การล้างดินปนเปื้อนตะกั่วและโครเมียมด้วยอีดีทีเอและทวีน 80

นางสาวนวพร เทศทศพร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WASHING OF SOIL CONTAMINATED WITH LEAD AND CHROMIUM BY EDTA AND TWEEN 80

Miss Nawaporn Thetthotsaporn

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การล้างดินปนเปื้อนตะกั่วและโครเมียมด้วยอีดีทีเอและทวีน 80
โดย	นางสาวนวพร เทศทศพร
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ปารมี เพ็งปรีชา)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นวพร เทศทศพร : การล้างดินปนเปื้อนตะกั่วและโครเมียมด้วยอีดีทีเอและทวีน 80. (WASHING OF SOIL CONTAMINATED WITH LEAD AND CHROMIUM BY EDTA AND TWEEN 80) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 107 หน้า.

การล้างดินปนเปื้อนตะกั่ว และโครเมียมด้วยสารคีเลตคือ EDTA และสารลดแรงตึงผิวคือ TWEEN 80 โดยทำการศึกษาที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA และ TWEEN 80 เท่ากับ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ใช้ดินตัวอย่างครั้งละ 20 กรัม ใส่ในสารละลาย 200 มิลลิลิตร ปรับ pH เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 ทำการเขย่าที่อัตราเร็วรอบเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm และเก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 15, 30, 60, 90, 120, 180 และทุกๆ 3 ชั่วโมงที่อุณหูมิห้อง จนกว่าถึงจุดสมดุลสาร และทำการเก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว และโครเมียมทั้งหมด ผลการศึกษาพบว่า เวลาในการสมดุลสารของทุกการทดลองคือ 30 นาที โดยการล้างดินด้วย EDTA สามารถกำจัดตะกั่วได้สูงสุด 80.55% ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 8 อัตราเร็วการเขย่าเท่ากับ 90 rpm และสามารถกำจัดโครเมียมได้สูงสุด 38.54% ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วการเขย่าเท่ากับ 120 rpm ส่วนการล้างดินด้วย TWEEN 80 นั้น สามารถกำจัดตะกั่วได้สูงสุด 19.53% ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 2 และสามารถกำจัดโครเมียมได้สูงสุด 9.86% ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 และมีอัตราเร็วการเขย่าเท่ากับ 150 rpm เช่นเดียวกัน ส่วนการล้างดินด้วยสารละลายผสมสามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด62.43% ที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม pH 4 อัตราเร็วการเขย่าเท่ากับ 150 rpm และสามารถกำจัดโครเมียมได้สูงสุด 27.58% ที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม pH 6 อัตราเร็วการเขย่าเท่ากับ 120 rpm สำหรับการล้างดินที่สามารถกำจัดตะกั่ว และโครเมียมได้มากที่สุดนั้น คือ การล้างดินด้วย EDTA ก่อน แล้วตามด้วย TWEEN 80 โดยสามารถกำจัดตะกั่ว และโครเมียมได้สูงที่สุด 94.78% และ 50.77% ตามลำดับ ที่ระดับความเข้มข้น pH และอัตราเร็วการเขย่าที่เหมาะสม ผลการศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่า สารคีเลตมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและโครเมียมได้มากกว่าสารลดแรงตึงผิว และเมื่อใช้สารสองชนิดร่วมกัน สามารถกำจัดตะกั่วและโครเมียมได้ดีกว่าการใช้สาร EDTA หรือ TWEEN 80 อย่างเดียว

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต นวพร เทศทศพร

ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

5187185320 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : EDTA / Chromium / Lead / Soil washing / TWEEN 80

NAWAPORN THETTHOTSAPORN : WASHING OF SOIL CONTAMINATED WITH LEAD AND CHROMIUM BY EDTA AND TWEEN 80. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D., 107 pp.

