

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การล้างดินและกากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะแคดเมียมโดยใช้สารละลายผสมของ
โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์กับโซเดียมอีดีทีเอ

WASHING OF SOIL AND SLUDGE CONTAMINATED WITH CADMIUM BY
MIXED SOLUTIONS OF SODIUM METABISULFITE AND SODIUM EDTA



นัทธีรญา ศรีวิริยานุภาพ
NATCHATHEEYA SRIWIRIYANUPHAP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-101-9

เลขหม.....
เลขทะเบียน 44961
วัน เดือน ปี 16 ส.ค. 2546

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

**WASHING OF SOIL AND SLUDGE CONTAMINATED WITH CADMIUM BY
MIXED SOLUTIONS OF SODIUM METABISULFITE AND SODIUM EDTA**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED CHEMISTRY (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKOT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2002
ISBN 974-324-101-9**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานวิจัย	การล้างดินและกากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะแคดเมียมโดยใช้สารละลายผสมของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์กับโซเดียมอิตีทีเอ
นักศึกษา	นางสาวนันทธีรญา ศรีวิริยานุภาพ
รหัสประจำตัว	43065103
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์ (เคมีสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการล้างดินและกากตะกอนที่ปนเปื้อนแคดเมียม สารละลายที่ใช้ในการล้างเป็นสารผสมระหว่าง โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 0.1 โมลาร์และโซเดียมอิตีทีเอ 0.01 โมลาร์ ดินที่ใช้ในการวิจัยนำมาจาก 4 แห่ง คือ จังหวัดชลบุรี สระบุรี ปทุมธานีและลพบุรี ซึ่งแต่ละแห่งจะมีองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกัน ก่อนทำการทดลองจึงต้องทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินและกากตะกอน จากนั้นจึงทำการล้างดินและกากตะกอนแบบคอลัมน์และแบบครึ่ง โดยแบบคอลัมน์ทำการทดลองโดยบรรจุดิน (หรือกากตะกอน) 9.25 กรัม ลงในคอลัมน์พลาสติกแล้วผ่านสารละลายผสมปริมาตร 300 มิลลิลิตร เข้าไปทางด้านล่างของคอลัมน์ด้วยปั๊มโดยมีอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนแบบครึ่งทำการทดลองโดยแปรค่าอัตราส่วนดิน (หรือกากตะกอน) ต่อสารละลายเป็น 1 กรัมต่อ 2.5 มิลลิลิตร 1 กรัมต่อ 5 มิลลิลิตรและ 1 กรัมต่อ 7.5 มิลลิลิตร แล้วควบคุมอัตราเร็วในการเขย่า 175 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องและนำไปปั่นเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 4,000 รอบต่อนาที แล้วนำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรสโคปีแล้วหาเปอร์เซ็นต์ที่กำจัดได้ หลังจากนั้นทำการสกัดดินและกากตะกอนแบบเป็นลำดับขั้น เพื่อศึกษาสัดส่วนของโลหะแคดเมียมที่อยู่ในรูปต่างๆในดินและกากตะกอน ดังนี้ คือ รูปที่ละลายน้ำได้ รูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออน รูปที่ละลายได้ดีในกรด รูปออกซิไดซ์ รูปรีดิวซ์และรูปที่เหลือ แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล้างแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 แบบโดยใช้เปอร์เซ็นต์การกำจัดเป็นตัวบ่งชี้

The results showed that soils washing capability in column test was based on percentage of silt. The less percentage of silt, the higher removal of cadmium. Cadmium removal was 22.52-35.49 % in soils while it was only 7.12 % in sludge. For batch test of soils, percentage of organic matter was a crucial factor on washing. The less percentage of organic matter as well as, the less soil to solution ratio, the higher removal of cadmium. The ratio of 1 g : 2.5 mL got highest percent removal (around 67.83-97.3%). In sludge, percent removal was increased when these ratio had increased but the percent removal was lower than soils, at which the ratio of 1 g : 7.5 mL got highest percent removal of 17.13 %

Proportional of different cadmium forms in soils and sludge was investigated by sequential extraction. It was that most of cadmium was in exchangeable form before washing. After washing by column test, cadmium in exchangeable form in soils was removed as much as other forms (59-77.73%). For sludge, cadmium in exchangeable and reducible forms were about 43.64 and 39.56%, respectively. In batch test, it was that the percent removal of cadmium forms in 4 different types of soils (from different locations) was the same direction in comparison to one another. The ratio of 1 g : 2.5 mL was an optimal point that more than 91% of cadmium in exchangeable form were removed. Percent removal of another forms tended to be decreased whilst the ratio increased. For sludge, the best removing point represented at the ratio of 1 g : 7.5 mL, at which was able to remove more reducible form of cadmium up to 42.01%.

From the results, the comparison of the effectiveness of column and batch test was found that batch test was more effective than column test.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XIV
คำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2	
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ภาวะมลพิษของดิน.....	4
2.2 ธาตุพิษในดิน.....	5
2.3 สมบัติของดิน.....	6
2.4 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	14
2.5 แหล่งกำเนิดของกากตะกอน.....	19
2.6 วิธีการจัดการกับกากตะกอน.....	20
2.7 รูปแบบของดินและกากตะกอนที่ถูกบำบัด.....	21
2.8 การป้องกันและกำจัดสารอินทรีย์เคมีที่ปนเปื้อน.....	22
2.9 โลหะหนักที่ทำการศึกษา.....	24
2.10 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential Extraction).....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.11 การล้างดิน (Soil Washing).....	33
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย..... 44

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	44
3.2 แหล่งที่มาของดิน.....	45
3.3 แหล่งที่มาของกากตะกอน.....	45
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินและ กากตะกอน.....	46
3.6 การสังเคราะห์ดินและกากตะกอน.....	47
3.7 การทดสอบการชะล้างโลหะหนักในดินและกากตะกอนสังเคราะห์ แบบคอลัมน์.....	47
3.8 การทดสอบการชะล้างโลหะหนักในดินและกากตะกอนสังเคราะห์ แบบครึ่ง.....	50
3.9 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น.....	52

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์..... 54

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินและกากตะกอน.....	54
4.2 การสังเคราะห์ดินและกากตะกอน.....	61
4.3 การทดสอบการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอน สังเคราะห์.....	62
4.4 การศึกษาสัดส่วนของโลหะแคดเมียมรูปแบบต่างๆ ในดินและกากตะกอน โดยการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น.....	71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดิน และกากตะกอนสังเคราะห์ระหว่างแบบคอลัมน์และแบบครึ่ง.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	82
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
บรรณานุกรม.....	87
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ดินและกากตะกอน.....	91
ภาคผนวก ข วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น.....	97
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง.....	99
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	155
ประวัติผู้เขียน.....	168

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อดินกับพื้นที่ผิวจำเพาะ.....	7
2.2 แสดงเนื้อดินกับอัตราการแทรกซึมลงและความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน ที่ระดับความจุความชื้นสนาม.....	9
2.3 แสดงค่า CEC ของอนุภาคดินในกลุ่มขนาดต่างๆ และในอินทรีย์วัตถุ.....	13
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อดินและอินทรีย์วัตถุกับค่า CEC.....	14
2.5 แสดงระดับ CEC ของดิน.....	14
2.6 ค่า K_{sp} และ pK_{sp} ของโลหะไฮดรอกไซด์, โลหะคาร์บอเนตและโลหะซัลไฟด์.....	16
2.7 รูปแบบโลหะหนัก 6 ชนิดที่พบใน Greenfield Sandy Loam มีปริมาณ ตะกอนโลหะ 45 mg/ha ในระยะเวลา 5 ปี.....	22
2.8 แสดงแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ที่เป็นปัญหามลพิษต่อดิน.....	27
2.9 ข้อแนะนำการใส่กากตะกอนน้ำโลหะลงไปในดิน.....	28
2.10 สารเคมีที่ใช้ในการสกัดแบบลำดับสำหรับดินและตะกอน.....	32
2.11 แสดงคุณสมบัติของสารคีเลตดึงที่สำคัญ.....	34
2.12 สารเคมีที่ได้มีการนำมาใช้ในการชะล้างโลหะหนักในดิน.....	39
3.1 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินและกากตะกอน.....	47
3.2 แสดงการทดสอบการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอน สังเคราะห์แบบครึ่ง.....	51
4.1 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินและ กากตะกอน.....	60
4.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอน.....	67
4.3 แสดงประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมแบบครึ่ง.....	71
4.4 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของโลหะแคดเมียมที่ยึดติดอยู่กับดิน และกากตะกอนก่อนและหลังการชะล้างแบบคอลัมน์.....	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.1 ผลการทดลองหาค่าพีเอช	99
ค.2 ผลการทดลองหาความหนาแน่นรวม.....	100
ค.3 ผลการทดลองหาพื้นที่ผิว.....	101
ค.4 ผลการทดลองหาค่า CEC	101
ค.5 ผลการทดลองหาปริมาณสารอินทรีย์.....	102
ค.6 ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น.....	102
ค.7 ผลการทดลองหาปริมาณแคลเซียมในตัวอย่าง.....	103
ค.8 ผลการทดลองการกระจายตัวของอนุภาค.....	104
ค.9 ผลของโลหะออกไซด์.....	105
ค.10 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินชลบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm.....	106
ค.11 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินชลบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm.....	108
ค.12 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินสระบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm.....	111
ค.13 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินสระบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm.....	113
ค.14 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินปทุมธานีที่ระดับความลึก 0-15 cm.....	116
ค.15 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินปทุมธานีที่ระดับความลึก 15-32 cm.....	118
ค.16 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินลพบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm.....	121
ค.17 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินลพบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm.....	123
ค.18 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของกากตะกอน.....	126
ค.19 ผลการทดลองแบบครึ่งที่สกัดส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL.....	129
ค.20 ผลการทดลองแบบครึ่งที่สกัดส่วน 1 g ต่อ 5 mL.....	130
ค.21 ผลการทดลองแบบครึ่งที่สกัดส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL.....	131
ค.22 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 1, spike.....	132
ค.23 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 1, column test.....	133
ค.24 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 1, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL.....	133

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.25 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 1, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL.....	134
ค.26 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 1, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL.....	134
ค.27 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 2, spike.....	135
ค.28 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 2, column test.....	136
ค.29 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 2, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL.....	136
ค.30 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 2, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL.....	137
ค.31 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 2, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL.....	138
ค.32 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 3, spike.....	138
ค.33 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 3, column test.....	139
ค.34 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 3, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL.....	140
ค.35 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 3, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL.....	140
ค.36 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 3, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL.....	141
ค.37 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 4, spike.....	142
ค.38 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 4, column test.....	142
ค.39 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 4, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL.....	143
ค.40 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 4, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL.....	144

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.41 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 4, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL.....	144
ค.42 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 5, spike.....	145
ค.43 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 5, column test.....	146
ค.44 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 5, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL.....	146
ค.45 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 5, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL.....	147
ค.46 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 5, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL.....	148
ค.47 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 6, spike.....	148
ค.48 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 6, column test.....	149
ค.49 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 6, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL.....	150
ค.50 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 6, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL.....	150
ค.51 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 6, batch test ที่ อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL.....	151
ค.52 แสดงผลการทดลองหาปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอน.....	152
ค.53 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของโลหะแคดเมียมที่ยึดติดอยู่กับดินและ กากตะกอนก่อนและหลังการชะล้างแบบคอลัมน์.....	153
ค.54 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของโลหะแคดเมียมที่ยึดติดอยู่กับดินและ กากตะกอนก่อนและหลังการชะล้างแบบครึ่ง.....	154
ง.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบคอลัมน์.....	158
ง.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบครึ่งที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL.....	159

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบครึ่งที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL.....	160
ง.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบครึ่งที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL.....	161
ง.5 การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองแบบคอลัมน์.....	162
ง.6 การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองแบบครึ่งที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL.....	163
ง.7 การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองแบบครึ่งที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL.....	165
ง.8 การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองแบบครึ่งที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL.....	166

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สภาพการดูดซับและดูดซึม.....	8
2.2 สภาพละลายได้ของธาตุอาหารพืชในช่วง pH ต่างๆ ของดิน.....	12
2.3 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะซัลไฟด์เปรียบเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์.....	17
2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียที่สมบูรณ์.....	20
2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียและระบบบำบัดกากตะกอน.....	21
2.6 ผลกระทบต่อดินที่ดูดซับโลหะ Pb, Cu, Zn และ Cd.....	23
2.7 สูตรโครงสร้างของสารเชิงซ้อนแบบคีเลตของโลหะไดวาเลนต์กับอีดีทีเอ.....	36
3.1 ขั้นตอนการทำงานวิจัย.....	46
3.2 ขั้นตอนในการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอน สังเคราะห์แบบคอลัมน์.....	48
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอน สังเคราะห์แบบคอลัมน์.....	48
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอน สังเคราะห์แบบครึ่ง.....	51
3.5 การสกัดแคดเมียมรูปแบบต่างๆ ออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์ แบบเป็นลำดับขั้น.....	53
4.1 ตัวอย่างดินชลบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm.....	55
4.2 ตัวอย่างดินชลบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm.....	55
4.3 ตัวอย่างดินสระบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm.....	56
4.4 ตัวอย่างดินสระบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm.....	56
4.5 ตัวอย่างดินปทุมธานีที่ระดับความลึก 0-15 cm (ก) และ ตัวอย่างดิน ปทุมธานีที่ระดับความลึก 15-32 cm (ข).....	57
4.6 บริเวณที่เก็บตัวอย่างดินลพบุรี.....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ตัวอย่างดินลพบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm และ 15-32 cm.....	58
4.8 ตัวอย่างกากตะกอน.....	59
4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะแคดเมียมของตัวอย่างดินลพบุรีที่ระดับความลึก 0-15 และ 15-32 cm.....	62
4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะแคดเมียมของตัวอย่างดินสระบุรีที่ระดับความลึก 0-15 และ 15-32 cm.....	63
4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะแคดเมียมของตัวอย่างดินปทุมธานีที่ระดับความลึก 0-15 และ 15-32 cm.....	64
4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะแคดเมียมของตัวอย่างดินลพบุรีที่ระดับความลึก 0-15 และ 15-32 cm.....	65
4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะแคดเมียมของกากตะกอน.....	66
4.14 ประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมแบบคอลัมน์เปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ซิลท์.....	68
4.15 สัดส่วนของโลหะแคดเมียมในดินและกากตะกอนก่อนการชะล้าง.....	72
4.16 สัดส่วนของโลหะแคดเมียมในดินและกากตะกอนหลังการล้างแบบคอลัมน์.....	73
4.17 สัดส่วนของโลหะแคดเมียมในดินและกากตะกอนหลังการล้างแบบครั้งที่อัตราส่วน 1g ต่อ 2.5 mL.....	75
4.18 สัดส่วนของโลหะแคดเมียมในดินและกากตะกอนหลังการล้างแบบครั้งที่อัตราส่วน 1g ต่อ 5 mL.....	76
4.19 สัดส่วนของโลหะแคดเมียมในดินและกากตะกอนหลังการล้างแบบครั้งที่อัตราส่วน 1g ต่อ 7.5 mL.....	78

คำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้

AAS	Atomic absorption spectroscopy
CEC	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก
cm	cm
DI	Deionized water
D _b	ความหนาแน่นรวม
EPA	Environmental Protection Agency
g	กรัม
h	ชั่วโมง
kg	กิโลกรัม
meq	มิลลิคควาเลนซ์
M	โมลาร์
mL	มิลลิลิตร
mg	มิลลิกรัม
Na ₂ EDTA	Disodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid
Na ₂ S ₂ O ₅	Sodium metabisulfite
OM	Organic matter
pH	พีเอช หรือระดับความเป็นกรดต่าง
ppm	ส่วนในล้านส่วน
rpm	รอบต่อนาที
sig.	Significant
μ	ไมครอน
VOCs	สารอินทรีย์ที่ระเหยได้
XRF	X-Ray Fluorescence Spectroscopy

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

จากรายงานของ National priority list (NPL) พบว่ามีสารที่ปนเปื้อนในดินหลายชนิด ได้แก่ สารอินทรีย์ที่ระเหยได้ สารอินทรีย์ที่ชอบและไม่ชอบน้ำ โลหะหนักและสารกัมมันตภาพรังสี โดยสารปนเปื้อนที่พบมากที่สุด คือ โลหะหนักซึ่งมีมากกว่า 36 ล้านลูกบาศก์เมตร (Abumizar และ Smith, 1999) ในปัจจุบันได้มีการนำโลหะแคดเมียมซึ่งเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งมาใช้ในการอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังได้มีการนำมาใช้เพื่อทำให้พลาสติกมีความเสถียรในอุตสาหกรรมพลาสติก หรือใช้ในการชุบโลหะเพื่อป้องกันสนิมและใช้ทำโลหะผสมเป็นต้น (Boreiko และ Van Assche, 2002) หากไม่มีวิธีการจัดการกับของเสียและกากตะกอนจากอุตสาหกรรมดังกล่าวข้างต้นอย่างถูกต้องก่อนนำไปฝังไว้ใต้ดิน อาจก่อให้เกิดภาวะมลพิษต่อดินและสิ่งมีชีวิตในบริเวณนั้น และทำให้โลหะแคดเมียมมีโอกาสซึมลงสู่น้ำใต้ดินได้อีกด้วย ซึ่งเป็นเหตุให้การใช้ประโยชน์จากที่ดินบริเวณนั้นถูกจำกัดลง ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาหาวิธีที่เหมาะสมมาใช้ในการบำบัดของเสีย ซึ่งมีหลายวิธี เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) การเผาไหม้ (incineration) การระเหย (volatilization) การใช้วิธีทางความร้อนเอาสิ่งปนเปื้อนออกไป (thermal desorption) และการใช้วิธีทางชีวภาพ (biological techniques) (Noyes, 1991) แต่วิธีดังกล่าวค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายที่สูง จึงได้มีการศึกษาวิธีที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายไม่มาก ซึ่งการชะล้างด้วยสารละลายเป็นวิธีหนึ่งที่ถูกเลือกมาใช้ในการบำบัด โดยสารละลายที่นิยมใช้ ได้แก่ สารลดแรงตึงผิว (surfactant) สารคีเลตติ้ง (chelating agent) รวมทั้งสารละลายกรดหรือด่าง (acid and/or alkaline solutions) ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้สารลดแรงตึงผิวไม่ดีนัก ส่วนสารคีเลตติ้งมีประสิทธิภาพดีแต่ราคาแพงทำให้ยากต่อการนำไปประยุกต์ใช้ ส่วนสารละลายกรดหรือด่างเมื่อผ่านการชะล้างแล้วจะทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงไป และทำให้เพิ่มการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินอีกด้วย ซึ่งก็ต้องเพิ่มการบำบัดขึ้นอีกทำให้ต้นทุนสูงมากขึ้น ในปัจจุบันจึงได้มีการนำเอาสารรีดิวซิง (reducing agent) มาใช้ เนื่องจากเป็นสารที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับสารคีเลตติ้ง

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อนำโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) ซึ่งเป็นสารรีดิวซิงชนิดหนึ่งมาใช้ในการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์ร่วมกับการใช้สารคีเลตติ้ง และศึกษาถึงสัดส่วนของโลหะแคดเมียมรูปต่างๆที่มีอยู่ในดิน โดยใช้เทคนิคการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น

(sequential extraction) อีกทั้งเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดิน และกากตะกอนแบบครั้ง (batch washing) และแบบคอลัมน์ (column washing)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินและกากตะกอน
- 1.2.2 เพื่อทดสอบการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์แบบคอลัมน์และแบบครั้ง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสัดส่วนของโลหะแคดเมียมรูปต่างๆในดินและกากตะกอนสังเคราะห์ โดยการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (sequential extraction)
- 1.2.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์ระหว่างแบบคอลัมน์และแบบครั้ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอนที่นำมาจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมเสมาดำ บางขุนเทียน และดินทั้ง 4 แหล่ง ได้แก่ ดินชลบุรี ดินสระบุรี ดินปทุมธานี และดินลพบุรี โดยกากตะกอนจะวิเคราะห์ค่าพีเอช ความหนาแน่นรวม พื้นที่ผิว ความชื้น ปริมาณอะลูมิเนียม เหล็ก และแมงกานีส เปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC) และความเข้มข้นของโลหะแคดเมียม ส่วนดินจะทำการวิเคราะห์เหมือนกากตะกอนทุกประการแต่เพิ่มการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของอนุภาค
- 1.3.2 ทำการสังเคราะห์ดินและกากตะกอน โดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานโลหะแคดเมียมแล้วใส่ลงในดินและกากตะกอนที่อยู่ในภาชนะพลาสติกให้มีความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 3 เดือน หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ $103-105^{\circ}\text{C}$ แล้วจึงนำไปหาความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมที่มีอยู่ในดินและกากตะกอนสังเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS
- 1.3.3 ทดสอบการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์แบบคอลัมน์ โดยใช้สารละลายผสม $0.1\text{ M Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 + 0.01\text{ M Na}_2\text{EDTA}$ ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุดิน (หรือกากตะกอน) 9.25 กรัมทางด้านล่าง ด้วยปั๊มที่มีอัตราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที แล้วเก็บตัวอย่างครั้งละ 2.5 มิลลิลิตรในช่วง 50 มิลลิลิตรแรก ส่วนตัวอย่างที่เหลือจะเก็บครั้งละ 5 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS พร้อมทั้งหาเปอร์เซ็นต์การกำจัด (% removal)

- 1.3.4 ทดสอบการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม แบบครั้ง โดยใช้สารละลายผสม 0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 0.01 M Na_2EDTA ซึ่งแปรค่าอัตราส่วนดิน (หรือกากตะกอน) ต่อสารละลาย เป็น 1 กรัมต่อ 2.5 มิลลิลิตร 1 กรัมต่อ 5 มิลลิลิตร และ 1 กรัมต่อ 7.5 มิลลิลิตรตามลำดับ โดยควบคุมอัตราเร็วในการเขย่าเป็น 175 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง และนำไปปั่นเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 4,000 รอบต่อนาที แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS พร้อมทั้งหาเปอร์เซ็นต์การกำจัด (% removal)
- 1.3.5 ทำการสกัดโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์แบบเป็นลำดับขั้น (sequential extraction) โดยทำการทดลองทั้งก่อนและหลังการทดสอบแบบคอลัมน์และแบบครั้ง เพื่อศึกษาสัดส่วนของโลหะแคดเมียมรูปแบบต่างๆ ในดินและกากตะกอน
- 1.3.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์ระหว่างแบบคอลัมน์และแบบครั้ง โดยอาศัยเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่ได้จากขอบเขตการทดลองที่ 1.3.3 และ 1.3.4 เป็นตัวบ่งชี้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เป็นแนวทางในการจัดการโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม
- 1.4.2 เป็นแนวทางในการนำโลหะหนักชนิดอื่นๆ ออกจากดินหรือกากตะกอนที่ปนเปื้อนได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ภาวะมลพิษของดิน

ภาวะมลพิษของดิน (soil pollution) หมายถึง ภาวะการปนเปื้อนของดินด้วยสารมลพิษ (soil pollutants) มากเกินขีดจำกัด จนมีอันตรายต่อสุขภาพอนามัย ตลอดจนการเจริญเติบโตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ ดังนั้นภาวะมลพิษของดินจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีสารมลพิษในดิน และดินจะเสียได้ก็ต่อเมื่ออัตราการเพิ่มสารมลพิษลงไปในดินมีมากกว่าการสลายตัวของสารมลพิษนั้น จนเกิดการสะสมมลพิษมากถึงขั้นเป็นอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่งขึ้นกับ

1. ความเข้มข้นของสารมลพิษในสารละลายดินมากกว่าปริมาณของสารมลพิษทั้งหมดในดิน เช่น สารมลพิษชนิดหนึ่งอาจมีมากในดินจนยากแก่การกำจัด แต่หากสามารถบังคับให้สารมลพิษชนิดนั้นมีความเข้มข้นน้อยในสารละลายดิน เช่น โดยการปรับสภาพกรด-ด่างของดิน หรือบังคับให้ตกตะกอนกับสารอื่น หรือโดยการเปลี่ยนแปลงสภาวะออกซิเดชัน-รีดักชันของดินจึงควบคุมหรือลดระดับภาวะมลพิษของสารนั้นลงในระดับหนึ่งได้
2. ภาวะมลพิษนั้นได้ทำให้ดินสูญเสียหน้าที่ของดินไป ซึ่งดินจะทำหน้าที่เป็นเครื่องกรองสารมลพิษมิ ให้ปนเปื้อนแหล่งน้ำและน้ำใต้ดิน และน้ำก็เป็นตัวการสำคัญที่สุดในการนำสารมลพิษลงไปในดิน โดยอาศัยสมบัติความมีประจุดูดซับสารที่มีประจุ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารเคมีต่าง ๆ ในดิน ซึ่งดินที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะกีดกันสารมลพิษไม่ให้ปนเปื้อนในแหล่งน้ำและน้ำใต้ดินได้ (ศุภมาศ, 2539)

ปัญหาดินเป็นพิษ สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มตามกิจกรรมของมนุษย์ที่เข้าไปเกี่ยวข้อง (สุริลา และ คณะ, 2544) คือ

1) ดินเป็นพิษในภาคเกษตรกรรม

การใช้ปุ๋ยเคมีในการเพิ่มผลผลิต ถ้าใช้ไม่ถูกต้องแล้วก็มีโทษตามมา เพราะปุ๋ยเคมีจะมีผลให้เกิดขบวนการมากมาย เช่น การแปรรูปของธาตุ (transformation) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การดูดซึม (absorption) การตกตะกอน (precipitation) การตรึงธาตุต่างๆ (fixation) การดูดอาหารโดยรากพืช (absorption by plant root) การสูญเสียธาตุอาหารในสภาพก๊าซ (gaseous losses) และขบวนการอื่นๆ

นอกจากนี้แล้วยังมีการใช้สารกำจัดศัตรูพืช ซึ่งสารกำจัดศัตรูพืชนี้เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาโดยกระบวนการทางเคมีและ/หรือสกัดจากธรรมชาติ ปัญหาดินเป็นพิษเนื่องจากสารกำจัดศัตรูพืชนี้ขึ้นอยู่กับความคงทนในดิน และเป็นพิษที่ทำลายสิ่งมีชีวิตในดิน/จุลินทรีย์ดินรวมทั้งส่งผลทางลบแก่พืชที่จะเจริญเติบโตในบริเวณนั้น

2) ดินเป็นพิษในอุตสาหกรรม

โรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีตั้งแต่เล็กถึงขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงมีหลายประเภท พิษภัยของของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนในดินจึงแตกต่างกันออกไป เช่น การปนเปื้อนของเกลืออนินทรีย์ปริมาณมาก ก็อาจทำให้ดินมีสภาพเป็นดินเค็มได้ กรดหรือด่างก็อาจทำให้ดินมีสภาพเป็นกรดจัดหรือด่างจัด สารพิษต่างๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมที่เป็นอันตราย เช่น โลหะหนัก โลหะหนักปนเปื้อนในดินโดยทั่วไป ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียมปรอทและโลหะอื่นๆ

จะเห็นได้ว่าจากแหล่งกำเนิดสารมลพิษ เช่น สารเคมีปราบศัตรูพืช ปุ๋ย จากภาคเกษตรกรรม วัตถุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรม หากเกินความสามารถที่ดินจะรับไว้ได้ ดินก็จะปลดปล่อยสารมลพิษเหล่านั้น ไม่ว่าจะอยู่ในรูปสารอินทรีย์ ไนโตรเจน หรือฟอสฟอรัส หรือธาตุพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม และจะแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ในรูปสารละลายหรือสารแขวนลอยในน้ำในดิน ซึ่งน้ำในดินจะเป็นตัวกลางการแพร่กระจายสารมลพิษดังกล่าว

2.2 ธาตุพิษในดิน

ธาตุพิษ (toxic elements) โดยทั่วไปหมายถึง โลหะหนักและธาตุอื่นซึ่งเป็นสารมลพิษในดิน ธาตุพิษเหล่านี้ปนเปื้อนในดินเนื่องจากการนำไปใช้ประโยชน์ในรูปสารประกอบและเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ แล้วมีการปนเปื้อนสู่สภาพแวดล้อม

ธาตุโลหะที่ปนเปื้อนในดินอาจอยู่ในรูปต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ละลายในสารละลายดิน (soluble form)
2. ถูกดูดซับในตำแหน่งผิวของอนุภาคคอลลอยด์ดิน (adsorbed form)
3. ตกตะกอนหรือตกตะกอนร่วมกับสารอื่น (precipitated form)
4. ถูกตรึงและจับกับสารแขวนลอยอื่นหรือแร่ในดิน (fixed, occluded form)
5. เปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์โดยกระบวนการทางชีวภาพ (organic form)

ธาตุโลหะในรูปที่หนึ่งและสอง จัดเป็นรูปที่เคลื่อนที่ได้ (mobile) ในดิน สามารถถูกพืชนำไปใช้ได้ ส่วนสามรูปหลังเป็นรูปที่ไม่เคลื่อนที่ (immobile) แต่เนื่องจากกระบวนการในดินมีลักษณะเป็น

พลวัต (dynamic) จึงอาจมีการเปลี่ยนแปลงธาตุที่ปนเปื้อนในดินให้อยู่ในรูปต่างๆ ที่กล่าวได้ตลอดเวลา

เราสามารถแบ่งธาตุออกได้ตามลักษณะสภาวะมลพิษเป็น 2 พวก คือ

1. มลสารที่ก่อให้เกิดปัญหาในระยะยาว ได้แก่ สารมลพิษซึ่งตกค้างอยู่ในดินเป็นระยะเวลานาน และมีพืชที่สามารถทนต่อมลพิษนี้ได้ ในปริมาณที่จำกัด ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว และปรอท ซึ่งธาตุเหล่านี้ถ้ามีอยู่ในดินในปริมาณมากพืชจะไม่สามารถใช้และเก็บสะสมได้มาก ดังนั้นในปีแรก ๆ ที่ดินได้รับมลพิษเหล่านี้จึงอาจมองเห็นปัญหาได้ไม่ชัดเจน เพราะธาตุเหล่านี้แพร่กระจายสู่ห่วงโซ่อาหารได้ในปริมาณที่น้อย
2. มลสารที่ก่อให้เกิดปัญหาในระยะสั้น ได้แก่ สารมลพิษที่ละลายน้ำได้ง่าย พืชสามารถดูดซึมได้ทันทีและดูดซึมได้ในปริมาณมาก ทำให้เกิดปัญหาต่อสภาวะแวดล้อมได้อย่างรวดเร็ว ได้แก่ โบรอน แคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี

ซึ่งการถูกดูดซับของธาตุโลหะหนักในดินเกิดขึ้นโดยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าต่างๆ ตัวอย่างเช่น พันธะไอออนิก แรงดึงดูดแวนเดอร์วาล (van der waals attration) พันธะไฮโดรเจน (H-bonding) พันธะโคออร์ดิเนต (coordinate bonding) การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) หรือพันธะทางเคมีอื่นๆ และธาตุแต่ละชนิดอาจถูกดูดซับได้ด้วยกระบวนการที่แตกต่างกัน

2.3 สมบัติของดิน

2.3.1 สมบัติทางกายภาพ

2.3.1.1 เนื้อดินกับพื้นที่ผิวจำเพาะ

เนื้อดินสามารถบอกถึงปริมาณคอลลอยด์อินทรีย์ได้อย่างคร่าวๆ ทั้งนี้เพราะอนุภาคดินเหนียวมีขนาดเล็กมากเมื่ออยู่ในสภาพคอลลอยด์จึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักสูง ดินที่มีเนื้อละเอียดขึ้นจะมีพื้นที่ผิวสูงขึ้น ดังตารางที่ 2.1 การเพิ่มพื้นที่ผิวให้สูงขึ้นในดินเหนียวก็สามารถทำได้เช่นกัน โดยการเติมคอลลอยด์อินทรีย์ลงไป ซึ่งได้แก่ฮิวมัส การเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้แก่ดินเมื่อสารอินทรีย์สลายตัวก็จะให้ฮิวมัสแก่ดินได้

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อดินกับพื้นที่ผิวจำเพาะ

เนื้อดิน (m ² /g)	พื้นที่ผิวจำเพาะ
เหนียว	120-200
ร่วนเหนียวปนซิลท์	50-150
ร่วนปนซิลท์	50-100
ร่วน	10-40
ร่วนปนทราย	150-250

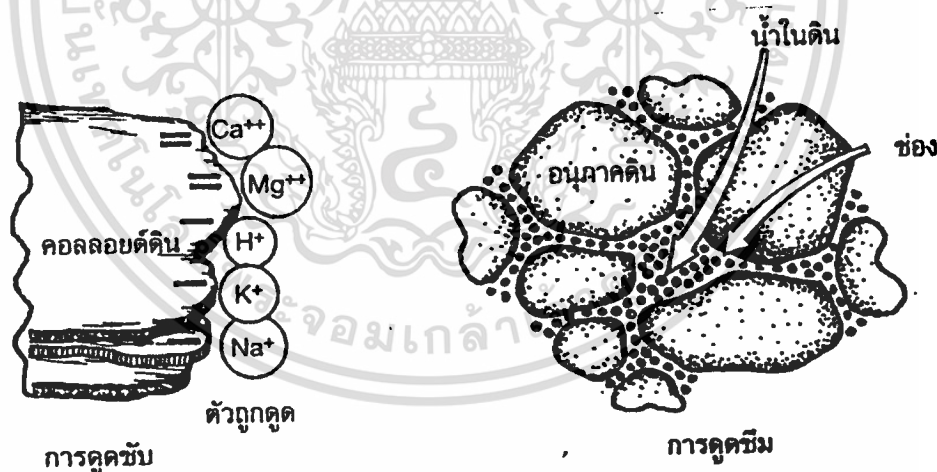
ที่มา : ศุภมาศ ; 2539

2.3.1.2 เนื้อดินกับความพรุนของดิน (soil porosity) เนื้อดินยังเกี่ยวข้องกับความพรุนของดิน ดินเนื้อหยาบบนจะมีช่อง (pore) ขนาดใหญ่อยู่มากแต่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย เมื่อดินแห้งลงจะอุ้มน้ำได้น้อยทำให้เกิดสลายเทได้ดี ส่วนในดินที่มีปริมาณซิลท์สูง เมื่อฝนตกหรือระหว่างให้น้ำจะสูญเสียโครงสร้างดินได้ง่าย ซิลท์จะไหลลงอุดตันช่องทำให้ช่องมีพุน้ำดินปิด ดังนั้นแม้การให้น้ำเพียงเล็กน้อยอาจทำให้ช่องบนมีพุน้ำดินปิดได้ ทำให้น้ำและแก๊สไหลถ่ายเทได้น้อยลง อนุภาคดินเหนียวมีขนาดเล็กมากและส่วนใหญ่อยู่ในสภาพคอลลอยด์ จึงยากที่จะบ่งบอกและปริมาณช่องที่มีอยู่ในดินนี้ เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวอาจเกาะยึดกันเองเป็นเม็ดดินที่เสถียร (stable aggregate) ซึ่งในสภาพเช่นนี้ดินเหนียวจะมีความพรุนสูงมาก ในทางตรงกันข้ามหากอนุภาคไม่เกาะยึดกันอยู่ในสภาพฟุ้งกระจาย ดินเหนียวลักษณะเช่นนี้จะแน่นทึบมาก น้ำและอากาศไหลถ่ายเทได้ยากมาก จะอย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้ว ช่องขนาดเล็ก (micropore) ในดินก็ยังคงมีความสัมพันธ์กับเนื้อดินโดยที่ดินเนื้อละเอียดจะมีช่องขนาดเล็กมากกว่าดินเนื้อหยาบ ซึ่งช่องขนาดเล็กจะสามารถดูดซึมน้ำเอาไว้ได้ ทำให้ดินเนื้อละเอียดมีความสามารถอุ้มน้ำได้ (available water capacity - AWC) มากกว่าดินเนื้อหยาบ ส่วนของน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีความสำคัญต่อพืชและต่อจุลินทรีย์ดินเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ดินเป็นแหล่งทิ้งวัสดุเหลือใช้ และต้องการให้ดินและพืชเป็นตัวการกำจัดสารมลพิษและวัสดุเหลือใช้ดังกล่าว

2.3.1.3 เนื้อดินกับการดูดซับ (adsorption) และการดูดซึม (absorption) กระบวนการดูดซับ (adsorption) หมายถึง กระบวนการที่เกิดขึ้นระดับโมเลกุลระหว่างสารที่เป็นตัวดูดซับ (adsorbant) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ากับสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างมาก ส่วนการดูดซึมเป็นกระบวนการที่มีสารตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปเกี่ยวข้องด้วยเช่นเดียวกันกับการดูดซับ โดยมีสารชนิดหนึ่งเป็นตัวดูดซับ และสารชนิดอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องดังกล่าวเป็นตัวถูกดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับจะดึงดูดตัวถูกดูดซับให้ฝังตัวอยู่ในโครงร่างของตัวดูดซับ และอาจมีกลไกอื่น ๆ นอกเหนือไปจากการดึงดูดในระดับโมเลกุลเกี่ยวข้องด้วย สารชนิดหนึ่งจะดูดซับสารอื่นได้มากน้อยเพียงใด ย่อมขึ้นอยู่กับว่าสารชนิดนั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากน้อยเพียงใด ในดินการดูดซับที่สำคัญได้แก่การดูดซับน้ำและการดูดซับไอออนในสารละลายดิน ซึ่งในดินตัวดูดซับก็คืออนุภาคดินเหนียวและอนุภาคอินทรีย์วัตถุ เพราะมีขนาดเล็กมากจึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง นอกจากนั้นอนุภาคทั้งสองชนิดยังมีประจุไฟฟ้าซึ่งส่วนใหญ่เป็นประจุลบจึงสามารถดูดซับไอออนที่มีประจุบวกได้เป็นอย่างดี ทำให้น้ำซึ่งเป็นสารประกอบมีขั้ว (polar compound) อาจถูกดูดซับได้โดยกระบวนการนี้เช่นกัน การดูดซึมที่สำคัญในดินก็คือการดูดซึมน้ำ น้ำจะถูกดินดูดไว้ในช่องระหว่างอนุภาคดิน ช่องในดินไม่อาจดูดซึมน้ำไว้ได้ทั้งหมดทั้งนี้เพราะแรงดูดซึมจำเป็นต้องเอาชนะอิทธิพลของแรงดึงดูดของโลกให้ได้ แรงดูดซึมนี้มีความสัมพันธ์โดยกลับกับขนาดของช่อง ยิ่งช่องมีขนาดเล็กแรงดูดซึ่มก็ยิ่งมาก ดังนั้นปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมไว้จึงมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคดิน ดินที่มีอนุภาคดินเหนียวในปริมาณมาก (ดินเนื้อละเอียด) จะดูดซึมน้ำได้มากปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่สูงก็จะอุ้มน้ำไว้ได้มากเช่นเดียวกัน (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 สภาพการดูดซับและดูดซึม

2.3.1.4 เนื้อดินกับอินทรีย์วัตถุในดิน โดยทั่วไปปริมาณอินทรีย์วัตถุจะมีความสัมพันธ์กับเนื้อดิน ดินเนื้อละเอียดจะมีอินทรีย์วัตถุสูงกว่าดินเนื้อหยาบ ความสัมพันธ์เช่นนี้อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากดินเนื้อละเอียดอุ้มน้ำและดูดซับไอออนที่เป็นธาตุอาหารพืชได้มาก พืชพรรณที่ขึ้นในดินจึงมีปริมาณมาก

กว่าที่ขึ้นในดินเนื้อหยาบ เมื่อซากพืชเหล่านี้ทับถมในดินจึงทำให้ดินเนื้อละเอียดมีการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในอัตราที่มากกว่า อีกประการหนึ่งดินเนื้อหยาบมีการระบายอากาศที่ดีกว่าดินเนื้อละเอียด อัตราการสลายตัวของอินทรีย์-วัตถุจึงสูงกว่าทำให้เหลือปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าดินเนื้อละเอียด

2.3.1.5 เนื้อดินกับสภาพความชื้นดินและการเคลื่อนย้ายของน้ำ ความแตกต่างในด้านความสามารถกักน้ำ (water holding capacity) ของดินเป็นผลมาจากความแตกต่างของเนื้อดิน ดังนั้นเนื้อดินจึงเป็นปัจจัยควบคุมระดับในการชะละลาย (leaching) ของดินแทรกซึมลงของน้ำจากบนดินเข้าสู่ผิวดิน ดังตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นอัตราการแทรกซึมลงของน้ำ และความสามารถกักน้ำของดินที่สภาพจุดความชื้นสนาม (field capacity) ในประเภทเนื้อดินต่างๆ ซึ่งทั้งอัตราการแทรกซึมลงของน้ำและความสามารถกักน้ำของดินสามารถปรับได้โดยการเพิ่มปริมาณอินทรีย์ในดินและการปรับปรุงโครงสร้างดิน เพราะฉะนั้นการทำลายอินทรีย์วัตถุในดินและการทำลายโครงสร้างดินจึงเป็นการลดอัตราการไหลซึมและลดความจุในการกักน้ำของดิน

ตารางที่ 2.2 เนื้อดินกับอัตราการแทรกซึมลงและความสามารถในการกักน้ำของดินที่ระดับความจุความชื้นสนาม

เนื้อดิน	การไหลซึม (นิ้ว/ชั่วโมง)		ปริมาณน้ำทั้งหมด ลูกบาศก์นิ้ว
	ดินมีพืชปกคลุม	ดินว่าง	
ร่วนเหนียว	0.2	0.1	4.8
ร่วนปนริลท์	0.6	0.3	4.2
ร่วน	1	0.5	3.8
ร่วนปนทราย	2	1	1.2

ที่มา : ศุภมาศ; 2539

2.3.1.6 ความหนาแน่นและความพรุนของดิน ความหนาแน่นของดินแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ความหนาแน่นรวม (bulk density, Db) และความหนาแน่นอนุภาค (particle density, Dp) ซึ่งความหนาแน่นรวม หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของดินขณะที่แห้งสนิทกับปริมาตรทั้งหมดของดิน (ปริมาตรของส่วนประกอบทุก ๆ ส่วนรวมกัน) ส่วนความหนาแน่นอนุภาค หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของดินขณะที่ดินแห้งสนิทกับปริมาตรของส่วนที่เป็นอนุภาคดิน (soil particle) เท่านั้น

สำหรับความพรุนของดินนิยมบอกเป็นค่าความพรุนทั้งหมด (total porosity, E) ซึ่งหมายถึงปริมาตรของส่วนที่ไม่ใช่ของแข็งในดิน เมื่อคิดเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมดของดิน ความสัมพันธ์ของค่าทั้งสามดังกล่าวอาจแสดงโดยสมการที่ 2.1

$$E = (1 - D_b/D_p) \times 100 \dots \dots \dots (2.1)$$

เนื่องจากค่าความหนาแน่นรวมคำนวณโดยเทียบน้ำหนักแห้งของดินกับปริมาตรตามทั้งส่วนที่เป็นของแข็งและส่วนที่เป็นช่องในดิน ดังนั้นดินที่มีค่าความหนาแน่นรวมต่ำจึงหมายความว่าดินนั้นมีส่วนที่เป็นช่องมาก เมื่อดินเนื้อละเอียดยิ่งขึ้นความพรุนของดินโดยปกติจะมากขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นรวมของดินเนื้อละเอียดจึงมักต่ำกว่าของดินเนื้อหยาบ ดินเหนียวมีความหนาแน่นรวมประมาณ 1.0-1.3 g/mL ดินร่วนเหนียวและร่วนปนสีลที่มีความหนาแน่นรวมประมาณ 1.1-1.4 g/mL และดินร่วน ร่วนปนทรายและทรายมีความหนาแน่นรวมโดยเฉลี่ยประมาณ 1.32 g/mL ดินในระดับที่ลึกลงไป ความพรุนของดินจะน้อยลง ทำให้มีความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้น

