	10.31
		Average			13.07

ตารางที่ ก.65 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในตะกอน

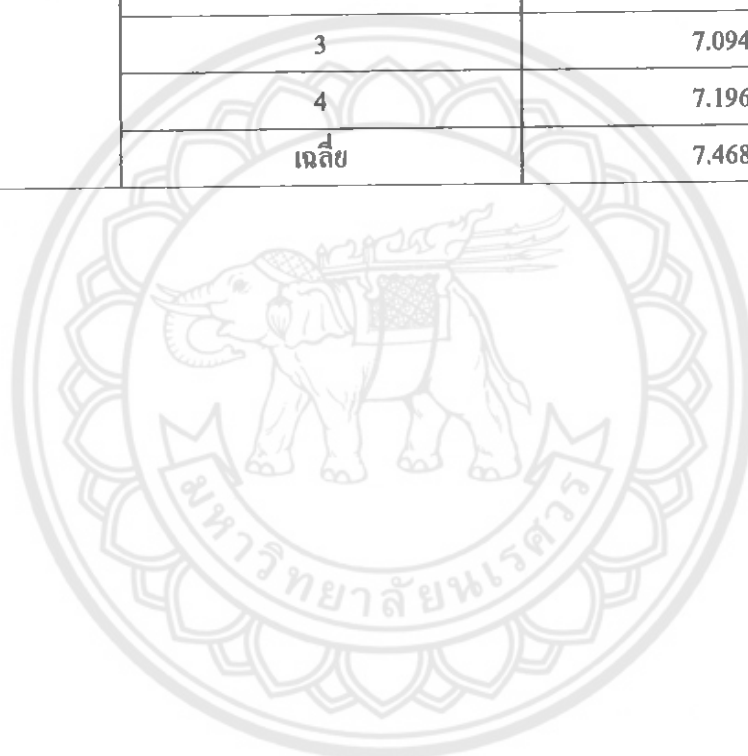
จุดที่	ความลึก (ซม.)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักตะกอน (กรัม)	ความเข้มข้น Cd (มก/ล)	ปริมาณ Cd (มก./กก.ดิน)
5	0 - 15	1	0.5205	0.16	15.37
		2	0.504	0.139	13.79
		Average			14.58
5	15 - 30	1	0.5123	0.108	10.54
		2	0.5032	0.135	13.41
		Average			11.98
5	30 - 45	1	0.5164	0.121	11.72
		2	0.5028	0.139	13.82
		Average			12.77

ตารางที่ ก.66 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในตะกอน

จุดที่	ความลึก (ซม.)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักตะกอน (กรัม)	ความเข้มข้น Cd (มก/ล)	ปริมาณ Cd (มก./กก.ดิน)
6	0 - 15	1	0.5078	0.063	6.20
		2	0.5069	0.047	4.64
		Average			5.42
6	15 - 30	1	0.5064	0.087	8.59
		2	0.5027	0.086	8.55
		Average			8.57
6	30 - 45	1	0.5101	0.084	8.23
		2	0.5105	0.088	8.62
		Average			8.43

ตารางที่ ก.67 แสดงผลการวิเคราะห์แคะเมี่ยมทั้งหมดในถ้ำลอยและหินฟอสเฟต

ถ้ำลอย	ตัวอย่างที่	ปริมาณแคะเมี่ยมทั้งหมด (มก./กก.)
	1	2.391
	2	3.098
	3	1.799
	4	1.400
	เฉลี่ย	1.824
หินฟอสเฟต	1	7.594
	2	7.990
	3	7.094
	4	7.196
	เฉลี่ย	7.468



ภาคผนวก ข
ค่าคงที่ของการละลาย

ตารางที่ ข. ค่าคงที่การละลายของ Cd, Pb และ Zn

Minerals	Equilibrium Reaction	Log K_{sp}
Octavite	$CdCO_3 \rightleftharpoons Cd^{2+} + CO_3^{2-}$	-11.3
Cadmium hydroxide	$Cd(OH)_2 \rightleftharpoons Cd^{2+} + 2OH^-$	-14.7
Cadmium phosphate	$Cd_3(PO_4)_2 \rightleftharpoons 2PO_4^{3-}$	-38.1
Cadmium sulfide	$CdS \rightleftharpoons Cd^{2+} + S^{2-}$	-27.1
Soil cadmium	$Soil-Cd \rightleftharpoons Cd^{2+}$	-7.00
Anglesite	$PbSO_4 \rightleftharpoons Pb^{2+} + SO_4^{2-}$	-7.79
Lead phosphate	$PbHPO_4 \rightleftharpoons Pb^{2+} + HPO_4^{2-}$	-11.43
Cerussite	$PbCO_3 \rightleftharpoons Pb^{2+} + CO_3^{2-}$	-12.8
Lead hydroxypyromorphite	$Pb(PO_4)_3OH \rightleftharpoons 5Pb^{2+} + 3PO_4^{2-} + OH^-$	-12.8
Lead chloropyromorphite	$Pb_5(PO_4)_3OH \rightleftharpoons 5Pb^{2+} + 3PO_4^{2-} + Cl^-$	-84.4
Smithsonite (calamine)	$ZnCO_3 \rightleftharpoons Zn^{2+} + H_2O$	-9.9
Zincite	$ZnO + 2H^+ \rightleftharpoons Zn^{2+} + H_2O$	11.16
Hopeite	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O \rightleftharpoons 3Zn^{2+} + 2PO_4^{3-} + 4H_2O$	-35.4
Zinc pyromorphite	$Zn_5(PO_4)_3OH \rightleftharpoons 5Zn^{2+} + 3PO_4^{3-} + OH^-$	-63.1