This paper presents a comparison of the efficiency of chelating agent and surfactant for removal of lead and chromium from contaminated soil. EDTA was selected for chelating agent and TWEEN 80 was selected for surfactant. Concentrations of 8, 16 and 32 mmol/kg soil were examined. This study used 20 g. of contaminated soil and 200 ml. of EDTA and TWEEN 80 as washing solution, The pH values varied among 2, 4, 6, 8 and 10. Sample solution were shaken at 90,120 and 150 rpm after 15, 30, 60, 90, 120, 180 minutes and every 3 hours until substances were equilibrium at room temperature and then analyses followed. This study shows that substances equilibrium at 30 minutes. Soil washing with EDTA solution showed the best result at a concentration of 32. mmol/kg soil pH 8 and shaken at 90 rpm. This combination removed 80.55% of the lead and chromium at concentration of 32 mmol/kg soil at pH 10 and 120 rpm removed 38.54%. Soil washing with TWEEN 80 solution at 8 mmol/kg soil and pH 2 removed 19.53% of the lead and concentration of 32 mmol/kg soil and pH 10 removed 9.86% of the chromium when each were shaken at 150 rpm. Soil washing with mixing solution removed 62.43% lead at pH 4 when shaken at 150 rpm. For chromium, pH 6 and shaken at 120 rpm removed 27.58%. Washing with EDTA followed by TWEEN 80 could removed 94.78% of lead and 50.77% of chromium at the most effective concentrations of pH and rpm. This study indicates EDTA followed by TWEEN 80 is more effective for removing metal than using either method alone.

Field of Study : Environmental Science Student's Signature นวพร เทพโทศาพร

Academic Year : 2010 Advisor's Signature Pantawat Sampanpanish

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากความช่วยเหลืออย่างดีของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่างๆ เกี่ยวกับการวิจัยมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนประสบความสำเร็จด้วยดี จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม และ ดร.ปารมี เพ็งปรีชา ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งได้ให้คำแนะนำในการปรับปรุง และแก้ไขวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ และให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวลล้อม และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้เงินทุนสำหรับทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตศึกษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้อง ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยเป็นอย่างดีในหลายๆ ด้านทั้งทางตรง และทางอ้อมแก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา (คุณพ่อภมร คุณแม่นงนุช เทศทศพร) น้องสาว (น้องซิน) และน้องชาย (น้องปิ๊ง) ที่แสนดี ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทุนทรัพย์ เกี่ยวกับการเรียนในทุกๆ ด้าน ท่านเหล่านี้เป็นกำลังใจที่ดี และสำคัญที่สุดสำหรับผู้วิจัยเสมอมา จนถึงวันที่ประสบความสำเร็จทางการศึกษา จึงขอมอบความดีต่างๆ ที่เกิดขึ้นให้กับท่านเหล่านี้ด้วยความรัก และความเคารพตลอดไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญรูป..... ฎ

บทที่

1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 สมมุติฐาน..... 2

1.4 ขอบเขตของการวิจัย..... 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 5

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มลพิษของดิน..... 6

2.2 ธาตุพิษในดิน..... 6

2.3 คุณสมบัติของดิน..... 7

2.3.1 เนื้อดิน..... 7

2.3.2 โครงสร้างดิน..... 8

2.3.3 ความหนาแน่นและความพรุนของดิน..... 8

2.3.4 ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน..... 9

2.3.5 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน..... 10

2.3.6 สภาพออกซิเดชัน-รีดักชันของดิน..... 11

2.4 การล้างดิน..... 11

2.5 สารคีเลต..... 12

2.5.1 การเลือกสารคีเลตติงเอเจนต์ที่ใช้ในการสกัดโลหะหนักออกจากดิน..... 12

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความเสถียรของสารประกอบโลหะกับคีเลต..... 13