2.3.2 สมบัติทางเคมี

2.3.2.1. ความเป็นกรด-ด่างของดิน (soil pH) การวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน คล้ายคลึงกับการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ สิ่งที่แตกต่างกันและควรคำนึงถึงเป็นอย่างมากก็คือดินมีความเป็นกรดอยู่ 2 ชนิดคือ กรดจริง (active acidity) และกรดแฝง (potential acidity)

ดินมีทั้งประจุบวกและลบแต่มีประจุลบมากกว่า ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์อย่างมากเพราะธาตุต่าง ๆ ในสารละลายดินรวมทั้งธาตุอาหารของพืชในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ก็อยู่ในรูปประจุ ธาตุอาหารพืชโดยส่วนใหญ่มีประจุเป็นบวก ดังนั้นจึงถูกดินจับเอาไว้ ไม่ไหลตามน้ำลงไปจนเลยระดับความลึกของรากพืช ซึ่งทำให้ธาตุอาหารเหล่านี้สูญเสียไป ดังนั้นพืชจึงสามารถดึงดูดธาตุอาหารที่ถูกดินดูดซับเอาไว้ได้

ไฮโดรเจนไอออนมีประจุบวก ดังนั้นส่วนของไฮโดรเจนที่ถูกดินดูดซับจึงเรียกว่า สภาพกรดแฝง ซึ่งจะสมดุลกับส่วนของไฮโดรเจนที่ไม่ถูกดูดซับ ซึ่งเรียกว่า สภาพกรดจริง ค่าพีเอชของดินที่วัดได้คือ การวัดสภาพกรดจริง ดังนั้นดินเหนียวและดินทรายที่มีค่าพีเอชเท่ากัน (ค่าสภาพเป็นกรดจริงเท่ากัน) จะมีความต้องการปูนในการปรับระดับพีเอชไม่เท่ากันได้ ทั้งนี้เพราะดินทั้งสองชนิดมีค่าความเป็นกรดแฝงไม่เท่ากัน เนื่องจากดินเหนียวมีค่าประจุลบมากกว่าจึงมีสภาพกรดแฝงมากกว่า ส่วนของไฮโดรเจนที่ถูกดูดซับจะมีปริมาณมากกว่าส่วนที่ไม่ถูกดูดซับมาก และจะปลดปล่อยจากส่วนที่ถูกดูดซับออกมาเพียงบางส่วน ลักษณะคล้ายกับการแตกตัวของกรดอ่อน นอกจากนี้พีเอชของดินยังเกี่ยว

พันกับสภาพละลายได้ (solubility) ของธาตุด้วย เนื่องจากน้ำในดินเป็นตัวทำละลายธาตุที่เป็นองค์ประกอบของอนุภาคดินและธาตุที่เติมลงไปดิน ดังนั้นสภาพละลายได้ของธาตุจึงขึ้นอยู่กับค่า pH ของดิน ตัวอย่างสภาพละลายได้ของธาตุอาหารพืชในสภาพความเป็นกรด-ต่างของดินได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าธาตุแคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียมจะพบในดินที่เป็นกรดในปริมาณต่ำทำให้พืชอาจจะขาดธาตุเหล่านี้ได้ ธาตุฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดไปใช้ได้น้อยทั้งในสภาพที่ดินเป็นกรดหรือเป็นด่าง จุลธาตุทั้งหลายได้แก่ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง โบรอน พืชสามารถดูดไปใช้ได้ดีในสภาพดินเป็นกรด ในดินที่มีธาตุเหล่านี้มากอยู่แล้ว ก็อาจละลายได้มากเกินไปจนเป็นพิษต่อพืชได้สำหรับโมลิบดีนัมนั้นจะละลายได้ดีเมื่อ pH ของดินสูงขึ้น (ดินเป็นกรดน้อยลง) ธาตุโลหะหนักหลายชนิด เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง จะละลายได้ดีในสภาพดินเป็นกรดเช่นกัน

2.3.2.2 ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity - CEC) การที่ดินมีประจุไฟฟ้าเป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุในดิน อนุภาคดินเหนียวมีขนาดเล็กมาก เป็นอนุภาคอนินทรีย์ที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน โดยส่วนใหญ่อนุภาคดินเหนียวมีรูปร่างแบนบางทำให้โอกาสที่อะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่รอบนอกจะหลุดออกไปไม่ได้มากนัก เมื่อสารประกอบใดมีการสูญเสียอะตอมไปก็จะมีประจุทันที บริเวณขอบของอนุภาคจึงมีประจุนอกจากนี้อะตอมของธาตุอื่นที่มีขนาดเท่ากันกับธาตุที่เป็นองค์ประกอบในอนุภาคดินเหนียวแต่มีจำนวนประจุไม่เท่ากัน อาจหลุดเข้าไปแทนที่ซึ่งจะทำให้อนุภาคมีประจุได้ในอินทรีย์วัตถุนั้น การแตกตัวของกลุ่มอนุมูลบางตัวจากสารประกอบอินทรีย์ก็จะทำให้มีประจุได้เช่นกัน ประจุที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นประจุลบ ดินจึงมีความสามารถในการดึงดูดแคตไอออนได้ และเนื่องจากดินแต่ละชนิดมีปริมาณอนุภาคดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุไม่เท่ากันจึงมีความจุในการดึงดูดแคตไอออนไว้ไม่เท่ากัน แคตไอออนที่ถูกดูดซับ (adsorbed cations) กับคอลลอยด์ดินเหล่านี้จะสามารถแลกเปลี่ยนกันได้กับแคตไอออนในสารละลายดิน จึงเรียกว่าแคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable cations) ดังนั้นความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนจึงมีหมายถึง ปริมาณแคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้ ค่าที่วัดได้มีหน่วยเป็น meq/100g ของดินแห้ง

กระบวนการแทนที่แคตไอออนแลกเปลี่ยนได้โดยแคตไอออนในสารละลายดินเรียกว่าการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange) ซึ่งในดินแคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ส่วนใหญ่จะเป็น Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} และ H^+ แคตไอออน 4 ตัวแรกมีชื่อเรียกรวมกันว่าเบสแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable base) ในดินบางสภาพเช่นดินน้ำขังจะมี Mn^{2+} หรือ Fe^{2+} ละลายได้มาก และถูกดูดซับเป็นส่วนใหญ่ ในสภาพดินเป็นกรดจะประกอบด้วย Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ และ Al (Al^{3+} หรือ Al)

ในดินทั่วไป CEC ของหน้าดินมีค่าระหว่าง 0.5-5 meq/100g ซึ่งการประเมินระดับ CEC ของดินได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 ถ้าระดับ CEC ของดินต่ำหมายความว่า ดินชนิดนั้นมีปริมาณดินเหนียวหรืออินทรีย์วัตถุน้อย (ศุภมาส, 2539)

ตารางที่ 2.3 ค่า CEC ของดินประเภทต่างๆ และในอินทรีย์วัตถุ

ส่วนประกอบของดิน	CEC (meq/100g)
ทราย	0
ซิลท์	3-7
ดินเหนียว	22-63
อินทรีย์วัตถุ	200-400

ที่มา : ศุภมาส ;2539

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อดินและอินทรีย์วัตถุกับค่า CEC

เนื้อดิน	อินทรีย์วัตถุ (%)	ดินเหนียว (%)	CEC(meq/100g)
ทราย	1.7	7	6
ร่วนปนทราย	3.2	13	13
ร่วน	4.2	17	20
ร่วนปนซิลท์	5.4	18	24
ร่วนเหนียว	5.5	31	27

ที่มา : ศุภมาส ;2539

ตารางที่ 2.5 แสดงระดับ CEC ของดิน

ระดับ	ค่า CEC (meq/100g)
ต่ำมาก	<3
ต่ำ	3-5
ต่ำปานกลาง	5-10
ปานกลาง	10-15
สูงปานกลาง	15-20
สูงปานกลาง	20-30
สูงมาก	>30

ที่มา : ศุภมาส ;2539

2.4 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

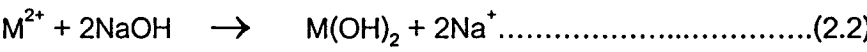
กระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมียหลายวิธี การเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่าง ๆ ได้แก่ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพน้ำที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

2.4.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน กระบวนการนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสภาพของสารต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปสารละลาย (soluble) ให้เป็นสารที่อยู่ในรูปที่ไม่ละลาย (insoluble) โดยวิธีการเติมสารเคมี การตกตะกอนด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธีด้วยกัน คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (hydroxide precipitation) และการตกตะกอนซัลไฟด์ (sulfide precipitation)

2.4.1.1 การตกตะกอนไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ ทำได้โดยการเติมสารเคมี เช่น ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น โดยการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.2



โดยที่ M²⁺ คือโลหะไอออน

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัด คือ จะต้องตกตะกอนที่ค่าพีเอชที่เหมาะสม

2.4.1.2 การตกตะกอนซัลไฟด์

การตกตะกอนซัลไฟด์มักจะใช้สารเคมีในการตกตะกอน คือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.3



โดยที่ M^{2+} คือโลหะไอออน

ข้อดีของการตกตะกอนซัลไฟด์คือ การละลายของโลหะซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนซัลไฟด์ มีข้อจำกัด คือ เรื่องของกลิ่นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไป จึงต้องมีการป้องกันแก๊สที่เกิดขึ้น โดยกำจัดซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง นอกจากการทำให้โลหะหนักตกตะกอนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์หรือโลหะซัลไฟด์ดังกล่าวข้างต้นแล้ว โลหะหนักอาจเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์กับไอออนประจุลบอื่นๆได้ เช่น CO_3^{2-} เป็นต้น ในทางทฤษฎีสารประกอบของโลหะหนักที่มีค่า K_{sp} สูงกว่าจะสามารถละลายน้ำได้มากกว่า (เหลือโลหะหนักมาก) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าโลหะซัลไฟด์มีความสามารถในการละลายน้ำน้อยกว่าโลหะไฮดรอกไซด์มาก (ดูรูปที่ 2.3) และในตารางที่ 2.6 แสดงค่า K_{sp} และ pK_{sp} ของโลหะไฮดรอกไซด์ โลหะคาร์บอเนตและซัลไฟด์ (มันลิน, 2542)

2.4.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกจับโดยเรซินไม่เท่ากัน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนจะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงข้ามนี้เป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคทไอออนเอกเชนเจอร์ (cation exchanger) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (anion exchanger) วิธีนี้จะเหมาะสำหรับกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อย และให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากวิธีนี้มีข้อจำกัด

กับชนิดของน้ำเสีย คือถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

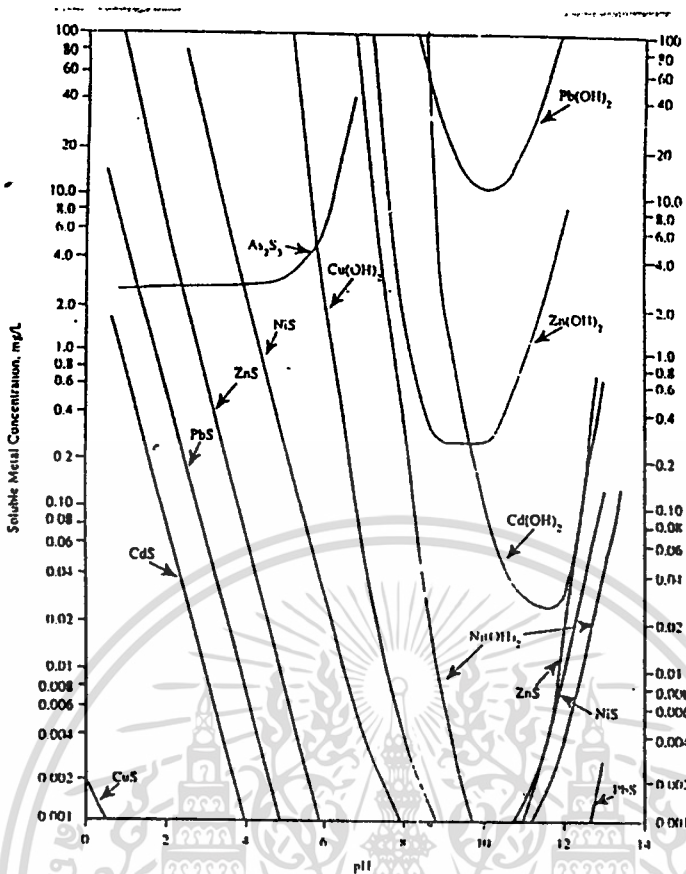
ตารางที่ 2.6 ค่า K_{sp} และ pK_{sp} ของโลหะไฮดรอกไซด์,โลหะคาร์บอเนตและโลหะซัลไฟด์

ไอออนโลหะ	โลหะไฮดรอกไซด์		โลหะซัลไฟด์		โลหะคาร์บอเนต	
	pK_{sp}	K_{sp}	pK_{sp}	K_{sp}	pK_{sp}	K_{sp}
Cd^{2+}	13.6	2×10^{-14}	26.1	7.9×10^{-27}	11.3	5×10^{-12}
Co^{2+}	14.8	1.6×10^{-15}	24.7	2×10^{-25}	12.8	1.6×10^{-13}
Cr^{3+}	30.2	6.3×10^{-31}	-	-	-	-
Cu^{2+}	19.7	2×10^{-20}	35.2	6.3×10^{-36}	9.9	1.2×10^{-10}
Hg^{2+}	23.7	2×10^{-24}	51.8	1.6×10^{-52}	16.1	7.9×10^{-17}
Mn^{2+}	12.7	2×10^{-13}	15.2	6.3×10^{-16}	10.7	2×10^{-11}
Ni^{2+}	14.7	2×10^{-15}	20.5	3.2×10^{-21}	8.2	6.3×10^{-9}
Pb^{2+}	14.9	1.2×10^{-15}	27.9	1.2×10^{-28}	13.1	7.9×10^{-14}
Sn^{2+}	27.8	1.6×10^{-28}	25	10^{-25}	-	-
Zn^{2+}	16.9	1.2×10^{-17}	22.8	2×10^{-23}	10.8	1.6×10^{-11}

ที่มา : มั่นสิน; 2542

2.4.3 การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

การออสโมซิสย้อนกลับเป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลสอะซีเตตและโพลีเอมิด ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน semipermeable membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและจะทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้ความดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องมีการบำบัดชั้นต้นโดยการปรับค่าพีเอชแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออกและการกรองสารแขวนลอยออกก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าและน้ำเสียจากการล้างภาพ



รูปที่ 2.3 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะซัลไฟด์เปรียบเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์

2.4.4 การระเหย (Evaporation)

วิธีการระเหยนํ้าออกนี้เป็นวิธีที่ง่าย ซึ่งใช้ในการทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศ (atmospheric evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (vacuum vaporation) วิธีบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น

2.4.5 อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีการนี้เป็นวิธีการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงรวมกับการใช้เมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (ion selective membrane) กลไกของวิธีนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน

2.4.5 การดูดซับ (Adsorption)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โดยสารที่ใช้ในการดูดซับมักจะเป็นถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ถ่านที่ใช้กันมี 2 ลักษณะ คือ คาร์บอนชนิดเม็ด

(granular carbon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.1 มิลลิเมตร และคาร์บอนผง (powder carbon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 200 เมช ซึ่งทำจากเมล็ดของแอลมอนด์ เปลือกถั่ว กะลามะพร้าว ไม้อื่นๆ หรือถ่านทั่วไป โดยถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้ได้พื้นที่ผิวของคาร์บอนมากๆ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้มีขนาดพื้นที่ผิวดั้งแต่ 500-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม (ชุดิมา, 2543)

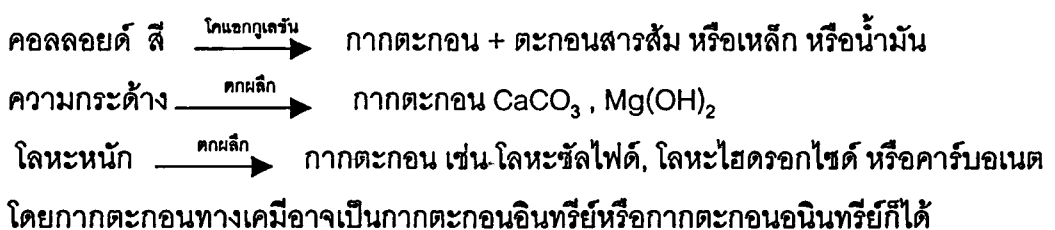
2.4.6 การออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หมายถึง ปฏิกิริยาเคมีที่มีการให้และรับอิเล็กตรอน ในขณะที่ปฏิกิริยาการลด หมายถึงปฏิกิริยาเคมีที่มีการให้หรือรับโปรตอนหรือ H^+ โดยทั่วไปแล้วการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพรวมทั้งวิธีเคมีบางชนิดเกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน สารอินทรีย์มักเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (oxidant) (ทำให้เกิดพลังงานได้) และมีสารรับอิเล็กตรอนต่าง ๆ (reductant) เช่น O_2 , NO_3^- , SO_4^{2-} หรือสารอินทรีย์บางอย่าง เป็นต้น ปฏิกิริยารีดอกซ์จะเกิดได้สมบูรณ์ต้องมีการรับอิเล็กตรอนเสมอ

สารเคมีที่นิยมใช้เป็นสาร Oxidant ได้แก่ ออกซิเจน, คลอรีนรูปต่างๆ, ด่างทับทิม, H_2O_2 และใช้เป็นสาร Reductant ได้แก่ SO_2 , เกลือซัลไฟต์, เหล็กซัลเฟต

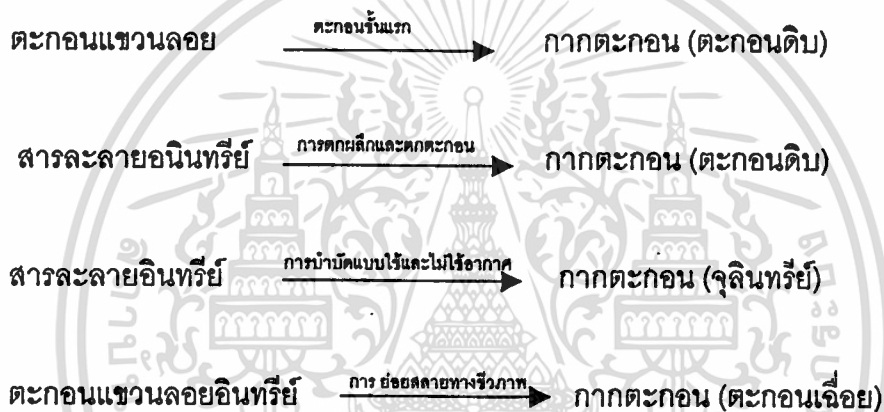
ตัวอย่างการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ได้แก่ การกำจัดโครเมียม (Cr^{6+}) การกำจัดไซยาไนด์ เป็นต้น ในกรณีที่ต้องการกำจัดมลพิษที่ละลายอยู่ในน้ำ แต่ไม่สามารถใช้วิธีการสร้างตะกอนแข็งได้ ก็อาจใช้กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชันเปลี่ยนมลพิษให้เป็นสารที่ไม่มีพิษ กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ได้แก่การเติมสารเคมีซึ่งอาจเป็น Oxidant หรือ Reductant อย่างใดอย่างหนึ่งไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันกับสารมลพิษ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นสารที่ไม่สร้างปัญหากับสิ่งแวดล้อม

การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี มักทำให้เกิดกากตะกอนเคมี เช่น กระบวนการโคแอกกูเลชันของสารแขวนลอยต่างๆ รวมทั้งน้ำมันและไขมันและกระบวนการตกผลึกหรือสร้างตะกอนแข็ง (precipitation) สารมลพิษที่ทำให้เกิดกากตะกอนเคมี ได้แก่ คอลลอยด์ สี น้ำมันและไขมัน (fog) ความกระด้าง (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+}) และโลหะหนักต่าง ๆ เป็นต้น คอลลอยด์มักจะเป็นอนุภาคดินเหนียวต่าง ๆ แต่ก็มีรวมจุลินทรีย์ต่าง ๆ ด้วย ดังแสดงต่อไปนี้



2.5 แหล่งกำเนิดของกากตะกอน

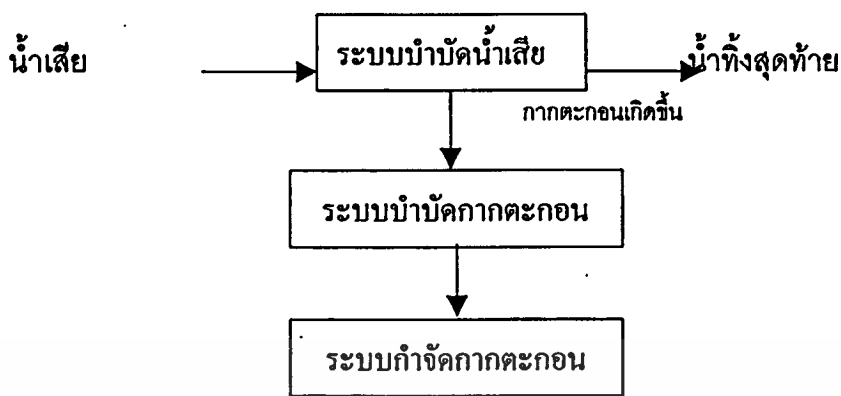
ส่วนประกอบต่างๆของน้ำเสียเป็นแหล่งกำเนิดของกากตะกอนได้ทั้งสิ้น ทั้งนี้สามารถจำแนกแหล่งกำเนิดของกากตะกอนได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ ตะกอนแขวนลอย และสารละลายตะกอนแขวนลอยที่ถูกตกตะกอนหรือทำให้ลอยจะกลายเป็นกากตะกอนโดยตรง ส่วนสารละลายนั้นเป็นแหล่งกำเนิดกากตะกอนที่ซับซ้อนกว่าตะกอนแขวนลอยสารละลายอินทรีย์ เช่น ไอออนของโลหะหนักจะกลายเป็นกากตะกอนโดยผ่านทางปฏิกิริยาตกผลึก (chemical precipitation) ตามด้วยการตกตะกอน ส่วนสารละลายอินทรีย์ เช่น บีโอดี เป็นต้น จุลินทรีย์บางส่วนซึ่งจะกลายเป็นกากตะกอนที่ต้องบำบัดต่อไป ดังขั้นตอนแสดงการเกิดกากตะกอนจากน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ดังกล่าว



กากตะกอนส่วนใหญ่จะพบได้ทั้งกันถึงตกตะกอนด้วยความเข้มข้นต่างๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของกากตะกอนซึ่งมีความสามารถในการอัดตัวให้แน่นแตกต่างกัน

2.6 วิธีการจัดการกับกากตะกอน

การบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจะด้วยกระบวนการใดก็ตามจะมีกากตะกอนเกิดขึ้นเสมอ ระบบบำบัดน้ำเสียที่สมบูรณ์ จำเป็นต้องมีระบบบำบัดและกำจัดกากตะกอน (ดูรูปที่ 2.4) กากตะกอนดังกล่าวจะเป็นตะกอนแข็งที่อยู่ในน้ำเสีย หรืออาจจะเป็นสารอินทรีย์ละลายหรือไอออนต่างๆที่ถูกเปลี่ยนเป็นตะกอนของแข็ง กากตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นของเสียที่ต้องการบำบัดให้กลายเป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อม การกำจัดกากตะกอนแต่ละประเภทมีขั้นตอนแตกต่างกัน กากตะกอนที่คงตัวสามารถบำบัดได้ง่ายกว่ากากตะกอนดิบ (ไม่คงตัว) กากตะกอนที่มีความเข้มข้นต่ำ เช่น ตะกอนแขวนลอย (suspended solid) ต่ำกว่า 1% ควรเพิ่มความเข้มข้นขึ้นเพื่อลดปริมาตรของกากตะกอนซึ่งทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดและกำจัดกากตะกอน

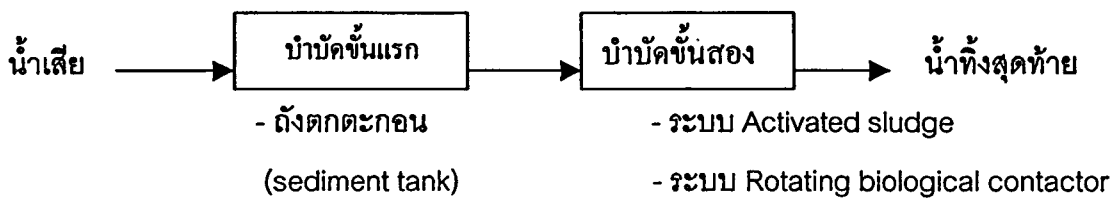


รูปที่ 2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียที่สมบูรณ์

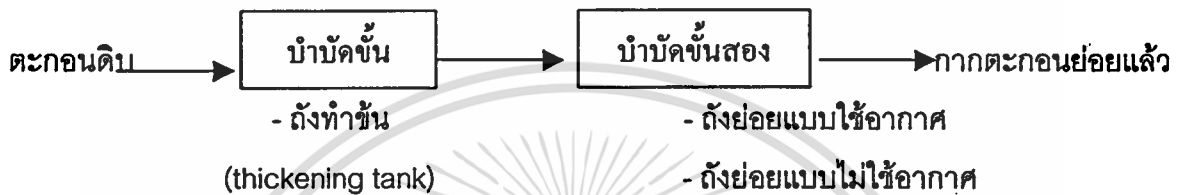
ระบบบำบัดกากตะกอนมีหลักการคล้ายกับระบบบำบัดน้ำเสีย (ดูรูปที่ 2.5) กล่าวคือขั้นตอนแรกจะเป็นการบำบัดเบื้องต้นซึ่งเป็นการแยกตะกอนของแข็งกับน้ำจากนั้นจะเป็นการบำบัดขั้นสูงซึ่งมักเป็นการบำบัดทางชีวภาพที่ทำให้น้ำเสียหรือกากตะกอนมีความคงตัว

วิธีการจัดการกับกากตะกอนมักมี 2 ส่วนหลัก คือ การบำบัดและการกำจัด ดังนี้

- 1. การบำบัดกากตะกอน
 - ทำให้กากตะกอนข้น (thickening)
 - ทำให้กากตะกอนคงตัว (stabilization)
 - ทำให้กากตะกอนแห้ง (dewatering)
- 2. การกำจัดทิ้ง (disposal) (มันสิน, 2542)



ระบบบำบัดน้ำเสีย



ระบบบำบัดกากตะกอน

รูปที่ 2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียและระบบบำบัดกากตะกอน

2.7 รูปแบบของดินและกากตะกอนที่ถูกบำบัด

รูปแบบของดินและกากตะกอนที่ถูกบำบัดโดยการใช้สารเคมีเป็นตัวสกัดนี้ ในงานวิจัยพบว่ามีโลหะหนักอยู่ 4 รูป คือ

- 2.7.1 รูปที่ถูกดูดซับหรือแลกเปลี่ยนไอออนได้ รูปแบบนี้พบเพียงเล็กน้อยเท่านั้นพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในปริมาณมาก
- 2.7.2 รูปที่ธาตุโลหะต่าง ๆ ในดินที่ถูกจับอยู่กับสารอินทรีย์และวัตถุอินทรีย์ ซึ่งพืชยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ธาตุนี้จะถูกปลดปล่อยออกจากดินอย่างช้า ๆ ตามระยะเวลา
- 2.7.3 รูปออกไซด์ของคาร์บอนหรือเหล็ก รูปแบบนี้พืชจะดูดซับได้น้อยเนื่องจากโลหะหนักในดินจะเป็นจับอยู่กับคาร์บอนและออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ทำให้โลหะรูปนี้ถูกปลดปล่อยออกมาได้น้อย แต่หากดินมีสภาพเป็นกรดโลหะรูปนี้ก็สามารที่จะละลายออกมาได้
- 2.7.4 รูปที่เกลือซึ่งประกอบด้วยซัลไฟด์และสารประกอบที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ รูปนี้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยกว่ารูปแบบอื่นๆ

ตัวอย่างโลหะหนักรูปต่าง ๆ ในดินแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 รูปแบบโลหะหนัก 6 ชนิดที่พบใน Greenfield Sandy Loam มีปริมาณตะกอนโลหะ 45 mg/ha ในระยะเวลา 5 ปี

Forms	Percentage of elements in each form					
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Exchangeable/adsorbed	1	1	2	5	1	2
Organically bound	20	5	34	24	3	28
Carbonate/iron oxides	64	19	36	33	85	39
Residual ^a	16	77	29	40	12	31

^aSulfides and other very insoluble forms.

ที่มา : Brady และ Well ; 1996.

2.8 การป้องกันและกำจัดสารอนินทรีย์เคมีที่ปนเปื้อน

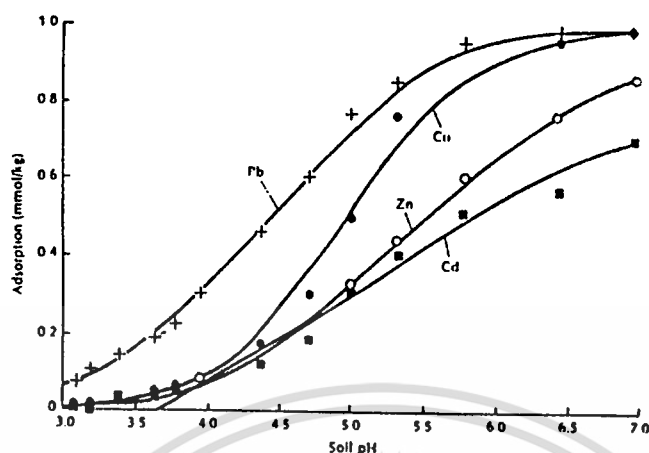
วิธีการลดปัญหาดินที่ปนเปื้อนด้วยสารประกอบอนินทรีย์มี 3 วิธี ดังนี้

2.8.1 การลดการนำดินไปใช้

ขั้นแรกจะต้องลดการปนเปื้อนที่ไม่จำเป็นในอุตสาหกรรม การดำเนินงานและท่อไอเสียจากแหล่งที่เคลื่อนที่ เช่น รถบรรทุก รถโดยสาร โดยจะต้องรู้แหล่งกำเนิดมลสารที่ทำให้ดินปนเปื้อน ถ้าการปนเปื้อนเกิดขึ้นโดยอุบัติเหตุควรทำให้มีปริมาณลดลง ควรลดการนำดินไปใช้กับสารพิษโดยตรงจากยาฆ่าแมลง สารเคมีแต่ง น้ำที่มีสิ่งปนเปื้อน และขยะที่เป็นของแข็ง

2.8.2 การทำให้มลสารที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้

การจัดการดินและพืชผลที่เพาะปลูก สามารถช่วยลดการปนเปื้อนของสารอนินทรีย์เคมีในสิ่งแวดล้อม โดยขั้นแรกควรให้สารเคมีที่ปนเปื้อนอยู่ในดินมากกว่าจะถูกดูดซึมโดยพืช ทำให้ลดการปนเปื้อนของมลสารผ่านห่วงโซ่อาหาร ธาตุจำนวนมากสามารถเคลื่อนที่ได้เล็กน้อย และจะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยถ้าอยู่ในดินที่มีพีเอชเป็นกลางหรือเป็นด่าง ดังรูปที่ 2.6 ความเป็นกรด-เบสในดินจะช่วยลดความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะได้โดยที่ดินที่มีสภาวะเป็นกลางจะสามารถดูดซับโลหะได้มากที่สุด โดยเฉพาะ Pb และ Cu ดังนั้นในพื้นที่ที่ต้องการบำบัดตะกอนควรมีค่าพีเอชประมาณ 6.5 หรือสูงกว่า



รูปที่ 2.6 ผลกระทบต่อดินที่ดูดซับโลหะ Pb, Cu, Zn และ Cd (Brady และ Well, 1996)

2.8.3 การบำบัดทางชีวภาพโดยการสะสมในพืช

พืชที่ปลูกในดินธรรมชาตินั้นสามารถดูดซับโลหะได้ในปริมาณมากและสะสมจนมีความเข้มข้นสูงสุดได้โดยไม่แสดงความเป็นพิษ จากการทดลองพบว่าพืชสามารถสะสม Ni ได้มากกว่า 20,000 mg/kg, Zn 40,000 mg/kg และ Cd 1,000 mg/kg แต่หากสัตว์และคนกินพืชเหล่านี้เข้าไปก็อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพได้ (Brady และ Well, 1996)

2.9 โลหะหนักที่ทำการศึกษา

2.9.1 แคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุในหมู่ 2B มีเลขอะตอม 48 เลขมวล 112.4 มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 2 มีไอโซโทปเสถียร 8 ไอโซโทป แคดเมียมเป็นธาตุโลหะที่อ่อน มีสีน้ำเงิน ความถ่วงจำเพาะ 8.64 จุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 767 องศาเซลเซียส ละลายได้ในกรดโดยเฉพาะกรดไนตริกและสารละลายแอมโมเนียมไนเตรท

ในธรรมชาติพบแคดเมียมในรูป greenockite (CdS) ประมาณ 0.5 ไมโครกรัมต่อกรัม และปะปนอยู่กับแร่อื่นๆ เช่น สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยคือพบบนผิวโลกประมาณ 0.15-0.20 ไมโครกรัมต่อกรัม พบในรูปสินแร่สังกะสีร้อยละ 0.3-1.0 ในหินแกรนิตมีแคดเมียมน้อยกว่า 1 ไมโครกรัมต่อกรัม หินชั้นมีแคดเมียมสูงถึง 11 ไมโครกรัมต่อกรัม ปริมาณแคดเมียมในน้ำและดินตะกอนจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะแหล่งกำเนิดของดินและสภาวะ

แวดล้อม ค่าพีเอช ดินเหนียวและดินที่เป็นเบสดูดซับแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตที่ละลายน้ำได้มาก ส่วนดินทรายและดินที่เป็นกรดดูดซับแคดเมียมได้น้อย

ปริมาณแคดเมียมในดินตะกอนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณสารอินทรีย์ที่หายไปจากดิน ตะกอน โคลนมี humic materials ประกอบอยู่และเป็นส่วนสำคัญในการดูดซับแคดเมียมด้วยกระบวนการดูดซับ (sorption process) ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญที่ลดปริมาณแคดเมียมในแหล่งน้ำได้ โดยการเปลี่ยนไปสะสมในดินตะกอน แต่แคดเมียมในดินตะกอนจะถูกปลดปล่อยสู่แหล่งน้ำได้เมื่อความเค็มของน้ำเพิ่มขึ้นโดยการเกิด desorption process การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในดินสามารถลดปริมาณของแคดเมียมในดินได้

2.9.2 ประโยชน์และโทษของแคดเมียม

การนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์ได้เพิ่มปริมาณสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากข้อมูลการใช้แคดเมียมทั่วโลกปี ค.ศ.1960 มีปริมาณ 11,000 ตันเพิ่มเป็น 19,000 ตัน ในปี ค.ศ. 1985 (Alloway, 1995) โดยแคดเมียมถูกใช้ประโยชน์ในหลายๆ ด้าน เช่น ชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อป้องกันสนิม อุตสาหกรรมรถยนต์ ใช้ผสมในสีผง ยาง แบตเตอรี่ ใช้เป็นตัว stabilizers ในอุตสาหกรรมพลาสติก ใช้กำจัดเชื้อรา ใช้ทำเซลล์สุริยะ ใช้ในทางการแพทย์ ทันตแพทย์ ทำโลหะผสม เช่น แคดเมียมและทองแดง ซึ่งมีความคงทนต่อแรงกระแทกและทนต่ออุณหภูมิสูง โลหะผสมแคดเมียมและนิเกิลใช้ในการทำแบตเตอรี่ที่สามารถประจุไฟฟ้าใหม่ได้ โลหะผสมแคดเมียมและเงินใช้ผสมเพื่อไม่ให้เงินเป็นรอยต่างเมื่อสัมผัสกับซัลไฟด์ นอกจากนี้แคดเมียมยังเป็นส่วนผสมในน้ำมันดีเซล ทำให้พบแคดเมียมในฝุ่นละอองและดินบนบริเวณริมถนนในปริมาณมาก

แคดเมียมเป็นธาตุที่ไม่จำเป็นในการดำรงชีวิต และยังก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นพิษต่อร่างกาย ที่เรียกว่าโรคพิษแคดเมียม ซึ่งเป็นโรคที่เกิดจากร่างกายได้รับแคดเมียม แคดเมียมจะทำลายไต กระดูก ระบบเลือด กระเพาะปัสสาวะ และอวัยวะอื่นๆ โดยมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โรคอิไต อิไต (Itai Itai) ซึ่งเป็นโรคที่มีอาการปวดในกระดูกมากเป็นสำคัญ กระดูกเสื่อม เสียรูปและมีอาการร่วมอื่น ๆ อีกมาก ได้แก่ อาการอ่อนเพลีย น้ำหนักลด คลื่นไส้ อาเจียน ไอเรื้อรัง มีวงสีเหลือง หรือ Yellow ring ที่ฟัน มีภาวะเลือดจาง เกิดความดันโลหิตสูง ทำให้เกิดภาวะเส้นเลือดอักเสบ และแคดเมียมยังทำให้เกิดมะเร็งต่อมลูกหมากได้ แคดเมียมเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางเดินอาหารและการหายใจ แต่มีการดูดซึมที่ทางเดินอาหารต่ำมากคือ 1 เปอร์เซ็นต์ และถูกดูดซึมที่ปอด 10-40 เปอร์เซ็นต์ โดยปกติคนจะรับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกาย 10-30 ไมโครกรัมต่อวัน จากรายงานของซูชาติ พบว่าถ้าหากคนไทยรับประทานอาหารได้ตามมาตรฐานการบริโภค จะได้รับปริมาณ

แคดเมียมที่ได้จากพืช 28.82 ไมโครกรัมต่อวัน แคดเมียมทำให้เกิดพิษต่อร่างกายหลายลักษณะ ถ้ามีการหายใจเอาควันออกไซด์ของแคดเมียมเข้าไปในร่างกายจะเป็นอันตรายต่อปอดฉับพลัน เกิดลักษณะปอดอักเสบ (pneumonitis) หรือน้ำขังในปอด (pulmonary edema) เมื่อร่างกายสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้น แคดเมียมจะไปรบกวนการเกิดเมตาบอลิซึมของ เหล็ก สังกะสี ทองแดง และ ฟอสฟอรัส ขัดขวางการทำงานของซัลโฟไธลเอ็นไซม์ (sulfhydryl enzyme) ทำให้เกิดความดันโลหิตสูง และโลหิตจาง ดับและไตดำมีการสะสมแคดเมียมในปริมาณสูงจะมีโครงสร้างและการทำงานผิดปกติ ทำให้เกิด protinuria คือ มีโปรตีนในน้ำปัสสาวะ และแคดเมียมยังทำให้เกิดความผิดปกติที่กระดูก (อภิชาติ, 2536) ดังตารางที่ 2.8 แสดงแหล่งกำเนิดของสารอนิน-ทรีย์ที่เป็นมลพิษต่อดิน (Brady และ Well, 1996)

2.9.3 การเกิดปฏิกิริยาในดินของแคดเมียม

แคดเมียมในดินชั้นนี้และดินตะกอนจะมีปริมาณไม่เกิน 0.3 ppm และจะพบอยู่ร่วมกับ สังกะสีเสมอแต่ในสภาพดินเป็นกรดแคดเมียมมีสภาพเคลื่อนที่ดีกว่าสังกะสี และแคดเมียมมีรูปสารประกอบได้เช่นเดียวกับกลุ่มแคดไอออน Zn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}

ในการสลายตัวของหินและแร่แคดเมียมในดินอยู่ในสภาพละลายได้ง่ายโดยจะอยู่ในรูป Cd^{2+} เป็นส่วนใหญ่ โดยอาจอยู่ในรูปไอออนเชิงซ้อน (complex ion) และสารประกอบได้ดังนี้

แคดไอออน	:	$CdCl^+$, $CdOH^+$, $CdHCO_3^+$
แอนไอออน	:	$CdCl_3^-$, $CdCl_4^{2-}$, $Cd(OH)_3^-$, $Cd(OH)_4^{2-}$
สารประกอบ	:	CdO , $CdCO_3$

ปัจจัยสำคัญที่สุดในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินคือ พีเอชและศักย์รีดอกซ์ ซึ่งดินที่มีศักย์รีดอกซ์สูง แคดเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบ เช่น CdO หรือ $CdCO_3$ หรืออาจอยู่รวมกับฟอสเฟตได้เช่นเดียวกัน

แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าพีเอชระหว่าง 4.5 ถึง 5.5 แต่ในดินที่เป็นด่าง แคดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ ซึ่งในสภาพดินเป็นกรดสภาพละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

การที่แคดเมียมในตะกอนน้ำโสโครกถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่าย เป็นเพราะไอออนบวกแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable cation) สามารถไล่ที่แคดเมียมก่อนที่จะถูกดูดซับในตะกอนได้มากกว่าประเภทของตะกอนน้ำโสโครกที่สามารถดูดซับแคดเมียมจากมากไปน้อยดังนี้ $Ca\text{-sludge} >$

untreated sludge > Fe-sludge, Al-sludge ขณะเดียวกันเมื่ออยู่ในดิน แคลเมียมโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพที่แลกเปลี่ยนได้ ขณะที่ทองแดงจะถูกตรึงในรูปของสารประกอบอินทรีย์ ทำให้ศักยภาพในการเคลื่อนที่และแพร่กระจายของแคลเมียมสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับจุลธาตุอื่นซึ่งเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $Cd > Zn > Cu, Ni$

แคลเมียมเมื่ออยู่ในภาคตะกอนที่เป็นต่างเช่น Ca-sludge มีแนวโน้มที่จะอยู่ในลักษณะคีเลตหรือรวมกับสารอินทรีย์ที่ไม่ละลาย (insoluble organic bound) เป็นส่วนใหญ่ และปริมาณในส่วนนี้ก็จะไม่ถูกกระทบโดยการเปลี่ยนแปลงสภาพออกซิเดชัน – รีดักชันแต่อย่างใด เมื่อสภาพความเป็นต่างลดลงเช่น จนถึงสภาพพีเอช 5.0 และอากาศถ่ายเทดี แคลเมียมในดินจะเปลี่ยนจากรูปสารประกอบอินทรีย์ไปอยู่ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนได้มากขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงศักย์รีดอกซ์และพีเอชในดินมีผลต่อการละลายและการแพร่กระจายของแคลเมียมเป็นอย่างมาก (ศุภมาศ, 2539)



ตารางที่ 2.8 แหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ที่เป็นปัญหามลพิษต่อดิน

Chemical	Major uses and sources of soil contamination	Organisms principally harmed ^a	Human health effects
Arsenic	Pesticides, plant desiccants, animal feed additives, coal and petroleum; mine tailings and detergents	H, A, F, B	commulative poison, possibly cancer
Cadmium	Electroplating, pigments for plastics and paints, plastic stabilizers, and batteries, phosphate fertilizers	H, A, F, B, P	Heart and kidney disease, bone embrittlement
Chromium	Stainless steel, chrome-plated metals, pigments, and refractory brick manufacture, leather tanning	H, A, F, B	Mutagenic, also essential nutrient
Copper	Mine tailings, fly ash, fertilizers, windblown copper-containing dust, water pipes	F, P	Rare, essential nutrient
Lead	Combustion of oil, gasoline, and coal; iron and steel production, solder on water pipe joints	H, A, F, B	Brain damage, convulsions
Mercury	Pesticides, catalysts for synthetic polymers, metallurgy, thermometers	H, A, F, B	Nerve damage
Nickel	Combustion of coal, gasoline, and oil; alloy manufacture, electroplating, batteries, mining	F, P	Lung damage
Zinc	Galvanized iron and steel, alloys, batteries, brass, rubber manufacture, mining, old tires	F, P	Rare, essential nutrient

^aH = humans, A = animals, F = fish, B = birds, P = plants.

ที่มา: Brady *et.al.*:1996.