2.5.3 EDTA..... 13
2.6 สารลดแรงตึงผิว..... 17
2.6.1 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว..... 17
2.6.2 TWEEN 80..... 18
2.7 โลหะหนัก..... 19
2.7.1 ตะกั่ว..... 19
1) คุณสมบัติทั่วไป..... 19
2) ประโยชน์ของตะกั่ว..... 21
3) โทษของตะกั่ว..... 21
4) ค่ามาตรฐานของตะกั่ว..... 21
2.7.2 โครเมียม..... 22
1) คุณสมบัติทั่วไป..... 22
2) การแบ่งกลุ่มของโครเมียมตามคุณสมบัติทางเคมี..... 22
3) ประโยชน์ของโครเมียม..... 25
4) โทษของโครเมียม..... 25
5) ค่ามาตรฐานของโครเมียม..... 26
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 26
3 วิธีดำเนินการวิจัย
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย..... 30
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย..... 30
3.3 การเตรียมดิน..... 31
3.4 การแตรียมสารละลาย..... 32
3.5 การดำเนินการทดลอง..... 32
3.5.1 การล้างดินด้วย EDTA..... 32
3.5.2 การล้างดินด้วย TWEEN 80..... 33
3.5.3 การล้างดินด้วยสารละลายผสมระหว่าง EDTA และ TWEEN 80..... 33
3.5.4 การล้างดินด้วย EDTA ก่อน แล้วตามด้วย TWEEN 80 และการล้างดิน
ด้วย TWEEN 80 ก่อน แล้วตามด้วย EDTA..... 34
3.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและดิน..... 34

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ..... 35
4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินทดลอง..... 36
4.2 ผลการล้างดินด้วย EDTA..... 38
4.2.1 ผลการศึกษา pH ต่อการล้างดิน..... 38
4.2.2 ผลการศึกษาระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่อการล้างดิน..... 48
4.2.3 ผลการศึกษาอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการล้างดิน..... 51
4.2.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว และโครเมียม ด้วยสาร EDTA..... 52
4.3 ผลการล้างดินด้วย TWEEN 80..... 53
4.3.1 ผลการศึกษา pH ต่อการล้างดิน..... 53
4.3.2 ผลการศึกษาระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่อการล้างดิน..... 63
4.3.3 ผลการศึกษาอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการล้างดิน..... 66
4.3.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว และโครเมียม ด้วยสาร TWEEN 80..... 67
4.4 ผลการล้างดินด้วยสารละลายผสมระหว่าง EDTA และ TWEEN 80..... 68
4.4.1 ผลการศึกษา pH ต่อการล้างดิน..... 68
4.4.2 ผลการศึกษาอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการล้างดิน..... 77
4.4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว และโครเมียม ด้วยสารละลายผสม..... 79
4.5 ผลการล้างดินด้วยสาร EDTA ก่อน แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 และ
การล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ก่อน แล้วตามด้วยสาร EDTA..... 80
4.6 สมดุลมวล (mass balance) การกำจัดตะกั่วและโครเมียมด้วยการล้างดิน..... 83
4.7 การคำนวณค่าใช้จ่าย..... 84
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 86
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 88

รายการอ้างอิง..... 89
ภาคผนวก..... 94
ภาคผนวก ก..... 95
ภาคผนวก ข..... 98
ภาคผนวก ค..... 105
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 107

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดง pH ที่มีผลต่อความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนโลหะบางชนิดกับ EDTA…….....	15
2.2	คุณสมบัติทางเคมีของสาร TWEEN 80…….....……	19
2.3	คุณสมบัติทั่วไปของตะกั่ว…….……	20
2.4	คุณสมบัติทั่วไปของโครเมียม……..	24
3.1	คุณสมบัติทางกายภาพที่ศึกษาและวิธีวิเคราะห์ดิน……	31
4.1	สมบัติทางกายภาพ และเคมีของดินทดลอง.....	37
4.2	สมดุลมวลของการทดลองที่สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด.....	83
4.3	สมดุลมวลของการทดลองที่สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด.....	84
4.4	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน.....	85
ข1	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยสาร EDTA……..	98
ข2	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยสาร TWEEN 80……..……....	98
ข3	ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยสาร EDTA……..	99
ข4	ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยสาร TWEEN 80…….	99
ข5	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยสารละลายผสมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ..	100
ข6	ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยสารละลายผสมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ……..	101
ข7	ปริมาณตะกั่วและโครเมียมที่กำจัดได้ด้วยการล้างดินด้วย EDTA แล้วตามด้วย TWEEN 80 และ TWEEN 80 แล้วตามด้วย EDTA ที่ปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสม……..	102
ข8	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยน้ำ DI…….	103
ข9	ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยน้ำ DI……...	104

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แผนผังขอบเขตการวิจัย……	4
2.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพกรดแฝงและสภาพกรดจริง…….……..	9
2.2	โครงสร้างของสาร EDTA……..……..	13
2.3	โครงสร้างของสาร TWEEN 80……..……	18
4.1	แสดงเวลาในการสมดุลสารของตะกั่ว ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่างๆ……..……..	40
4.2	แสดงเวลาในการสมดุลสารของตะกั่ว ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่างๆ……..……	41
4.3	แสดงเวลาในการสมดุลสารของตะกั่ว ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่างๆ……..……	42
4.4	แสดงเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่างๆ……..……..	43
4.5	แสดงเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่างๆ……..……..	44
4.6	แสดงเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่างๆ……..……	45
4.7	แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่ว ที่ pH และระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ต่างๆ……..	46
4.8	แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม ที่ pH และระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ต่างๆ……..	47
4.9	แสดงระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่วที่ pH 8 ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที……..	50
4.10	แสดงระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียมที่ pH 10 ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที……	50

รูปที่		หน้า
4.11	แสดงอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดตะกั่ว ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 32 มิลลิโมล pH 8 และอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดโครเมียม ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 32 มิลลิโมล pH 10 ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที…….……	52
4.12	แสดงเวลาในการสมดุลสารของตะกั่ว ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่างๆ…….……	55
4.13	แสดงเวลาในการสมดุลสารของตะกั่ว ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่างๆ…….……..	56
4.14	แสดงเวลาในการสมดุลสารของตะกั่ว ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่างๆ……..…	57
4.15	แสดงเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่างๆ……	58
4.16	แสดงเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่างๆ……..	59
4.17	แสดงเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่างๆ……..	60
4.18	แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ…….……..	61
4.19	แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียมด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ……..……	62
4.20	แสดงระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่ว ที่ pH 2 ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที……..……	65
4.21	แสดงระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียม ที่ pH 10 ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที……..…	65
4.22	แสดงอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดตะกั่ว ที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ที่ 32 มิลลิโมล pH 8 และอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดโครเมียม ที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ที่ 32 มิลลิโมล pH 10 ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที……	67

รูปที่		หน้า
4.23	แสดงปริมาณการกำจัดตะกั่วในช่วงเวลาการเก็บน้ำต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมล และ TWEEN 80 เท่ากับ 8 มิลลิโมล ที่อัตราเร็วต่างๆ.....	71
4.24	แสดงปริมาณการกำจัดตะกั่วที่ในช่วงเวลาการเก็บน้ำต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมล และ TWEEN 80 เท่ากับ 32 มิลลิโมล ที่อัตราเร็วต่างๆ.....	72
4.25	แสดงปริมาณการกำจัดโครเมียมในช่วงเวลาการเก็บน้ำต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมล และ TWEEN 80 เท่ากับ 8 มิลลิโมล ที่อัตราเร็วต่างๆ.....	73
4.26	แสดงปริมาณการกำจัดโครเมียมในช่วงเวลาการเก็บน้ำต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมล และ TWEEN 80 เท่ากับ 32 มิลลิโมล ที่อัตราเร็วต่างๆ.....	74
4.27	แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่ว ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมต่างๆ.....	75
4.28	แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมต่างๆ.....	76
4.29	แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่ว และโครเมียมที่กำจัดได้ด้วยสารละลายผสมที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมต่างๆ.....	78
4.30	แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่ว และโครเมียม ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	82
ค1	แสดงดินปนเปื้อนตะกั่ว และโครเมียมที่ใช้ทดลองล้างดินและการเขย่าที่อัตราเร็วรอบต่างๆ.....	105
ค2	แสดงการทดลองหาปริมาณตะกั่ว และโครเมียมทั้งหมด.....	105
ค3	แสดงไมโครปิเปต (micropipette) และเครื่องเขย่า (shaker).....	105
ค4	แสดงตู้อบ (oven) และเครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด (analytical balance).....	106
ค5	แสดงเครื่องย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (microwave digestion).....	106
ค6	เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (atomic absorption spectrometer; AAS).....	106