2.9.4 ลักษณะการแพร่กระจายและการปนเปื้อน

แคดเมียมที่สะสมบนผิวดินได้มาจากแหล่งกำเนิดที่สำคัญ 3 แหล่ง คือ

2.9.4.1 เหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการถลุงแร่

2.9.4.2 กากตะกอนน้ำโสโครก

2.9.4.3 ปุ๋ย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปุ๋ยฟอสเฟตและปุ๋ยคอก

เนื่องจากแคดเมียมละลายได้ง่าย และพืชดูดซึมได้โดยรวดเร็ว ในปี ค.ศ. 1978 องค์การป้องกันสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (USEPA) จึงกำหนดปริมาณสูงสุดในการทิ้งกากตะกอนน้ำโสโครกโดยการฝังกลบลงในดินโดยใช้ปริมาณแคดเมียมเป็นข้อกำหนด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ CEC ของดิน (ตารางที่ 2.7) นอกจากนี้ยังได้กำหนดห้ามไม่ให้ใช้วัสดุเหลือใช้ที่เป็นของแข็งใดๆ ที่มีแคดเมียมมากกว่า 25 mg/kg โดยมวลแห้งกับยาสูบ ผักกินใบหรือพืชหัวที่ปลูกเพื่อการบริโภค (ศุภมาส, 2539)

ตารางที่ 2.7 ^{2.7} ข้อกำหนดในการทิ้งกากตะกอนน้ำโสโครกลงไปในดิน โดยพิจารณาจากปริมาณแคดเมียม และ CEC ของดิน

ปริมาณแคดเมียมสะสมสูงสุด (mg/kg)	CEC (meq/100 g)
5	< 5
10	5 – 15
15	> 15

ที่มา : ศุภมาส ;2539

2.10 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential Extraction)

การหาปริมาณโลหะหนัก นิยมใช้เทคนิคการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น เนื่องจากวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้ โดยศึกษาสมบัติทางเคมีของโลหะและแร่ธาตุในดินตะกอน ซึ่งการศึกษานี้จะทำให้เข้าใจเคมีของดินที่สัมพันธ์ระหว่างโลหะและชนิดของดินหรือภาคตะกอน วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นจะเกี่ยวข้องกับการเลือกสารเคมีที่เหมาะสมในการสกัดแต่ละลำดับของการสกัด (เพ็ญใจ, 2532)

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา นักวิทยาศาสตร์หลายท่านให้ความสนใจกับการสกัดเป็นลำดับมากขึ้น ซึ่งมีการสกัดตั้งแต่ 3 ชั้น จนถึง 8 ชั้น ขึ้นอยู่กับรูปแบบของโลหะที่ถูกสกัด หรือตัวอย่างที่ทำการศึกษา ดังตารางที่ 2.8 ซึ่งทางสมาคม European Communities Bureau of Reference (BCR) ได้เสนอมาตรฐานการวัดและการทดสอบของการสกัด ซึ่งมีวัตถุประสงค์คล้ายกับ Ure และคณะ ในการใช้กับดินและตะกอน แต่อย่างไรก็ตามก็ยังไม่มีความมาตรฐานใดที่เป็นที่ยอมรับและนำมาใช้ได้อย่างจริงจัง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น 6 ชั้น มาใช้เพื่อแยกโลหะที่สนใจออกเป็นส่วน ๆ ตามการใช้สารละลายสกัด ที่มีความแรงเพิ่มขึ้นตามลำดับ ปริมาณของโลหะหนักที่ออกมาในแต่ละส่วนสามารถทำนายพฤติกรรมของโลหะที่เป็นพิษในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ การเคลื่อนที่ของโลหะหนักขึ้นกับพีเอช ศักย์รีดอกซ์และการเกิดสารเชิงซ้อนกับลิแกนด์ ดังนั้นการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นจึงมีความสำคัญในการศึกษาทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งการสกัดที่นำมาใช้นี้คล้ายกับการสกัด 4 ชั้นของ BCR และ Ure และคณะ โดยเพิ่มขั้นที่ละลายน้ำได้ และขั้นที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ โดยการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาจากงานวิจัยหลายท่านซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้ (รัตติกาล, 2542)

ขั้นที่ 1 : ส่วนที่ละลายน้ำได้ (deionized H_2O , pH 7)

ปกติน้ำบริสุทธิ์จะไม่ใช่ตัวสกัดที่ใช้กัน แต่มักใช้เป็นสารสกัดในส่วนแรก เพื่อพิจารณาว่าโลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างนั้นสามารถละลายน้ำได้หรือไม่ เพื่อใช้เป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการดูผลกระทบของสิ่งแวดล้อม เช่น ความเป็นพิษของไอออนโลหะที่มีความสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้หลังจากเกิดน้ำท่วม

ขั้นที่ 2 : ส่วนที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ ($1.0\text{ M } NH_4OAc$, pH 7)

ส่วนนี้เกี่ยวข้องการแลกเปลี่ยนกับสิ่งแวดล้อม ผลของการแลกเปลี่ยนประจุบวกของโลหะที่จับตัวกันอย่างหลวม ๆ กับแร่ธาตุ ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ของดินและตะกอน คุณสมบัติของสารสกัดในส่วนนี้คือ สามารถละลายไอออนโลหะที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวของตัวอย่าง สารสกัดในส่วนนี้นิยม

ใช้สารที่เป็น neutral salt, neutral electrolytes และ buffered neutral solutions ซึ่ง MgCl_2 และ NH_4OAc นิยมใช้กันมากในส่วนนี้

จากงานวิจัยของรัตติกาล (พ.ศ.2542) ได้กล่าวไว้ว่า Pickering ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสกัด ที่ใช้เกลือคลอไรด์และเกลืออะซิเตต โดยดูการนำโลหะกลับคืนมา (recovery) ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการนำโลหะกลับคืนมาของเกลืออะซิเตตดีกว่าเกลือคลอไรด์ ถึง 10% เนื่องมาจากการเกิด metal chloro-complexes ซึ่งมีความแรงของพันธะอ่อนกว่าไอออนอะซิเตต (pK_1 ของ metal chloro-complexes มีช่วงอยู่ระหว่าง 0.7-2 ขณะที่ pK_1 ของ Metal acetate-complexes มีช่วงอยู่ระหว่าง 1.6-2.2) ดังนั้น NH_4OAc จึงถูกเลือกมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยที่แอมโมเนียมไอออนจะแทนที่โลหะที่ถูกดูดซับอยู่ และโลหะก็จะถูกละลายอยู่ในรูปสารเชิงซ้อนอะซิเตต

ขั้นที่ 3 : ส่วนที่ละลายได้ในกรด (0.11 M CH_3COOH , pH 3)

คุณสมบัติของสารสกัดในส่วนนี้ ต้องสามารถละลายโลหะที่เชื่อมอยู่กับคาร์บอนेटได้ ซึ่งสารละลายอะซิเตตถูกนำมาใช้ โดยทำให้เป็นกรดที่ pH 5 เพื่อป้องกันการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ โดยงานวิจัยนี้ได้นำกรดอะซิติก 0.11 M pH 3 มาใช้ในการสกัด โดยใช้อัตราส่วน สารตัวอย่างต่อสารสกัด เท่ากับ 1:25

ขั้นที่ 4 : ส่วนที่ถูกรีดิวซ์ได้ (0.1 M $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ in CH_3COOH 25% v/v pH 2)

ในงานวิจัยนี้จะใช้การผสมของ reducing agent และกรด ซึ่งปกติใช้สกัดโลหะปริมาณน้อยที่ยึดเกาะอยู่กับ Fe-oxide หรือ Mn-oxide ในดินและตะกอน ซึ่งรูปของออกไซด์นี้เรียกว่า reducing phase โดยมีช่วงอยู่ระหว่าง amorphous และ crystalline โดยปกตินิยมใช้ $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ใน CH_3COOH 25% v/v กันมากในส่วนนี้ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.10 ค่าพีเอชที่ใช้จะต้องปรับให้มีค่าน้อยกว่า 3 เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการรีดิวซ์ของ reducing agent และ Tessier และคณะ (ค.ศ. 1997) ยังได้รายงานไว้อีกว่า $\text{HOAc}\cdot\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ไม่สามารถรีดิวซ์ปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในตัวอย่างตะกอนได้แต่มีความเฉพาะเจาะจงกับพวกโลหะออกไซด์ ดังนั้นชนิดของสารสกัดนี้ควรมีความเฉพาะเจาะจงกับโลหะออกไซด์และละลายโลหะที่เชื่อมอยู่กับสารตัวอย่างด้วยพันธะที่แข็งแรง ซึ่งในส่วนนี้ปกติจะนิยมใช้ hydroxylamine hydrochloride ใน acetic acid เป็นสารสกัด

ขั้นที่ 5 : ส่วนที่ถูกออกซิไดซ์ได้ (30% H_2O_2 acidified with HNO_3 , pH 2/1.0 M NH_4OAc , pH 2)

การสกัดโลหะในดินและตะกอนที่เชื่อมอยู่กับสารอินทรีย์ด้วยกลไกหลายแบบ เช่น การดูดซับ การเกิดสารเชิงซ้อนและการเกิดคีเลตภายใต้การสกัดเป็นลำดับจะมีสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ เพื่อใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ละลายสารอินทรีย์หรือสารที่สามารถที่จะถูกออกซิไดซ์ได้ เช่น ออกไซด์และซัลไฟด์ของโลหะบางตัว ซึ่งทำให้ได้โลหะที่ถูกละลายออกมาจากการสกัด ในตารางที่ 2.11 นิยมนำ H_2O_2 ที่ถูกทำให้มีสภาพเป็นกรด มาใช้เป็นสารสกัดกันมากในส่วนี้ โดยในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างที่เหลือจะถูกสกัดด้วย 30% H_2O_2 ในกรดไนตริก โดยการเขย่าด้วย waterbath shaker ภายใต้อุณหภูมิ 85°C นาน 2 ชั่วโมง สาเหตุที่สารสกัดนี้ต้องรักษาสภาพให้เป็นกรดเพื่อป้องกันการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ เพราะอาจเกิดการดูดซับกลับอีกครั้งของโลหะที่ถูกสกัดหากมีสภาวะที่สามารถออกซิไดซ์ได้ ดังนั้น สารละลาย NH_4OAc ในกรดไนตริก ที่ pH 2 จึงต้องถูกเติมลงไปเป็นลำดับต่อไปหลังจากที่สกัดด้วย 30% H_2O_2 pH 2 เสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยการให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิ 85°C นาน 2 ชั่วโมงก่อนการแยก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สารสกัดและสภาวะที่เหมือน Guy และ Rendell และคณะ โดยใช้ 30% H_2O_2 ที่ถูกทำให้เป็นกรดด้วย HNO_3 ให้มีพีเอชเท่ากับ 2 และเติม 1.0 M NH_4OAc pH 2 หลังจากทำการสกัดด้วย 30% H_2O_2

ขั้นที่ 6 : ส่วนที่เหลือ (HF/HNO_3 , 2:3 v/v)

หลังจากที่สกัดเอาบางส่วนออกไปแล้ว ของแข็งที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นแร่ปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ในส่วนนี้จึงใช้สารสกัดที่มีความเป็นกรดแรง เพื่อละลายซิลิเกต และส่วนที่เหลืออื่นๆ ที่ไม่สามารถสกัดออกมาได้ด้วยสารสกัดที่มีความแรงอ่อน โดยปกติจะนำการผสมกันของกรดที่ร้อนมาใช้เพื่อย่อยส่วนที่เหลือให้เป็นสารละลายได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ส่วนที่เหลือจากส่วนที่ 5 สามารถถูกละลายได้โดยการย่อยด้วย HF และ HNO_3 ที่อัตราส่วน 2:3 v/v

ตารางที่ 2.10 สารเคมีที่ใช้ในการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นสำหรับดินและตะกอน

ส่วนที่ 2	ส่วนที่ 3	ส่วนที่ 4	ส่วนที่ 5	ส่วนที่ 6	ชนิดตัวอย่าง	สารที่วิเคราะห์	เอกสารอ้างอิง
NH_4Cl	-	$\text{NH}_2\text{OH HCl pH 2 (HOAc)}$	H_2O_2	Diluted HNO_3	ตะกอน	Cu, Pb	Guy et al.(1978)
-	HOAc		$\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OAc}$	$\text{HF/HNO}_3/\text{HClO}_4$	ตะกอน	Zn,Cd	Filipek และ Owen (1978)
MgCl_2	NaOAc pH 5	$\text{NH}_2\text{OH HCl / HOAc}$	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OAc}$	HF/HClO_4	ตะกอน	Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, Mn	Tessier et al. (1979)
$\text{NH}_4\text{OAc/MgOAc}$	-	$\text{NH}_2\text{OH HCl pH 2}$	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OAc}$	-	ตะกอน	Cu, Zn, Mn	Adri และ Aston (1981)
BaCl_2	NaOAc pH 5	$\text{NH}_2\text{OH HCl / HOAc}$	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OAc}$	$\text{HF/HNO}_3/\text{HClO}_4$	ตะกอน	-	Meguellati et al.(1983)
MgCl_2	NaOAc pH 5	$\text{NH}_2\text{OH HCl pH 2 (HOAc)}$	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OAc}$	-	ตะกอน	Cu	Diks และ Allen (1983)
MgCl_2	NaOAc pH 5	$\text{NH}_2\text{OH HCl (HOAc)}$	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OAc}$	$\text{HF/HNO}_3/\text{HClO}_4$	ตะกอน	Cd	Lee และ Kittrick (1984)
NH_4OAc	NaOAc pH 5	$\text{NH}_2\text{OH HCl pH 2 (NH}_4\text{Ox/HOx)}$	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OAc}$	HNO_3	ตะกอน	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, Mn	Salomon และ Forstner (1984)
NH_4OAc	NaOAc pH 5	-	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OAc}$	HF/HClO_4	ตะกอน	-	Hayes (1985)
NH_4OAc	NaOAc pH 5	$\text{NH}_2\text{OH HCl pH 2 (HOAc)}$	H_2O_2	$\text{HF/HNO}_3/\text{HClO}_4$	ดิน	-	Gibson และ Farmer (1986)
-	NaOAc/HOAc pH5	$\text{NH}_2\text{OH HCl/ Na-citrate pH 5}$	$\text{H}_2\text{O}_2 \text{ pH 2}$	$\text{HF/HNO}_3/\text{HClO}_4$	ตะกอน	-	เพ็ญใจ (2532)
-	HOAc	$\text{NH}_2\text{OH HCl pH 2 (HOAc)}$	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OAc}$	-	ตะกอน / ดิน	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	Ure et al. (1993)
-	HOAc	$\text{NH}_2\text{OH HCl pH 2}$	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OAc}$	-	ตะกอน / ดิน	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	BCR (1993)
$\text{NH}_4\text{OAc pH 7}$	HOAc pH 3	$\text{NH}_2\text{OH HCl pH 2 (HOAc)}$	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OAc pH 2}$	HF/HNO_3	ขยะ	Cd, Cu, Pb, Zn, Mn	รัตนทิภาล (2542)

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก รัตนทิภาล : 2542

2.11 การล้างดิน (Soil Washing)

การล้างดินเป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากดินผ่านตัวกลางในการชะล้าง ซึ่งเหมือนกับวิธีการใช้น้ำล้าง ในการล้างดินด้วยตัวสกัดนั้นสารละลายที่ใช้ล้างอาจเป็นสารละลายที่เป็นต่าง ได้แก่ สารที่กัดกร่อน ปูนขาว หินปูนที่แตกตัวด้วยน้ำ หรือในอุตสาหกรรมที่ใช้สารประกอบที่เป็นเบสในการล้าง เป็นต้น สารละลายกรดได้แก่ ซัลฟิวริก ไฮโดรคลอริก ไนตริก ฟอสฟอริก หรือ คาร์บอนิก เป็นต้น หรือสารละลายที่เป็นสารลดแรงตึงผิว หรือคีเลตติ้งเอเจนต์ พวกเปอร้อกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์หรือตัวออกซิไดซิงเอเจนต์ตัวอื่น ๆ โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสิ่งปนเปื้อนอยู่ เบสแก่หรือสารละลายลดแรงตึงผิวสามารถใช้ในการสกัดสารอินทรีย์ และสารละลายกรดแก่หรือสารละลายคีเลตติ้งเอเจนต์สามารถใช้ในการกำจัดโลหะหนัก สารลดแรงตึงผิวและคีเลตติ้งเอเจนต์มีความสำคัญอย่างมากในการชะล้างดิน เพราะดินส่วนใหญ่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และโลหะหนัก โดยความสามารถในการชะล้างสิ่งปนเปื้อนออกจากดิน ขึ้นอยู่กับขนาดของดิน ความพรุน และโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของดิน

กระบวนการกำจัดสารปนเปื้อนในดิน แบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ (Noyes, 1991) ดังนี้

- 1) การสกัดด้วยน้ำซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการสกัดต่าง ๆ ซึ่งนิยมใช้กันมี 3 ประเภท ดังนี้
 - การเติมสารลดแรงตึงผิว เพื่อเพิ่มการละลายของสารปนเปื้อนลงในน้ำ
 - การเติมคีเลตติ้งเอเจนท์ ซึ่งเป็นตัวที่เข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับโลหะและช่วยให้การละลายได้ดีขึ้น
 - การเติมสารละลายกรดหรือด่าง เพื่อช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่ ทำให้เป็นกลางและทำลายสิ่งปนเปื้อน
- 2) การใช้สารละลายสกัดการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ โดยสารอินทรีย์ที่ละลายได้จะเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในสารละลาย
- 3) การกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกด้วยอากาศนิยมใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ระเหยได้โดยใช้ไอน้ำหรืออากาศมาประยุกต์ใช้ โดยอาศัยความร้อนและสภาวะสูญญากาศ หรือทั้งสองแบบมาช่วยเพิ่มอัตราการสกัด

สารที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินด้วยวิธีการล้างดิน (soil washing) มีหลายชนิด ซึ่งมีประสิทธิภาพแตกต่างกันออกไป สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ประเภทคือ

2.11.1 การล้างดินด้วยสารประเภทคีเลตติงเอเจนต์ (Chelating agent)

การกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้สารประเภทคีเลตติงเอเจนต์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง เนื่องจากสารดังกล่าวสามารถเกิดการคีเลชันกับโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน แต่สารชนิดนี้มีราคาสูงมากจึงไม่นิยมใช้

Elliott และ Peters กล่าวถึงการใช้สารคีเลตติงกับการแก้ไขปัญหาดิน ควรคำนึงถึงปัจจัยสำคัญ 4 ข้อ (Allen *et.al*, 1995) ดังนี้

- 1. สารเคมีควรมีความสามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่เสถียรในช่วงพีเอชที่กว้างที่อัตราส่วนลิแกนด์ต่อโลหะ 1:1 โมลาร์
- 2. การย่อยสลายทางชีวภาพของสารคีเลตติงและสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักควรต่ำ (ยกเว้นกรณีที่ใช้สารคีเลตติงที่ผ่านการใช้แล้วมาใช้อีก)
- 3. สารคีเลตติงควรมีความเป็นพิษและอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ
- 4. สารเคมีที่ใช้ควรคุ้มค่าต่อการนำมาใช้

นอกจากนี้ Elliott และ Peters ยังได้กล่าวอีกว่าไม่มีสารประกอบใดที่จะเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ได้หมด ซึ่งคุณสมบัติของสารคีเลตติงที่สำคัญแสดงดังตารางที่ 2.11

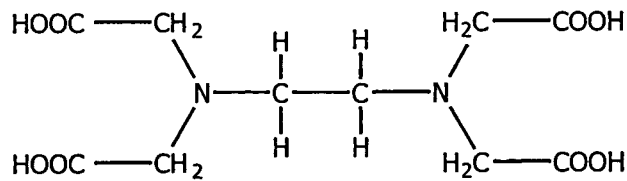
ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของสารคีเลตติงที่สำคัญ

Chelating Agent	MW g/mol)	Acidity Constants					Metal Chelate log (Stability Constant)					
		pK ₁	pK ₂	pK ₃	pK ₄	pK ₅	Cd	Zn	Cu	Pb	Mn ²⁺	Fe ³⁺
Nitrilotriacetic acid (NTA)	191	1.89	2.49	9.73	-	-	10.5	11.2	13.7	11.8	8.1	17
Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA)	292	2.08	3.01	6.4	10.4	-	17.5	17.2	19.7	17.7	14.5	26.5
Diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA)	93	2.08	2.81	4.49	8.73	10.6	20.1	19.7	22.6	21	16.7	29.2

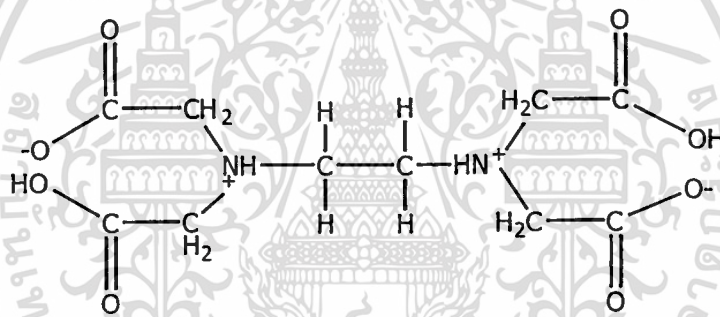
ที่มา :Allen, *et al.* ; 1995

ตัวอย่างสารประเภทคีเลตติงเอเจนต์ คือ โซเดียมอีดีทีเอ (Sodium EDTA; Na₂EDTA) สารประเภท Tertiary amine ที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิลสามารถเกิดสารเชิงซ้อนแบบคีเลตที่เสถียรกับไอออนของโลหะหลายชนิด ที่สำคัญคือ Ethylenediaminetetraacetic acid หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า

EDTA สารนี้ถูกใช้เป็นลิแกนด์เพื่อทำให้เกิดสารเชิงซ้อนแบบคีเลตกับไอออนของโลหะ สูตรโครงสร้างของสารนี้เขียนแสดงได้ดังนี้



สารนี้เป็นกรดอ่อนชนิด Tetraprotic acid มีค่า $K_1 = 1.02 \times 10^{-2}$ $K_2 = 2.14 \times 10^{-3}$ $K_3 = 6.92 \times 10^{-7}$ $K_4 = 5.50 \times 10^{-11}$ ค่าเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า โปรตอนสองตัวแรกจะหลุดได้ง่ายกว่าสองตัวหลังที่เหลือ ในสารละลายของกรดนี้จะมีโครงสร้างเป็นแบบดับเบิลซิทวิทเทอะไอออน (Double Zwitterion)



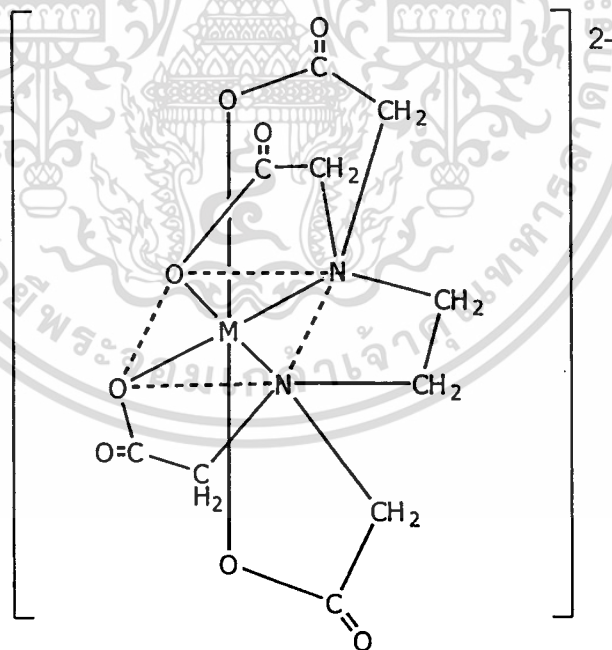
อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของ O แต่ละตัวในหมู่ -OH และของ N ทำให้โมเลกุลของ EDTA เป็นลิแกนด์เฮกซะเดนเตต (Hexadentate ligand) ซึ่งสามารถรวมกับไอออนของโลหะได้สูตรอย่างย่อของ EDTA คือ H_4Y ปกติ H_4Y และเกลือโซเดียมไดไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ชนิดมาตรฐาน ปริมาณที่มีจำหน่ายทั่วไป H_4Y ต้องอบแห้งที่อุณหภูมิ 130-145 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหลายชั่วโมง การละลายของสารนี้ต้องเติมเบสลงไปเล็กน้อยจะเกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ ส่วนเกลือโซเดียมไดไฮเดรตของ EDTA เป็นที่นิยมมาก ถึงแม้มีความชื้นประมาณ 3% แต่ละลายน้ำได้ และเมื่อเก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดโพลีเอทิลีนก็จะเสถียรเป็นเวลาหลายเดือน

การเกิดสารเชิงซ้อนของ EDTA กับไอออนของโลหะ

สมบัติที่ดีของ EDTA คือเป็นลิแกนด์ที่รวมตัวกับไอออนของโลหะส่วนใหญ่ด้วยอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:1 ตัวอย่างเช่น ซิลเวอร์ไอออน และอะลูมิเนียมไอออน เมื่อรวมกับ EDTA จะให้สารเชิงซ้อนดังนี้



สารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเป็นแบบคีเลตที่อยู่ตัวซึ่งเหมาะสมสำหรับงานไทเทรต การที่สารเหล่านี้เสถียรเป็นผลเนื่องมาจากลักษณะการเกิดพันธะทางเคมีของลิแกนด์ที่มีทิศทางทำให้ไอออนของโลหะอยู่ตรงกลางและล้อมรอบด้วยลิแกนด์ ซึ่งทำให้ไอออนของโลหะแยกตัวออกจากโมเลกุลของตัวทำละลายได้ สูตรโครงสร้างของสารเชิงซ้อนของไอออนของโลหะไดวาเลนต์ (Divalent metal ion) บางชนิดกับ EDTA แสดงในรูปที่ 2.7 (ศุภชัย, 2537)



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของสารเชิงซ้อนแบบคีเลตของโลหะไดวาเลนต์กับอีดีทีเอ

2.11.2 การล้างดินด้วยสารประกอบรีดิวซิงเอเจนต์ (Reducing agent)

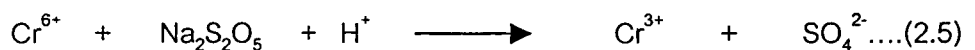
กระบวนการของสารรีดิวซิงเอเจนต์อาศัยปฏิกิริยาการออกซิเดชันทางเคมีโดยทำให้อิเล็กตรอนของรีดิวซิงเอเจนต์มีจำนวนลดลง ซึ่งรีดิวซิงเอเจนต์ จะเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามสารอินทรีย์และโลหะ โดยทั่วไปสารประเภทรีดิวซิงเอเจนต์ เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมเครื่องหนัง เป็นต้น เนื่องจากเหล่านี้มีราคาถูกจึงนำมาใช้ในการล้างดิน แต่ประสิทธิภาพไม่ได้เท่าที่ควร ในปัจจุบันจึงมีการนำสารดังกล่าวมาใช้ควบคู่กับสารประเภทคีเลตติงเอเจนต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการล้างและลดต้นทุนในการกำจัดโลหะหนักออกจากดินและกากตะกอน ตัวอย่างสารประกอบรีดิวซิงเอเจนต์ คือ โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Sodium metabisulfite; $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)

โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) มีน้ำหนักโมเลกุล 190.13 กรัม ความหนาแน่นรวม (bulk density) 1.03-1.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 150 องศาเซลเซียสและมีค่าการละลายได้เท่ากับ 722 มีลักษณะเป็นผลึกแบ่งที่ละเอียดสีขาว มีกลิ่นซัลเฟอร์ไดออกไซด์เล็กน้อย ลักษณะของสารละลาย 20% จะไม่มีสีหรือมีสีเหลืองอ่อน

มีความเป็นพิษต่อสัตว์ทดลอง LD_{50} ต่อหนูแรด (rat) 115 mg/kg และหนูเม้าท์ (mouse) 192 mg/kg ความเป็นพิษกึ่งเฉียบพลันถึงเรื้อรัง เมื่อหายใจเข้าไปก่อให้เกิดการระคายเคืองของเยื่อเมือก ทำให้มีอาการไอและหายใจลำบาก เมื่อกลืนกินจะเกิดอาการระคายเคืองที่เยื่อในปาก หลอดลม หลอดอาหารและระบบลำไส้ (Eckenfelder, 1989)

การใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรม

1. การบำบัดน้ำเสีย ใช้ในขบวนการลดความเค็มจากการนำน้ำทะเลและมหาสมุทรมาผลิตน้ำดื่มในระบบรีเวอร์สออสโมซิส
2. สิ่งแวดล้อม ใช้ลดความเป็นพิษของกรดโครมิกในโรงงานชุบโลหะและฟอกย้อม โดยการรีดิวซ์ Cr(VI) ไปเป็น Cr(III) หรือใช้เป็นสารลดความเป็นพิษของไซยาไนด์ ตัวอย่าง เช่น



3. สิ่งทอ ใช้เป็นสารฟอกย้อมหนังสือ ปอและเส้นใยต่าง ๆ ใช้เป็นสารต่อต้านคลอรีน และทำแถบสี (colors stripper) หรือแม้แต่การพิมพ์
4. Photographic chemical เป็นสารเคมีเกี่ยวกับการถ่ายรูป ใช้ในการทำรูปถ่ายให้คงที่ ทำให้สีไม่ตก
5. อุตสาหกรรมหนัง เป็นสารละลายที่ใช้ในการสกัดหนัง
6. อุตสาหกรรมยาง ใช้ทำยางให้มีความเสถียร
7. อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในการถนอมอาหารและยับยั้งเอนไซม์ในผลไม้แห้ง แยม เยลลี่ และผักที่ถูกทำให้แห้ง น้ำผลไม้สด อาหารทะเล อาหารกระป๋อง ใช้ในโรงงานน้ำตาลและการผลิตไวน์
8. โรงเบียร์ ใช้ฆ่าเชื้อโรคในขบวนการหมักและรักษาคุณภาพ
9. โรงงานเคมี ใช้เป็นสาร Reducing agent ของแอลดีไฮด์และคีโตน (PARSulfite Chemical Company, 2001)

การศึกษาเกี่ยวกับสารเคมีที่นำมาใช้ในการชะล้างโลหะหนักออกจากดินและกากตะกอน ส่วนใหญ่จะเน้นถึงการเปรียบเทียบสารคีเลตกับสารเคมีตัวอื่นที่ใช้ในการสกัด ดังตารางที่ 2.12 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการสกัดขึ้นกับชนิดของดินและส่วนประกอบของสารละลายที่ใช้ในการชะล้าง (Abumizar และ Smith, 1999) ซึ่งการกำจัดโลหะหนักโดยการทำปฏิกิริยากับสารคีเลตมีประสิทธิภาพดีแต่ราคาของสารคีเลตเช่น EDTA แพงมาก ทำให้ยากต่อการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในบริเวณที่มีปัญหาได้ (Allen และ Chen, 1993)

ตารางที่ 2.12 สารเคมีที่ได้มีการนำมาใช้ในการชะล้างโลหะหนักในดิน

ชนิดตัวอย่าง	วิธีการชะล้าง	สารเคมี	โลหะหนัก	ความเข้มข้น (mg/kg)	% Removal	เอกสารอ้างอิง
ดินสังเคราะห์	Batch	HCl	Pb	10-1,000	65-100	Cline และ Reed (1995)
		EDTA			60-100	
		CH ₃ COOH			45	
		CaCl ₂			0-85	
ดินสังเคราะห์	คอลัมน์	Na ₂ S ₂ O ₅	Pb	204	61	Abumaizar และ Khan (1996)
			Zn	79	94	
ดินสังเคราะห์	คอลัมน์	HCl	Pb	500-600	85	Reed et al., (1996)
		EDTA			100	
		CaCl ₂			78	
ดินสังเคราะห์	คอลัมน์	น้ำ DI , Na ₂ S ₂ O ₅ และ Na ₂ EDTA	Cd	603-1231	65-112	Abumaizar และ Smith (1999)
			Cr		10,40	
			Pb		14-104	
			Zn		29-75	

ที่มา : ดัดแปลงจาก Abumizar and Smith, 1999

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cline และ Reed (ค.ศ. 1995) ได้ศึกษาการนำตะกั่วออกจากดินสังเคราะห์โดยใช้เทคนิคการชะล้างดิน (Soil Washing techniques) โดยมีน้ำประปา สารละลาย HCl 0.1 N และ 1.0 N สารละลาย EDTA ($\text{Na}_2\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}_8\text{N}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 0.01 M และ 0.1 M กรดอะซิติก 0.1 N และ 1.0 N สารละลาย CaCl_2 0.1 M และ 1.0 M เป็นสารที่ใช้ชะล้าง ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของสารละลายที่ใช้สกัดเอาตะกั่วออกจากดินเป็นดังนี้คือ น้ำประปา 3% EDTA 92% HCl 89% CH_3COOH 45% และ CaCl_2 36% โดยประสิทธิภาพขึ้นกับระดับความเข้มข้นที่ปนเปื้อนรวมทั้งชนิดของดินที่แตกต่างกันและความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการชะล้าง โดยสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงจะสกัดตะกั่วออกมาได้มากกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสารละลาย HCl ใช้หลักการควบคุมไม่ให้ส่วนประกอบของดินละลายออกมา สารละลาย EDTA ใช้กลไกการเกิดคีเลต และสารละลาย CaCl_2 ใช้การแลกเปลี่ยนไอออน Ca^{2+} หรือการเกิดเป็นสารประกอบกับคลอไรด์ ถึงแม้ว่าการใช้ CaCl_2 จะมีประสิทธิภาพในการสกัดตะกั่วต่ำ แต่ก็ไม่ทำลายโครงสร้างของดินเหมือนกับกรดที่แรง จึงสรุปได้ว่าการนำตะกั่วออกจากดินโดยการชะล้างด้วยสารละลายได้ผลที่ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่ง EDTA แต่อาจได้ผลที่ไม่ดี ในกรณีที่ถูกปนเปื้อนด้วยตะกั่วจากแหล่งกำเนิดต่างกัน

Reed และคณะ (ค.ศ. 1996) ได้ทำการศึกษาการชะล้างดินสังเคราะห์ชนิด sandy loam ที่มีตะกั่วปนเปื้อน โดยใช้ 0.1 N HCl, 0.01 M EDTA และ 1 M CaCl_2 ชะผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง (continuous-flow) ผลการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การชะตะกั่วด้วย 0.1 N HCl, 0.01 M EDTA และ 1 M CaCl_2 เท่ากับ 85%, 100% และ 78% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการชะของ HCl และ CaCl_2 น้อยกว่าที่ควรจะเป็น เพราะตะกั่วที่อยู่ในดินยึดกับดินแน่นมาก ในขณะที่ 0.01 M EDTA สามารถชะเอาตะกั่วที่เดิมมีอยู่ในดินและที่สังเคราะห์เข้าไปออกมาได้ทั้งหมด แต่หากนำไปใช้อาจเกิดผลไม่ดีต่อสุขภาพ จึงยากต่อการนำไปใช้ อีกทั้งค่าพีเอชสุดท้ายของดินกรณีที่ใช้ 0.1 N HCl มีค่าใกล้เคียงกับ 1 จึงเป็นเหตุให้การปนเปื้อนของดินมากขึ้นกว่าเดิมอีก และทำให้การใช้ประโยชน์จากดินลดลง เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและเคมีในดิน ทำให้แร่ธาตุไม่สามารถละลายได้ ส่วนพีเอชสุดท้ายของดินกรณีที่ใช้ 0.01 M EDTA และ 1 M CaCl_2 อยู่ในช่วง 4.85-5.2

Abumaizar และ Khan (ค.ศ. 1996) ทำการศึกษาอิทธิพลของสารอินทรีย์ในดินสังเคราะห์ 2 ชนิด โดยทำการชะล้างตะกั่วและสังกะสีผ่านคอลัมน์ที่มีดินสังเคราะห์สองชนิดบรรจุอยู่ คือ silty clay และ Millpond sludge ที่มีทรายผสมในอัตราส่วน 1:1 โดยดิน silty clay ใช้ น้ำประปาล้างเป็นอันดับแรก แล้วใช้สารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 0.2 M ชะล้างอีกสามครั้ง ตามลำดับ

จากผลการทดลองซึ่งพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การกำจัดในแต่ละขั้นที่ทำการชะสารละลายผ่านจากเอกสารเป็นเอกสารที่ลงวันที่ 10/10/2563 โดยผู้เขียนได้เห็นว่าดินที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่วและสังกะสีนั้นไม่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำประปาแล้วจึงใช้สารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 0.2 M ชะล้างอีกสามครั้ง ตามลำดับ จากผลการทดลองซึ่งพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การกำจัดในแต่ละขั้นที่ทำการชะสารละลายผ่านจากเอกสารเป็นเอกสารที่ลงวันที่ 10/10/2563 โดยผู้เขียนได้เห็นว่าดินที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่วและสังกะสีนั้นไม่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำประปาแล้วจึงใช้สารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 0.2 M ชะล้างอีกสามครั้ง ตามลำดับ

คอลัมน์ พบว่าน้ำประปาสามารถนำตะกั่วและสังกะสีได้ประมาณ 1.3 % ส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วและสังกะสีในดินเท่ากับ 61% และ 94% ตามลำดับ ส่วน Millpond sludge ใช้น้ำประปาล้างเป็นอันดับแรก แล้วตามด้วยสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 0.2 M และ EDTA ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าน้ำประปาไม่สามารถล้างตะกั่วและสังกะสีได้ ส่วน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ล้างตะกั่วและสังกะสีได้เท่ากับ 48 % และ 75 % ตามลำดับ และสารละลาย EDTA สามารถล้างตะกั่วและสังกะสีได้เท่ากับ 70.4 % และ 92.7 % ตามลำดับ ซึ่งเปอร์เซ็นต์การกำจัดในการใช้ EDTA มีค่ามากกว่าการใช้สารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ โดยสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ สามารถชะตะกั่วและสังกะสีที่อยู่ในดินที่มีสารอินทรีย์ต่ำ (Silty Clay) ได้ดีกว่า EDTA 0.05 M และในทางตรงข้ามสารละลาย EDTA 0.05 M สามารถชะตะกั่วและสังกะสีที่อยู่ในดินที่มีสารอินทรีย์สูง (Millpond sludge) ได้ดีกว่า

Abumaizar และ Smith (ค.ศ. 1999) ได้ศึกษาการนำโลหะแคดเมียมออกจากดิน Silty sand สังเคราะห์ ด้วยการชะล้างดินแบบครั้งและแบบคอลัมน์ โดยใช้สารละลายผสมของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 0.1 M กับ Na_2EDTA 0.01 M โดยการทดลองแบบครั้งจะเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนดินหรือกากตะกอน เป็น 1 g ต่อ 5 mL 1 g ต่อ 12.5 mL โดยควบคุมอัตราเร็วในการเขย่า เป็น 175 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง และนำไปปั่นเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 4,000 รอบต่อนาที ผลการทดลองพบว่าที่สัดส่วนสารละลายที่ใช้ในการชะกับดิน 12.5 mL ต่อ 1 g มีประสิทธิภาพในการสกัดมากกว่า 5 mL ต่อ 1 g โดยที่อัตราส่วนดินหรือกากตะกอน เป็น 1 g ต่อ 5 mL สามารถชะโลหะแคดเมียมได้ $101.9 \pm 4.9\%$ ส่วนที่อัตราส่วนดินหรือกากตะกอน 12.5 mL ต่อ 1 g มีประสิทธิภาพการกำจัดลดลง โดยสามารถชะโลหะแคดเมียมได้ $192.3 \pm 5.1\%$ ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์จะบรรจุดิน 9.25 g แล้วผ่านสารละลายปริมาตร 300 mL เข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ด้วยปั๊มที่มีอัตราการไหล 1.2 ± 0.1 mL/min ผลของการทดลองพบว่าสามารถชะโลหะแคดเมียมได้ประมาณ 80% โดยสารเคมีที่ใช้ในการสกัดจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะที่ปนเปื้อนอยู่ โดยการให้สารละลายไหลแบบต่อเนื่องผ่านคอลัมน์ซึ่งช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเป็นสารเชิงซ้อนระหว่างสารเคมีกับโลหะหนัก ป้องกันสารเชิงซ้อนเกิดการดูดซับกลับบนผิวของดินและช่วยทำให้ประสิทธิภาพการนำโลหะออกมาได้มาก จากงานวิจัยของ Abumizar และ Smith พบว่าผลการทดลองที่ได้ในการทดลองแบบคอลัมน์และแบบครั้งที่ใช้กำจัดโลหะแคดเมียมมีประสิทธิภาพที่สูงเหมาะสมต่อการนำไปใช้ แต่ในการทดลองแบบครั้ง ที่ใช้ 0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ และ 0.01 M Na_2EDTA ในการล้างดิน ซึ่งแปรค่าอัตราส่วนดินต่อสารละลายผสมเป็น 1 g ต่อ 5 mL 1 g ต่อ 12.5 mL ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงจาก 101.9 ± 4.9 ไปเป็น 92.3 ± 5.1 ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์ ประสิทธิภาพการกำจัดตอนเริ่มแรกสูงมาก เกือบถึง 80 % เมื่อใช้สารละลายผสมไป 100 mL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเปลี่ยนตัวอย่างดิน โดยเก็บมาจาก 4 แห่ง ได้แก่ ชลบุรี สระบุรี ปทุมธานี และลพบุรี โดยเก็บที่ 2 ระดับความลึก คือ 0-15 และ 15-32 เซนติเมตร และเพิ่มกากตะกอนเข้ามาศึกษาาร่วมด้วย แล้วทำการทดลองล้างดินและกากตะกอนแบบครึ่งและแบบคอลัมน์ด้วยสารละลายผสมที่ความเข้มข้นดังกล่าว โดยในส่วนของ การทดลองแบบครึ่งจะเปลี่ยนอัตราส่วนดินต่อสารละลายผสมเป็น 1 g ต่อ 2.5 mL 1 g ต่อ 5 mL และ 1 g ต่อ 7.5 mL ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราเร็วในการเขย่า อุณหภูมิ เวลาและอัตราการไหลของสารละลายให้คงที่เท่าเดิม เพื่อดูแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมของ Abumizar และ Smith ส่วนในการทดลองแบบคอลัมน์จะทำการเก็บตัวอย่างในช่วงแรกให้เร็วขึ้นจากเดิม เพื่อดูประสิทธิภาพการกำจัดในช่วงแรกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วศึกษาสัดส่วนของโลหะแคดเมียมรูปแบบต่าง ๆ ในดินและกากตะกอนโดยการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นเพิ่มเติม



บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

- 3.1.1.1 บีม (ยี่ห้อ Watson-marlon Bredel)
- 3.1.1.2 ไฮโดรมิเตอร์ มาตรฐาน ASTM No.1.152H อ่านสเกลในหน่วยกรัมต่อลิตร
- 3.1.1.3 แท่งใส่ดิน (Soil core)
- 3.1.1.4 คอลัมน์พลาสติก
- 3.1.1.5 พีเอชมิเตอร์ ยี่ห้อ Denver instrument model 250
- 3.1.1.6 เครื่องอะตอมมิกแอปซอพชั่นสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Shimadzu AA-680
- 3.1.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ยี่ห้อ Precisa 205A
- 3.1.1.8 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ยี่ห้อ Bruker axs รุ่น SRS 3400
- 3.1.1.9 เครื่องออโตซอร์ป-1 ยี่ห้อ Quanta Chrome
- 3.1.1.10 ตะแกรงร่อนขนาด 12 เมช
- 3.1.1.11 เครื่องเขย่าแนวนอน (Horizontal shaker) ยี่ห้อ Julabo รุ่น SW1
- 3.1.1.12 เครื่องปั่นเหวี่ยงพร้อมหลอด ยี่ห้อ Sanyo รุ่น CENTAUR 2
- 3.1.1.13 ตู้อบเครื่องแก้วและสารเคมี
- 3.1.1.14 เครื่องกรองระบบสุญญากาศ ยี่ห้อ Buchi B-169 vacuum-system
- 3.1.1.15 แท่นให้ความร้อน
- 3.1.1.16 เม็ดแก้ว (Glass bead)
- 3.1.1.17 กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร
- 3.1.1.18 กระดาษกรองขนาด 1 ไมโครเมตร
- 3.1.1.19 ขวดพลาสติกใส่สารตัวอย่าง ขนาด 60 และ 100 มิลลิลิตร
- 3.1.1.20 อุปกรณ์ทดลองที่ทำจากพลาสติก