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลหะหนักเป็นธาตุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งถ้ามีระดับความเข้มข้นสูงก็อาจเป็นพิษต่อมนุษย์ สัตว์ พืชหรือสิ่งมีชีวิตในดิน โลหะหนักพบทั่วไปในดินทุกชนิด แต่มีระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันไปตามวัตถุต้นกำเนิดดิน โลหะหนักบางชนิดสามารถให้ทั้งคุณ และโทษต่อสิ่งมีชีวิต ขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งมีชีวิต และปริมาณที่ได้รับเข้าไป เช่น แบคทีเรียต้องการโคบอลท์ (cobalt-Co) ทองแดง (copper-Cu) แมงกานีส (manganese-Mn) โมลิบดีนัม (molybdenum-Mo) แวแนเดียม (vanadium-V) และสังกะสี (zinc-Zn) ในปริมาณที่พอเหมาะต่อการเจริญเติบโต (ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี, 2549 : ออนไลน์) อย่างไรก็ตามปริมาณโลหะที่มากเกินไปจะก่อให้เกิดสิ่งแวดล้อมที่เป็นพิษ ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ โดยเฉพาะมนุษย์หากพื้นที่การใช้ประโยชน์ต่างๆ โดยเฉพาะพื้นที่เกษตรกรรมมีการปนเปื้อนโลหะหนักในดินปริมาณมาก ย่อมไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเพาะปลูกได้หรือหากทำได้ ผลผลิตอาจตกต่ำ และไม่มีคุณภาพ ส่งผลให้ไม่ได้ราคาในการจำหน่าย ประกอบกับปัจจุบันประเทศมีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ มีการพัฒนาเทคโนโลยี และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัด ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในระดับที่รุนแรง และยากต่อการแก้ไข นอกจากนี้การดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์มักมีความเสี่ยงต่อการนำโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายผ่านทางการบริโภคอาหาร หรือการดื่มน้ำที่มีสารเหล่านี้ปนเปื้อนอยู่ โดยเฉพาะชุมชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ขาดจิตสำนึก และมักลักลอบเทของเสียลงดินหรือลงแหล่งน้ำ รวมทั้งการกำจัดกากของเสียอันตรายอย่างผิดวิธี ทั้งนี้เนื่องจากต้องการลดรายจ่าย ซึ่งดินสามารถที่จะรองรับโลหะหนักและสารพิษต่างๆ ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์จากการใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ ในชีวิตประจำวันของมนุษย์แล้วปล่อยทิ้งลงสู่ดิน (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [สสวท.], 2547: ออนไลน์) โลหะหนักเป็นวัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วน เช่น ด้านการเกษตร โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลง ปุ๋ยเคมี สารกำจัดศัตรูพืช และวัสดุปรับปรุงดิน เป็นต้น ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์ และเครื่องสำอาง เป็นต้น สำหรับด้านอุตสาหกรรม มักใช้โลหะหนักในการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย เป็นต้น ซึ่งน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำ ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนลงมาสู่ดินซึ่งเป็นสิ่ง