3.1.2 สารเคมี

- 3.1.2.1 โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) A.R. Grade (บริษัท Carlo Erba reagent, USA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1.2.2 โซเดียมอีดีทีเอ (Na_2EDTA) A.R.Grade (บริษัท Carlo Erba reagent, USA)
- 3.1.2.3 แคดเมียมไนเตรท ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) A.R.Grade (บริษัท Fluka, Switzerland)
- 3.1.2.4 ไนตริก (HNO_3) 70% w/w A.R.Grade (บริษัท Ajax Chemical, Australia)
- 3.1.2.5 อะซิติก (CH_3COOH) 100% w/w A.R.Grade (บริษัท BDH Laboratory, England)
- 3.1.2.6 ไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$) 99% w/w Commercial grade (บริษัท Carlo Erba reagent, USA)
- 3.1.2.7 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30% m/m Commercial grade (บริษัท Merck, USA)
- 3.1.2.8 แอมโมเนียมอะซิเตท (NH_4OAc) 98% w/w A.R.Grade (บริษัท J.T. Baker, USA)
- 3.1.2.9 ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 50% w/w Commercial grade (บริษัท Carlo Erba reagent, USA)
- 3.1.2.10 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) A.R.Grade (บริษัท Carlo Erba reagent, USA)
- 3.1.2.11 ไฮโดรคลอริก (HCl) 37% w/w Commercial grade (บริษัท Fisher Chemicals, USA)
- 3.1.2.12 ดิน
- 3.1.2.13 กากตะกอนจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ บางขุนเทียน

3.2 แหล่งที่มาของดิน

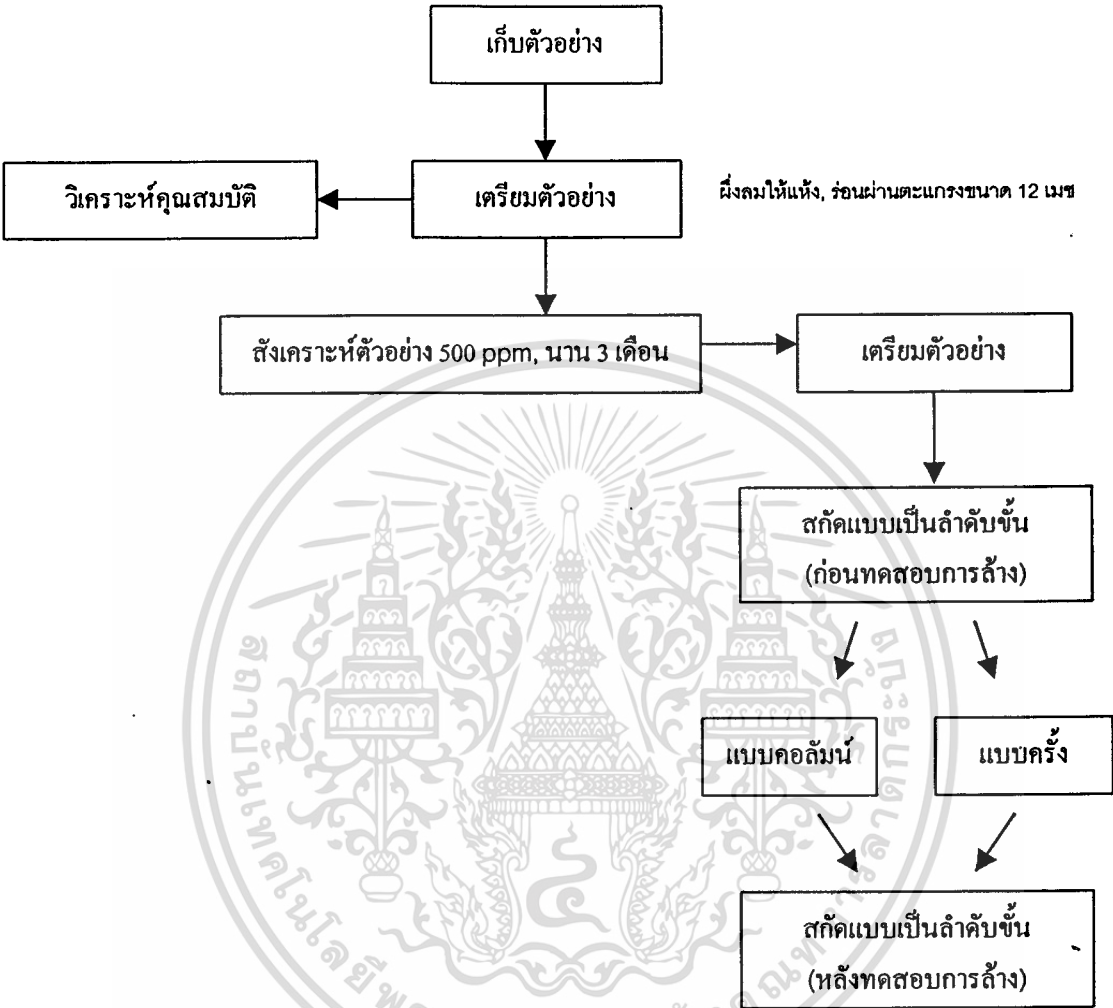
ทำการเก็บตัวอย่างดินที่ 2 ระดับความลึก คือ 0-15 cm และ 15-32 cm จาก 4 จังหวัด ดังนี้

- 3.2.1 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี
- 3.2.2 ตำบลกุดนกเปล้า อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี
- 3.2.3 ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี
- 3.2.4 ตำบลหลุมข้าว อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี

3.3 แหล่งที่มาของกากตะกอน

กากตะกอนที่ใช้ในการทดลองเป็นกากตะกอนของบ่อน้ำบาดน้ำเสียรวมที่นำมาจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ บางขุนเทียน กรุงเทพฯ

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินและกากตะกอน

นำตัวอย่างดินและกากตะกอนที่แห้งแล้วมาร้อนผ่านตะแกรง ขนาด 12 เมช แล้วนำไปเก็บไว้ในภาชนะพลาสติกที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปใช้ในการทดลองเป็นลำดับต่อไป ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินและกากตะกอน

พารามิเตอร์	วิธี/เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์
พีเอช	เครื่องวัดพีเอช
ความหนาแน่นรวม	วิธีแท่งดิน (Core method)
พื้นที่ผิว	เครื่องออโตซอร์ป-1
ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	วิธีทำให้อิ่มตัวด้วยแอมโมเนีย
ปริมาณอินทรีย์สาร	วิธีการออกซิเดชันแบบเปียก
ปริมาณความชื้น	วิธีการวิเมตริก
การกระจายตัวของอนุภาค	เครื่องมือไฮโดรมิเตอร์
ปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์
ปริมาณเหล็กออกไซด์	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์
ปริมาณแมงกานีสออกไซด์	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์
ความเข้มข้นของโลหะแคดเมียม	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

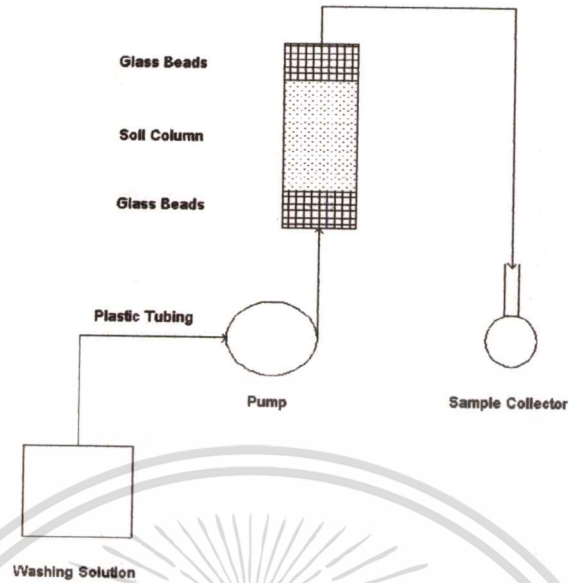
หมายเหตุ : ดูวิธีการทดลองในภาคผนวก ก.

3.6 การสังเคราะห์ดินและกากตะกอน

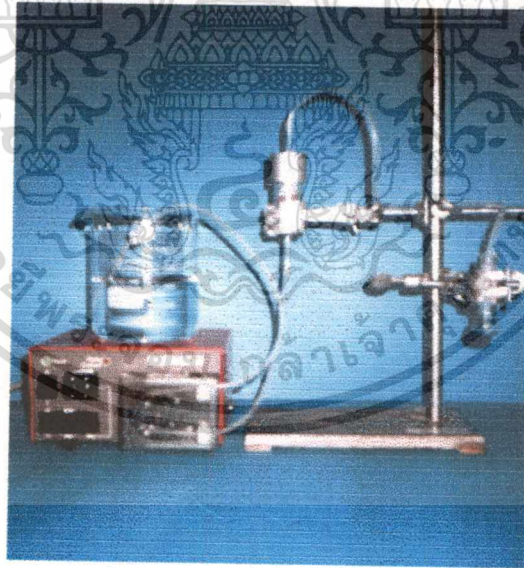
ใส่สารละลายมาตรฐานโลหะแคดเมียมลงในดินและกากตะกอนที่อยู่ในภาชนะพลาสติกให้มีความเข้มข้นเป็น 500 ppm (mg/kg) ผสมรวมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 3 เดือน หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 -105°C แล้วจึงนำไปหาความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมที่มีอยู่ในดินและกากตะกอนสังเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

3.7 ทดสอบการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์แบบคอลัมน์

คอลัมน์ทำด้วยพลาสติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 cm ยาว 7 cm ภายในแบ่งเป็น 3 ส่วน ตรงกลางบรรจุตัวอย่างดินหรือกากตะกอนสังเคราะห์ จำนวน 9.25 g ส่วนชั้นบนและชั้นล่างบรรจุเม็ดแก้ว (glass bead) ดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3



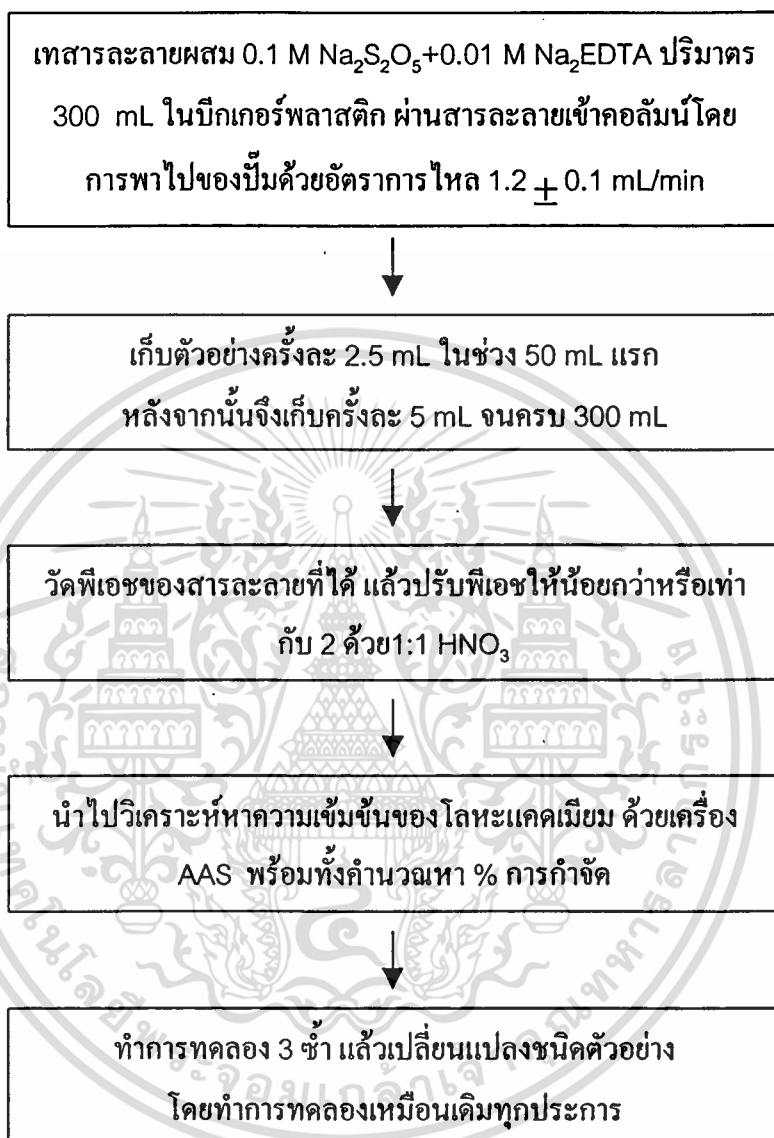
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์แบบคอลัมน์



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์แบบคอลัมน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

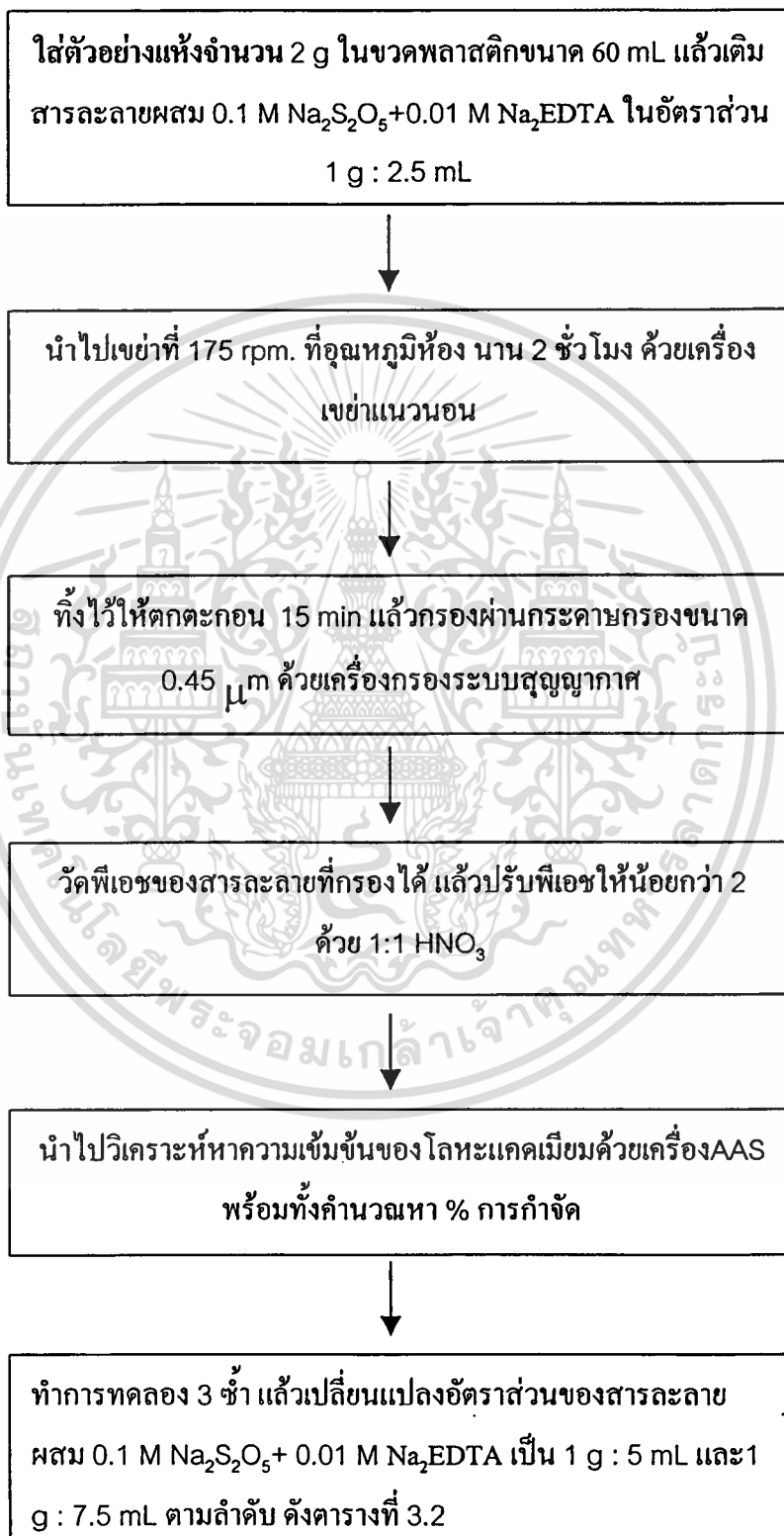
เมื่อบรรจุคอลัมน์ตัวอย่างเรียบร้อยแล้วจึงเริ่มทำการทดลอง ดังนี้



ชนิดตัวอย่างที่ทำการทดลองมีดังนี้

1. ดินชลบุรี ชั้นบน (0 - 15 cm) และ ชั้นล่าง (15 - 32 cm)
2. ดินสระบุรี ชั้นบน (0 - 15 cm) และ ชั้นล่าง (15 - 32 cm)
3. ดินปทุมธานี ชั้นบน (0 - 15 cm) และ ชั้นล่าง (15 - 32 cm)
4. ดินลพบุรี ชั้นบน (0 - 15 cm) และ ชั้นล่าง (15 - 32 cm)
5. กากตะกอน

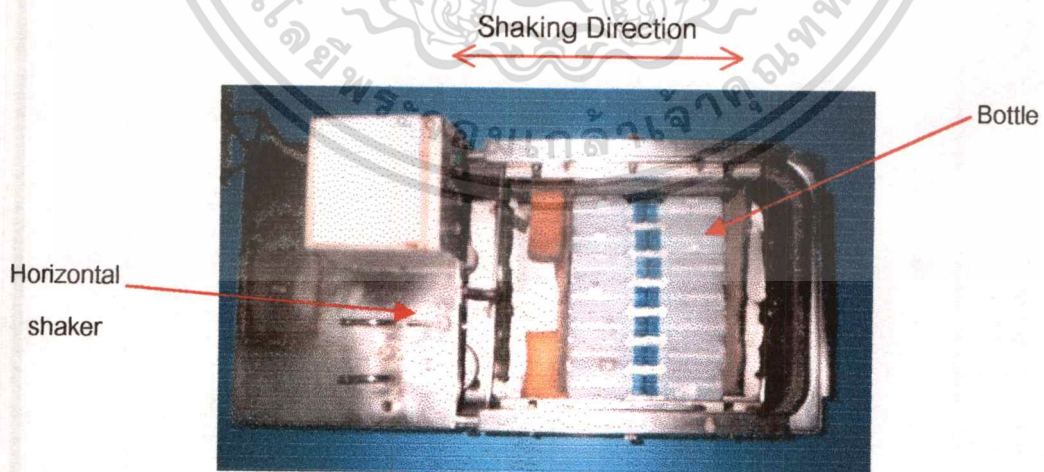
3.8 ทดสอบการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์แบบ ครึ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงการทดสอบการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์แบบครึ่ง

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	จำนวนตัวอย่าง (g)	ชนิดของสารละลาย	ปริมาตรของสารละลาย (mL)
ดินชลบุรี			
0-15	2	0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 0.01 M Na_2EDTA	5, 10, 15
15-32	2	0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 0.01 M Na_2EDTA	5, 10, 15
ดินสระบุรี			
0-15	2	0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 0.01 M Na_2EDTA	5, 10, 15
15-32	2	0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 0.01 M Na_2EDTA	5, 10, 15
ดินปทุมธานี			
0-15	2	0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 0.01 M Na_2EDTA	5, 10, 15
15-32	2	0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 0.01 M Na_2EDTA	5, 10, 15
ดินลพบุรี			
0-15	2	0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 0.01 M Na_2EDTA	5, 10, 15
15-32	2	0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 0.01 M Na_2EDTA	5, 10, 15
กากตะกอน	2	0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 0.01 M Na_2EDTA	5, 10, 15



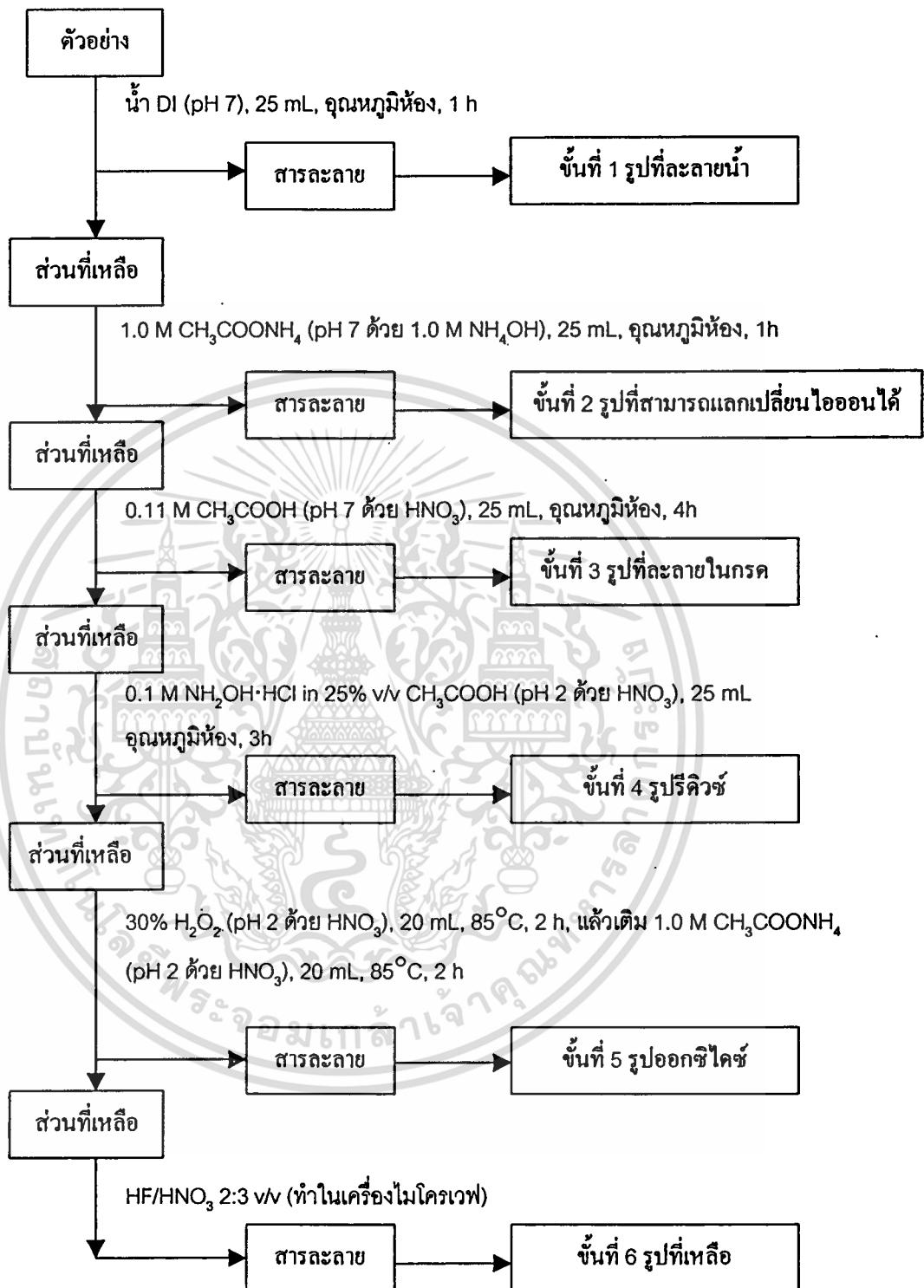
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์แบบครึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction)

นำตัวอย่างดินและกากตะกอนสังเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์แบบคอลัมน์และแบบครั้งที่แห้งแล้วมาทำการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นเพื่อศึกษาสัดส่วนของโลหะแคดเมียมรูปแบบต่างๆ ในดินและกากตะกอนสังเคราะห์ ซึ่งลำดับการสกัดแสดงดังรูปที่ 3.5





รูปที่ 3.5 แสดงการสกัดเคเดเมียรูปแบบต่างๆออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์แบบเป็นลำดับขั้น (ดูวิธีการทดลองในภาคผนวก ข)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินและกากตะกอน

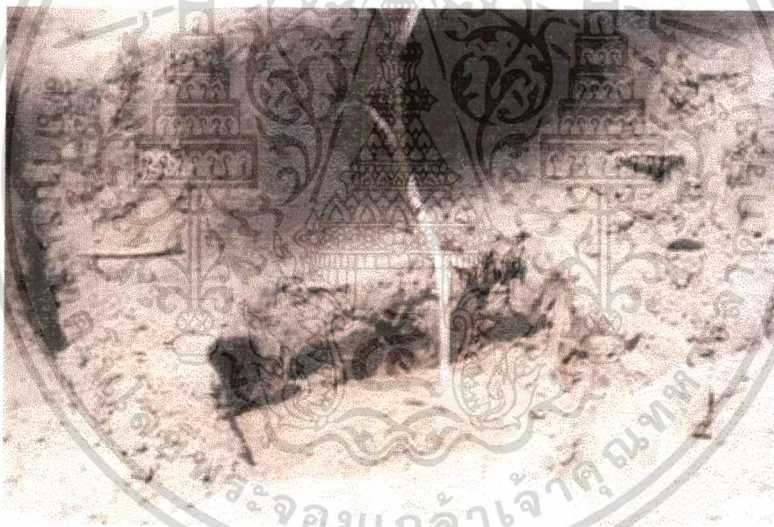
จากการวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินและกากตะกอน พบว่าในดินทั้ง 4 แหล่ง ทั้งสองระดับความลึกมีโลหะแคดเมียมอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก โดยอยู่ในช่วง 0-0.33 ppm ซึ่งเป็นปริมาณที่มีอยู่ในดินตามธรรมชาติ ส่วนกากตะกอนมีปริมาณเท่ากับ 4.77 ppm ดังตารางที่ 4.1

4.1.1 ดินจังหวัดชลบุรี

ลักษณะของเนื้อดินเป็นดินทราย เนื้อหยาบ มีสีเทา สีน้ำตาลอ่อนหรือสีเหลือง มีการระบายน้ำค่อนข้างมากเกินไป จึงทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำและการดูดซับธาตุของดินมีค่าต่ำ ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ปริมาณสารอินทรีย์และค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) จึงมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างดินจังหวัดอื่นๆ ซึ่งประจุบวกในดินที่แลกเปลี่ยนได้ ได้แก่ Na^+ , K^+ , H^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} และ Al^{3+} (Hillel, 1998) โดยพิจารณาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้จากเปอร์เซ็นต์ของ Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ MnO_2 ที่อยู่ในดิน พบว่า Al_2O_3 มีปริมาณที่มากที่สุดที่ดินชนิดนี้ คือเท่ากับ 3.68 เปอร์เซ็นต์ แต่เป็นปริมาณที่ไม่มากจึงทำให้พีเอชมีค่าเป็นกรดอ่อน และเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้น้อยทำให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินจึงต่ำ ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างดินชลบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm



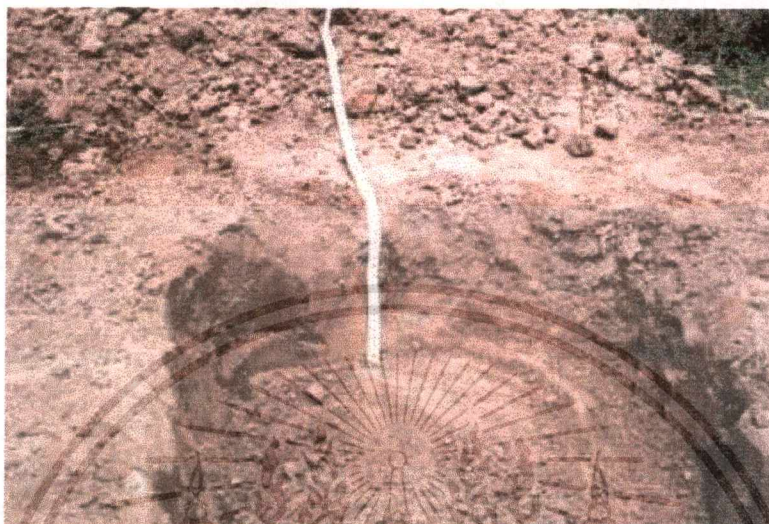
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างดินชลบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm

4.1.2 ดินจังหวัดสระบุรี

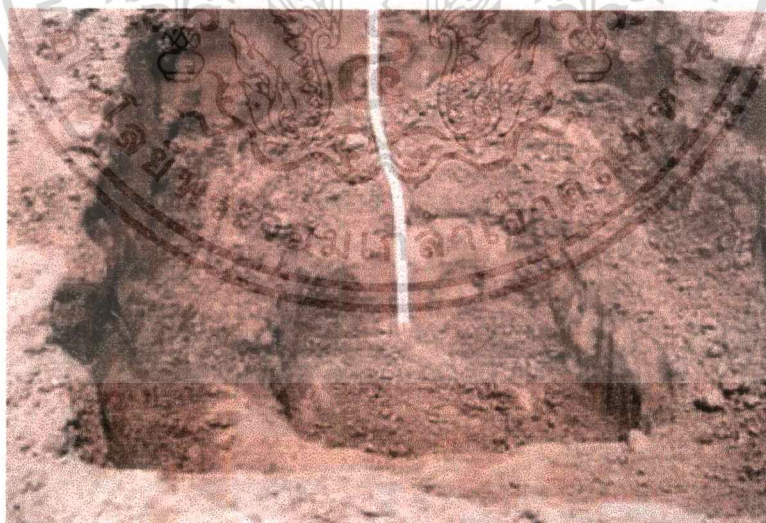
ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) สีดินมีสีน้ำตาลอ่อนหรือสีน้ำตาลปนเทา ในดินชั้นล่าง (15-32 cm) จะพบเหล็กและแมงกานีสละลายปนอยู่มากกว่าดินชั้นบน (0-15 cm) เป็นดินเหนียวคล้ายกับดินจังหวัดชลบุรี จึงทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ คล้ายกัน แต่ดินจังหวัดนี้มีเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรายที่ต่ำกว่า อีกทั้งเปอร์เซ็นต์ของ Al_2O_3 มีปริมาณที่สูงกว่าจึงทำให้ค่า CEC ในดินชนิดนี้มีค่าที่สูงตามไปด้วย ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างดินสระบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างดินสระบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ดินจังหวัดปทุมธานี

ลักษณะของเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียว (clay loam) ดินชั้นบนมีสีดำหรือเทาแก่ และมีจุดประสีน้ำตาล สีเหลือง หรือสีแดงปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก ส่วนดินชั้นล่างจะพบจุดประสีเหลืองฟางข้าวของสารจาโรไซต์ (jarosite) ดินมีเนื้อละเอียดทำให้ปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่าตัวอย่างดินชนิดอื่นๆ ซึ่งลักษณะของเนื้อดินและปริมาณสารอินทรีย์จะเป็นตัวกำหนดค่า CEC ในดิน เนื่องจากดินเหนียวมีอนุภาคที่ขนาดเล็กมากและมีรูปร่างแบน ทำให้โอกาสที่อะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่รอบนอกมีโอกาสหลุดออกไปได้มากขึ้น และเมื่อองค์ประกอบใดเกิดมีการหลุดออกของอะตอมก็จะมีประจุเกิดขึ้นทันที (สรสิทธิ์ และ คณะ, 2535) นอกจากนี้ค่าเปอร์เซ็นต์ Al_2O_3 ยังมีค่าที่สูงกว่าตัวอย่างดินชนิดอื่น จากเหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้ดินจังหวัดปทุมธานีมีค่า CEC สูงกว่าตัวอย่างดินชนิดอื่น ๆ แต่การมีเปอร์เซ็นต์ Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ในปริมาณที่มากจึงเป็นเหตุให้ดินมีความเป็นกรดจัดมาก (เทียนชัย, 2539) ดังรูปที่ 4.5

จากตารางที่ 4.1 พบว่าในดินชั้นบนและดินชั้นล่างมีค่าพีเอชเท่ากับ 2.9 และ 2.72 ตามลำดับ จึงทำให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินค่อนข้างต่ำ



ก

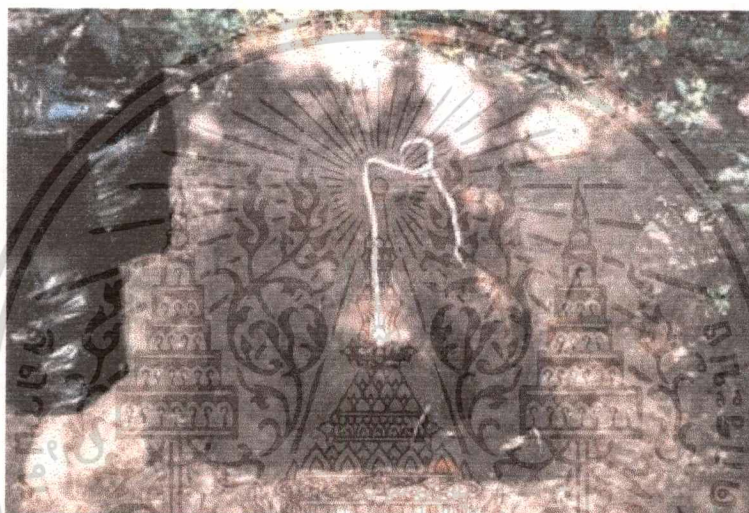


ข

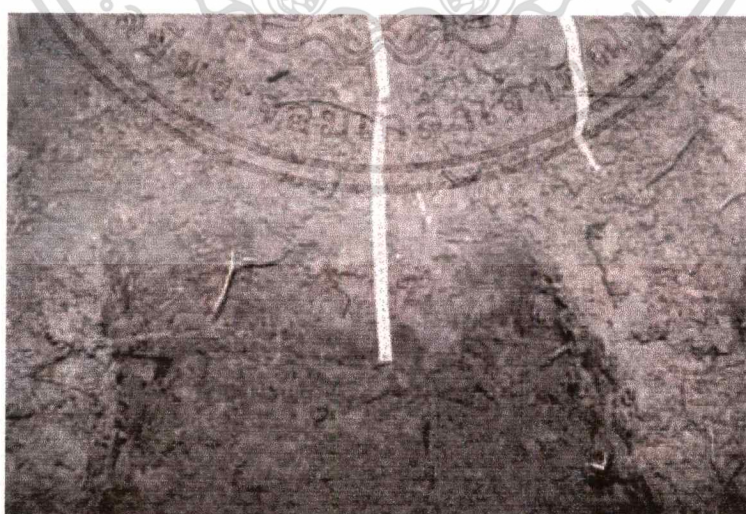
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างดินปทุมธานีที่ระดับความลึก 0-15 cm (ก) และที่ระดับความลึก 15-32 cm (ข)

4.1.4 ดินจังหวัดลพบุรี

ลักษณะของเนื้อดินในดินชั้นบนเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) ส่วนดินชั้นล่างเป็นดินเหนียวปนทราย (sandy clay) สีดินส่วนมากเป็นสีดำหรือสีเทาแก่ เป็นดินเนื้อละเอียด ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในดินสูง คุณสมบัติต่าง ๆ จะคล้ายกับตัวอย่างดินจังหวัดปทุมธานี แต่มีค่าที่ต่ำกว่า ยกเว้นค่าพีเอช โดยมีพีเอชที่เป็นกลาง คือเท่ากับ 7.07 และ 6.48 ในดินชั้นบนและชั้นล่างตามลำดับ เนื่องมาจากค่าของเปอร์เซ็นต์ Al_2O_3 ที่มีค่าต่ำกว่า ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 บริเวณที่เก็บตัวอย่างดินลพบุรี



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างดินลพบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm และ 15-32 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 กากตะกอน

กากตะกอนที่นำมาทำการทดลองเป็นกากตะกอนที่ผ่านกระบวนการบำบัดมาแล้ว จึงทำให้กากตะกอนมีลักษณะที่เฉพาะตัว ไม่สามารถจำแนกประเภทของลักษณะตามตัวอย่างดินได้ แต่ลักษณะที่สามารถสังเกตได้คือ ลักษณะของเนืือกากตะกอนเป็นเนื้อละเอียด มีสีส้มแดง มีปริมาณสารอินทรีย์และค่า CEC ที่สูง คือ เท่ากับ 6.61 เปอร์เซ็นต์ และ 32.76 meq/100g ตามลำดับ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ MnO_2 มีค่าเท่ากับ 2.07, 25.47 และ 0.12 ตามลำดับ สาเหตุที่มีเปอร์เซ็นต์ Fe_2O_3 อยู่ในปริมาณที่สูงเนื่องมาจากกากตะกอนที่นำมาใช้เป็นกากตะกอนของบ่อบำบัดรวมที่ทำการบำบัดโลหะหลายชนิด ซึ่งหนึ่งในจำนวนนั้นมีเหล็กวมอยู่ด้วยจึงทำให้พบเหล็กในปริมาณที่สูง ส่วนค่าพีเอชที่มีค่าสูง คือเท่ากับ 8.64 เป็นเพราะว่ากากตะกอนดังกล่าวได้ผ่านขั้นตอนการทำให้เสถียร เพื่อไม่ให้โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในกากตะกอนเกิดการเคลื่อนที่ไปปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมนั่นเอง ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างกากตะกอน

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินและกากตะกอน

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	pH	D _b	พื้นที่ผิว (m ² /g)	CEC (meq/100g)	OM %	ความชื้น %	การกระจายตัวของอนุภาค (%)			เนื้อดิน	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO ₂ %	Cd (mg/kg)
							sand	silt	clay					
ชลบุรี														
0-15	5.41	1.42	11.12	0.82	0.68	0.13	92.33	4.27	3.99	Sand	3.68	0.46	0.05	-
15-32	5.54	1.76	11.12	1.22	0.26	0.18	86.33	7.83	5.10	Sand	4.18	0.42	0.03	0.02
สระบุรี														
0-15	4.35	1.32	19.41	2.99	0.62	9.55	64.02	19.31	16.74	Sandy loam	9.33	1.78	0.02	0.05
15-32	4.00	1.35	20.44	3.28	0.37	9.94	63.59	18.78	17.51	Sandy loam	10.33	1.80	0.02	0.08
ปทุมธานี														
0-15	2.90	1.35	45.26	20.15	2.18	8.65	43.99	20.34	35.82	Clay loam	22.09	5.96	0.09	0.22
15-32	2.72	1.06	45.74	23.59	1.48	8.92	45.72	16.21	38.05	Clay loam	22.15	5.99	0.09	0.33
ลพบุรี														
0-15	7.07	1.49	43.00	15.98	2.07	5.31	49.83	16.04	33.50	Sandy clay loam	15.46	5.40	0.16	0.09
15-32	6.48	1.39	58.54	18.84	0.98	6.71	56.85	6.84	36.13	Sandy clay	17.27	5.36	0.12	0.11
กากตะกอน	8.54	0.43	37.51	32.76	6.61	16.47	-	-	-	-	2.07	25.47	0.12	4.77

หมายเหตุ : กากตะกอนไม่ได้ทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอน

ชนิดโลหะ	ความเข้มข้น (ppm)
โครเมียม	5,316.73
ทองแดง	1,244.71
เหล็ก	6,687.12
แมงกานีส	315.04
นิกเกิล	1,946.28
ตะกั่ว	178.92
สังกะสี	2,480.86

4.2 การสังเคราะห์ดินและกากตะกอน

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างดินและกากตะกอน พบว่ามีปริมาณโลหะแคดเมียมอยู่ปริมาณที่น้อยมาก จึงได้ทำการสังเคราะห์ดิน โดยเติมสารละลายแคดเมียมจนมีความเข้มข้นเป็น 500 ppm ในดินทิ้งไว้เป็นเวลา 3 เดือน แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมอีกครั้ง โดยใช้เครื่อง AAS พบว่าในดินจังหวัดชลบุรี สระบุรี ปทุมธานีและลพบุรี ที่ระดับความลึก 0-15 cm มีปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 349.2 382.95 295.56 และ 331.38 mg/kg ตามลำดับ และที่ระดับความลึก 15-32 cm มีปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 374.8 349.19 286.67 และ 298.71 mg/kg ตามลำดับ ส่วนกากตะกอนมีปริมาณแคดเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 4.77 mg/kg ซึ่งมีค่าที่ต่ำ ดังนั้นจึงทำการสังเคราะห์กากตะกอนโดยใช้ความเข้มข้นเดียวกับดินทั้ง 4 แหล่ง แล้ววิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม พบว่ามีค่าเท่ากับ 328.01 mg/kg

พบว่าความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมที่วิเคราะห์ได้จากดินและกากตะกอนสังเคราะห์มีค่าที่ต่ำกว่าความเข้มข้นที่ใส่ลงไป อาจเนื่องมาจาก

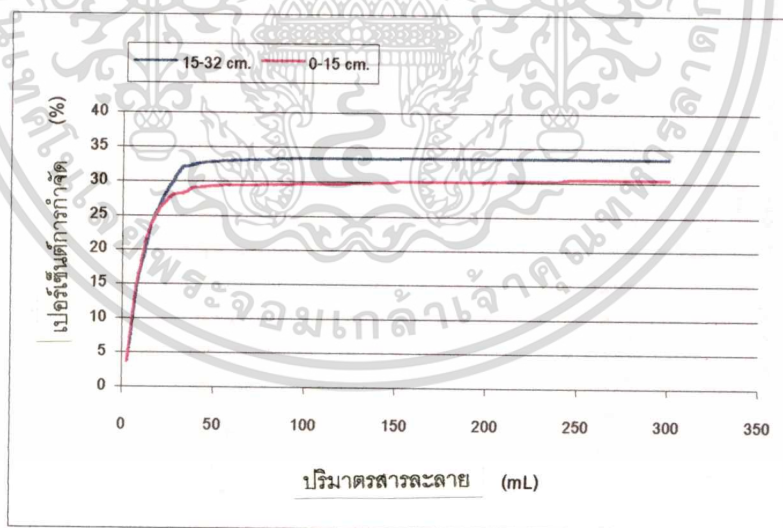
- 1. โลหะแคดเมียมที่เติมลงไปไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับดินและกากตะกอน ทำให้เมื่อทำการสุ่มตัวอย่างในแต่ละซ้ำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมและหาค่าเฉลี่ยจึงมีความเข้มข้นที่ต่ำ
- 2. โลหะแคดเมียมดูดซับอยู่กับอนุภาคของดินและกากตะกอนได้ไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้โลหะแคดเมียมบางส่วนไม่เกาะอยู่กับอนุภาคของดินและกากตะกอน

3. ดินและกากตะกอนมีขีดความสามารถในการดูดซับโลหะแคดเมียมที่จำกัด โดยตัวดูดซับในดินก็คืออนุภาคดินเหนียวและสารอินทรีย์ซึ่งมีขนาดเล็กมากทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับสูง ดังนั้นเมื่อใช้ดินที่มาจากแหล่งที่แตกต่างกัน การดูดซับโลหะแคดเมียมของดินแต่ละชนิดก็ควรมีค่าที่แตกต่างกัน

4.3 การทดสอบการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์

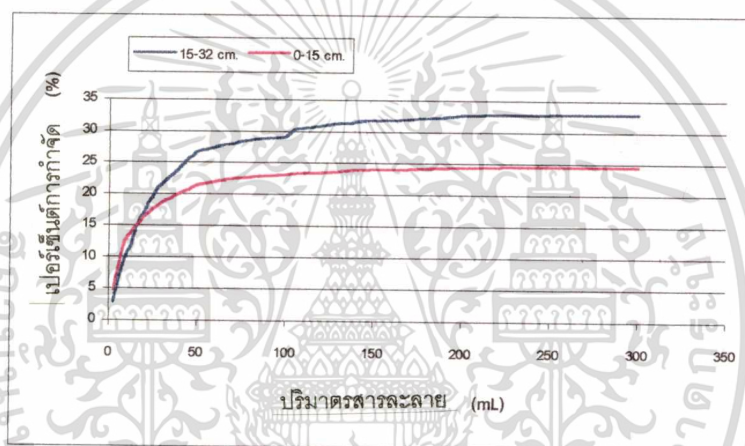
4.3.1 การทดสอบแบบคอลัมน์ (column test)

การทดสอบหาประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมแบบคอลัมน์นี้ใช้สารละลายผสมของ 0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ และ 0.01 M Na_2EDTA ปริมาตร 300 mL โดยให้ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุดิน (หรือกากตะกอน) 9.25 g ทางด้านล่าง ด้วยปั๊มที่มีอัตราการไหล 1 mL/min แล้วเก็บตัวอย่างครั้งละ 2.5 mL ในช่วง 50 mL แรก ส่วนตัวอย่างที่เหลือจะเก็บครั้งละ 5 mL แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS พร้อมทั้งหาเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียม เพื่อหาประสิทธิภาพในการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์ โดยดูจากเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียม ผลการทดลองแสดงได้ดังนี้



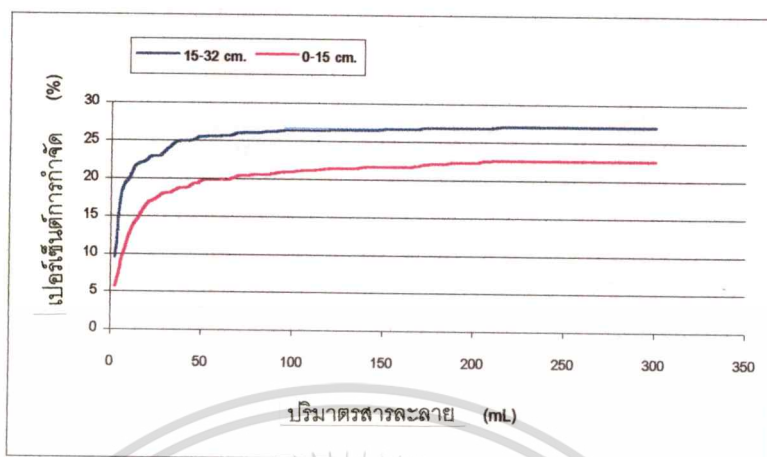
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมของตัวอย่างดินจังหวัดชลบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm และ 15-32 cm

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมทั้งสองระดับความลึกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-35 mL โดยที่ระดับความลึก 0-15 cm เริ่มคงที่ที่ 35 mL โดยมีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมเท่ากับ 29.48 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้นก็ยิ่งเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย และเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมในดินชลบุรีได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 30.42 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ระดับความลึก 15-32 cm มีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมสูงกว่าที่ระดับความลึก 0-15 cm โดยเริ่มคงที่ที่ 35 mL มีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมเท่ากับ 32.07 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้นก็ยิ่งเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย และเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมในดินชลบุรีได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 33.39 เปอร์เซ็นต์



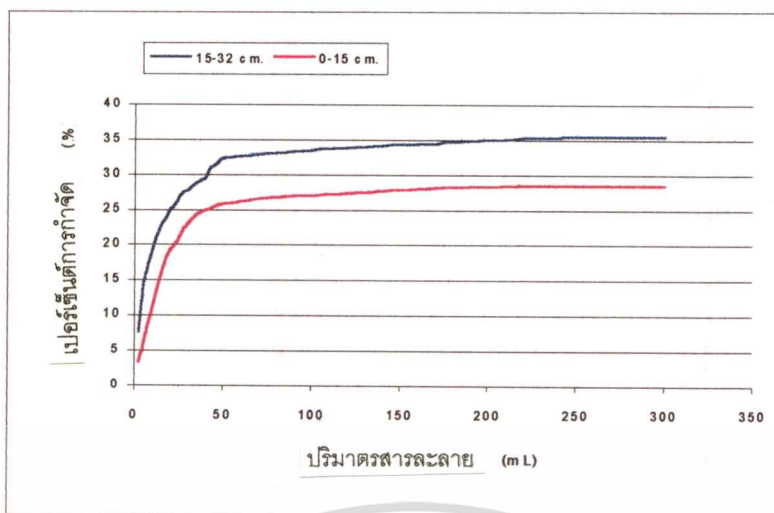
รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมของตัวอย่างดินจังหวัดสระบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm และ 15-32 cm

จากรูปที่ 4.10 พบว่าเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมทั้งสองระดับความลึกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-100 mL โดยที่ระดับความลึก 0-15 cm เริ่มคงที่ที่ 100 mL โดยมีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมเท่ากับ 23.04 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้นก็ยิ่งเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย และเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมในดินสระบุรีได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 24.40 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ระดับความลึก 15-32 cm มีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมสูงกว่าที่ระดับความลึก 0-15 cm โดยเริ่มคงที่ที่ 100 mL มีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมเท่ากับ 29.13 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้นก็ยิ่งเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย และเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมในดินสระบุรีได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 32.76 เปอร์เซ็นต์



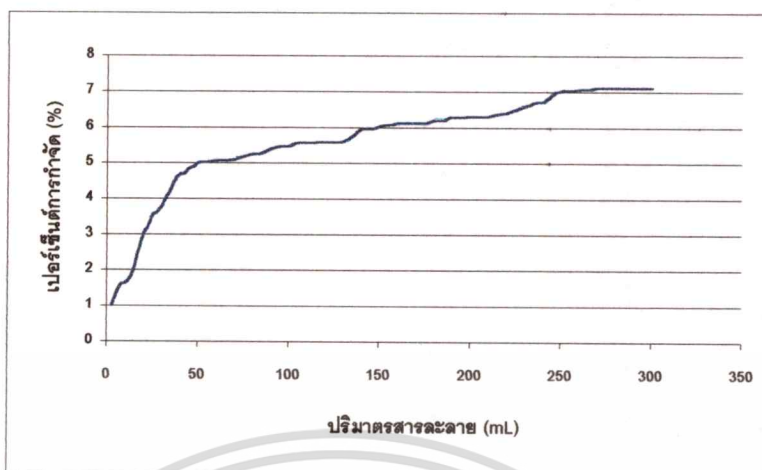
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการชะโลหะแคว่เมี่ยมของตัวอย่างดินจังหวัดปทุมธานีที่ระดับความลึก 0-15 cm และ 15-32 cm

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคว่เมี่ยมทั้งสองระดับความลึกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-50 mL โดยที่ระดับความลึก 0-15 cm เริ่มคงที่ที่ 50 mL โดยมีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคว่เมี่ยมเท่ากับ 19.73 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย และเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคว่เมี่ยมที่สามารถชะโลหะแคว่เมี่ยมในดินปทุมธานีได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 22.52 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ระดับความลึก 15-32 cm มีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคว่เมี่ยมสูงกว่าที่ระดับความลึก 0-15 cm โดยเริ่มคงที่ที่ 50 mL มีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคว่เมี่ยมเท่ากับ 25.53 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย และเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคว่เมี่ยมที่สามารถกักน้ำในดินปทุมธานีได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 27.05 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมของตัวอย่างดินจังหวัดลพบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm และ 15-32 cm

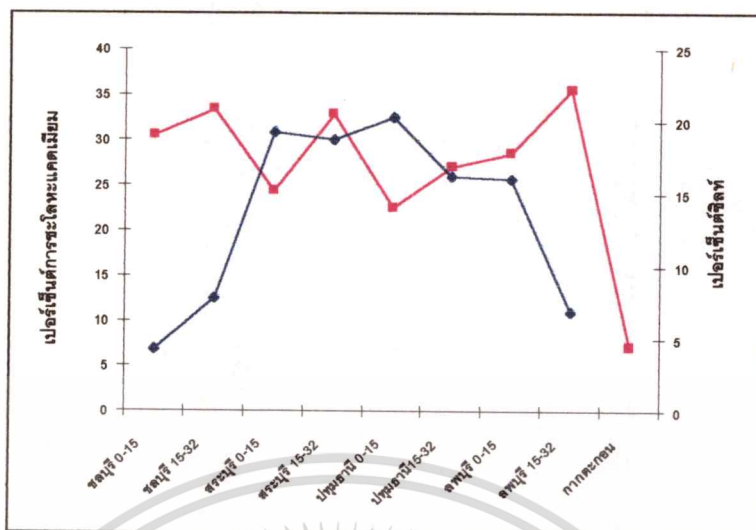
จากรูปที่ 4.12 พบว่าเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมทั้งสองระดับความลึกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-50 mL โดยที่ระดับความลึก 0-15 cm เริ่มคงที่ที่ 50 mL โดยมีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมเท่ากับ 25.81 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย และเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่สามารถชะโลหะแคดเมียมในดินลพบุรีได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 28.52 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ระดับความลึก 15-32 cm มีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมสูงกว่าที่ระดับความลึก 0-15 cm โดยเริ่มคงที่ที่ 50 mL มีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมเท่ากับ 32.32 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย และเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมในดินลพบุรีได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 35.49 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมของกากตะกอน

จากรูปที่ 4.13 พบว่าเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมของกากตะกอน เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-50 mL โดยมีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมเท่ากับ 5.01 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นไปอีกจนถึงปริมาตร 300 mL หลังจากนั้นก็ยังคงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย โดยเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่สามารถชะโลหะแคดเมียมออกจากกากตะกอนได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 7.12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่ได้จากตัวอย่างดินทั้งสี่ชนิด

และจากรูปที่ 4.9-4.12 ยังพบอีกว่าเส้นกราฟของตัวอย่างดินทั้งสี่ชนิดมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและหลังจากนั้นก็คงที่ ส่วนกากตะกอนพบว่าเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเช่นเดียวกันกับตัวอย่างดิน แต่หลังจากนั้นเส้นกราฟมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารละลายผสมมากขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพในการชะโลหะแคดเมียมออกจากตัวอย่างดินในแต่ละจังหวัด ทั้งสองระดับความลึก ตัวอย่างดินชั้นล่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวอย่างดินชั้นบน เนื่องมาจากการที่ตัวอย่างดินชั้นล่างมีค่า CEC และเปอร์เซ็นต์ clay ในดินสูงกว่าตัวอย่างดินชั้นบน จึงทำให้การแลกเปลี่ยนของประจุบวกมีได้มากกว่า อีกทั้งจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS version 9.01 ที่มีระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) (ตารางที่ ง.1 - ง.5 ในภาคผนวก ง) พบว่าเปอร์เซ็นต์ silt ในดินมีผลต่อการชะล้างดินแบบคอลัมน์



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมแบบคอลัมน์เปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ซิลท์

ซึ่งจากรูปที่ 4.14 จะพบว่ายิ่งเปอร์เซ็นต์ของซิลท์มากเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมจะมีค่าที่น้อยลง โดยดินชลบุรีทั้งสองระดับความลึก และดินลพบุรีที่ระดับความลึก 5-32 cm มีเปอร์เซ็นต์ซิลท์ที่ค่อนข้างต่ำ คืออยู่ในช่วง 4.27-7.83 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมมีค่าที่สูง ส่วนในตัวอย่างดินสระบุรี ปทุมธานี ทั้งสองระดับความลึกและดินลพบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm มีเปอร์เซ็นต์ซิลท์ที่สูง ซึ่งอยู่ในช่วง 16.04-20.34 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมมีค่าที่ต่ำ

แต่เปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่ได้ยังมีค่าที่ต่ำมาก อาจเนื่องมาจาก

1. การชะล้างด้วยวิธีแบบคอลัมน์ใช้ระยะเวลาสั้นจึงมีโอกาสดังโลหะแคดเมียมจะเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอเนตและซิลไฟต์ขึ้นได้ (Allen และ Chen, 1993)
2. การใช้ปริมาณสารละลายที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ย้อนกลับได้อีก เพราะในสารละลายมีแคดเมียมไอออนอยู่แล้ว ทำให้แคดเมียมไอออนหลุดออกจากดินได้ยากขึ้น จึงเป็นเหตุให้เปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมมีค่าที่ต่ำ

ส่วนประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมออกจากกากตะกอน พบว่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าที่ต่ำมาก คือเท่ากับ 7.12 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เนื่องมาจาก

1. กากตะกอนมีสารอินทรีย์ที่สูง ทำให้โอกาสที่สารละลายไฮดรอกไซด์เมตาไบซิลไฟต์จะเข้าไปรีดิวซ์หรือลดแรงพันธะที่โลหะแคดเมียมเกาะอยู่กับดินนั้นยากขึ้น (Abumizar และ Smith, 1999)

2. ค่าพีเอชที่สูงคือเท่ากับ 8.04 โลหะแคดเมียมในกากตะกอนจะอยู่ในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนมาก (มันลิน, 2542) เมื่อทำการชะล้างด้วยสารละลายที่มี Na_2EDTA รวมอยู่ด้วย จึงไม่สามารถเข้าไปแทนที่ไฮดรอกไซด์และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกับอีดีทีเอได้ และถึงแม้ไอออนของโลหะแคดเมียมในตะกอนไฮดรอกไซด์จะกลับละลายลงมาสู่สารละลายโดยเกิดไอออนเชิงซ้อนกับอีดีทีเอ แต่อัตราเร็วของปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ามาก (ศุภชัย, 2539) จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมของกากตะกอนมีค่าที่ต่ำมาก
3. การชะล้างด้วยวิธีแบบคอลัมน์ใช้ระยะเวลาานจึงมีโอกาที่โลหะแคดเมียมจะเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอเนตและซัลไฟด์ขึ้นได้ (Allen และ Chen, 1993)
4. ผลของโลหะตัวอื่นที่อยู่ในกากตะกอน เช่น โครเมียม สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอีดีทีเอได้ดีในช่วงพีเอชที่ใช้ในการทดลอง (พีเอช 6-7)

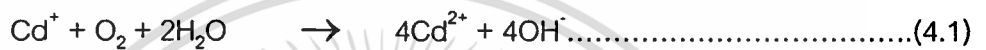
4.3.2 การทดสอบแบบครั้ง (batch test)

ขั้นตอนนี้เป็น การทดสอบหาประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมแบบครั้ง โดยใช้สารละลายผสมของ 0.1 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ และ 0.01 M Na_2EDTA ซึ่งแปรค่าอัตราส่วนตัวอย่างดิน (หรือกากตะกอน) ต่อสารละลายเป็น 1 g ต่อ 2.5 mL 1 g ต่อ 5 mL และ 1 g ต่อ 7.5 mL ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราเร็วในการเขย่าเป็น 175 rpm เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง และนำไปปั่นเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 4,000 rpm แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS พร้อมทั้งหาเปอร์เซ็นต์การชะล้างโลหะแคดเมียม เพื่อหาประสิทธิภาพในการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอน โดยดูจากเปอร์เซ็นต์การชะล้างโลหะแคดเมียม ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างดินทุกชนิดมีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การชะล้างโลหะแคดเมียมลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของดินต่อสารละลายมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Abumizar และ Smith (1999) อาจเนื่องมาจากการเพิ่มสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ มากขึ้น ทำให้โลหะแคดเมียมตกตะกอนเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ จึงเป็นเหตุให้แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การชะล้างโลหะแคดเมียมมีแนวโน้มที่ลดลง โดยตัวอย่างดินชั้นล่างจะมีเปอร์เซ็นต์การชะล้างโลหะแคดเมียมมากกว่าดินชั้นบน เนื่องจากคุณสมบัติของตัวอย่างดินและสารละลาย ซึ่งค่า CEC ของตัวอย่างดินชั้นล่างจะมีค่าที่มากกว่าตัวอย่างดินชั้นบน ทำให้การแลกเปลี่ยนประจุบวกเกิดขึ้นได้มากกว่า และจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS version 9.01 ที่มีระดับความเชื่อมั่น 95% การวิเคราะห์การถดถอย พบว่าเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์มีผลต่อการชะล้างด้วยวิธีแบบครั้งมากที่สุด (ตารางที่ ๖.6 – ๖.8 ภาค

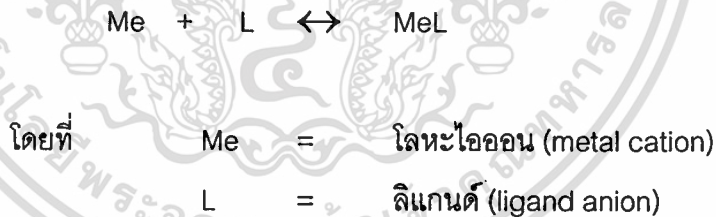
ผนวก ง) ซึ่งเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ในดินชั้นล่างมีค่าน้อยกว่าดินชั้นบน โดยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันในดินได้ดี เมื่อดินมีเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ที่ต่ำ ซึ่งสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์จะทำหน้าที่ 2 แบบ คือ

1. สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์จะปรีดิทซ์ให้ Cd^{2+} เปลี่ยนเป็น Cd^+ ซึ่งเป็นรูปที่ไม่เสถียร ทำให้หลุดออกจากดินได้ง่ายแล้ว Cd^+ ยังสามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนกลายเป็น Cd^{2+} (King, 1994) ทำให้สามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับอิตีทีเอได้ ดังสมการที่ 4.1



2. สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ลดแรงระหว่างพันธะขององค์ประกอบในดินที่โลหะแคดเมียมยึดเกาะอยู่ทำให้โลหะแคดเมียมหลุดออกจากดินมาอยู่ในสารละลาย แล้วเข้าทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับสารละลายโซเดียมอิตีทีเอได้ง่ายขึ้น

โดยสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นนั้นสามารถละลายน้ำได้ ซึ่งมีกลไกดังสมการ



ซึ่งการสกัดโลหะออกจากดินโดยการเกิดเป็นสารเชิงซ้อนนี้จะได้ผลดีต้องแข่งกับการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการดังนี้คือ

1. การตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนต
2. การเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่ผิว (surface complexation) แล้วตกตะกอนบนอนุภาคของดิน (Abumizar และ Smith, 1999)

ส่วนกรณีของกากตะกอน ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนกับสารละลายมากขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์การชะล้างโลหะแคดเมียมมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องมาจากการเพิ่ม

สารละลายจะไปช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น ซึ่งอาจจะไม่สมบูรณ์ เพราะสารละลายจะเข้าไปล้อมรอบอนุภาคของกากตะกอนไว้ และเมื่อทำการเขย่าจะทำให้โลหะแคดเมียมหลุดออกมาจากอนุภาคของกากตะกอนได้ แต่เปอร์เซ็นต์การชะล้างโลหะแคดเมียมยังคงมีค่าต่ำเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตัวอย่างดินชนิดต่างๆ อาจเป็นเพราะ

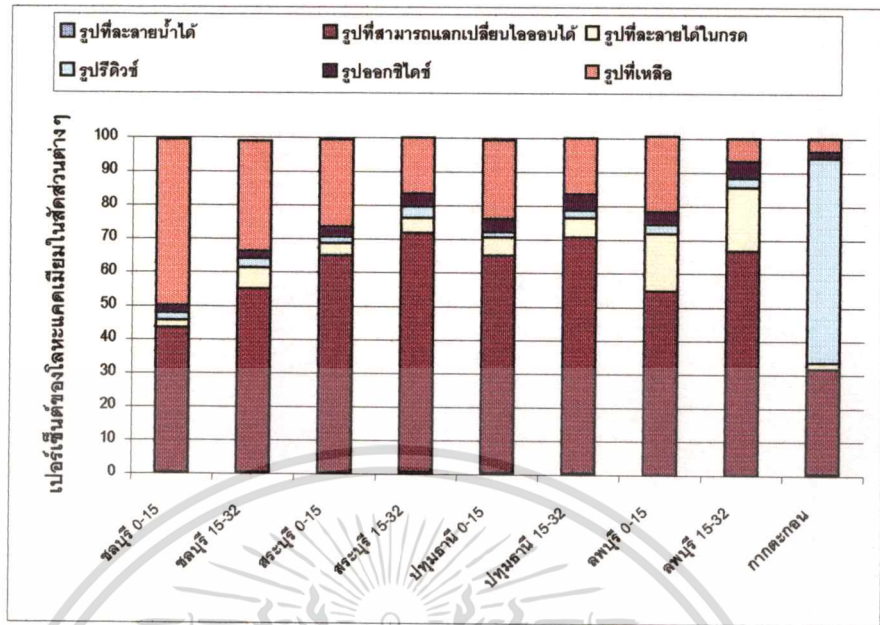
1. กากตะกอนมีเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์สูงถึง 6.61 เปอร์เซ็นต์ และโลหะแคดเมียมถูกดูดซับอยู่กับสารอินทรีย์ในกากตะกอนด้วยพลังงานที่แข็งแรง (high energy) จึงทำให้สารละลายโซเดียมเมตาโบซัลไฟด์ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้แต่ก็มีบางส่วนที่เกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับโซเดียมอิตีที่เอได้ เมื่อแรงดึงดูดของโซเดียมอิตีที่เอกับโลหะแคดเมียมมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารอินทรีย์กับโลหะแคดเมียม ซึ่งจะทำให้โลหะแคดเมียมหลุดออกจากกากตะกอนได้บ้าง (Abumizar และ Smith, 1999)
2. สารละลายโซเดียมเมตาโบซัลไฟด์ไปฟอร์มตัวกับโลหะแคดเมียมเป็นแคดเมียมซัลไฟด์จึงทำให้ตกตะกอน การที่สารละลายโซเดียมอิตีที่เอจะเข้าไปทำปฏิกิริยาจึงเป็นไปได้ยาก
3. ผลของโลหะตัวอื่นที่อยู่ในกากตะกอน เช่น โคโรเมียม สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอิตีที่เอได้ดีในช่วงพีเอชที่ใช้ในการทดลอง (พีเอช 6-7)

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมแบบครึ่ง

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	เปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียม		
	อัตราส่วน 1 g : 2.5 mL	อัตราส่วน 1 g : 5 mL	อัตราส่วน 1 g : 7.5 mL
ดินชลบุรี			
0-15	86.43	76.59	75.04
15-32	92.86	90.39	75.87
ดินสระบุรี			
0-15	77.74	73.83	68.45
15-32	85.21	82.09	76.11
ดินปทุมธานี			
0-15	82.22	79.37	78.28
15-32	93.12	89.2	80.27
ดินลพบุรี			
0-15	67.83	67.13	62.04
15-32	97.3	87.69	83.72
กากตะกอน	7.29	12.7	17.13

4.4 การศึกษาสัดส่วนของโลหะแคดเมียมรูปต่าง ๆ ในดินและกากตะกอน โดยการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (sequential extraction)

ขั้นตอนนี้เป็นกรนำวิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น 6 ขั้น มาใช้เพื่อแยกโลหะที่สนใจออกเป็น ส่วน ๆ ตามการใช้สารละลายสกัดที่มีความแรงเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งปริมาณของโลหะที่ออกมาในแต่ละขั้นสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมของโลหะแคดเมียมในตัวอย่างได้ โดยทำการทดลองทั้งก่อนและ หลังการชะล้างโลหะออกจากดินและกากตะกอนในแบบต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงดังนี้

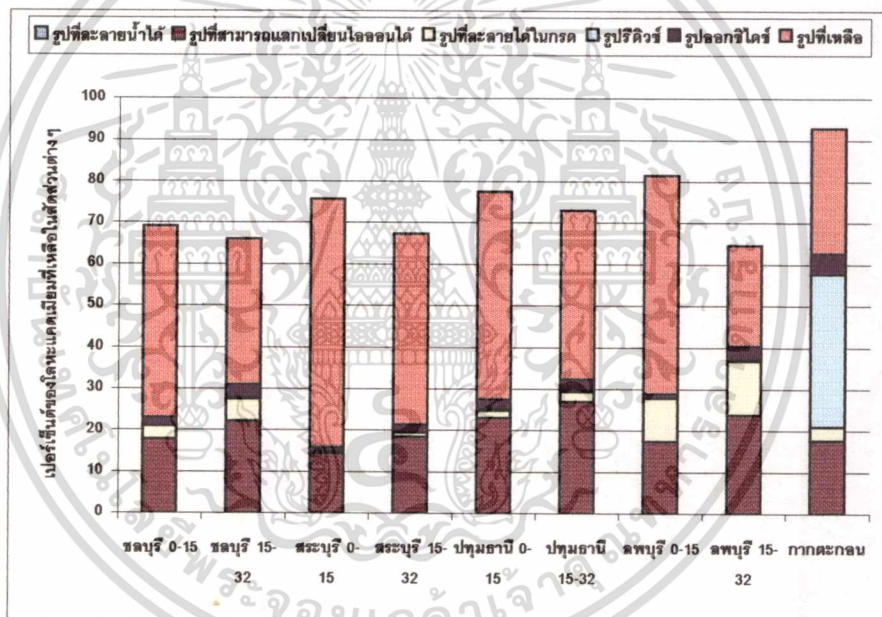


รูปที่ 4.15 สัดส่วนโลหะแคดเมียมในดินและกากตะกอนก่อนการชะล้าง

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นก่อนทำการชะล้างโลหะแคดเมียม พบว่า ก่อนทำการชะล้างตัวอย่างดินทั้งสี่ชนิด ทั้งสองระดับความลึก มีโลหะแคดเมียมอยู่ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้มากที่สุด ซึ่งอยู่ในช่วง 43.3-71 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเป็นรูปที่เหลือ โดยอยู่ในช่วง 6.7-49.2 เปอร์เซ็นต์ (ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 53 ในภาคผนวก ค)

เมื่อทำการชะล้างดิน (รูปที่ 4.16) พบว่าในดินชลบุรีโลหะแคดเมียมในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ถูกชะออกมามากที่สุดแม้จะไม่ทั้งหมด เนื่องจากโลหะแคดเมียมยึดเกาะอยู่กับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วยพันธะที่อ่อน ซึ่งเป็นรูปที่สามารถชะโลหะแคดเมียมออกมาได้โดยง่าย โดยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์สามารถที่จะไปรีดิวซ์หรือลดแรงพันธะของโลหะแคดเมียมที่เกาะอยู่กับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในดินให้หลุดออกมาได้โดยง่าย ทำให้สารละลายโซเดียมซัลไฟต์ที่เอ่ได้ดี โลหะแคดเมียมจึงถูกชะออกมาได้โดยง่าย โดยชะได้ประมาณ 59 เปอร์เซ็นต์จากที่มีอยู่เดิม ส่วนโลหะแคดเมียมในรูปที่ละลายน้ำได้และรูปปริติวท์ แม้จะมีปริมาณน้อยในดินแต่ก็ถูกชะออกมาได้ทั้งหมดโดยโลหะแคดเมียมรูปที่ละลายน้ำได้อาศัยน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ดีในการชะล้าง ส่วนโลหะแคดเมียมรูปปริติวท์ ซึ่งโลหะแคดเมียมยึดเกาะอยู่กับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่ใช้ในการชะล้างจะไปรีดิวซ์หรือลดแรงพันธะของโลหะแคดเมียมที่เกาะอยู่กับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ให้สามารถจับกับสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ที่เอ่ได้ดีขึ้นทำให้ไม่มี

โลหะแคดเมียมที่สามารถละลายน้ำได้และยึดเกาะอยู่กับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์เหลืออยู่ในดินหลังทำการชะล้าง โลหะแคดเมียมรูปที่เหลือนและรูปที่ละลายได้ในกรดก็ถูกชะออกมาได้บ้าง แต่เมื่อเทียบกับปริมาณที่มีอยู่เดิมในดินถือว่าชะได้น้อยมาก เนื่องจากโลหะแคดเมียมในรูปที่เหลือนและรูปที่ละลายได้ในกรดจะเป็นพวกซิลิเกตและคาร์บอเนตซึ่งมีโครงสร้างที่แข็งแรงยากต่อการสกัด โลหะแคดเมียมออกมาได้ง่ายด้วยสารละลายที่ใช้ในการชะล้าง ส่วนโลหะแคดเมียมรูปออกซิไดซ์ไม่สามารถชะออกมาได้เลย เนื่องจากโลหะแคดเมียมยึดติดอยู่กับซัลไฟด์และออกไซด์ในดินด้วยกลไกหลายชนิดเช่น การดูดซับ การเกิดสารเชิงซ้อนและการเกิดคิเลต จึงยากที่สารละลายไซเดียมเมตาไบซัลไฟด์และสารละลายไซเดียมอิตีที่เอทีจะใช้จะไปทำปฏิกิริยาและพอร์มตัวด้วยทำให้ยากต่อการชะโลหะรูปนี้จึงยังคงอยู่ในดินชนิดนี้

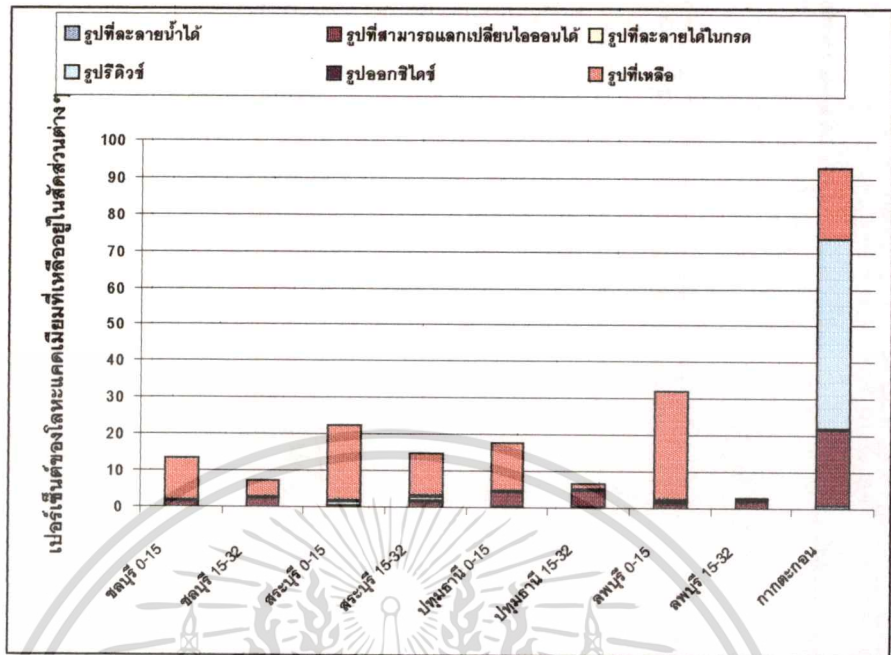


รูปที่ 4.16 สัดส่วนโลหะแคดเมียมในดินและกากตะกอนหลังการล้างแบบคอลัมน์

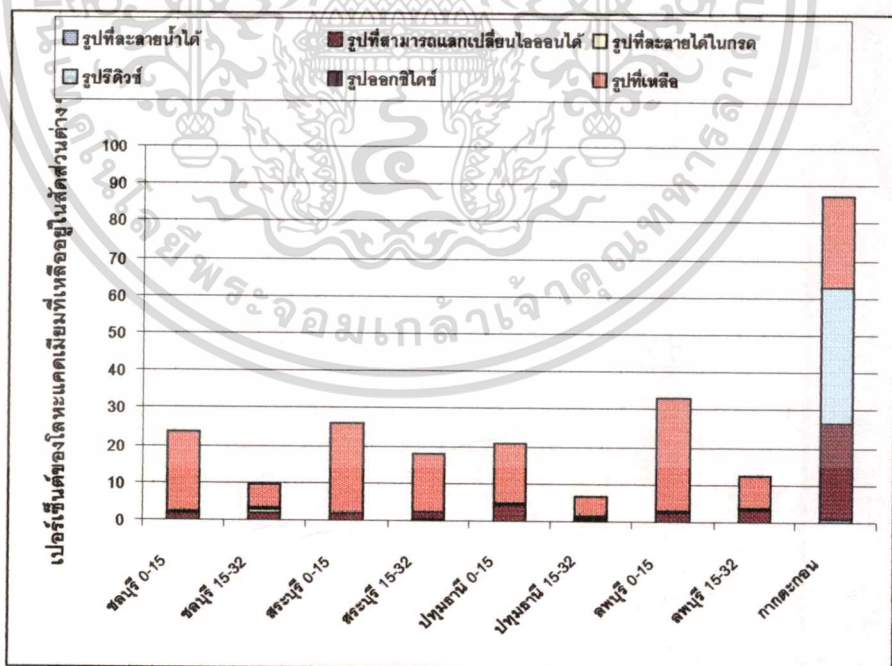
ในดินสระบุรี ปทุมธานีและลพบุรี พบว่าโลหะแคดเมียมในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ถูกชะออกมาได้มากที่สุด โดยชะได้ประมาณ 61.7-77.7 เปอร์เซ็นต์ โลหะแคดเมียมรูปที่ละลายได้ในกรด รูปรีดิวซ์และรูปออกซิไดซ์ถูกชะออกมาได้เล็กน้อย ส่วนโลหะแคดเมียมรูปที่ละลายน้ำได้มีปริมาณที่น้อยมากในดินก็สามารถชะออกมาได้ทั้งหมด แต่โลหะแคดเมียมรูปที่เหลือนหลังจากชะล้างจะพบในปริมาณที่สูงกว่าตอนก่อนชะล้าง เนื่องจากโลหะแคดเมียมในรูปอื่น ๆ เปลี่ยนรูปมาอยู่ในรูปที่

เหลือ ซึ่งเป็นซิลิเกตและพวกที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงยากต่อการชะ หลังทำการชะล้างจึงพบโลหะแคดเมียมในรูปที่เหลือเพิ่มขึ้นจากเดิมที่มีอยู่ในดิน โดยรูปที่มีโอกาสเปลี่ยนรูปมาเป็นรูปนี้มากที่สุดคือรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้

ในขณะที่กากตะกอนก่อนชะล้างจะพบโลหะแคดเมียมอยู่ในรูปปรีดิทซ์มากที่สุด คือเท่ากับ 60.79 เปอร์เซ็นต์ รองลงไปคือรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ คือเท่ากับ 31.21 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการชะล้างด้วยสารละลายยวผลแล้ว พบว่าสามารถชะเอาโลหะแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนและรูปปรีดิทซ์ออกมาได้มากที่สุด ซึ่งเป็นรูปที่โลหะแคดเมียมยึดติดกับสารอินทรีย์ด้วยพันธะที่อ่อนและเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ในกากตะกอน สารละลายโซเดียมเมตาโบซัลไฟด์ที่ใช้ในการชะล้างจะไปปรีดิทซ์หรือลดแรงพันธะของโลหะแคดเมียมที่เกาะอยู่กับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์และเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ในกากตะกอนให้โลหะแคดเมียมหลุดออกมาได้โดยง่ายและเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับฮีดรอกไซด์ที่เอทำให้สามารถชะโลหะแคดเมียมออกไปได้มาก โดยคิดเป็น 43.64 เปอร์เซ็นต์ และ 39.56 เปอร์เซ็นต์จากที่มีอยู่เดิมตามลำดับ โลหะแคดเมียมรูปที่ละลายน้ำได้แม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้นแต่ก็สามารถชะออกมาได้ทั้งหมด รูปที่ละลายได้ในกรดและรูปออกซิไดซ์พบว่าโลหะแคดเมียมถูกชะได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเป็นรูปที่โลหะแคดเมียมยึดเกาะอยู่กับคาร์บอนเนต ซัลไฟด์และออกไซด์ในกากตะกอนด้วยกลไกต่าง ๆ เช่น การดูดซับ การเกิดเป็นสารเชิงซ้อนและการเกิดคีเลต จึงยากที่สารละลายโซเดียมเมตาโบซัลไฟด์ไปปรีดิทซ์หรือลดแรงพันธะของโลหะแคดเมียมที่เกาะอยู่ในกากตะกอนได้ทั้งหมด ทำให้มีโลหะแคดเมียมเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับฮีดรอกไซด์ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ส่วนรูปที่เหลือจะมีปริมาณโลหะแคดเมียมสูงกว่าเดิมที่มีอยู่เดิม โดยรูปที่มีโอกาสเปลี่ยนรูปมาเป็นรูปนี้มากที่สุดคือรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้

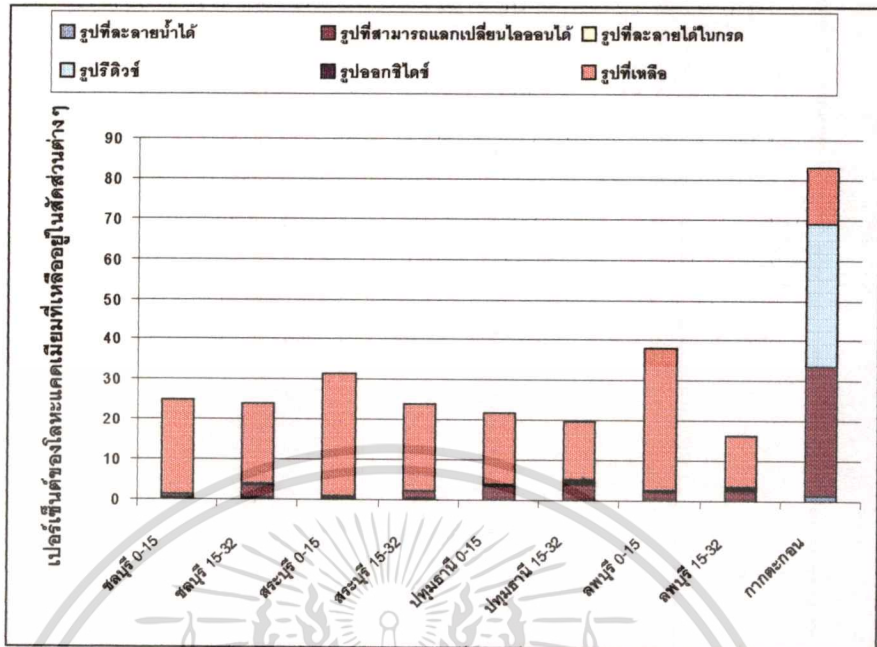


รูปที่ 4.17 สัดส่วนโลหะแคดเมียมในดินและอากาศก่อนหลังการล้างแบบครั้งที่อัตราส่วน 1 g : 2.5 mL



รูปที่ 4.18 สัดส่วนโลหะแคดเมียมในดินและอากาศก่อนหลังการล้างแบบครั้งที่อัตราส่วน 1 g : 5 mL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 สัดส่วนโลหะแคะเคี่ยมในดินและกากตะกอนหลังการล้างแบบครั้งที่อัตราส่วน 1 g:7.5 mL

จากรูปที่ 4.17 4.18 และ 4.19 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นหลังการชะล้างแบบครั้งที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL 1 g ต่อ 5 mL และ 1 g ต่อ 7.5 mL ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการสกัดก่อนการชะล้างในรูปที่ 4.15 พบว่าดินทั้งสองชนิดทั้งสองระดับความลึกโลหะแคะเคี่ยมในรูปที่ละลายน้ำได้ รูปที่ละลายได้ในกรด รูปรีดิวซ์และรูปออกซิไดซ์ ถึงแม้จะมีปริมาณน้อยก็สามารถชะออกมาจากดินได้เกือบหมดโดยการชะล้างแบบครั้งนี้ใช้การเขย่าซึ่งสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของโลหะแคะเคี่ยมที่อยู่ในส่วนต่าง ๆ ของดินกับสารละลายได้มากขึ้น จึงเป็นเหตุให้โลหะแคะเคี่ยมในรูปดังกล่าวถูกชะออกมาได้เกือบหมด ส่วนโลหะแคะเคี่ยมรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ที่มีอยู่เดิมในดินในปริมาณที่สูงที่สุดก็สามารถถูกชะออกมาได้ในปริมาณที่มากกว่า 93 เปอร์เซ็นต์ เนื่องมาจากการเขย่าทำให้อนุภาคของดินแตกมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงช่วยให้สารละลายไฮเดรียมเมตาไบซัลไฟต์สามารถที่จะไปรีดิวซ์หรือลดแรงพันธะของโลหะแคะเคี่ยมที่เกาะอยู่กับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ต่าง ๆ ในดินได้ง่าย จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การชะสูง และรูปที่เหลือถึงแม้จะเป็นส่วนที่ชะได้ยาก เนื่องจากโลหะแคะเคี่ยมยึดเกาะกับซิลิเกตในดินซึ่งมีโครงสร้างที่แข็งแรงแต่ก็สามารถชะออกมาได้ โดยที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL อยู่ในช่วง 20.4-98.8 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL อยู่ในช่วง 5.5-81.2 เปอร์เซ็นต์ ในดินลูกรัง ทรายและปทุมธานีทั้งสองระดับความลึก ส่วนดินลูกรังมีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL อยู่ในช่วง 11.8-52.1 เปอร์เซ็นต์ ในดินลูกรังและปทุมธานีทั้ง

สองระดับความลึก ส่วนดินสระบุรีและลพบุรีมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยอยู่ในช่วง 15-43 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากโลหะรูปอื่น ๆ เปลี่ยนมาอยู่ในรูปนี้มากขึ้น จึงเป็นเหตุให้เปอร์เซ็นต์การชะมีค่าลดลง

ส่วนโลหะแคดเมียมในกากตะกอนพบว่ารูปที่ละลายได้ในกรดและรูปออกซิไดซ์ถึงแม้จะมีเพียงเล็กน้อยและอยู่ในรูปคาร์บอนเนต ซัลไฟด์ และออกไซด์ต่าง ๆ ซึ่งค่อนข้างยากต่อการชะ เนื่องจากในการทดลองใช้การเขย่าทำให้อนุภาคของดินแตกมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงช่วยให้สารละลายไฮเดียมเมตาไบโซลไฟต์สามารถที่จะไปรีดิวซ์หรือลดแรงพันธะของโลหะแคดเมียมที่เกาะอยู่หลุดออกมาเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับอีดีทีเอได้ดี ส่วนรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้และรูปรีดิวซ์ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL สามารถชะออกได้เพียง 33.64 เปอร์เซ็นต์ และ 15.15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL สามารถชะออกได้เพียง 18.49 เปอร์เซ็นต์ และ 40.48 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ อาจเป็นเพราะโลหะแคดเมียมในกากตะกอนยึดเกาะอยู่กับสารอินทรีย์และโลหะออกไซด์แน่นมาก การเขย่าอาจช่วยให้อนุภาคของกากตะกอนแตกออกทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสของโลหะแคดเมียมในกากตะกอนกับสารละลายผสมมีมากขึ้น แต่ก็ไม่สามารถที่จะไปรีดิวซ์หรือลดแรงพันธะของโลหะแคดเมียมที่เกาะอยู่กับกากตะกอนได้หมด ส่วนรูปที่ละลายน้ำได้และรูปที่เหลือนี้อาจมีปริมาณมากขึ้นกว่าเดิมที่มีอยู่ เนื่องจากโลหะแคดเมียมในรูปอื่น ๆ เปลี่ยนมาอยู่ในรูปนี้มากขึ้น โดยรูปที่มีโอกาสเปลี่ยนรูปมาเป็นรูปนี้มากที่สุดคือรูปรีดิวซ์และรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ ส่วนที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL พบว่าโลหะแคดเมียมรูปรีดิวซ์สามารถชะออกได้เพียง 42.01 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ อาจเป็นเพราะโลหะแคดเมียมในกากตะกอนยึดเกาะอยู่กับสารอินทรีย์และโลหะออกไซด์แน่นมาก การเขย่าอาจช่วยให้อนุภาคของกากตะกอนแตกออกทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสของโลหะแคดเมียมในกากตะกอนกับสารละลายผสมมีมากขึ้น แต่ก็ไม่สามารถที่จะไปรีดิวซ์หรือลดแรงพันธะของโลหะแคดเมียมที่เกาะอยู่กับกากตะกอนได้หมด รูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ไม่สามารถชะออกมาได้เลย เนื่องจากกากตะกอนมีปริมาณสารอินทรีย์มากทำให้สารละลายไฮเดียมเมตาไบโซลไฟต์ไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ ส่วนรูปที่ละลายน้ำได้และรูปที่เหลือนี้อาจมีปริมาณที่มากขึ้นกว่าเดิมที่มีอยู่ เนื่องจากโลหะแคดเมียมในรูปอื่น ๆ เปลี่ยนรูปมาอยู่ในรูปนี้มากขึ้น โดยรูปที่มีโอกาสเปลี่ยนรูปมาเป็นรูปนี้มากที่สุดคือรูปรีดิวซ์

4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์ระหว่างแบบคอลัมน์และแบบครึ่ง

จากผลการทดลองหาประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์ระหว่างแบบคอลัมน์และแบบครึ่งสามารถเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดได้ดังตารางที่ 4.4 พบว่าเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมด้วยวิธีแบบครึ่งมีประสิทธิภาพในการชะโลหะแคดเมียมมากกว่าวิธีแบบคอลัมน์ โดยการชะล้างแบบครึ่งของตัวอย่างดินทั้งสี่ชนิดที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL มีประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมสูงที่สุด โดยมากกว่าแบบคอลัมน์อยู่ในช่วง 39.3-66 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL มีประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมมากกว่าแบบคอลัมน์อยู่ในช่วง 38.6-57 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL มีประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมมากกว่าแบบคอลัมน์อยู่ในช่วง 33.5-55.7 เปอร์เซ็นต์

ส่วนกากตะกอนที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL มีประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมมากกว่าแบบคอลัมน์อยู่เท่ากับ 0.17 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL มีประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมมากกว่าแบบคอลัมน์อยู่เท่ากับ 5.58 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL เป็นอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมสูงที่สุด โดยมากกว่าแบบคอลัมน์อยู่เท่ากับ 10.01 เปอร์เซ็นต์

สาเหตุที่วิธีสกัดแบบครึ่งมีประสิทธิภาพในการชะโลหะแคดเมียมสูงกว่าแบบคอลัมน์มีดังนี้ คือ

1. วิธีแบบครึ่งมีระยะเวลาที่โลหะแคดเมียมในดินสัมผัสกับสารละลายผสมที่นานกว่าทำให้เพิ่มโอกาสในการละลายได้มากขึ้น
2. วิธีแบบครึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเนื้อดิน (โลหะแคดเมียมในดิน) กับสารละลายผสมมากกว่า
3. วิธีแบบครึ่งใช้การเขย่า จึงทำให้อนุภาคดินแตกออก ส่งผลให้เกิดข้อที่ 2 และยังส่งผลให้ดินปล่อยโลหะแคดเมียมบางส่วนออกมาในขณะที่เนื้อดินแตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆ
4. วิธีแบบคอลัมน์ใช้การบรรจุ หากบรรจุแน่นเกินไปจะทำให้ตัวอย่างอัดตัวกันแน่น ดังนั้นโอกาสที่สารละลายจะสัมผัสกับสารตัวอย่างจึงน้อยกว่าวิธีแบบครึ่ง

สาเหตุที่วิธีสกัดแบบครึ่งดีกว่าแบบคอลัมน์มีดังนี้ คือ

1. วิธีการสกัดง่ายกว่า
2. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานถูกกว่า
3. มีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่สูงกว่า

4. ใช้เวลาในการดำเนินงานน้อยกว่า ทำให้ประหยัดเวลา
5. ใช้ปริมาณสารละลายน้อยกว่า

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอน
สังเคราะห์ระหว่างแบบคอลัมน์และแบบครึ่ง

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด แบบคอลัมน์	เปอร์เซ็นต์การกำจัดแบบครึ่ง					
		1 : 2.5	% ที่สูงกว่า	1: 5	% ที่สูงกว่า	1: 7.5	% ที่สูงกว่า
ชลบุรี							
0-15	30.42	86.43	56.01	76.59	46.17	75.04	44.62
15-32	33.39	92.86	59.47	90.39	57	75.87	42.45
สระบุรี							
0-15	24.4	77.74	53.34	73.83	49.43	68.45	44.05
15-32	32.76	85.21	52.45	82.09	49.33	76.11	43.35
ปทุมธานี							
0-15	22.52	82.22	59.7	79.37	56.85	78.28	55.76
15-32	27.05	93.12	66.07	89.2	62.15	80.27	53.22
ลพบุรี							
0-15	28.52	67.83	39.31	67.13	38.61	62.04	33.52
15-32	35.49	97.3	61.81	83.69	52.2	83.72	48.23
กากตะกอน	7.12	7.29	0.17	12.7	5.58	17.13	10.01

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินและกากตะกอน

5.1.1.1 คุณสมบัติของดิน ดินที่ใช้ในการวิจัยแต่ละชนิดมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันตามลักษณะของเนื้อดิน ดังนี้

5.1.1.1.1 ดินจังหวัดชลบุรี ลักษณะเนื้อดินเป็นดินทราย มีเปอร์เซ็นต์ของซิลท์และความสามารถในการอุ้มน้ำที่ต่ำ จึงมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นและสารอินทรีย์ที่ต่ำ

5.1.1.1.2 ดินจังหวัดสระบุรี ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย ซึ่งคล้ายกับดินชลบุรีเปอร์เซ็นต์ความชื้นจึงค่อนข้างต่ำ แต่มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับดินชลบุรี และมีเปอร์เซ็นต์ของซิลท์ที่สูงกว่าดินชลบุรี

5.1.1.1.3 ดินจังหวัดปทุมธานี ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียว ทำให้เปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์สูงกว่าดินชนิดอื่นๆ เป็นเหตุให้ค่า CEC สูงตามไปด้วย และการที่มีสารอินทรีย์สูงจึงทำให้ดินนี้สามารถเก็บความชื้นไว้ได้ดีทำให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นสูง มีเปอร์เซ็นต์ของซิลท์ที่สูง และมีพีเอชที่ต่ำมาก

5.1.1.1.4 ดินจังหวัดลพบุรี ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย คล้ายกับดินปทุมธานี แต่มีค่าพีเอชที่สูงกว่า ส่วนเปอร์เซ็นต์ของซิลท์เมื่อเทียบกับดินปทุมธานีและสระบุรีจะมีค่าน้อยกว่า

เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกันนี้ทำให้ดินที่มีค่า CEC สูง และเปอร์เซ็นต์ของซิลท์ต่ำ มีความเหมาะสมต่อการชะล้างแบบคอลัมน์ ส่วนดินที่มี CEC สูง และเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ต่ำ มีความเหมาะสมต่อการชะล้างแบบครึ่ง

5.1.1.1 คุณสมบัติของกากตะกอน

กากตะกอนเป็นกากตะกอนจากบ่อน้ำบาดาลรวมและผ่านขั้นตอนการทำให้เสถียรมาแล้ว จึงมีค่าพีเอช 8.64 และมีเปอร์เซ็นต์ของ Fe_2O_3 ที่สูง และยังมีเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์และค่า CEC ที่สูงอีกด้วย

5.1.2 การทดสอบการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์แบบคอลัมน์และแบบครึ่ง

5.1.2.1 แบบคอลัมน์

จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS version 9.01 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการวิเคราะห์การถดถอย พบว่าซิลต์เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการชะล้างโลหะแคดเมียมแบบคอลัมน์มากที่สุด โดยดินที่มีเปอร์เซ็นต์ซิลต์ต่ำสามารถชะล้างโลหะแคดเมียมออกมาได้สูง ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมอยู่ในช่วง 22.5-35.5 เปอร์เซ็นต์ โดยในดินสระบุรีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-100 mL สำหรับดินชลบุรี ปทุมธานีและลพบุรีมีช่วงอยู่ที่ 0-50 mL ส่วนกากตะกอนเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่ได้มีค่าที่ต่ำกว่าดินมาก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.12 เปอร์เซ็นต์ โดยเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-50 mL

5.1.2.2 แบบครึ่ง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS version 9.01 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการวิเคราะห์การถดถอย พบว่าเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการชะล้างโลหะแคดเมียมแบบครึ่งมากที่สุด โดยในดินเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมลดลงเมื่ออัตราส่วนดินต่อสารละลายเพิ่มขึ้น และดินที่มีเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ต่ำจะมีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่สูง ซึ่งทุกตัวอย่างดินอัตราส่วนที่สามารถชะโลหะแคดเมียมได้มากที่สุด คือ อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL โดยมีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมอยู่ในช่วง 67.8-97.3 เปอร์เซ็นต์

ส่วนกากตะกอนเปอร์เซ็นต์การกำจัดมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนกากตะกอนต่อสารละลายมากขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การกำจัดที่ได้ต่ำกว่าในดินมาก โดยที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงที่สุด คือเท่ากับ 17.13 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 การศึกษาสัดส่วนของโลหะแคดเมียมรูปต่างๆในดินและกากตะกอนโดยการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น

การสกัดแบบเป็นลำดับขั้นก่อนการชะล้างตัวอย่าง พบว่าในดินทั้งสี่ชนิดโลหะแคดเมียมอยู่ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้มากที่สุด รองลงไปคือรูปที่เหลือ ส่วนกากตะกอนส่วนใหญ่อยู่ในรูปรีดิวซ์ และรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้หลังทำการชะล้างด้วยวิธีแบบคอลัมน์และแบบครึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้

5.1.3.1 การชะล้างแบบคอลัมน์

ในตัวอย่างดินสามารถชะโลหะแคดเมียมรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้มากที่สุด โดยอยู่ในช่วง 59-77.7 เปอร์เซ็นต์

ส่วนกากตะกอนสามารถชะโลหะแคดเมียมรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนและรูปรีดิวซ์ได้มากที่สุด คือเท่ากับ 43.64 เปอร์เซ็นต์ และ 39.56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5.1.3.2 การชะล้างแบบครึ่ง

ทุกอัตราส่วนของสารตัวอย่างต่อสารละลายในดินทั้งสี่ชนิดมีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL มีค่าสูงที่สุด โดยสามารถชะเอาโลหะแคดเมียมรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้มากกว่า 91 เปอร์เซ็นต์ ส่วนรูปที่เหลือเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมมีแนวโน้มที่ลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น

ส่วนเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่ดีที่สุดของกากตะกอน คือที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL ซึ่งสามารถชะเอาโลหะแคดเมียมรูปรีดิวซ์ออกมาได้มากที่สุดคือเท่ากับ 42.01 เปอร์เซ็นต์

5.1.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะล้างโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์ระหว่างแบบคอลัมน์และแบบครึ่ง

ประสิทธิภาพในการใช้สารละลายผสมชะล้างโลหะแคดเมียมด้วยวิธีแบบครึ่งมีค่าสูงกว่าแบบคอลัมน์ โดยในดินและกากตะกอนสังเคราะห์มีเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมมากกว่าแบบคอลัมน์เท่ากับ 33.52 เปอร์เซ็นต์และ 0.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เนื่องจากระยะเวลาที่โลหะแคดเมียมในตัวอย่างสัมผัสกับสารละลายและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเนื้อตัวอย่างกับสารละลายที่นานกว่าแบบคอลัมน์

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 การล้างดินด้วยสารละลายผสมนี้ควรทดลองนำไปใช้กับโลหะหนักชนิดอื่นๆ นอกเหนือจากโลหะแคดเมียม
- 5.2.2 การนำเทคนิคการล้างดินไปประยุกต์ใช้จริง ควรมีการศึกษาถึงองค์ประกอบของดินในแต่ละพื้นที่ก่อน เนื่องจากดินแต่ละแห่งมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน
- 5.2.3 ควรแปรค่าความเข้มข้นของสารละลายผสม แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมที่ได้ เพื่อดูความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่ได้จากงานวิจัยนี้
- 5.2.4 ลดเวลาในการทดลองแบบครึ่ง และลดอัตราการไหลในการทดลองแบบคอลัมน์ แล้วเปรียบเทียบการชะโลหะแคดเมียมที่ได้ เพื่อดูความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมที่ได้จากงานวิจัยนี้
- 5.2.5 ในตัวอย่างกากตะกอนถ้าต้องการให้มีประสิทธิภาพการชะโลหะแคดเมียมสูงขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มอัตราส่วนของสารละลาย และปรับพีเอชให้มีค่าเป็นกรด เพื่อให้โลหะแคดเมียมอยู่ในรูป Cd^{2+} แล้วเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายอีดีทีเอได้มากขึ้น
- 5.2.6 ลองใช้สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์เพียงชนิดเดียวก่อนว่ามีความสามารถในการชะโลหะแคดเมียมได้ในปริมาณเท่าใด แล้วจึงใช้สารละลายโซเดียมอีดีทีเอตามทีหลัง เพื่อจะได้ใช้ปริมาณของสารละลายโซเดียมอีดีทีเอน้อยลง
- 5.2.7 ควรศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอีดีทีเอกับโลหะแคดเมียมก่อน แล้วนำสภาวะนั้นมาใช้ในการทดลอง

- 5.2.8 พีเอชในกากตะกอนมีค่าที่สูงไม่เหมาะสมต่อการเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับอีดีทีเอ ทำให้เปอร์เซ็นต์การชะโลหะแคดเมียมมีค่าที่ต่ำ ควรปรับค่าพีเอชในกากตะกอนให้เหมาะสมต่อการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนแล้วนำสภาวะที่ดีที่สุดจากข้อ 5.2.6 มาใช้ในการทดลอง
- 5.2.9 นำไปประยุกต์ใช้กับดินหรือกากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนักหลายชนิด เพื่อดูผลของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่อาจมีผลต่อการชะล้าง



บรรณานุกรม

- กองสำรวจดิน กรมพัฒนาที่ดิน. คู่มือการจัดการทรัพยากรที่ดินเบื้องต้น จังหวัดลพบุรี. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ. 2541.
- กองสำรวจดิน กรมพัฒนาที่ดิน. คู่มือการจัดการทรัพยากรที่ดินเบื้องต้น จังหวัดสระบุรี. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ. 2541.
- กองสำรวจดิน กรมพัฒนาที่ดิน. รายงานแผนที่ความเหมาะสมของดินกับพืชเศรษฐกิจเบื้องต้น จังหวัดปทุมธานี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ. 2534.
- กองสำรวจดิน กรมพัฒนาที่ดิน. รายงานการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อการปลูกพืชเศรษฐกิจ จังหวัดลพบุรี. เอกสารวิชาการ เล่มที่ 193. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ. 2534.
- กองวิเคราะห์ดิน กรมพัฒนาที่ดิน. คู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ดินของกลุ่มเคมีดินที่ 2. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ. 2535.
- กลั่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และอำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล. ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม 2. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ม.ป.ป. อัดสำเนา.
- ชุตินา เสงี่ยมธรรม. "การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- เทียนชัย สุวรรณเวช. เคมีของดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2539.
- เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล. "การวิเคราะห์รูปแบบของโลหะปริมาณน้อยในตะกอนใกล้ฝั่งโดยวิธีการสกัดล้างตามลำดับขั้น." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.
- มันสิน ดันทุลเวศน์. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1 และ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท แชน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์. 2542.
- รัตติกาล จันทิวาสณ์. "การปรับเสถียรภาพของโลหะมีพิษในกากตะกอนจากโรงงานถลุงสังกะสี." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีวิเคราะห์และเคมีอินทรีย์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยมหิดล. 2542.
- ศุภชัย ไข่เทียมวงศ์. เคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัทเท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชัน จำกัด. 2539.

สุธีลา ตุลยะเสถียร และคณะ. มลพิษสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัทรวมสาส์น (1977) จำกัด. 2544.

สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน และคณะ. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2535.

อนุกุล สุธำพันธ์. "ความสามารถของดินชุดสระบุรีในการดูดซับสังกะสีและแคดเมียมภายหลังการเติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนในพื้นที่ที่มีการปลูกผัก." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.

อภิชาติ โพธิ์สุ. "ปริมาณตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ในน้ำ และดินตะกอนจากชั้นคุณภาพลุ่มน้ำต่างๆบริเวณลุ่มน้ำเลย." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2536.

Alloway, B.J. Heavy Metal in Soils, 2nd ed., Blackie academic&professional, UK, 1995.

Abumaizar, R.J., Khan. L.J. "Laboratory investigation of heavy metal removal by soil washing." J.Air Waste Manage.Assoc. 46, 765-768, 1996.

Abumaizar, R.J., Smith. E.H. "Heavy metal contaminants removal by soil washing." J.Hazaed.Mater., B70,71-86, 1999.

Allen, H.E., Huang, C.P., Bailey, G.W., Bowers, A.R. Metal Speciation and Contamination of Soil, 1st ed., USA, Lewis publishers, 1995.

Allen, H.E., Chen, P. "Remediation of Metal Contaminated Soil by EDTA Incorporating Electrochemical Recovery of Metal and EDTA," Environmental Progress., 12, No. 4, 284-293, 1993.

Boreiko, C.J., Van Assche, F.J. "Cadmium Products." [Online]. Available : <http://www.cadmium.org/download/cadmium.doc>. 2002.

Brady, N.C., Well, R.R. The Nature and Properties of Soils, 11th ed., USA, Prentice-Hall International, Inc., 1996.

Carter, M.R. Soil Sampling and Methods of Analysis, USA, Lewis Publishers, Florida, 1993.

Cline, S.R., Reed, B.E. "Lead removal from soils via bench-scale soil washing techniques." J.Environ Eng., ASCE. 121 (10), 700-705, 1995.

Eckenfelder, B.W. Industrial Water Pollution Control, 2nd ed., Singapore, McGraw-Hill book. Co., 1989.

Hillel, D. Environmental Soil Physics, 2nd ed., USA, Academic press, 1998.

King, R.B. Encyclopedia of Inorganic Chemistry, Vol 1 A-Cal, USA, John-Wiley & Sons, Inc, 1994.

Noyes, R. Handbook of Pollution Control Process, USA, Noyes Publications, 1991.

PARSulfite Chemical Company. Available:<http://www.PARSulfite.com> [2001, July 2].

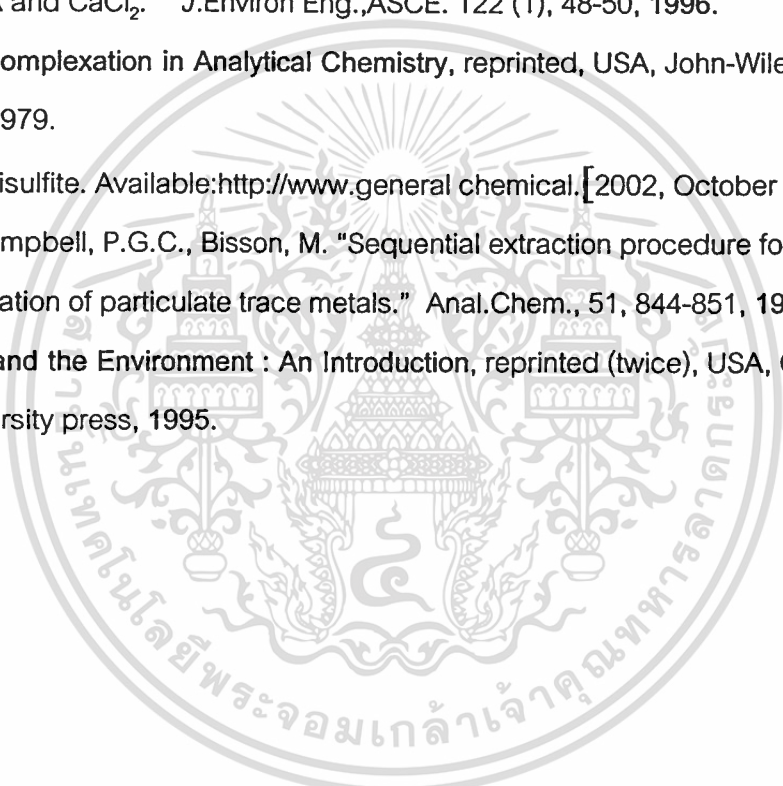
Reed, B.E., Carriere, P.C., Moore, R. "Flushing of Pb (II) contaminated soil using HCl, EDTA and CaCl_2 ." *J. Environ Eng., ASCE*. 122 (1), 48-50, 1996.

Ringbom, A. Complexation in Analytical Chemistry, reprinted, USA, John-Wiley & Sons, Inc, 1979.

Sodium metabisulfite. Available:<http://www.generalchemical.com> [2002, October 14].

Tessier, A., Campbell, P.G.C., Bisson, M. "Sequential extraction procedure for speciation of particulate trace metals." *Anal. Chem.*, 51, 844-851, 1979.

Wild, A. Soils and the Environment : An Introduction, reprinted (twice), USA, Cambridge University press, 1995.





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์ดินและกากตะกอน

ก.1 การหาเปอร์เซ็นต์ทราย ซิลต์ เคลย์ (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

การปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

1. เทสารละลายคัลคอน จำนวน 100 mL ลงในกระบอกตวงปรับปริมาตรด้วยด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 0.1 L ผสมให้ทั่วด้วยแท่งแก้วคนแบบ plungers ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่ (อยู่ในช่วง $20^{\circ} - 25^{\circ} \text{C}$)
2. ค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในสารละลายอย่างระมัดระวัง อ่านค่าจากสเกลที่รอยเว้าบนของของเหลวที่ล้อมรอบไฮโดรมิเตอร์

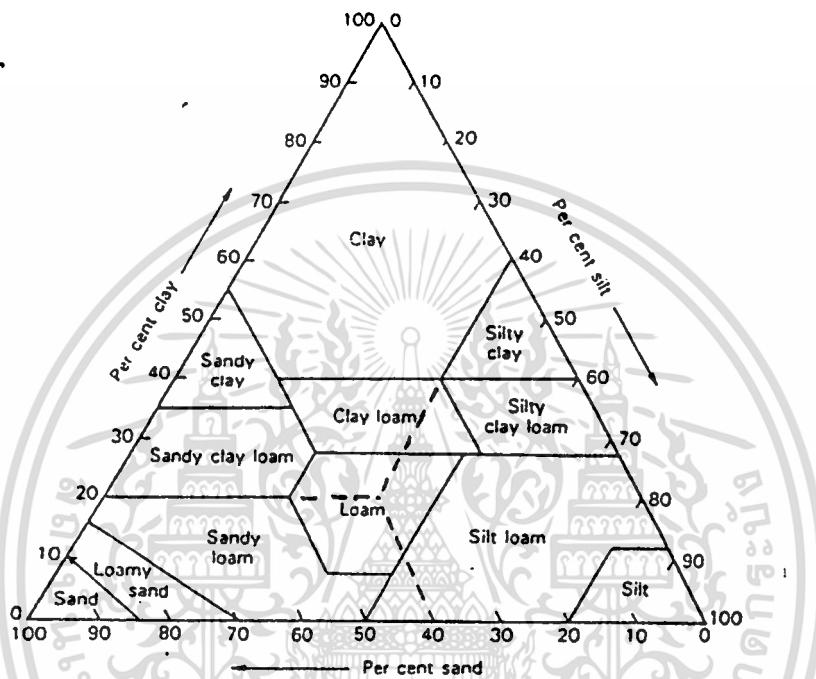
การอ่านค่าจากสารแขวนลอย

1. ชั่งดินที่ผึ่งแห้งและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 เมช แล้ว 40 g (ถ้าเป็นดินทรายร่วนหรือดินทรายหยาบ 100 g) ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 mL เติมน้ำประปา 300 mL และน้ำประมาณ 300 mL ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน
2. ชั่งดินตัวอย่างเดิมอีก 10 g เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นและน้ำหนักแห้งแล้วนำไปอบที่ 105°C 1 คืน ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์และชั่งน้ำหนัก
3. นำสารแขวนลอยดินจากข้อ 1 มากรองด้วยเครื่องกรองแม่เหล็กประมาณ 5 นาทีแล้วเทลงกระบอกตวงขนาด 1 L
4. ปรับปริมาตรสารในข้อ 3 ด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 L ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่
5. จุ่มแท่งแก้วคนแบบ plunger แบบขึ้น – ลง เบาๆ เพื่อให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วทั้งกระบอกตวง (ให้หมุนขึ้นลงแบบเกลียวสว่าน 2 – 3 รอบ) บันทึกเวลาเมื่อคนเสร็จ (เติม 1 หยดของเอมิลแอลกอฮอล์ ถ้าที่ผิวของสารแขวนลอยเป็นฟอง)
6. ค่อย ๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงอย่างระมัดระวังในสารแขวนลอยและอ่านสเกลเหมือนหัวข้อการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์ เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาที หลังจากการกวนผสมค่าที่อ่านได้ควรหักลบจากค่าที่อ่านได้จากการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์
7. ค่อย ๆ ดึงไฮโดรมิเตอร์ขึ้นอย่างระมัดระวังเมื่ออ่านเสร็จ ล้างและเช็ดให้แห้ง
8. เมื่อครบ 2 ชั่วโมงให้อ่านค่าไฮโดรมิเตอร์อีกครั้งโดยทำเหมือนข้อ 6 และ 7

ข้อควรระวัง

การหาขนาดของอนุภาคด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์นี้ไม่เหมาะสมในกรณีที่ดินตัวอย่างมีหินปูนมากหรือเป็นคอนครีต หรือมีอินทรีย์คาร์บอนมากกว่า 2 %

การคำนวณ



% Sand = $\frac{(W-R)40S}{W} \times 100$(ก.1)

% Clay = $\frac{(R_{2hr})}{W} \times 100$(ก.2)

% Silt = $100 - (\%Sand + \%Clay)$(ก.3)

ก.2 การวัดค่าพีเอช (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

- 1. ชั่งดินแห้ง 5 g ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นลงไป 5 mL พร้อมบันทึกหมายเลขตัวอย่างดิน
- 2. กวนให้เข้ากันอย่างน้อย 5 วินาที และตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
- 3. ขณะที่ตั้งสารละลายทิ้งไว้ ให้ทำการปรับเทียบเครื่องวัดพีเอชกับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน 4 และ 7 (ปฏิบัติตามคู่มือการใช้เครื่องวัดพีเอช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จุ่มอิเล็กโทรดลงในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายดินที่ครบตามเวลากวนโดยใช้การหมุนอิเล็ก-
โทรดเบาๆ (ระวัง ! อิเล็กโทรดกระแทกแตกได้) อ่านค่าพีเอช

ก.3 การหาความชื้น (Carter, 1993)

1. ชั่งกระเจกนาฬิกา ที่สะอาด
2. นำตัวอย่างดินมาชั่ง 10 g ลงบนกระเจกนาฬิกา จดบันทึกน้ำหนักเปียก
3. นำไปเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 – 110 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ทำให้เย็นใน
เดซิเคเตอร์
4. นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง
5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

$$\% \text{ความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง})}{\text{น้ำหนักเปียก}} \times 100 \dots\dots\dots (ก.4)$$

6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย

ก.4 การหาประจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 10 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 125 mL เติมสารละลายโซเดียมอะซิเตท 1
N ลงไป 20 mL ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ค้างคืน
2. เขย่าสารละลายดิน 30 นาที โดยใช้เครื่องเขย่า ๆ จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง นาน 20 นาที
แยกเอาส่วนใสทิ้ง
3. ล้างดินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 1 N ครั้งละ 30 mL นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วน
ใสออกจนไม่มีแคลเซียมเหลืออยู่ (ทดสอบดูโดยนำส่วนใสที่ได้จากการล้างแต่ละครั้ง $\approx$ 10
mL ใส่ในหลอดทดลอง หยดแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N แอมโมเนียมออกซาลาเลท 10 %
และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 50 % อย่างละ 2 – 3 หยด นำไปต้มให้เดือด ถ้าเกิดตะกอน
หรือสารละลายขุ่น แสดงว่ามีแคลเซียมตกค้างอยู่)
4. ล้างตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N 4 ครั้งและล้างด้วยสารละลาย
แอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 N อีก 1 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 7
ครั้งๆ ละ 30 mL โดยในการล้างแต่ละครั้งให้นำไปปั่นเหวี่ยงนานประมาณ 3 – 5 นาที

เพื่อแยกส่วนใสออก จนไม่มีคลอไรด์เหลืออยู่ (ทดสอบได้โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท 0.1 N 2-3 หยด ถ้ามีตะกอนขาวของ AgCl แสดงว่ามีคลอไรด์เหลืออยู่)

5. นำสารละลายจากข้างต้นทิ้งไปนำตัวอย่างดินที่ได้มาล้างต่อด้วยโซเดียมคลอไรด์ 10 % เพื่อไล่ NH_4 ในดิน โดยล้างครั้งละ 30 mL ซ้ำ 3 ครั้ง นำไปปั่นเหวี่ยง เก็บส่วนใสไว้
6. นำขวดใสที่ได้จากสารละลายดินมาใส่ในขวดวัดปริมาตร 100 mL ปรับปริมาตรรวมจนมีปริมาณ 100 mL ด้วยน้ำกลั่น
7. นำสารละลายดินที่ได้ไปกลั่นเพื่อไล่แอมโมเนียออกมา โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 % ลงไป 25 mL ใส่ใน Kjeldahl flask ที่ปลายคอนเดนเซอร์ (condenser) รุ่มอยู่ในสารละลายกรดบอริกซึ่งใส่อินดิเคเตอร์สมไว้ 2-3 หยดกลั่นจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียว
8. นำสารละลายที่ได้จากการกลั่น ไปไตเตรทด้วย สารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 N จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง
9. กลั่นแบลงค์และไตเตรทเช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

การคำนวณ

$$\text{CEC} = \frac{(A - B) N \times 100}{X} \quad \text{มิลลิกรัมสมมูลต่อดิน 100 กรัม} \dots\dots\dots(\text{ก.5})$$

- A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไตเตรทกับตัวอย่างดิน (mL)
- B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไตเตรทกับแบลงค์
- N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)
- X = น้ำหนักเป็นกรัมของตัวอย่างดิน

ก.5 การวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์สารโดยวิธี Walkley and Black (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 1 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำยาโพแทสเซียมไดโครเมท 1 N ลงไป 10 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปต
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น ลงไป 15 มิลลิลิตร เขย่าขูดแก้วเบาๆ เป็นเวลา 1-2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ดินและน้ำยาทำปฏิกิริยากันเป็นเวลา 30 นาที
4. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 50 มิลลิลิตรทิ้งไว้ให้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5. ไตเตรทสารละลายที่ได้ด้วยน้ำยาเฟอร์สแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 N เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมทที่เหลือจากปฏิกิริยาจนกระทั่งสีของสารละลายดินเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ
- 6. จดปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมทและเฟอร์สแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้
- 7. ทำแบบลงค์เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ดิน
- 8. คำนวณหาประมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุ

การคำนวณ

% Organic carbon =
$$\frac{(B-T)N \times 100 \times 3 \times 100 \times 10}{B \times 77 \times 10^3 \times X} \dots\dots\dots (ก.6)$$

- N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมท
- B = จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายเฟอร์สแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไตเตรทกับแบบลงค์
- T = จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายเฟอร์สแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไตเตรทกับตัวอย่างดิน
- X = น้ำหนักดิน (g)

% Organic matter = % Organic carbon X 1.724.....(ก.7)

หรือ % Organic matter =
$$\frac{(B-T)N \times 100 \times 100 \times 3 \times 100 \times 10}{B \times 77 \times 58 \times 10^3 \times X} \dots\dots\dots (ก.8)$$

ก.6 การหาความหนาแน่นรวม โดยวิธี Core method (Carter, 1993)

- 1. ชั่งน้ำหนัก core และบันทึกน้ำหนัก
- 2. เตรียมพื้นที่ที่จะชั่งเอาตัวอย่าง
- 3. กดแท่งทรงกระบอก (cylindrical cores) ลงไปตามระดับที่ต้องการให้ดินเต็ม core แล้วชั่งรอบ ๆ cylindrical cores เพื่อนำขึ้นมา
- 4. ใช้มีดตัดดินส่วนที่เกิน cylindrical cores ออก แล้ววางบนกระจกนาฬิกาที่ทราบน้ำหนักแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำไปชั่งน้ำหนัก จะได้ wet soil + core (g)
6. นำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 24 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ใน dessiccator
7. นำไปชั่งน้ำหนัก จะได้ dry soil + core (g)
8. นำไปคำนวณหาความหนาแน่นรวม (bulk density)

การคำนวณ

$$D_b = m/v \dots\dots\dots (ก.9)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} D_b &= \text{ความหนาแน่นรวมรวม (bulk density)} \\ m &= \text{น้ำหนักดินแห้ง} \\ v &= \text{ปริมาตรของ cylindrical core } (v = \pi d^2 h / 4000) \end{aligned}$$

ก.7 การหาความเข้มข้นของโลหะหนักโดย Microwave digester (Milestone application lab, 1996)

1. เลือก digestion program ให้เหมาะสมกับตัวอย่าง
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างลงใน vessel ของ rotor type ที่กำหนดให้ใช้ได้ ใน program
3. ใส่กรดที่มีความเข้มข้น และปริมาณตามที่ระบุไว้ใน program
4. ใส่ vessel ใน protective shield ปิดฝา ตามด้วย adapter plate และ special spring นำไปใส่ใน polypropylene rotor body

หมายเหตุ ถ้าตัวอย่างไม่ครบทุก vessel ให้วาง vessel ที่มีสารให้สมดุลหรือใช้ vessel เปล่าวางแทน

5. ไขให้แน่นด้วย tension wrench (ด้ามสีดำ) เมื่อแน่นจะได้ยินเสียง "คลิก"
6. วาง polypropylene rotor body ใน microwave unit โดยสวมให้ตรงกับแกน
7. กำหนดค่าของ time, power, pressure, temp ตามที่กำหนดใน program ที่เลือกไว้
8. กด start เครื่องจะ check และทำตาม program
9. เมื่อสิ้นสุดการการ digest ตาม program เครื่องจะแสดง switch off microwave unit และ exhaust module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เปิดเครื่อง microwave unit และยก rotor body ทำให้เย็นโดยใส่ใน cooling bath ประมาณ 10 นาที
11. นำ vessel ออก แล้วนำสารละลายที่ได้ไปกรอง
12. นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS



ภาคผนวก ข

วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction)

ขั้นที่ 1 Water soluble

1. นำตัวอย่าง 1 g มาผสมกับน้ำ DI 25 mL ใส่ในขวดพลาสติก
2. นำไปเขย่า 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส นาน 5 นาที
3. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS
5. นำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 2 Exchangeable

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 1 มาเติม 1.0 M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ pH 7 ปริมาตร 25 mL ในขวดพลาสติก
2. นำไปเขย่า 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส นาน 5 นาที
3. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แช่ไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วย AAS
5. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำ DI 10 mL แล้วนำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 3 Acid soluble

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 2 มาเติม 0.11 M CH_3COOH pH 3 ปริมาตร 25 mL ในขวดพลาสติก
2. นำไปเขย่า 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส นาน 5 นาที
3. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แช่ไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วย AAS
5. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำ DI 10 mL แล้วนำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 4 Reducible

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 3 มาเติม 0.1 M $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ pH 2 (ใน 25%v/v CH_3COOH) ปริมาตร 25 mL ในขวดพลาสติก
2. นำไปเขย่า 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส นาน 5 นาที
3. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แช่ไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วย AAS
5. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำ DI 10 mL แล้วนำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 5 Oxidizable

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 4 มาเติม H_2O_2 30% pH 2 ปริมาตร 20 mL ในขวดรูปชมพู่
2. นำไปเขย่าด้วย waterbath shaker 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 85°C แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
3. เติม 1.0 M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ pH 2 ปริมาตร 20 mL
4. นำไปเขย่าด้วย waterbath shaker 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 85°C แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
5. กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
6. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แช่ไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วย AAS
7. นำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 6 Residual

1. นำส่วนของของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 5 ไปทำให้แห้ง โดยนำไปอบที่ 103-105°C นาน 30 นาที
2. ชั่งน้ำหนักให้ได้ 2 g ใส่ platinum crucible
3. นำไปย่อยด้วย HF/HNO_3 บนแท่นให้ความร้อนจนได้สารละลายใส
4. ปรับปริมาตรให้เป็น 25 mL ด้วยน้ำ DI
5. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แช่ไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วย AAS

ภาคผนวก ค

ผลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองหาค่าพีเอช

ตัวอย่าง	พีเอช			เฉลี่ย
	1	2	3	
ชลบุรี				
0-15	5.16	5.37	5.7	5.41
15-32	5.64	5.78	5.2	5.54
สระบุรี				
0-15	4.33	4.31	4.4	4.35
15-32	4.03	4.16	3.8	4.00
ปทุมธานี				
0-15	7.54	6.9	6.78	7.07
15-32	6.49	6.51	6.43	6.48
ลพบุรี				
0-15	3.22	2.92	2.55	2.90
15-32	2.95	2.75	2.46	2.72
ภาคตะกอน	8.5	8.55	8.58	8.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองหาความหนาแน่นรวม

ตัวอย่าง	ความหนาแน่นรวม			เฉลี่ย
	1	2	3	
ชลบุรี				
0-15	1.42	1.42	1.42	1.42
15-32	1.73	1.76	1.78	1.76
สระบุรี				
0-15	1.27	1.34	1.34	1.32
15-32	1.39	1.36	1.29	1.35
ปทุมธานี				
0-15	1.31	1.41	1.34	1.35
15-32	1.07	1.09	1.03	1.06
ลพบุรี				
0-15	1.53	1.46	1.49	1.49
15-32	1.37	1.42	1.39	1.39
ภาคตะกอน	0.41	0.43	0.45	0.43

ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองหาพื้นที่ผิว

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m ² /g)			เฉลี่ย
	1	2	3	
ชลบุรี				
0-15	11.11	11.10	11.14	11.12
15-32	11.13	11.12	11.10	11.12
สระบุรี				
0-15	19.40	19.51	19.32	19.41
15-32	20.41	20.46	20.46	20.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองหาพื้นที่ผิว

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m ² /g)			เฉลี่ย
	1	2	3	
ปทุมธานี				
0-15	45.22	45.26	45.30	45.26
15-32	45.71	45.74	45.78	45.74
ลพบุรี				
0-15	43.00	42.90	43.10	43.00
15-32	58.69	58.73	58.21	58.54
ภาคตะกอน	37.90	37.54	37.10	37.51

ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองหาค่า CEC

ตัวอย่าง	CEC (meq/100g)			เฉลี่ย
	1	2	3	
ชลบุรี				
0-15	0.80	0.83	0.83	0.82
15-32	1.22	1.25	1.20	1.22
สระบุรี				
0-15	2.93	3.10	2.95	2.99
15-32	3.50	3.12	3.21	3.28
ปทุมธานี				
0-15	20.09	20.17	20.19	20.15
15-32	23.70	23.50	23.56	23.59
ลพบุรี				
0-15	15.98	15.98	15.97	15.98
15-32	18.80	18.99	18.73	18.84
ภาคตะกอน	32.75	32.78	32.76	32.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองหาปริมาณสารอินทรีย์

ตัวอย่าง	% สารอินทรีย์			เฉลี่ย
	1	2	3	
ชลบุรี				
0-15	0.71	0.65	0.69	0.68
15-32	0.28	0.27	0.23	0.26
สระบุรี				
0-15	0.63	0.60	0.63	0.62
15-32	0.37	0.37	0.38	0.37
ปทุมธานี				
0-15	1.99	2.34	2.20	2.18
15-32	1.49	1.54	1.40	1.48
ลพบุรี				
0-15	2.10	2.03	2.07	2.07
15-32	1.07	0.93	0.95	0.98
ภาคตะกอน	6.72	6.52	6.59	6.61

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

ตัวอย่าง	% ความชื้น			เฉลี่ย
	1	2	3	
ชลบุรี				
0-15	0.20	0.10	0.11	0.13
15-32	0.10	0.30	0.15	0.18
สระบุรี				
0-15	9.48	9.68	9.48	9.55
15-32	9.97	9.91	9.95	9.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 (ต่อ) ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

ตัวอย่าง	% ความชื้น			เฉลี่ย
	1	2	3	
ปทุมธานี				
0-15	8.76	8.59	8.60	8.65
15-32	9.13	8.61	9.02	8.92
ลพบุรี				
0-15	5.26	5.37	5.30	5.31
15-32	6.67	6.76	6.70	6.71
ภาคตะกอน	15.90	17.16	16.35	16.47

ตารางที่ ค.7 ผลการทดลองหาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ปริมาณแคดเมียม (mg/kg)			เฉลี่ย
	1	2	3	
ชลบุรี				
0-15	-	-	-	-
15-32	0.03	0.03	0.02	0.02
สระบุรี				
0-15	0.05	0.04	0.07	0.05
15-32	0.09	0.04	0.10	0.08
ปทุมธานี				
0-15	0.22	0.24	0.20	0.22
15-32	0.38	0.31	0.29	0.33
ลพบุรี				
0-15	0.12	0.07	0.09	0.09
15-32	0.13	0.09	0.11	0.11
ภาคตะกอน	4.81	4.83	4.66	4.77

ตารางที่ ค.8 ผลของการกระจายตัวของอนุภาค

ตัวอย่าง	% Sand				% Silt				% Clay			
	1	2	3	Avg.	1	2	3	Avg.	1	2	3	Avg.
ชลบุรี												
0-15	91.00	93.00	93.00	92.33	5.00	3.00	4.80	4.27	4.00	4.00	3.97	3.99
15-32	87.00	87.00	85.00	86.33	7.80	8.00	7.70	7.83	5.20	5.00	5.09	5.10
สระบุรี												
0-15	63.04	64.53	64.50	64.02	19.98	18.99	18.97	19.31	16.98	16.49	16.75	16.74
15-32	63.01	64.54	63.23	63.59	19.50	17.98	18.85	18.78	17.50	17.48	17.55	17.51
ปทุมธานี												
0-15	45.08	42.59	44.31	43.99	19.47	21.22	20.34	20.34	35.45	36.20	35.82	35.82
15-32	47.58	43.92	45.67	45.72	16.23	16.20	16.21	16.21	36.20	39.88	38.07	38.05
ลพบุรี												
0-15	47.74	52.64	49.12	49.83	17.42	14.96	15.73	16.04	34.84	32.40	33.25	33.50
15-32	56.39	57.66	56.50	56.85	6.23	7.47	6.82	6.84	37.38	34.87	36.14	36.13

ตารางที่ ค.9 ผลของโลหะออกไซด์

ตัวอย่าง	% Al ₂ O ₃				% Fe ₂ O ₃				% MnO ₂			
	1	2	3	Avg.	1	2	3	Avg.	1	2	3	Avg.
ชลบุรี												
0-15	3.77	3.51	3.76	3.68	0.47	0.45	0.46	0.46	0.05	0.02	0.06	0.05
15-32	4.12	4.30	4.11	4.18	0.42	0.42	0.42	0.42	0.04	0.03	0.03	0.03
สระบุรี												
0-15	9.32	9.54	9.13	9.33	1.79	1.77	1.78	1.78	0.02	0.02	0.02	0.02
15-32	10.00	10.00	11.00	10.33	1.80	1.79	1.81	1.80	0.02	0.01	0.02	0.02
ปทุมธานี												
0-15	22.20	21.90	22.17	22.09	5.97	5.95	5.96	5.96	0.09	0.09	0.09	0.09
15-32	22.20	20.98	23.26	22.15	5.99	5.99	5.98	5.99	0.09	0.08	0.09	0.09
ลพบุรี												
0-15	15.70	14.75	15.93	15.46	5.40	5.39	5.40	5.40	0.16	0.16	0.16	0.16
15-32	17.30	16.98	17.52	17.27	5.38	5.29	5.41	5.36	0.12	0.10	0.14	0.12
ภาคตะกอน	2.05	2.11	2.04	2.07	25.1	25	26.32	25.47	0.122	0.12	0.12	0.12