สำคัญและจำเป็นต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต สำหรับประเด็นการลักลอบทิ้งกากของเสียอันตราย ปัจจุบันได้รับผลกระทบจากปัญหาดังกล่าวอย่างมาก ทำให้ดินที่เกษตรกรใช้เพาะปลูกพืชเศรษฐกิจเกิดการปนเปื้อน ส่งผลให้ประชาชนในพื้นที่และบริเวณใกล้เคียงนั้นได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนของเสียอันตรายในระดับสูงเกินค่ามาตรฐานเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จึงได้ทำการล้างดินปนเปื้อนโลหะหนักได้แก่ ตะกั่ว และโครเมียมด้วยสารคีเลต (chelating agent) คือ EDTA และสารลดแรงตึงผิว (surfactant) คือ TWEEN 80 เพื่อเป็นแนวทางเลือกในการแก้ปัญหาดินเสื่อมโทรมจากการปนเปื้อนโลหะหนัก ซึ่งน่าจะเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย สะดวก และมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล้างดินปนเปื้อนตะกั่วและโครเมียมโดยใช้สารคีเลต คือ ethylene diaminetetraacetic acid (EDTA) และสารลดแรงตึงผิวคือ polysorbate 80 (TWEEN 80)

2) เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการล้างดินได้แก่ ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารคีเลต สารลดแรงตึงผิว ค่าความเป็นกรด-ด่าง อัตราเร็วรอบของการเขย่า และเวลาในการสมดุลสารต่อการกำจัดตะกั่ว และโครเมียมที่ปนเปื้อนในดิน

1.3 สมมุติฐาน

1) การใช้สาร EDTA และ TWEEN 80 ร่วมกันจะมีประสิทธิภาพในการล้างดินมากกว่าการใช้สารเพียงชนิดเดียว

2) ระดับความเข้มข้นของสารคีเลต สารลดแรงตึงผิว ค่าความเป็นกรด-ด่าง อัตราเร็วรอบของการเขย่า และเวลาในการสมดุลสารมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว และโครเมียมในดินปนเปื้อน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1) ดินที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ดินที่ปนเปื้อนตะกั่วสังเคราะห์ ซึ่งเคยทำการทดลองปลูกสับปะรดเป็นตัวชี้วัดความเป็นพิษ โดยดินดังกล่าวปนเปื้อนโลหะหนักเป็นเวลา 2 ปี

2) สารคีเลตที่ใช้ในการวิจัย คือ EDTA (ethylene diaminetetraacetic acid)

3) สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการวิจัย คือ TWEEN 80 (polysorbate 80)

4) ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่

4.1) ระดับความเข้มข้นของ EDTA และ TWEEN 80 เท่ากับ 8, 16 และ 32 มิลลิโมล ส่วนระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมระหว่าง EDTA และ TWEEN 80 การล้างด้วย EDTA ก่อน แล้วตามด้วย TWEEN 80 และการล้างด้วย TWEEN 80 ก่อน แล้วตามด้วย EDTA ใช้ระดับความเข้มข้นของสารที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดลองหาระดับความเข้มข้นของ EDTA และ TWEEN 80 ที่ระดับต่างๆ