ตารางที่ ค.10 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนที่ระดับความลึก 0-15 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
1	2.5	13.2524	11.8660	14.7840	13.3008	3.5488	3.5488
2	5	19.6224	22.6064	17.0401	19.7563	5.2712	8.8199
3	7.5	19.0715	20.2250	19.4490	19.5818	5.2246	14.0445
4	10	13.8369	12.4350	11.8890	12.7203	3.3939	17.4384
5	12.5	12.4383	12.8450	12.5380	12.6071	3.3637	20.8021
6	15	8.2530	8.9550	7.8950	8.3677	2.2326	23.0347
7	17.5	6.2930	4.9540	7.9810	6.4093	1.7101	24.7448
8	20	4.3120	3.9200	6.0830	4.7717	1.2731	26.0179
9	22.5	2.4696	2.5740	2.2250	2.4229	0.6464	26.6643
10	25	3.0618	2.8740	2.9720	2.9693	0.7922	27.4565
11	27.5	1.9474	1.7390	2.0640	1.9168	0.5114	27.9680
12	30	0.6902	0.7152	0.5973	0.6676	0.1781	28.1461
13	32.5	0.2800	0.3250	0.2197	0.2749	0.0733	28.2194
14	35	1.2880	1.0360	1.3580	1.2273	0.3275	28.5469
15	37.5	1.3244	1.3784	1.3750	1.3593	0.3627	28.9096
16	40	0.4354	0.9510	0.0190	0.4685	0.1250	29.0345
17	42.5	0.3108	0.4250	0.2888	0.3415	0.0911	29.1257
18	45	0.2030	0.1450	0.3580	0.2353	0.0628	29.1885
19	47.5	0.2814	0.0801	0.4754	0.2790	0.0744	29.2629
20	50	0.0000	0.0070	0.0042	0.0037	0.0010	29.2639
21	55	0.4711	0.6730	0.5346	0.5596	0.1493	29.4132
22	60	0.0000	0.0020	0.0000	0.0007	0.0002	29.4134
23	65	0.0025	0.0046	0.0000	0.0024	0.0006	29.4140
24	70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.4140
25	75	0.2156	0.3080	0.2010	0.2415	0.0644	29.4784
26	80	0.0721	0.0616	0.0804	0.0714	0.0190	29.4975
27	85	0.0623	0.0890	0.0673	0.0729	0.0194	29.5169
28	90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.5169
29	95	0.5383	0.6020	0.4290	0.5231	0.1396	29.6565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินชลประทานที่ระดับความลึก 0-15 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
30	100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.6565
31	105	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.6565
32	110	0.0840	0.0240	0.1250	0.0777	0.0207	29.6772
33	115	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.6772
34	120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.6772
35	125	0.4340	0.2600	0.6070	0.4337	0.1157	29.7929
36	130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.7929
37	135	0.0490	0.0140	0.0580	0.0403	0.0108	29.8037
38	140	0.4214	0.3754	0.2386	0.3451	0.0921	29.8958
39	145	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.8958
40	150	0.3689	0.4005	0.3221	0.3638	0.0971	29.9928
41	155	0.0000	0.0053	0.0000	0.0018	0.0005	29.9933
42	160	0.0735	0.0040	0.1260	0.0678	0.0181	30.0114
43	165	0.0000	0.0110	0.0010	0.0040	0.0011	30.0125
44	170	0.0385	0.0087	0.0717	0.0396	0.0106	30.0230
45	175	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.0230
46	180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.0230
47	185	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.0230
48	190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.0230
49	195	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.0230
50	200	0.2373	0.3390	0.1862	0.2542	0.0678	30.0909
51	205	0.1631	0.1140	0.2002	0.1591	0.0424	30.1333
52	210	0.1792	0.1512	0.1756	0.1687	0.0450	30.1783
53	215	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.1783
54	220	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.1783
55	225	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.1783
56	230	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.1783
57	235	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.1783
58	240	0.3556	0.2339	0.5081	0.3659	0.0976	30.2759

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินชลบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
59	245	0.4193	0.5270	0.3980	0.4481	0.1196	30.3955
60	250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.3955
61	255	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.3955
62	260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.3955
63	265	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.3955
64	270	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.3955
65	275	0.2286	0.0000	0.0000	0.0762	0.0203	30.4158
66	280	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.4158
67	285	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.4158
68	290	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.4158
69	295	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.4158
70	300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	30.4158

ตารางที่ ค.11 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินชลบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
1	2.5	13.3392	14.4013	10.0200	12.5868	3.6045	3.6045
2	5	19.7274	19.0598	9.2870	16.0247	4.5890	8.1935
3	7.5	18.9994	19.1310	14.5500	17.5601	5.0287	13.2221
4	10	13.3406	13.9520	14.2130	13.8352	3.9620	17.1841
5	12.5	8.5022	9.2018	8.3725	8.6922	2.4892	19.6733
6	15	10.0772	9.9514	12.5762	10.8683	3.1123	22.7856
7	17.5	7.4704	8.2943	7.1986	7.6544	2.1920	24.9776
8	20	4.4674	3.8990	4.7610	4.3758	1.2531	26.2307
9	22.5	5.0078	5.2003	4.6574	4.9552	1.4190	27.6497
10	25	4.2028	5.1130	3.8790	4.3983	1.2595	28.9092
11	27.5	3.7366	2.9520	3.4510	3.3799	0.9679	29.8771
12	30	4.1300	3.6510	4.2970	4.0260	1.1529	31.0300
13	32.5	3.2424	3.7500	2.9820	3.3248	0.9521	31.9821
14	35	0.3178	0.2928	0.3346	0.3151	0.0902	32.0724

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.11 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินชลบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
15	37.5	0.6398	0.7019	0.5976	0.6464	0.1851	32.2575
16	40	0.3066	0.2874	0.4015	0.3318	0.0950	32.3525
17	42.5	0.6300	0.5612	0.8374	0.6762	0.1936	32.5462
18	45	0.5068	0.3279	0.6108	0.4818	0.1380	32.6841
19	47.5	0.0000	0.0013	0.0000	0.0004	0.0001	32.6843
20	50	0.3122	0.4453	0.2617	0.3397	0.0973	32.7816
21	55	0.4221	0.5137	0.3784	0.4381	0.1254	32.9070
22	60	0.2198	0.2176	0.2795	0.2390	0.0684	32.9754
23	65	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.9754
24	70	0.1848	0.2017	0.0000	0.1288	0.0369	33.0123
25	75	0.1561	0.1892	0.0000	0.1151	0.0330	33.0453
26	80	0.5222	0.4923	0.5538	0.5228	0.1497	33.1950
27	85	0.1183	0.1754	0.0000	0.0979	0.0280	33.2230
28	90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.2230
29	95	0.3297	0.2913	0.0000	0.2070	0.0593	33.2823
30	100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.2823
31	105	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.2823
32	110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.2823
33	115	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.2823
34	120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.2823
35	125	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.2823
36	130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.2823
37	135	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.2823
38	140	0.1281	0.0977	0.0000	0.0753	0.0216	33.3039
39	145	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3039
40	150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3039
41	155	0.1414	0.1093	0.1789	0.1432	0.0410	33.3449
42	160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3449
43	165	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3449

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.11 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอสมันของดินชลบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
44	170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3449
45	175	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3449
46	180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3449
47	185	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3449
48	190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3449
49	195	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3449
50	200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3449
51	205	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3449
52	210	0.1057	0.0951	0.0000	0.0669	0.0192	33.3640
53	215	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3640
54	220	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3640
55	225	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3640
56	230	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3640
57	235	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3640
58	240	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3640
59	245	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3640
60	250	0.0364	0.0421	0.0313	0.0366	0.0105	33.3745
61	255	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3745
62	260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3745
63	265	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3745
64	270	0.0441	0.0518	0.0296	0.0418	0.0120	33.3865
65	275	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3865
66	280	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3865
67	285	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3865
68	290	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3865
69	295	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3865
70	300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.3865

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินสระบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
1	2.5	27.0620	23.8875	3.5600	18.1698	4.7447	4.7447
2	5	16.1860	18.1524	2.3800	12.2395	3.1961	7.9408
3	7.5	14.2540	17.1556	3.2400	11.5499	3.0160	10.9568
4	10	10.1220	8.9810	2.7700	7.2910	1.9039	12.8607
5	12.5	3.1420	4.3988	2.8700	3.4703	0.9062	13.7669
6	15	3.3730	4.7180	2.8300	3.6403	0.9506	14.7175
7	17.5	2.9612	3.3642	2.1900	2.8385	0.7412	15.4587
8	20	4.0988	3.4580	3.5100	3.6889	0.9633	16.4220
9	22.5	1.4190	1.4672	3.6200	2.1687	0.5663	16.9884
10	25	0.9470	1.7920	4.0700	2.2697	0.5927	17.5810
11	27.5	1.4160	1.4560	1.9200	1.5973	0.4171	17.9981
12	30	1.4628	1.6198	2.8000	1.9609	0.5120	18.5102
13	32.5	0.1460	0.2044	4.6600	1.6701	0.4361	18.9463
14	35	0.2680	0.2380	3.4100	1.3053	0.3409	19.2872
15	37.5	1.0700	1.2390	2.3400	1.5497	0.4047	19.6918
16	40	0.1160	0.1498	3.8200	1.3619	0.3556	20.0475
17	42.5	0.4280	0.4060	2.1700	1.0013	0.2615	20.3090
18	45	0.3360	0.4704	2.4800	1.0955	0.2861	20.5950
19	47.5	1.3440	1.0598	2.7300	1.7113	0.4469	21.0419
20	50	0.5580	0.5418	2.1100	1.0699	0.2794	21.3213
21	55	0.4340	0.5250	2.8000	1.2530	0.3272	21.6485
22	60	0.5180	0.6076	1.7300	0.9519	0.2486	21.8970
23	65	0.4972	0.5684	1.8600	0.9752	0.2547	22.1517
24	70	0.1985	0.3626	2.1600	0.9070	0.2369	22.3885
25	75	0.0470	0.0210	1.2800	0.4493	0.1173	22.5059
26	80	0.0100	0.0000	1.5200	0.5100	0.1332	22.6391
27	85	0.2200	0.3052	1.0600	0.5284	0.1380	22.7770
28	90	0.1068	0.2142	0.5200	0.2803	0.0732	22.8502
29	95	0.3028	0.2989	0.6400	0.4139	0.1081	22.9583

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินสระบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
30	100	0.3060	0.3094	0.3700	0.3285	0.0858	23.0441
31	105	0.5350	0.6363	0.5400	0.5704	0.1490	23.1931
32	110	0.0000	0.0000	0.7600	0.2533	0.0662	23.2592
33	115	0.0000	0.0000	0.4800	0.1600	0.0418	23.3010
34	120	0.4930	0.6384	0.0100	0.3805	0.0994	23.4003
35	125	0.0000	0.0000	1.0200	0.3400	0.0888	23.4891
36	130	0.1480	0.3269	0.2500	0.2416	0.0631	23.5522
37	135	0.6520	0.5019	0.4700	0.5413	0.1414	23.6936
38	140	0.2780	0.3220	1.0500	0.5500	0.1436	23.8372
39	145	0.1140	0.1302	0.0000	0.0814	0.0213	23.8584
40	150	0.0000	0.0000	0.1400	0.0467	0.0122	23.8706
41	155	0.0000	0.0000	0.2700	0.0900	0.0235	23.8941
42	160	0.0000	0.0000	0.0380	0.0127	0.0033	23.8974
43	165	0.0000	0.0000	0.1300	0.0433	0.0113	23.9088
44	170	0.0000	0.0000	0.5300	0.1767	0.0461	23.9549
45	175	0.1098	0.3843	0.5700	0.3547	0.0926	24.0475
46	180	0.0000	0.0000	0.4000	0.1333	0.0348	24.0823
47	185	0.0000	0.0000	0.4500	0.1500	0.0392	24.1215
48	190	0.0000	0.0000	0.3000	0.1000	0.0261	24.1476
49	195	0.0000	0.0000	0.1600	0.0533	0.0139	24.1615
50	200	0.0000	0.0000	0.3500	0.1167	0.0305	24.1920
51	205	0.0000	0.0000	0.8100	0.2700	0.0705	24.2625
52	210	0.0000	0.0000	0.6300	0.2100	0.0548	24.3174
53	215	0.0000	0.1747	0.1800	0.1182	0.0309	24.3482
54	220	0.0000	0.0000	0.2600	0.0867	0.0226	24.3709
55	225	0.0000	0.0000	0.2600	0.0867	0.0226	24.3935
56	230	0.0000	0.0000	0.0500	0.0167	0.0044	24.3978
57	235	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินสระบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
58	240	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978
59	245	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978
60	250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978
61	255	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978
62	260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978
63	265	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978
64	270	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978
65	275	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978
66	280	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978
67	285	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978
68	290	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978
69	295	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978
70	300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.3978

ตารางที่ ค.13 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินสระบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
1	2.5	9.9300	9.0958	10.2598	9.7619	2.7956	2.7956
2	5	12.5400	9.8714	9.8204	10.7439	3.0768	5.8724
3	7.5	8.0100	7.5236	9.1494	8.2277	2.3562	8.2286
4	10	8.4300	9.0902	5.9722	7.8308	2.2426	10.4712
5	12.5	5.5700	4.9252	3.5181	4.6711	1.3377	11.8089
6	15	5.7700	9.2792	10.6512	8.5668	2.4533	14.2622
7	17.5	4.0200	5.7666	6.4767	5.4211	1.5525	15.8147
8	20	3.9700	4.6802	4.3374	4.3292	1.2398	17.0545
9	22.5	2.2800	6.0074	7.1645	5.1506	1.4750	18.5295
10	25	4.1600	3.5854	2.5110	3.4188	0.9791	19.5085
11	27.5	3.6600	4.0068	6.4127	4.6932	1.3440	20.8526
12	30	1.1500	3.5742	1.0212	1.9151	0.5485	21.4010

ตารางที่ ค.13 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินสระบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
13	32.5	2.6500	2.7692	1.9787	2.4660	0.7062	22.1072
14	35	3.0200	2.2596	1.6146	2.2981	0.6581	22.7653
15	37.5	1.3900	1.4672	2.4192	1.7588	0.5037	23.2690
16	40	0.7600	3.4804	4.0991	2.7798	0.7961	24.0651
17	42.5	1.4900	2.6810	2.9766	2.3825	0.6823	24.7474
18	45	0.9400	3.1570	4.2250	2.7740	0.7944	25.5418
19	47.5	0.8500	2.2092	1.5786	1.5459	0.4427	25.9845
20	50	0.5800	2.3128	4.6080	2.5003	0.7160	26.7005
21	55	0.6600	0.9429	1.6940	1.0990	0.3147	27.0153
22	60	0.8600	0.9023	1.2890	1.0171	0.2913	27.3065
23	65	0.7100	1.6380	2.3440	1.5640	0.4479	27.7544
24	70	0.6500	0.9744	0.2785	0.6343	0.1816	27.9361
25	75	0.7300	1.3265	1.8957	1.3174	0.3773	28.3133
26	80	0.2000	1.2530	0.7690	0.7407	0.2121	28.5255
27	85	0.5300	0.9814	0.8028	0.7714	0.2209	28.7464
28	90	0.4500	0.7042	0.9975	0.7172	0.2054	28.9518
29	95	0.0000	0.4228	0.2012	0.2080	0.0596	29.0113
30	100	0.1900	0.5215	0.4919	0.4011	0.1149	29.1262
31	105	0.7200	0.8974	10.5620	4.0598	1.1626	30.2888
32	110	0.2500	0.6643	0.9490	0.6211	0.1779	30.4667
33	115	0.3700	0.6811	0.7314	0.5942	0.1702	30.6369
34	120	0.2400	0.6804	0.9441	0.6215	0.1780	30.8148
35	125	0.3700	1.0206	1.4580	0.9495	0.2719	31.0868
36	130	0.1600	0.7154	0.2044	0.3599	0.1031	31.1898
37	135	0.5300	0.1470	0.5425	0.4065	0.1164	31.3063
38	140	0.6400	0.5558	0.7940	0.6633	0.1899	31.4962
39	145	0.4400	0.4683	0.3383	0.4155	0.1190	31.6152
40	150	0.0000	0.3654	0.0000	0.1218	0.0349	31.6501
41	155	0.0200	0.0000	0.5007	0.1736	0.0497	31.6998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.13 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินสระบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
42	160	0.2000	0.3731	0.5331	0.3687	0.1056	31.8054
43	165	0.1400	0.0959	0.0274	0.0878	0.0251	31.8305
44	170	0.1500	0.3941	0.1266	0.2236	0.0640	31.8945
45	175	0.6800	0.4858	0.6940	0.6199	0.1775	32.0721
46	180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.0721
47	185	0.2700	0.7700	0.2200	0.4200	0.1203	32.1924
48	190	0.3900	0.3353	0.4799	0.4017	0.1150	32.3074
49	195	0.2600	0.2170	0.6231	0.3667	0.1050	32.4124
50	200	0.0000	0.6685	0.7834	0.4840	0.1386	32.5510
51	205	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.5510
52	210	0.0000	0.2212	0.1967	0.1393	0.0399	32.5909
53	215	0.2200	0.0000	0.0000	0.0733	0.0210	32.6119
54	220	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.6119
55	225	0.0000	0.0427	0.0322	0.0250	0.0071	32.6191
56	230	0.0100	0.0000	0.0000	0.0033	0.0010	32.6200
57	235	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.6200
58	240	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.6200
59	245	0.5700	0.0000	0.5790	0.3830	0.1097	32.7297
60	250	0.0900	0.2779	0.0000	0.1226	0.0351	32.7648
61	255	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.7648
62	260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.7648
63	265	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.7648
64	270	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.7648
65	275	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.7648
66	280	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.7648
67	285	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.7648
68	290	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.7648
69	295	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.7648
70	300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	32.7648

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.14 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินปนุมนานีที่ระดับความลึก 0-15 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
1	2.5	13.5422	15.8692	21.0030	16.8048	5.6857	5.6857
2	5	10.6582	9.7613	2.4870	7.6355	2.5834	8.2692
3	7.5	9.9148	7.0822	2.3005	6.4325	2.1764	10.4455
4	10	4.8678	3.9080	8.1970	5.6576	1.9142	12.3597
5	12.5	4.8510	4.6583	3.8430	4.4508	1.5059	13.8656
6	15	3.1402	2.2430	1.7800	2.3877	0.8079	14.6735
7	17.5	3.9186	2.7990	3.4620	3.3932	1.1481	15.8215
8	20	3.7730	1.1196	2.2240	2.3722	0.8026	16.6241
9	22.5	1.0500	0.9750	1.0307	1.0186	0.3446	16.9688
10	25	1.6226	1.1594	0.0082	0.9301	0.3147	17.2834
11	27.5	1.8508	1.3220	1.6250	1.5993	0.5411	17.8245
12	30	0.4732	0.1352	0.7260	0.4448	0.1505	17.9750
13	32.5	0.0000	0.0000	0.0047	0.0016	0.0005	17.9756
14	35	1.1158	1.5318	0.9548	1.2008	0.4063	18.3818
15	37.5	0.6118	0.4748	1.0190	0.7019	0.2375	18.6193
16	40	0.0980	0.0730	0.0000	0.0570	0.0193	18.6386
17	42.5	0.7994	0.5712	0.2310	0.5339	0.1806	18.8192
18	45	1.3482	1.3852	1.1160	1.2831	0.4341	19.2534
19	47.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	19.2534
20	50	1.8760	1.3450	0.9973	1.4061	0.4757	19.7291
21	55	0.1659	0.2374	0.0000	0.1344	0.0455	19.7746
22	60	0.4368	0.2480	0.0000	0.2283	0.0772	19.8518
23	65	0.0448	0.0128	0.0000	0.0192	0.0065	19.8583
24	70	1.1858	1.1130	1.6368	1.3119	0.4439	20.3022
25	75	0.0000	0.0000	0.3892	0.1297	0.0439	20.3461
26	80	0.4641	0.3264	0.6331	0.4745	0.1606	20.5066
27	85	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.5066
28	90	0.3738	0.5346	0.8846	0.5977	0.2022	20.7088
29	95	0.7021	0.2006	0.8764	0.5930	0.2006	20.9095

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.14 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินปทุมธานีที่ระดับความลึก 0-15 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
30	100	0.1190	0.1734	0.0068	0.0997	0.0337	20.9432
31	105	0.5929	0.6984	0.5539	0.6151	0.2081	21.1513
32	110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21.1513
33	115	0.1827	0.2615	0.1969	0.2137	0.0723	21.2236
34	120	0.5544	0.3517	0.4683	0.4581	0.1550	21.3786
35	125	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21.3786
36	130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21.3786
37	135	0.2177	0.3116	0.2297	0.2530	0.0856	21.4642
38	140	0.3766	0.2138	0.6758	0.4221	0.1428	21.6070
39	145	0.0000	0.0012	0.0012	0.0008	0.0003	21.6073
40	150	0.1211	0.1429	0.1038	0.1226	0.0415	21.6488
41	155	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21.6488
42	160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21.6488
43	165	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	21.6488
44	170	0.4361	0.8591	0.5712	0.6221	0.2105	21.8593
45	175	0.7896	0.5026	0.6193	0.6372	0.2156	22.0749
46	180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.0749
47	185	0.2597	0.0000	0.0107	0.0901	0.0305	22.1054
48	190	0.0518	0.7810	0.8194	0.5507	0.1863	22.2917
49	195	0.0000	0.0732	0.0000	0.0244	0.0083	22.3000
50	200	0.1435	0.0000	0.0000	0.0478	0.0162	22.3161
51	205	0.4179	0.3989	0.8691	0.5620	0.1901	22.5063
52	210	0.0294	0.0670	0.0038	0.0334	0.0113	22.5176
53	215	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
54	220	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
55	225	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
56	230	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
57	235	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
58	240	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางอื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.14 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินปนุมนานที่ระดับความลึก 0-15 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
59	245	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
60	250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
61	255	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
62	260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
63	265	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
64	270	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
65	275	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
66	280	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
67	285	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
68	290	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
69	295	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176
70	300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	22.5176

ตารางที่ ค.15 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินปนุมนานที่ระดับความลึก 15-32 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
1	2.5	35.2842	29.5413	16.6820	27.1692	9.4775	9.4775
2	5	14.6286	20.7966	28.3376	21.2543	7.4142	16.8917
3	7.5	4.9434	7.7230	6.0774	6.2479	2.1795	19.0712
4	10	2.8056	3.6610	0.4558	2.3075	0.8049	19.8761
5	12.5	3.1822	5.5700	3.3315	4.0279	1.4051	21.2812
6	15	1.3888	2.0880	1.8584	1.7784	0.6204	21.9015
7	17.5	0.6328	0.5297	0.6003	0.5876	0.2050	22.1065
8	20	0.9702	1.7820	0.4457	1.0660	0.3718	22.4784
9	22.5	1.1228	1.3900	1.0069	1.1732	0.4093	22.8876
10	25	0.0000	0.0071	0.0000	0.0024	0.0008	22.8884
11	27.5	0.8302	0.4498	0.2763	0.5188	0.1810	23.0694
12	30	2.0930	1.8090	1.7980	1.9000	0.6628	23.7322
13	32.5	1.4378	1.1160	1.0335	1.1958	0.4171	24.1493
14	35	1.9852	1.7442	1.2533	1.6609	0.5794	24.7287

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.15 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินปทุมธานีที่ระดับความลึก 15-32 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
15	37.5	0.2534	0.9765	0.0879	0.4393	0.1532	24.8819
16	40	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	24.8819
17	42.5	0.0000	0.0499	0.0000	0.0166	0.0058	24.8877
18	45	0.6538	0.7763	0.0000	0.4767	0.1663	25.0540
19	47.5	0.8890	0.5314	0.6627	0.6944	0.2422	25.2962
20	50	0.9618	0.7412	0.2870	0.6633	0.2314	25.5276
21	55	0.0000	0.0659	0.0000	0.0220	0.0077	25.5353
22	60	0.2772	0.3488	0.0000	0.2087	0.0728	25.6081
23	65	0.1981	0.2034	0.0000	0.1338	0.0467	25.6548
24	70	0.8414	0.6563	1.6368	1.0448	0.3645	26.0192
25	75	0.0000	0.0000	0.3892	0.1297	0.0453	26.0645
26	80	0.0000	0.0807	0.0261	0.0356	0.0124	26.0769
27	85	0.4536	0.3226	0.0000	0.2587	0.0903	26.1672
28	90	0.0000	0.0211	0.0000	0.0070	0.0025	26.1696
29	95	0.2282	0.3566	0.8764	0.4871	0.1699	26.3395
30	100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.3395
31	105	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.3395
32	110	0.0714	0.0003	0.0000	0.0239	0.0083	26.3479
33	115	0.2471	0.4039	0.0000	0.2170	0.0757	26.4236
34	120	0.2947	0.2210	0.0000	0.1719	0.0600	26.4835
35	125	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.4835
36	130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.4835
37	135	0.0092	0.0000	0.0163	0.0085	0.0030	26.4865
38	140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.4865
39	145	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.4865
40	150	0.3675	0.6322	0.0000	0.3332	0.1162	26.6027
41	155	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.6027
42	160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.6027
43	165	0.0000	0.0042	0.0000	0.0014	0.0005	26.6032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.15 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินปนุมนานที่ระดับความลึก 15-32 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
44	170	0.1148	0.0688	0.2896	0.1577	0.0550	26.6582
45	175	0.3122	0.5026	0.8341	0.5496	0.1917	26.8500
46	180	0.0067	0.0000	0.0000	0.0022	0.0008	26.8508
47	185	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.8508
48	190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.8508
49	195	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.8508
50	200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.8508
51	205	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.8508
52	210	0.3563	0.0000	0.0000	0.1188	0.0414	26.8922
53	215	0.4417	0.8799	0.0000	0.4405	0.1537	27.0459
54	220	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
55	225	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
56	230	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
57	235	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
58	240	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
59	245	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
60	250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
61	255	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
62	260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
63	265	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
64	270	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
65	275	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
66	280	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
67	285	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
68	290	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
69	295	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459
70	300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0459

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.16 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินลพบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
1	2.5	2.3520	9.9300	17.0300	9.7707	3.2710	3.2710
2	5	2.7832	12.5400	5.8100	7.0444	2.3583	5.6292
3	7.5	8.1620	8.0100	8.6420	8.2713	2.7690	8.3982
4	10	7.6790	8.4300	6.1900	7.4330	2.4884	10.8866
5	12.5	11.7012	5.5700	4.3300	7.2004	2.4105	13.2971
6	15	6.8838	5.7700	7.0060	6.5533	2.1939	15.4910
7	17.5	7.0784	4.0200	8.5190	6.5391	2.1891	17.6801
8	20	4.7012	3.9700	3.4160	4.0291	1.3488	19.0289
9	22.5	2.6124	2.2800	2.2130	2.3685	0.7929	19.8218
10	25	2.4220	4.1600	1.7312	2.7711	0.9277	20.7495
11	27.5	2.2666	3.6600	6.1180	4.0149	1.3441	22.0936
12	30	2.9582	1.1500	2.7133	2.2738	0.7612	22.8548
13	32.5	1.8648	2.6500	2.5530	2.3559	0.7887	23.6435
14	35	0.2632	3.0200	1.9940	1.7591	0.5889	24.2324
15	37.5	1.2936	1.3900	1.2248	1.3028	0.4361	24.6685
16	40	0.9142	0.7600	0.7663	0.8135	0.2723	24.9408
17	42.5	0.0000	1.4900	0.0000	0.4967	0.1663	25.1071
18	45	0.0000	0.9400	1.7712	0.9037	0.3025	25.4097
19	47.5	0.8092	0.8500	0.8931	0.8508	0.2848	25.6945
20	50	0.0000	0.5800	0.4711	0.3504	0.1173	25.8118
21	55	0.3402	0.6600	0.3997	0.4666	0.1562	25.9680
22	60	0.3087	0.8600	0.4654	0.5447	0.1824	26.1503
23	65	0.2737	0.7100	0.4558	0.4798	0.1606	26.3110
24	70	0.7882	0.6500	0.6647	0.7010	0.2347	26.5456
25	75	0.5376	0.7300	0.3352	0.5343	0.1789	26.7245
26	80	0.1932	0.2000	0.1331	0.1754	0.0587	26.7832
27	85	0.1309	0.5300	0.6843	0.4484	0.1501	26.9333
28	90	0.0525	0.4500	0.1366	0.2130	0.0713	27.0047
29	95	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0047

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.16 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินลพบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
30	100	0.0000	0.1900	0.0000	0.0633	0.0212	27.0259
31	105	0.3066	0.7200	0.2655	0.4307	0.1442	27.1700
32	110	0.0455	0.2500	0.0401	0.1119	0.0374	27.2075
33	115	0.0805	0.3700	0.1863	0.2123	0.0711	27.2786
34	120	0.2856	0.2400	0.2392	0.2549	0.0853	27.3639
35	125	0.6076	0.3700	0.1550	0.3775	0.1264	27.4903
36	130	0.0000	0.1600	0.0000	0.0533	0.0179	27.5081
37	135	0.0000	0.5300	0.0000	0.1767	0.0591	27.5673
38	140	0.4060	0.6400	0.4331	0.4930	0.1651	27.7323
39	145	0.3633	0.4400	0.3776	0.3936	0.1318	27.8641
40	150	0.0161	0.0000	0.0000	0.0054	0.0018	27.8659
41	155	0.1218	0.0200	0.0000	0.0473	0.0158	27.8817
42	160	0.3780	0.2000	0.3998	0.3259	0.1091	27.9908
43	165	0.1106	0.1400	0.1062	0.1189	0.0398	28.0307
44	170	0.3528	0.1500	0.4661	0.3230	0.1081	28.1388
45	175	0.1967	0.6800	0.0000	0.2922	0.0978	28.2366
46	180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.2366
47	185	0.0441	0.2700	0.0000	0.1047	0.0351	28.2717
48	190	0.0000	0.3900	0.0000	0.1300	0.0435	28.3152
49	195	0.0000	0.2600	0.0000	0.0867	0.0290	28.3442
50	200	0.1813	0.0000	0.0000	0.0604	0.0202	28.3644
51	205	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.3644
52	210	0.1967	0.0000	0.0000	0.0656	0.0219	28.3864
53	215	0.0000	0.2200	0.0000	0.0733	0.0246	28.4109
54	220	0.3136	0.0000	0.0000	0.1045	0.0350	28.4459
55	225	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.4459
56	230	0.0000	0.0100	0.0000	0.0033	0.0011	28.4470
57	235	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.4470
58	240	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.4470

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.16 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินลพบุรีที่ระดับความลึก 0-15 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
59	245	0.0000	0.5700	0.0054	0.1918	0.0642	28.5113
60	250	0.0000	0.0900	0.0302	0.0401	0.0134	28.5247
61	255	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.5247
62	260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.5247
63	265	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.5247
64	270	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.5247
65	275	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.5247
66	280	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.5247
67	285	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.5247
68	290	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.5247
69	295	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.5247
70	300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.5247

ตารางที่ ค.17 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินลพบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
1	2.5	36.2285	29.2610	9.9300	25.1398	7.5864	7.5864
2	5	23.2652	28.1270	12.5400	21.3107	6.4309	14.0173
3	7.5	7.8148	11.3980	8.0100	9.0743	2.7383	16.7556
4	10	4.9714	10.2680	8.4300	7.8898	2.3809	19.1365
5	12.5	5.2542	8.6800	5.5700	6.5014	1.9619	21.0984
6	15	3.9746	5.2600	5.7700	5.0015	1.5093	22.6078
7	17.5	2.8532	4.4100	4.0200	3.7611	1.1350	23.7427
8	20	3.6470	3.5830	3.9700	3.7333	1.1266	24.8693
9	22.5	2.0244	2.1370	2.2800	2.1471	0.6479	25.5173
10	25	2.8392	4.0931	4.1600	3.6974	1.1158	26.6330
11	27.5	2.1938	2.5130	3.6600	2.7889	0.8416	27.4746
12	30	0.7070	0.8096	1.1500	0.8889	0.2682	27.7429
13	32.5	1.1676	2.1640	2.6500	1.9939	0.6017	28.3446
14	35	0.2296	1.1632	3.0200	1.4709	0.4439	28.7884

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.17 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินลพบุรีที่ระดับความลึก 15-32 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
15	37.5	1.1998	1.4910	1.3900	1.3603	0.4105	29.1989
16	40	2.2106	0.7316	0.7600	1.2341	0.3724	29.5713
17	42.5	7.8022	3.4920	1.4900	4.2614	1.2860	30.8573
18	45	2.7958	0.6170	0.9400	1.4509	0.4378	31.2951
19	47.5	2.6138	2.4395	0.8500	1.9678	0.5938	31.8889
20	50	2.8910	0.7684	0.5800	1.4131	0.4264	32.3154
21	55	0.4305	0.4056	0.6600	0.4987	0.1505	32.4659
22	60	0.2471	0.2269	0.8600	0.4447	0.1342	32.6001
23	65	0.3213	0.2745	0.7100	0.4353	0.1313	32.7314
24	70	0.0000	0.0000	0.6500	0.2167	0.0654	32.7968
25	75	0.2450	0.9910	0.7300	0.6553	0.1978	32.9945
26	80	0.3773	0.2664	0.2000	0.2812	0.0849	33.0794
27	85	0.0000	0.7120	0.5300	0.4140	0.1249	33.2043
28	90	0.1288	0.2352	0.4500	0.2713	0.0819	33.2862
29	95	0.6251	0.3766	0.0000	0.3339	0.1008	33.3870
30	100	0.1743	0.1594	0.1900	0.1746	0.0527	33.4397
31	105	0.8365	0.7700	0.7200	0.7755	0.2340	33.6737
32	110	0.0000	0.1410	0.2500	0.1303	0.0393	33.7130
33	115	0.0000	0.4600	0.3700	0.2767	0.0835	33.7965
34	120	0.1477	0.1882	0.2400	0.1920	0.0579	33.8544
35	125	0.0000	0.0964	0.3700	0.1555	0.0469	33.9014
36	130	0.0000	0.2709	0.1600	0.1436	0.0433	33.9447
37	135	0.1015	0.4118	0.5300	0.3478	0.1049	34.0496
38	140	0.0000	0.5594	0.6400	0.3998	0.1206	34.1703
39	145	0.0000	0.7150	0.4400	0.3850	0.1162	34.2865
40	150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	34.2865
41	155	0.0000	0.0198	0.0200	0.0133	0.0040	34.2905
42	160	0.0000	0.4170	0.2000	0.2057	0.0621	34.3525
43	165	0.0000	0.2640	0.1400	0.1347	0.0406	34.3932

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.17 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินพบูรีที่ระดับความลึก 15-32 cm

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
44	170	0.0000	0.0000	0.1500	0.0500	0.0151	34.4083
45	175	0.0000	1.6830	0.6800	0.7877	0.2377	34.6460
46	180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	34.6460
47	185	0.0000	0.7795	0.2700	0.3498	0.1056	34.7515
48	190	0.2919	0.3314	0.3900	0.3378	0.1019	34.8535
49	195	0.0000	0.4200	0.2600	0.2267	0.0684	34.9219
50	200	0.1813	0.7944	0.0000	0.3252	0.0981	35.0200
51	205	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.0200
52	210	0.1967	0.3900	0.0000	0.1956	0.0590	35.0790
53	215	0.0000	0.9400	0.2200	0.3867	0.1167	35.1957
54	220	0.3136	0.6870	0.0000	0.3335	0.1006	35.2963
55	225	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.2963
56	230	0.0000	0.0000	0.0100	0.0033	0.0010	35.2974
57	235	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.2974
58	240	0.0000	0.3990	0.0000	0.1330	0.0401	35.3375
59	245	0.0000	0.8110	0.5700	0.4603	0.1389	35.4764
60	250	0.0000	0.0000	0.0900	0.0300	0.0091	35.4855
61	255	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.4855
62	260	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.4855
63	265	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.4855
64	270	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.4855
65	275	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.4855
66	280	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.4855
67	285	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.4855
68	290	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.4855
69	295	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.4855
70	300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	35.4855

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.18 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของกากตะกอน

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
1	2.5	2.2400	2.0600	2.3700	2.2233	0.6778	0.9955
2	5	0.9100	1.1960	1.0200	1.0420	0.3177	1.3132
3	7.5	0.7600	0.9230	0.9730	0.8853	0.2699	1.5831
4	10	0.0600	0.1434	0.1280	0.1105	0.0337	1.6168
5	12.5	1.2100	0.0935	0.2640	0.5225	0.1593	1.7761
6	15	1.0500	0.1950	1.6490	0.9647	0.2941	2.0701
7	17.5	1.5300	1.2400	2.4300	1.7333	0.5284	2.5986
8	20	1.2200	1.0937	1.9120	1.4086	0.4294	3.0280
9	22.5	0.2900	0.8240	0.5017	0.5386	0.1642	3.1922
10	25	1.1800	0.0609	2.0390	1.0933	0.3333	3.5255
11	27.5	0.2500	0.4530	0.3600	0.3543	0.1080	3.6335
12	30	0.9700	0.1047	0.5930	0.5559	0.1695	3.8030
13	32.5	1.2700	0.0029	1.0700	0.7810	0.2381	4.0411
14	35	1.1700	0.1933	0.8469	0.7367	0.2246	4.2657
15	37.5	1.0000	0.0365	1.8350	0.9572	0.2918	4.5575
16	40	0.4700	0.0458	0.6952	0.4037	0.1231	4.6806
17	42.5	0.0200	0.1106	0.0674	0.0660	0.0201	4.7007
18	45	0.6400	0.0000	0.8430	0.4943	0.1507	4.8514
19	47.5	0.1100	0.0000	0.2764	0.1288	0.0393	4.8907
20	50	1.0200	0.0000	0.1104	0.3768	0.1149	5.0056
21	55	0.0400	0.0419	0.0000	0.0273	0.0083	5.0139
22	60	0.2400	0.0596	0.1630	0.1542	0.0470	5.0609
23	65	0.0100	0.0367	0.0425	0.0297	0.0091	5.0700
24	70	0.1400	0.0459	0.0796	0.0885	0.0270	5.0970
25	75	0.2800	0.0609	0.3684	0.2364	0.0721	5.1690
26	80	0.6800	0.0000	0.0000	0.2267	0.0691	5.2381
27	85	0.3200	0.0200	0.0061	0.1154	0.0352	5.2733
28	90	0.3600	0.0000	0.8900	0.4167	0.1270	5.4003
29	95	0.2300	0.0293	0.1764	0.1452	0.0443	5.4446

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.18 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของกากตะกอน

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
30	100	0.1700	0.0162	0.0693	0.0852	0.0260	5.4706
31	105	0.4300	0.0000	0.3820	0.2707	0.0825	5.5531
32	110	0.1200	0.0477	0.0097	0.0592	0.0180	5.5711
33	115	0.0000	0.0536	0.0691	0.0409	0.0125	5.5836
34	120	0.0000	0.0034	0.0000	0.0011	0.0003	5.5840
35	125	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.5840
36	130	0.0000	0.0143	0.1480	0.0541	0.0165	5.6004
37	135	0.6600	0.3180	0.5300	0.5027	0.1532	5.7537
38	140	0.6600	0.6480	0.6358	0.6479	0.1975	5.9512
39	145	0.0000	0.0265	0.0000	0.0088	0.0027	5.9539
40	150	0.4100	0.0000	0.2410	0.2170	0.0662	6.0201
41	155	0.1800	0.0424	0.2900	0.1708	0.0521	6.0722
42	160	0.3300	0.0221	0.0660	0.1394	0.0425	6.1146
43	165	0.0000	0.0414	0.0132	0.0182	0.0056	6.1202
44	170	0.0000	0.0231	0.0000	0.0077	0.0023	6.1225
45	175	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.1225
46	180	0.3100	0.2470	0.2040	0.2537	0.0773	6.1999
47	185	0.0300	0.0000	0.0000	0.0100	0.0030	6.2029
48	190	0.2700	0.3520	0.1860	0.2693	0.0821	6.2850
49	195	0.0000	0.0309	0.0653	0.0321	0.0098	6.2948
50	200	0.0000	0.0219	0.0000	0.0073	0.0022	6.2970
51	205	0.0000	0.0316	0.0864	0.0393	0.0120	6.3090
52	210	0.0000	0.0000	0.1308	0.0436	0.0133	6.3223
53	215	0.1200	0.1780	0.1821	0.1600	0.0488	6.3711
54	220	0.1500	0.0109	0.1720	0.1110	0.0338	6.4049
55	225	0.2000	0.3610	0.3180	0.2930	0.0893	6.4943
56	230	0.2600	0.1700	0.3900	0.2733	0.0833	6.5776
57	235	0.3800	0.3160	0.2940	0.3300	0.1006	6.6782
58	240	0.1500	0.0326	0.0942	0.0923	0.0281	6.7063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.18 (ต่อ) ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของกากตะกอน

No.	mL	Conc.			Avg.	%Removal	Summation
59	245	0.6600	0.4920	0.7940	0.6487	0.1978	6.9041
60	250	0.4400	0.3740	0.5830	0.4657	0.1420	7.0461
61	255	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.0461
62	260	0.0700	0.0000	0.1000	0.0567	0.0173	7.0633
63	265	0.0000	0.0081	0.0040	0.0040	0.0012	7.0646
64	270	0.0600	0.1930	0.2470	0.1667	0.0508	7.1154
65	275	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.1154
66	280	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.1154
67	285	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.1154
68	290	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.1154
69	295	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.1154
70	300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.1154



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.19 ผลการทดลองแบบครึ่งที่ตัดส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery	% recovery 1	% recovery 2	% recovery 3
	1	2	3					
ชลบุรี								
0-15	319.87	286.15	299.46	301.83	86.43	91.60	81.94	85.76
15-32	346.28	348.69	349.1	348.02	92.86	99.16	99.85	99.97
สระบุรี								
0-15	310.15	288.3	294.67	297.71	77.74	88.82	82.56	84.38
15-32	295.22	302.74	294.66	297.54	85.21	84.54	86.70	84.38
ปทุมธานี								
0-15	261.81	239.54	227.64	243.00	82.22	74.97	68.60	65.19
15-32	297.39	213.67	289.76	266.94	93.12	85.16	61.19	82.98
ลพบุรี								
0-15	229.31	220.47	224.53	224.77	67.83	65.67	63.14	64.30
15-32	303.37	299.67	268.92	290.65	97.30	86.88	85.82	77.01
ภาคตะกอน	28.44	20.49	22.82	23.92	7.29	8.14	5.87	6.53

ตารางที่ ค.20 ผลการทดลองแบบครั้งเดียวที่สัดส่วน 1 g ต่อ 5 mL

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery	% recovery 1	% recovery 2	% recovery 3
	1	2	3					
ชลบุรี								
0-15	271.1	290.08	241.13	267.44	76.59	77.63	83.07	69.05
15-32	348.36	331.74	336.23	338.78	90.39	99.76	95.00	96.29
สระบุรี								
0-15	305.06	299.47	243.7	282.74	73.83	87.36	85.76	69.79
15-32	280.78	279.11	300.1	286.66	82.09	80.41	79.93	85.94
ปทุมธานี								
0-15	237.94	219.43	246.38	234.58	79.37	68.14	62.84	70.56
15-32	265.04	241.38	260.73	255.72	89.20	75.90	69.12	74.66
ลพบุรี								
0-15	219.16	216.55	231.68	222.46	67.13	62.76	62.01	66.35
15-32	256.09	263.21	266.5	261.93	87.69	73.34	75.38	76.32
ภาคตะกอน	46.8	35.97	42.16	41.64	12.70	13.40	10.30	12.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.21 ผลการทดลองแบบครึ่งที่สัดส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery	% recovery 1	% recovery 2	% recovery 3
	1	2	3					
ชลบุรี								
0-15	256.82	277.35	251.92	262.03	75.04	73.55	79.42	72.14
15-32	290.69	275	287.36	284.35	75.87	83.24	78.75	82.29
สระบุรี								
0-15	274.89	226.87	284.61	262.12	68.45	78.72	64.97	81.50
15-32	259.3	274.2	263.8	265.76	76.11	74.26	78.52	75.54
ปทุมธานี								
0-15	226.16	247.86	220.08	231.37	78.28	64.77	70.98	63.02
15-32	220.23	217.33	252.76	230.11	80.27	63.07	62.24	72.38
ลพบุรี								
0-15	202.63	200.81	213.29	205.58	62.04	58.03	57.51	61.08
15-32	240.3	235	274.96	250.09	83.72	68.81	67.30	78.74
ภาคตะกอน	60.48	55.08	52.98	56.18	17.13	17.32	15.77	15.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-22 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 1, spike

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	0.76	0.71	0.84	0.77	0.22
15-32	0.89	0.92	0.76	0.86	0.23
สระบุรี					
0-15	1.27	1.03	1.23	1.18	0.31
15-32	2.67	2.06	2.24	2.32	0.67
ปทุมธานี					
0-15	1.27	1.33	1.30	1.30	0.44
15-32	1.73	1.71	1.73	1.73	0.60
ลพบุรี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	-	-	-	-	-
ภาคตะกอน	2.06	1.76	1.49	1.77	0.54

ตารางที่ ค-23 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 1, column test

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	0.04	0.03	0.04	0.03	0.01
สระบุรี					
0-15	0.04	0.04	0.04	0.04	0.01
15-32	0.05	0.05	0.05	0.05	0.01
ปทุมธานี					
0-15	0.06	0.04	0.07	0.06	0.02
15-32	0.08	0.07	0.07	0.07	0.03

ตารางที่ ค-23 (ต่อ) แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 1, column test

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ลพบุรี					
0-15	0.06	0.05	0.06	0.06	0.02
15-32	0.09	0.07	0.07	0.07	0.02
ภาคตะกอน	0.16	0.18	0.13	0.16	0.05

ตารางที่ ค-24 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 1, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	-	-	-	-	-
สระบุรี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	-	-	-	-	-
ปทุมธานี					
0-15	0.64	0.69	0.84	0.73	0.25
15-32	1.13	1.49	1.18	1.27	0.44
ลพบุรี					
0-15	0.43	0.26	1.00	0.56	0.17
15-32	0.58	0.54	0.42	0.51	0.17
ภาคตะกอน	3.77	3.18	2.63	3.19	0.97

ตารางที่ ค-25 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 1, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	0.67	0.59	0.62	0.63	0.18
15-32	0.10	0.11	0.09	0.10	0.03
สระบุรี					
0-15	0.81	0.78	0.84	0.81	0.21
15-32	1.87	2.08	1.85	1.93	0.55
ปทุมธานี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	0.92	1.00	0.90	0.94	0.33
ลพบุรี					
0-15	0.43	0.44	0.45	0.44	0.13
15-32	0.73	0.41	0.29	0.48	0.16
ภาคตะกอน	3.87	3.13	2.95	3.31	1.01

ตารางที่ ค-26 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 1, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	0.86	0.90	0.75	0.84	0.24
15-32	1.74	1.20	2.05	1.66	0.44
สระบุรี					
0-15	0.96	0.96	0.90	0.94	0.24
15-32	1.02	1.29	1.00	1.10	0.32
ปทุมธานี					
0-15	0.20	0.10	0.17	0.16	0.05
15-32	0.55	0.59	0.49	0.55	0.19

ตารางที่ ค-26 (ต่อ) แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 1, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ดพบรี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	0.45	0.43	0.45	0.44	0.15
ภาคตะกอน	5.27	3.57	3.25	4.03	1.23

ตารางที่ ค-27 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 2, spike

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	144.05	155.64	153.57	151.09	43.27
15-32	231.19	175.87	209.67	205.58	54.85
สระบุรี					
0-15	250.12	242.51	250.65	247.76	64.70
15-32	241.52	233.23	269.47	248.07	71.04
ปทุมธานี					
0-15	199.26	176.48	196.74	190.83	64.56
15-32	199.78	202.53	200.05	200.79	70.04
ลพบุรี					
0-15	180.98	181.55	181.40	181.31	54.71
15-32	200.31	243.57	154.32	199.40	66.75
ภาคตะกอน	107.96	98.82	100.33	102.37	31.21

ตารางที่ ค-28 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 2, column test

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	61.99	62.05	61.79	61.94	17.74
15-32	84.34	80.24	84.12	82.90	22.12
สระบุรี					
0-15	56.01	51.16	58.41	55.19	14.41
15-32	65.70	60.16	66.17	64.01	18.33
ปทุมธานี					
0-15	68.56	66.24	68.92	67.90	22.97
15-32	77.58	77.87	75.26	76.90	26.83
ลพบุรี					
0-15	58.86	56.17	56.36	57.13	17.24
15-32	72.91	69.24	70.93	71.03	23.78
กากตะกอน	58.63	56.17	58.30	57.70	17.59

ตารางที่ ค-29 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 2, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	5.05	4.55	4.92	4.84	1.39
15-32	8.50	8.32	8.31	8.38	2.24
สระบุรี					
0-15	1.72	1.47	1.69	1.63	0.43
15-32	5.15	5.02	4.97	5.04	1.44
ปทุมธานี					
0-15	11.56	11.04	11.71	11.44	3.87
15-32	11.76	12.01	12.11	11.96	4.17

ตารางที่ ค-29 (ต่อ) แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นใน Fraction 2, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ลพบุรี					
0-15	4.79	4.81	4.81	4.80	1.45
15-32	5.36	5.05	3.47	4.63	1.55
ภาคตะกอน	67.87	68.69	67.21	67.92	20.71

ตารางที่ ค-30 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นใน Fraction 2, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	5.86	5.62	5.68	5.72	1.64
15-32	7.70	7.62	7.73	7.68	2.05
สระบุรี					
0-15	6.64	6.42	6.69	6.58	1.72
15-32	6.49	6.29	6.51	6.43	1.84
ปทุมธานี					
0-15	12.34	11.84	12.14	12.11	4.10
15-32	12.61	12.30	12.54	12.48	4.36
ลพบุรี					
0-15	7.33	6.83	7.12	7.09	2.14
15-32	9.17	9.23	9.13	9.17	3.07
ภาคตะกอน	86.32	80.26	83.80	83.46	25.44

ตารางที่ ค-31 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 2, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	3.88	4.01	3.90	3.93	1.13
15-32	10.52	11.11	10.85	10.83	2.89
สระบุรี					
0-15	2.10	2.20	2.09	2.13	0.56
15-32	5.99	5.72	5.96	5.89	1.69
ปทุมธานี					
0-15	9.94	10.03	9.86	9.95	3.36
15-32	11.27	11.54	11.25	11.35	3.96
ลพบุรี					
0-15	6.83	6.86	6.92	6.87	2.07
15-32	7.88	7.73	7.58	7.73	2.59
ภาคตะกอน	106.75	105.33	105.54	105.87	32.28

ตารางที่ ค-32 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 3, spike

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	7.87	8.02	7.85	7.91	2.27
15-32	24.67	20.65	25.29	23.54	6.28
สระบุรี					
0-15	14.84	13.38	13.89	14.04	3.67
15-32	16.68	15.48	16.63	16.26	4.66
ปทุมธานี					
0-15	16.14	16.55	15.95	16.21	5.49
15-32	15.95	17.32	16.48	16.59	5.79

ตารางที่ ค-32 (ต่อ) แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 3, spike

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ฉนวน					
0-15	61.54	51.39	58.65	57.19	17.26
15-32	57.85	49.19	62.37	56.47	18.90
ภาคตะกอน	5.54	6.17	5.01	5.57	1.70

ตารางที่ ค-33 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 3, column test

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	10.61	11.30	10.76	10.89	3.12
15-32	19.41	20.52	19.77	19.90	5.31
สระบุรี					
0-15	1.01	1.03	0.92	0.99	0.26
15-32	3.71	4.12	3.97	3.93	1.13
ปทุมธานี					
0-15	4.96	5.16	5.61	5.24	1.77
15-32	7.30	7.25	6.54	7.03	2.45
ฉะบุรี					
0-15	41.24	31.37	31.31	34.64	10.45
15-32	36.71	39.12	40.05	38.63	12.93
ภาคตะกอน	14.65	10.12	7.37	10.71	3.27

ตารางที่ ค-34 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 3, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	0.59	0.62	0.52	0.58	0.16
15-32	0.70	0.72	0.69	0.70	0.19
สระบุรี					
0-15	1.04	0.93	1.07	1.01	0.26
15-32	2.08	1.96	2.03	2.02	0.58
ปทุมธานี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	0.67	0.63	0.60	0.63	0.22
ลพบุรี					
0-15	1.24	1.13	0.99	1.12	0.34
15-32	1.16	1.26	1.09	1.17	0.39
กากตะกอน	0.81	0.80	0.61	0.74	0.23

ตารางที่ ค-35 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 3, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	0.82	0.80	0.86	0.83	0.24
15-32	2.19	2.06	2.12	2.12	0.57
สระบุรี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	-	-	-	-	-
ปทุมธานี					
0-15	0.55	0.62	0.51	0.56	0.19
15-32	0.99	1.02	0.89	0.97	0.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-35 (ต่อ) แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 3, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ลพบุรี					
0-15	0.77	0.72	0.78	0.76	0.23
15-32	0.99	1.00	0.93	0.97	0.33
ภาคตะกอน	0.63	0.31	0.18	0.37	0.11

ตารางที่ ค-36 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 3, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	0.11	0.11	0.12	0.11	0.03
15-32	0.98	1.02	1.00	1.00	0.27
สระบุรี					
0-15	0.47	0.41	0.51	0.47	0.12
15-32	0.45	0.43	0.61	0.50	0.14
ปทุมธานี					
0-15	0.36	0.36	0.38	0.37	0.12
15-32	0.82	0.83	0.79	0.81	0.28
ลพบุรี					
0-15	0.91	0.87	0.92	0.90	0.27
15-32	1.04	1.03	1.02	1.03	0.35
ภาคตะกอน	0.29	0.28	0.30	0.29	0.09

ตารางที่ ค-37 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 4, spike

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	9.40	7.51	7.09	8.00	2.29
15-32	10.59	9.03	9.32	9.64	2.57
สระบุรี					
0-15	9.15	5.39	6.05	6.86	1.79
15-32	14.25	9.08	12.15	11.83	3.39
ปทุมธานี					
0-15	6.97	4.32	3.66	4.98	1.69
15-32	7.59	5.32	7.06	6.66	2.32
ลพบุรี					
0-15	4.37	6.35	4.52	5.08	1.53
15-32	6.38	8.92	9.02	8.11	2.71
ภาคตะกอน	211.66	185.53	200.95	199.38	60.79

ตารางที่ ค-38 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 4, column test

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	0.56	0.39	0.20	0.38	0.11
15-32	0.60	0.52	0.38	0.50	0.13
สระบุรี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	-	-	-	-	-
ปทุมธานี					
0-15	0.93	1.02	0.93	0.96	0.33
15-32	1.32	1.34	1.27	1.31	0.46

ตารางที่ ค-38 (ต่อ) แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 4, column test

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ลพบุรี					
0-15	0.35	0.30	0.53	0.39	0.12
15-32	1.10	0.98	0.97	1.02	0.34
ภาคตะกอน	124.43	120.16	116.93	120.51	36.74

ตารางที่ ค-39 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 4, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	1.28	0.94	0.93	1.05	0.30
15-32	1.37	1.19	1.32	1.29	0.35
สระบุรี					
0-15	4.62	2.08	2.21	2.97	0.78
15-32	3.25	2.68	3.50	3.14	0.90
ปทุมธานี					
0-15	1.29	1.05	1.06	1.13	0.38
15-32	1.49	1.10	1.49	1.36	0.47
ลพบุรี					
0-15	0.48	0.25	0.47	0.40	0.12
15-32	0.51	0.55	0.48	0.51	0.17
ภาคตะกอน	142.32	200.64	164.58	169.18	51.58

ตารางที่ ค-40 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 4, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	0.82	0.77	0.94	0.84	0.24
15-32	1.18	0.92	1.15	1.08	0.29
สระบุรี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	-	-	-	-	-
ปทุมธานี					
0-15	0.51	0.62	0.51	0.54	0.18
15-32	1.33	1.23	1.26	1.27	0.44
ลพบุรี					
0-15	0.44	0.50	0.48	0.48	0.14
15-32	0.50	0.54	0.50	0.51	0.17
กากตะกอน	98.95	126.34	130.76	118.68	36.18

ตารางที่ ค-41 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 4, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	-	-	-	-	-
สระบุรี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	-	-	-	-	-
ปทุมธานี					
0-15	0.92	0.64	0.71	0.76	0.26
15-32	1.45	1.06	1.12	1.21	0.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-41 (ต่อ)แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 4, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ลพบุรี					
0-15	0.44	0.32	0.45	0.40	0.12
15-32	0.99	1.01	0.62	0.87	0.29
ภาคตะกอน	101.68	158.42	86.80	115.64	35.25

ตารางที่ ค-42 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 5, spike

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	6.43	9.42	5.74	7.20	2.06
15-32	11.52	5.79	7.63	8.31	2.22
สระบุรี					
0-15	13.85	9.88	11.46	11.73	3.06
15-32	16.68	10.58	12.67	13.31	3.81
ปทุมธานี					
0-15	13.90	11.50	9.59	11.66	3.95
15-32	15.84	9.53	14.92	13.43	4.68
ลพบุรี					
0-15	17.23	11.62	10.69	13.18	3.98
15-32	20.61	10.89	12.84	14.78	4.95
ภาคตะกอน	2.36	6.46	10.44	6.42	1.96

ตารางที่ ค-43 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 5, column test

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	5.32	7.42	8.56	7.10	2.03
15-32	13.51	7.79	15.32	12.21	3.26
สระบุรี					
0-15	4.58	7.22	2.03	4.61	1.20
15-32	6.68	8.42	3.78	6.29	1.80
ปทุมธานี					
0-15	9.30	5.11	5.95	6.79	2.30
15-32	8.54	5.93	7.12	7.20	2.51
ลพบุรี					
0-15	3.27	1.94	5.31	3.51	1.06
15-32	6.01	9.79	10.85	8.88	2.97
กากตะกอน	13.29	17.84	18.25	16.46	5.02

ตารางที่ ค-44 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 5, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	0.36	0.23	0.75	0.45	0.13
15-32	0.46	0.27	0.96	0.57	0.15
สระบุรี					
0-15	1.12	0.73	0.89	0.91	0.24
15-32	3.00	0.79	0.50	1.43	0.41
ปทุมธานี					
0-15	0.61	0.23	0.12	0.32	0.11
15-32	0.41	0.36	0.74	0.50	0.18

ตารางที่ ค-44 (ต่อ)แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 5, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ลพบุรี					
0-15	0.51	0.82	1.54	0.96	0.29
15-32	1.01	0.96	1.04	1.00	0.34
ภาคตะกอน	0.87	0.65	0.51	0.68	0.21

ตารางที่ ค-45 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 5, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	0.43	0.58	0.97	0.66	0.19
15-32	2.31	1.88	1.46	1.88	0.50
สระบุรี					
0-15	-	-	-	-	-
15-32	-	-	-	-	-
ปทุมธานี					
0-15	0.26	0.34	0.56	0.39	0.13
15-32	0.67	0.85	0.78	0.77	0.27
ลพบุรี					
0-15	0.33	0.72	0.65	0.57	0.17
15-32	0.55	0.24	1.13	0.64	0.22
ภาคตะกอน	0.26	0.12	0.41	0.26	0.08

ตารางที่ ค-46 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 5, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	0.09	0.01	0.03	0.04	0.01
15-32	0.75	1.00	0.85	0.87	0.23
สระบุรี					
0-15	0.54	0.46	0.32	0.44	0.12
15-32	0.51	0.33	0.45	0.43	0.12
ปทุมธานี					
0-15	0.21	0.11	0.45	0.26	0.09
15-32	0.94	0.42	0.68	0.68	0.24
ลพบุรี					
0-15	0.87	0.56	0.67	0.70	0.21
15-32	1.13	0.98	0.88	1.00	0.33
ภาคตะกอน	0.21	0.29	0.37	0.29	0.09

ตารางที่ ค-47 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 6, spike

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี.					
0-15	152.46	235.94	126.87	171.76	49.19
15-32	99.71	168.36	100.51	122.86	32.78
สระบุรี					
0-15	95.38	89.88	111.49	98.92	25.83
15-32	56.24	37.62	78.16	57.34	16.42
ปทุมธานี					
0-15	83.74	71.50	49.59	68.28	23.10
15-32	35.48	62.93	44.32	47.58	16.60

ตารางที่ ค-47 (ต่อ) แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 6, spike

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ลพบุรี					
0-15	97.32	51.64	72.15	73.70	22.24
15-32	18.91	20.22	20.48	19.87	6.65
กากตะกอน	13.80	10.55	12.69	12.35	3.76

ตารางที่ ค-48 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 6, column test

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	182.31	169.74	130.60	160.88	46.07
15-32	111.53	88.96	195.00	131.83	35.17
สระบุรี					
0-15	199.31	217.01	269.87	228.73	59.73
15-32	142.56	159.82	178.71	160.36	45.92
ปทุมธานี					
0-15	168.14	157.10	118.09	147.78	50.00
15-32	139.00	89.12	121.63	116.58	40.67
ลพบุรี					
0-15	137.29	134.50	151.70	141.16	42.60
15-32	89.11	90.22	37.88	72.40	24.24
กากตะกอน	83.00	118.13	96.00	99.04	30.20

ตารางที่ ค-49 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 6, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	44.70	22.10	54.46	40.42	11.58
15-32	15.90	20.70	10.60	15.73	4.20
สระบุรี					
0-15	61.00	83.81	91.36	78.72	20.56
15-32	31.00	49.00	40.00	40.00	11.46
ปทุมธานี					
0-15	52.00	38.00	26.58	38.86	13.15
15-32	3.30	2.57	6.20	4.02	1.40
ลพบุรี					
0-15	41.00	100.00	156.00	99.00	29.88
15-32	0.16	0.18	0.39	0.24	0.08
กากตะกอน	81.00	28.00	78.00	62.33	19.00

ตารางที่ ค-50 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 6, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	74.40	92.00	52.77	73.06	20.92
15-32	25.70	22.70	21.00	23.13	6.17
สระบุรี					
0-15	82.00	94.20	102.30	92.83	24.24
15-32	42.60	51.27	68.70	54.19	15.52
ปทุมธานี					
0-15	53.10	39.70	49.31	47.37	16.03
15-32	9.84	15.36	18.28	14.49	5.06

ตารางที่ ค-50 (ต่อ) แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 6, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL

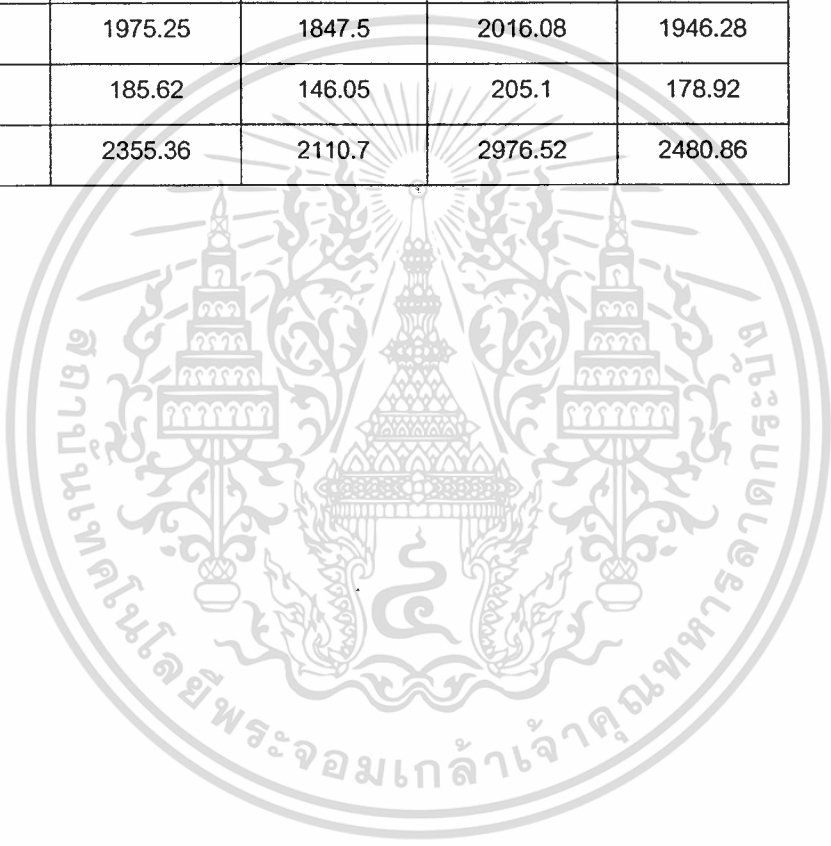
ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ลพบุรี					
0-15	102.58	95.90	100.37	99.62	30.06
15-32	22.89	23.48	28.55	24.97	8.36
กากตะกอน	96.58	68.99	75.34	80.30	24.48

ตารางที่ ค-51 แสดงผลการสกัดแบบเป็นลำดับชั้นใน Fraction 6, batch test ที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ความเข้มข้น (mg/kg)			Avg.	% recovery
	1	2	3		
ชลบุรี					
0-15	56.00	98.73	92.01	82.25	23.55
15-32	62.80	85.86	79.57	76.08	20.30
สระบุรี					
0-15	92.34	122.60	135.61	116.85	30.51
15-32	88.74	81.30	56.40	75.48	21.62
ปทุมธานี					
0-15	46.00	51.20	61.00	52.73	17.84
15-32	48.56	32.10	45.23	41.96	14.64
ลพบุรี					
0-15	132.82	76.43	141.60	116.95	35.29
15-32	35.67	46.94	29.99	37.53	12.57
กากตะกอน	38.00	43.21	55.84	45.68	13.93

ตารางที่ ค-52 แสดงผลการทดลองหาปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอน

ชนิดโลหะ	ความเข้มข้น (mg/kg)			เฉลี่ย
	1	2	3	
โครเมียม	5528.27	4987.1	5434.81	5316.73
ทองแดง	1103.02	1642.34	988.76	1244.71
เหล็ก	7064.12	5861.83	7135.42	6687.12
แมงกานีส	285.11	362.37	297.64	315.04
นิกเกิล	1975.25	1847.5	2016.08	1946.28
ตะกั่ว	185.62	146.05	205.1	178.92
สังกะสี	2355.36	2110.7	2976.52	2480.86



ตารางที่ 53 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของโลหะแคดเมียมที่ยึดติดอยู่กับดินและกากตะกอนก่อนและหลังการชะล้างแบบคอลัมน์

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ก่อนการชะล้าง (%)						หลังการชะล้าง (%)					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
ชลบุรี												
0-15	0.22	43.27	2.27	2.29	2.06	49.19	0	17.74	3.12	0.11	2.03	46.07
15-32	0.22	54.85	6.28	2.57	2.22	32.78	0.01	22.12	5.31	0.13	3.26	35.17
สระบุรี												
0-15	0.31	64.7	3.67	1.79	3.06	25.83	0.01	14.41	0.26	0	1.2	59.73
15-32	0.67	71.04	4.66	3.39	3.81	16.42	0.01	18.33	1.13	0	1.8	45.92
ปทุมธานี												
0-15	0.5	64.56	5.49	1.69	3.95	23.1	0.02	22.97	1.77	0.33	2.3	50
15-32	0.6	70.04	5.79	2.32	4.68	16.6	0.03	26.83	2.45	0.46	2.51	40.67
ลพบุรี												
0-15	0	54.71	17.26	2.53	3.98	22.24	0.02	17.24	10.45	0.12	1.06	52.61
15-32	0	66.75	18.9	2.71	4.95	6.65	0.02	23.78	12.93	0.34	3.2	24.24
กากตะกอน	0.54	31.21	1.7	60.79	1.96	3.76	0.05	17.59	3.27	36.74	5.02	30.2

หมายเหตุ : F1 = รูปที่ละลายน้ำได้ F4 = รูปรีดิวซ์
F2 = รูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ F5 = รูปออกไซด์
F3 = รูปที่ละลายได้ในกรด F6 = รูปที่เหลือ

ตารางที่ 54 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของโลหะแคดเมียมที่ยึดติดอยู่กับดินและกากตะกอนหลังทำการชะล้างด้วยวิธีแบบครึ่ง

ความลึกของตัวอย่าง (cm)	ก่อนการชะล้าง (%)						หลังการชะล้างที่อัตราส่วน 1 : 2.5 (%)						หลังการชะล้างที่อัตราส่วน 1 : 5 (%)						หลังการชะล้างที่อัตราส่วน 1 : 7.5 (%)					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
ชลบุรี																								
0-15	0.22	43.3	2.27	2.29	2.06	49.2	0	1.39	0.16	0.3	0.13	11.6	0.18	1.64	0.24	0.24	0.19	20.9	0.24	1.13	0.03	0	0.01	23.6
15-32	0.22	54.9	6.28	2.57	2.22	32.8	0	2.24	0.19	0.35	0.15	4.2	0.03	2.05	0.57	0.29	0.5	6.17	0.44	2.89	0.27	0	0.23	20.3
สระบุรี																								
0-15	0.31	64.7	3.67	1.79	3.06	25.8	0	0.43	0.26	0.78	0.24	20.6	0.21	1.72	0	0	0	24.2	0.24	0.56	0.12	0	0.12	30.5
15-32	0.67	71	4.66	3.39	3.81	16.4	0	1.44	0.58	0.9	0.41	11.5	0.55	1.84	0	0	0	15.5	0.32	1.69	0.14	0	0.12	21.6
ปทุมธานี																								
0-15	0.5	64.6	5.49	1.69	3.95	23.1	0.25	3.87	0	0	0.11	13.15	0.00	4.10	0	0	0.13	16.03	0.05	3.36	0.12	0.26	0.09	17.84
15-32	0.6	70	5.79	2.32	4.68	16.6	0.44	4.17	0.22	0.47	0.18	1.40	0.33	4.6	0.34	0.44	0.27	5.06	0.19	3.96	0.28	0.42	0.24	14.64
ลพบุรี																								
0-15	0	54.7	17.3	2.53	3.98	22.2	0.17	1.45	0.30	0.12	0.29	29.88	0.13	2.14	0.23	0.14	0.17	30.06	0	2.07	0.27	0.12	0.21	35.29
15-32	0	66.8	18.9	2.71	4.95	6.65	0.17	1.55	0.39	0.17	0.34	0.08	0.16	3.07	0.33	0.17	0.22	8.36	0.15	2.59	0.35	0.29	0.33	12.57
ภาคตะกอน	0.54	31.2	1.7	60.8	1.96	3.76	0.97	20.71	0.23	51.58	0.21	19	1.01	25.44	0.11	36.18	0.08	24.48	1.23	32.28	0.09	35.25	0.09	13.93

หมายเหตุ : F1 = รูปที่ละลายน้ำได้

F4 = รูปรีดิคัล

F2 = รูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้

F5 = รูปออกซิไดซ์

F3 = รูปที่ละลายได้ในกรด

F6 = รูปที่เหลือ

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิตินี้ใช้โปรแกรม SPSS version 9.01 โดยในการวิเคราะห์ผลงานการวิจัยขั้นแรกจะใช้หลักการทางสถิติเรื่องการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance : ANOVA) เพื่อให้พยากรณ์พารามิเตอร์จำนวน 12 พารามิเตอร์ ของดินแต่ละชนิดว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยมีสมมุติฐาน

Ho : พารามิเตอร์ทั้ง 12 ตัวไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะแคดเมียมในดินและกากตะกอนสังเคราะห์

H₁ : พารามิเตอร์ทั้ง 12 ตัวมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะแคดเมียมในดินและกากตะกอนสังเคราะห์

ตัวแปรตาม คือ เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินและกากตะกอน

ตัวแปรอิสระ คือ พีเอช ความหนาแน่นรวม พื้นที่ผิว เปอร์เซ็นต์ความชื้น เปอร์เซ็นต์แซน ซิลท์ และเคลย์ เปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์

จากสมมุติฐาน ดูได้จากค่า sig. ของตาราง ANOVA หรือค่า sig ของตาราง Coefficient model ค่า sig. มีค่าน้อยกว่า 0.05 (ระดับความเชื่อมั่นอย่างมีนัยสำคัญ) ซึ่งแสดงว่าในทุกการทดลองมีความแตกต่างกันจริงจึงปฏิเสธ Ho ยอมรับ H₁ ดังนั้นจึงใช้หลักการวิเคราะห์ทางสถิติเรื่องการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เพื่อให้พยากรณ์พารามิเตอร์ทั้งหมดว่าพารามิเตอร์ใดที่มีผลต่อการกำจัดโลหะแคดเมียมออกจากดินและกากตะกอนสังเคราะห์มากที่สุด โดยใช้ตัวแปรเดิม ผลการวิเคราะห์พบว่า

- 1. การทดลองแบบคอัลมันน์ เปอร์เซ็นต์ซิลท์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะแคดเมียมมากที่สุด ซึ่งจาก Model Summary มีค่า R เท่ากับ 0.564 ค่า R² เท่ากับ 0.318 และ Adjusted R² เท่ากับ 0.287 และจากตาราง Coefficients สามารถนำมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\% \text{ recovery (y)} = 36.158 - 0.491\% \text{Silt} \dots\dots\dots (\text{ง} - 1)$$

ซึ่งแสดงว่าหากเปอร์เซ็นต์ซิลท์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%recovery) ลดลง ถ้าเปอร์เซ็นต์ซิลท์เพิ่มขึ้น 1 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดลดลงเหลือ 35.667

2. การทดลองแบบครึ่ง เปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะแคดเมียมมากที่สุดในทุกๆ การแปรค่าอัตราส่วน จึงนำมาเข้าสมการ

ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2.5 จาก Model Summary มีค่า R เท่ากับ 0.851 ค่า R² เท่ากับ 0.724 และ Ajusted R² เท่ากับ 0.712 และจากตาราง Coefficients สามารถนำมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\% \text{ recovery (y)} = 96.114 - 13.716 \% \text{OM} \dots\dots\dots (\text{ง} - 2)$$

ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 5 จาก Model Summary มีค่า R เท่ากับ 0.515 ค่า R² เท่ากับ 0.663 และ Ajusted R² เท่ากับ 0.648 และจากตาราง Coefficients สามารถนำมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\% \text{ recovery (y)} = 90.057 - 12.117 \% \text{OM} \dots\dots\dots (\text{ง} - 3)$$

สมการที่อัตราส่วน 1 ต่อ 7.5 จาก Model Summary มีค่า R เท่ากับ 0.794 ค่า R² เท่ากับ 0.63 และ Ajusted R² เท่ากับ 0.614 และจากตาราง Coefficients สามารถนำมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\% \text{ recovery (y)} = 80.909 - 8.913 \% \text{OM} \dots\dots\dots (\text{ง} - 4)$$

ซึ่งแสดงว่าหากเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%recovery) ลดลง ถ้าเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์เพิ่มขึ้น 1 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดของแต่ละอัตราส่วนลดลงดังนี้

อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL ลดลงเหลือ 82.398

อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL ลดลงเหลือ 77.94

อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL ลดลงเหลือ 71.996

หมายเหตุ การวิเคราะห์ทางสถิตินี้ไม่ได้นำกากตะกอนมาพิจารณาด้วย เนื่องจากกากตะกอนมีองค์ประกอบที่แตกต่างจากดิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบคอลัมน์

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
PH	Between Groups	53.392	7	7.627	154.545	.000
	Within Groups	.790	16	4.935E-02		
	Total	54.182	23			
DB	Between Groups	.743	7	.106	66.478	.000
	Within Groups	2.553E-02	16	1.596E-03		
	Total	.768	23			
SURFACE	Between Groups	7062.941	7	1008.992	75321.302	.000
	Within Groups	.214	16	1.340E-02		
	Total	7063.156	23			
CEC	Between Groups	1953.573	7	279.082	27746.338	.000
	Within Groups	.161	16	1.006E-02		
	Total	1953.734	23			
OM	Between Groups	11.648	7	1.664	296.095	.000
	Within Groups	8.992E-02	16	5.620E-03		
	Total	11.738	23			
MOISTURE	Between Groups	338.032	7	48.290	3329.419	.000
	Within Groups	.232	16	1.450E-02		
	Total	338.264	23			
SAND	Between Groups	6831.287	7	975.898	489.917	.000
	Within Groups	31.871	16	1.992		
	Total	6863.158	23			
SILT	Between Groups	850.867	7	121.552	199.219	.000
	Within Groups	9.762	16	.610		
	Total	860.629	23			
CLAY	Between Groups	4271.402	7	610.200	727.154	.000
	Within Groups	13.427	16	.839		
	Total	4284.829	23			
AL2O3	Between Groups	1127.430	7	161.061	584.978	.000
	Within Groups	4.405	16	.275		
	Total	1131.835	23			
FE2O3	Between Groups	131.390	7	18.770	34559.348	.000
	Within Groups	8.690E-03	16	5.431E-04		
	Total	131.399	23			
MNO2	Between Groups	5.637E-02	7	8.053E-03	74.744	.000
	Within Groups	1.724E-03	16	1.077E-04		
	Total	5.810E-02	23			
RECOVERY	Between Groups	431.765	7	61.681	4.051	.010
	Within Groups	243.630	16	15.227		
	Total	675.395	23			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบครั้งที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
PH	Between Groups	53.392	7	7.627	154.545	.000
	Within Groups	.790	16	4.935E-02		
	Total	54.182	23			
DB	Between Groups	.743	7	.106	66.478	.000
	Within Groups	2.553E-02	16	1.596E-03		
	Total	.768	23			
SURFACE	Between Groups	7062.941	7	1008.992	75321.302	.000
	Within Groups	.214	16	1.340E-02		
	Total	7063.156	23			
CEC	Between Groups	1953.573	7	279.082	27746.338	.000
	Within Groups	.161	16	1.006E-02		
	Total	1953.734	23			
OM	Between Groups	11.648	7	1.664	296.095	.000
	Within Groups	8.992E-02	16	5.620E-03		
	Total	11.738	23			
MOISTURE	Between Groups	338.032	7	48.290	3329.419	.000
	Within Groups	.232	16	1.450E-02		
	Total	338.264	23			
SAND	Between Groups	6831.287	7	975.898	489.917	.000
	Within Groups	31.871	16	1.992		
	Total	6863.158	23			
SILT	Between Groups	850.867	7	121.552	199.219	.000
	Within Groups	9.762	16	.610		
	Total	860.629	23			
CLAY	Between Groups	4271.402	7	610.200	727.154	.000
	Within Groups	13.427	16	.839		
	Total	4284.829	23			
AL2O3	Between Groups	1127.430	7	161.061	584.978	.000
	Within Groups	4.405	16	.275		
	Total	1131.835	23			
FE2O3	Between Groups	131.390	7	18.770	34559.348	.000
	Within Groups	8.690E-03	16	5.431E-04		
	Total	131.399	23			
MNO2	Between Groups	5.637E-02	7	8.053E-03	74.744	.000
	Within Groups	1.724E-03	16	1.077E-04		
	Total	5.810E-02	23			
RECOVERY	Between Groups	2520.025	7	360.004	10.899	.000
	Within Groups	528.492	16	33.031		
	Total	3048.517	23			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบครั้งเดียวที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
PH	Between Groups	53.392	7	7.627	154.545	.000
	Within Groups	.790	16	4.935E-02		
	Total	54.182	23			
DB	Between Groups	.743	7	.106	66.478	.000
	Within Groups	2.553E-02	16	1.596E-03		
	Total	.768	23			
SURFACE	Between Groups	7062.941	7	1008.992	75321.302	.000
	Within Groups	.214	16	1.340E-02		
	Total	7063.156	23			
CEC	Between Groups	1953.573	7	279.082	27746.338	.000
	Within Groups	.161	16	1.006E-02		
	Total	1953.734	23			
OM	Between Groups	11.648	7	1.664	296.095	.000
	Within Groups	8.992E-02	16	5.620E-03		
	Total	11.738	23			
MOISTURE	Between Groups	338.032	7	48.290	3329.419	.000
	Within Groups	.232	16	1.450E-02		
	Total	338.264	23			
SAND	Between Groups	6831.287	7	975.898	489.917	.000
	Within Groups	31.871	16	1.992		
	Total	6863.158	23			
SILT	Between Groups	850.867	7	121.552	199.219	.000
	Within Groups	9.762	16	.610		
	Total	860.629	23			
CLAY	Between Groups	4271.402	7	610.200	727.154	.000
	Within Groups	13.427	16	.839		
	Total	4284.829	23			
AL ₂ O ₃	Between Groups	1127.430	7	161.061	584.978	.000
	Within Groups	4.405	16	.275		
	Total	1131.835	23			
FE ₂ O ₃	Between Groups	131.390	7	18.770	34559.348	.000
	Within Groups	8.690E-03	16	5.431E-04		
	Total	131.399	23			
MNO ₂	Between Groups	5.637E-02	7	8.053E-03	74.744	.000
	Within Groups	1.724E-03	16	1.077E-04		
	Total	5.810E-02	23			
RECOVERY	Between Groups	2201.604	7	314.515	12.715	.000
	Within Groups	395.775	16	24.736		
	Total	2597.379	23			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบครั้งที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
PH	Between Groups	53.392	7	7.627	154.545	.000
	Within Groups	.790	16	4.935E-02		
	Total	54.182	23			
DB	Between Groups	.743	7	.106	66.478	.000
	Within Groups	2.553E-02	16	1.596E-03		
	Total	.768	23			
SURFACE	Between Groups	7062.941	7	1008.992	75321.302	.000
	Within Groups	.214	16	1.340E-02		
	Total	7063.156	23			
CEC	Between Groups	1953.573	7	279.082	27746.338	.000
	Within Groups	.161	16	1.006E-02		
	Total	1953.734	23			
OM	Between Groups	11.648	7	1.664	296.095	.000
	Within Groups	8.992E-02	16	5.620E-03		
	Total	11.738	23			
MOISTURE	Between Groups	338.032	7	48.290	3329.419	.000
	Within Groups	.232	16	1.450E-02		
	Total	338.264	23			
SAND	Between Groups	6831.287	7	975.898	489.917	.000
	Within Groups	31.871	16	1.992		
	Total	6863.158	23			
SILT	Between Groups	850.867	7	121.552	199.219	.000
	Within Groups	9.762	16	.610		
	Total	860.629	23			
CLAY	Between Groups	4271.402	7	610.200	727.154	.000
	Within Groups	13.427	16	.839		
	Total	4284.829	23			
AL2O3	Between Groups	1127.430	7	161.061	584.978	.000
	Within Groups	4.405	16	.275		
	Total	1131.835	23			
FE2O3	Between Groups	131.390	7	18.770	34559.348	.000
	Within Groups	8.690E-03	16	5.431E-04		
	Total	131.399	23			
MNO2	Between Groups	5.637E-02	7	8.053E-03	74.744	.000
	Within Groups	1.724E-03	16	1.077E-04		
	Total	5.810E-02	23			
RECOVERY	Between Groups	1088.791	7	155.542	6.376	.001
	Within Groups	390.328	16	24.396		
	Total	1479.120	23			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.5 การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองแบบคอลัมน์

Regression

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	SILT		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).

a. Dependent Variable: RECOVERY

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.564 ^a	.318	.287	4.5771

a. Predictors: (Constant), SILT

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	214.494	1	214.494	10.238	.004 ^a
	Residual	460.901	22	20.950		
	Total	675.395	23			

a. Predictors: (Constant), SILT

b. Dependent Variable: RECOVERY

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	36.158	2.333		15.497	.000
	SILT	-.499	.156	-.564	-3.200	.004

a. Dependent Variable: RECOVERY

Excluded Variables^b

Model		Beta In	t	Sig.	Partial Correlation	Collinearity Statistics
						Tolerance
1	PH	.173 ^a	.793	.437	.171	.664
	DB	-.160 ^a	-.741	.467	-.160	.678
	SURFACE	.039 ^a	.213	.834	.046	.964
	CEC	-.070 ^a	-.376	.711	-.082	.923
	OM	-.279 ^a	-1.482	.153	-.308	.831
	MOISTURE	.391 ^a	1.284	.213	.270	.325
	SAND	-.022 ^a	-.087	.931	-.019	.511
	CLAY	.011 ^a	.056	.956	.012	.809
	AL2O3	-.068 ^a	-.325	.748	-.071	.746
	FE2O3	-.054 ^a	-.277	.784	-.060	.855
	MNO2	-.077 ^a	-.432	.670	-.094	1.000

a. Predictors in the Model: (Constant), SILT

b. Dependent Variable: RECOVERY

ตารางที่ ง.6 การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองแบบครึ่งที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 2.5 mL

Regression

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	OM		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).

a. Dependent Variable: RECOVERY

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.851 ^a	.724	.712	6.1802

a. Predictors: (Constant), OM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2208.223	1	2208.223	57.814	.000 ^a
	Residual	840.294	22	38.195		
	Total	3048.517	23			

- a. Predictors: (Constant), OM
b. Dependent Variable: RECOVERY

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	96.114	2.321		41.416	.000
	OM	-13.716	1.804	-.851	-7.604	.000

- a. Dependent Variable: RECOVERY

Excluded Variables^b

Model		Beta In	t	Sig.	Partial Correlation	Collinearity Statistics
						Tolerance
1	PH	-.036 ^a	-.317	.754	-.069	.991
	DB	-.019 ^a	-.160	.875	-.035	.977
	SURFACE	-.014 ^a	-.088	.930	-.019	.504
	CEC	.086 ^a	.453	.655	.098	.361
	MOISTURE	-.175 ^a	-1.547	.137	-.320	.919
	SAND	.189 ^a	1.102	.283	.234	.421
	SILT	-.142 ^a	-1.165	.257	-.246	.831
	CLAY	-.126 ^a	-.698	.493	-.151	.393
	AL2O3	.015 ^a	.080	.937	.017	.388
	FE2O3	-.039 ^a	-.182	.858	-.040	.281
	MNO2	-.015 ^a	-.085	.933	-.019	.398

- a. Predictors in the Model: (Constant), OM
b. Dependent Variable: RECOVERY

ตารางที่ ๓.7 การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองแบบครึ่งที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 5 mL Regression

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	OM		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).

a. Dependent Variable: RECOVERY

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.815 ^a	.663	.648	6.3036

a. Predictors: (Constant), OM

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1723.211	1	1723.211	43.368	.000 ^a
	Residual	874.168	22	39.735		
	Total	2597.379	23			

a. Predictors: (Constant), OM

b. Dependent Variable: RECOVERY

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	90.057	2.367		38.047	.000
	OM	-12.117	1.840	-.815	-6.585	.000

a. Dependent Variable: RECOVERY

Excluded Variables^b

Model		Beta In	t	Sig.	Partial Correlation	Collinearity Statistics
						Tolerance
1	PH	-.123 ^a	-.986	.335	-.210	.991
	DB	-.108 ^a	-.855	.402	-.183	.977
	SURFACE	-.111 ^a	-.627	.537	-.136	.504
	CEC	.028 ^a	.132	.897	.029	.361
	MOISTURE	-.124 ^a	-.963	.346	-.206	.919
	SAND	.051 ^a	.260	.797	.057	.421
	SILT	.016 ^a	.116	.909	.025	.831
	CLAY	-.117 ^a	-.584	.565	-.127	.393
	AL2O3	.015 ^a	.073	.942	.016	.388
	FE2O3	-.071 ^a	-.298	.769	-.065	.281
	MNO2	-.142 ^a	-.714	.483	-.154	.398

a. Predictors in the Model: (Constant), OM

b. Dependent Variable: RECOVERY

ตารางที่ 3.8 การวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองแบบครึ่งที่อัตราส่วน 1 g ต่อ 7.5 mL Regression

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	OM		Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter <= .050, Probability-of-F-to-remove >= .100).

a. Dependent Variable: RECOVERY

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.794 ^a	.630	.614	4.9843

a. Predictors: (Constant), OM

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	932.558	1	932.558	37.537	.000 ^a
	Residual	546.562	22	24.844		
	Total	1479.120	23			

- a. Predictors: (Constant), OM
b. Dependent Variable: RECOVERY

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	80.909	1.872		43.229	.000
	OM	-8.913	1.455	-.794	-6.127	.000

- a. Dependent Variable: RECOVERY

Excluded Variables^b

Model		Beta In	t	Sig.	Partial Correlation	Collinearity Statistics
						Tolerance
1	PH	-.131 ^a	-1.004	.327	-.214	.991
	DB	.030 ^a	.225	.824	.049	.977
	SURFACE	-.112 ^a	-.605	.552	-.131	.504
	CEC	-.095 ^a	-.432	.670	-.094	.361
	MOISTURE	-.075 ^a	-.549	.589	-.119	.919
	SAND	.125 ^a	.617	.544	.133	.421
	SILT	-.020 ^a	-.137	.892	-.030	.831
	CLAY	-.161 ^a	-.772	.449	-.166	.393
	AL2O3	-.026 ^a	-.124	.903	-.027	.388
	FE2O3	-.168 ^a	-.680	.504	-.147	.281
	MNO2	-.234 ^a	-1.150	.263	-.243	.398

- a. Predictors in the Model: (Constant), OM
b. Dependent Variable: RECOVERY

ประวัติผู้เขียน

นางสาวนันทธีรญา ศรีวิริยานุภาพ เกิดเมื่อวันที่ 6 ตุลาคม 2521 ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาวិทยาสตรบัณฑิต (เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542 และวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีประยุกต์) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2545