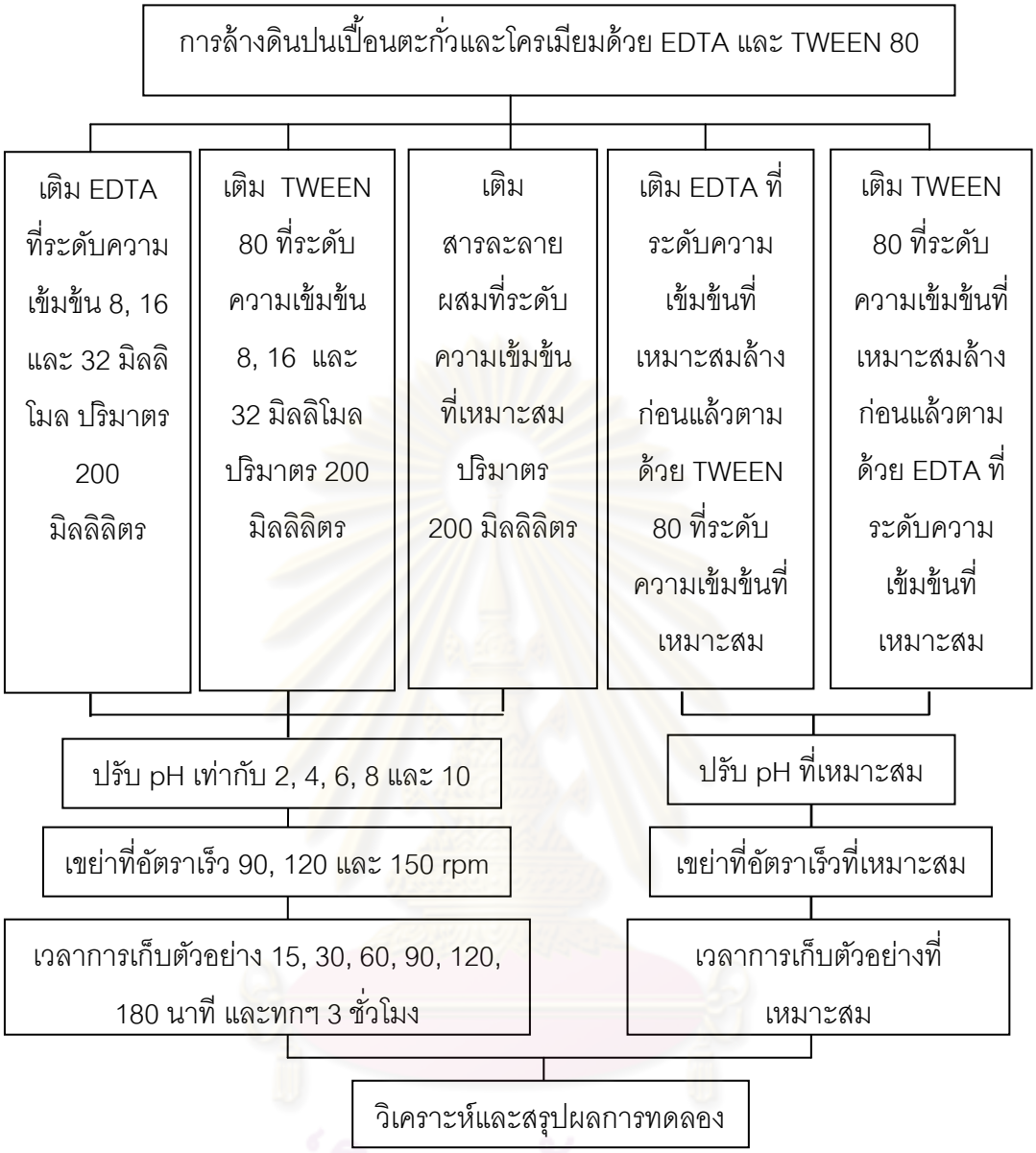
4.2) ชุดการทดลองที่ล้างดินด้วย EDTA, TWEEN 80 และสารละลายผสมนั้นปรับค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 สำหรับชุดการทดลองที่ล้างดินด้วย EDTA ก่อน แล้วตามด้วย TWEEN 80 และล้างดินด้วย TWEEN 80 ก่อน แล้วตามด้วย EDTA นั้นปรับค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ที่เหมาะสม จากผลการทดลองขั้นตอนแรก

4.3) สารละลายชุดการทดลองที่ล้างดินด้วย EDTA, TWEEN 80 และสารละลายผสม เขย่าที่อัตราเร็วเท่ากับ 90, 120 และ 150 รอบต่อนาที สำหรับชุดการทดลองที่ล้างดินด้วย EDTA ก่อน แล้วตามด้วย TWEEN 80 และล้างดินด้วย TWEEN 80 ก่อน แล้วตามด้วย EDTA นั้นเขย่าที่อัตราเร็วที่เหมาะสม จากผลการทดลองขั้นตอนแรก

4.4) สารละลายชุดการทดลองที่ล้างดินด้วย EDTA, TWEEN 80 และสารละลายผสม เก็บตัวอย่างน้ำที่เวลาเท่ากับ 15, 30, 60, 90, 120, 180 นาที และทุกๆ 3 ชั่วโมง จนกระทั่งถึงจุดสมดุลสาร สำหรับชุดการทดลองที่ล้างดินด้วย EDTA ก่อน แล้วตามด้วย TWEEN 80 และล้างดินด้วย TWEEN 80 ก่อน แล้วตามด้วย EDTA นั้น เก็บตัวอย่างน้ำที่เวลาที่เหมาะสม จากผลการทดลองขั้นตอนแรก

5) การวิเคราะห์สารละลาย เพื่อหาค่าปริมาณโครเมียมทั้งหมด (TCr), โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ [Cr(VI)] โครเมียมไตรวาเลนซ์ [Cr(III)] และค่าปริมาณตะกั่วทั้งหมด (TPb) สำหรับตัวอย่างดิน ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าปริมาณโครเมียมทั้งหมด (TCr) และค่าปริมาณตะกั่วทั้งหมด (TPb) จากชุดการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงที่สุด เพื่อหา mass balance

ทั้งนี้สามารถแสดงรายละเอียดขอบเขตการศึกษาได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนผังขอบเขตการวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบประสิทธิภาพของสารละลาย EDTA, TWEEN 80, สารละลายผสมระหว่าง EDTA และ TWEEN 80, การล้างด้วย EDTA ก่อน แล้วตามด้วย TWEEN 80 และการล้างดินด้วย TWEEN 80 ก่อน แล้วตามด้วย EDTA ที่มีต่อการกำจัดตะกั่ว และโครเมียมที่ปนเปื้อนในดิน

2) ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางเลือกในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว และโครเมียมทั่วไปได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 **มลพิษของดิน** (soil pollution) (ชัชพล ทรงสุนทรวงศ์, 2549)

มลพิษทางดิน หมายถึง ภาวะที่ดินได้รับสารปนเปื้อนในปริมาณที่มากกว่าอัตราการสลายตัวหรือการเสื่อมฤทธิ์ของสารนั้น จนทำให้เกิดการสะสมของสารพิษหรือเชื้อโรคต่างๆ ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อการเจริญเติบโต และการเจริญพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ

ดินที่เสื่อมค่าจากเดิมหรือมีสารพิษเกินขีดจำกัดจะมีอันตรายต่อสุขภาพ และอนามัยตลอดจนการเจริญเติบโตของมนุษย์ สัตว์ และพืช ทั้งโดยทางตรง และทางอ้อม ดินเหล่านี้จะมีคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และชีววิทยาเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จึงไม่เหมาะต่อการนำมาใช้ประโยชน์ อาจก่อให้เกิดความรำคาญ เกิดอันตรายหรือเป็นพิษต่อมนุษย์ในที่สุด

มลพิษทางดินเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ 1) ดินเสียโดยธรรมชาติ ได้แก่ ดินเปรี้ยว ดินเค็มและดินโซดิก ดินพรุ ดินที่มีการสะสมของโลหะหนัก และจุลธาตุที่เป็นพิษ และดินที่มีการสะสมของสารกัมมันตรังสี 2) ดินเสียเพราะการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ ของเสียจากชุมชน ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม จากสารกัมมันตรังสี จากปุ๋ยเคมี จากวัตถุมีพิษ และจากการทำเหมืองแร่ เป็นต้น

2.2 **ธาตุพิษในดิน** (toxic element) (ศุภมาศ พณิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

ธาตุพิษ (toxic element) โดยทั่วไปมักหมายถึงธาตุโลหะหนัก ซึ่งเป็นสารมลพิษที่สำคัญในดิน ธาตุพิษเหล่านี้เป็นสารมลพิษได้เนื่องจากมีการนำมาใช้ประโยชน์ในรูปสารประกอบและเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ แล้วมีการปนเปื้อนสู่สภาพแวดล้อม โดยแหล่งที่มา และการสะสมของสารมลพิษสู่ดินมีได้หลายแหล่งคือ จากสารเคมีในการเกษตร (เช่น ปุ๋ย และสารฆ่าแมลง) โรงถลุงแร่ การเผาไหม้น้ำมัน โรงงานอุตสาหกรรม ของเหลือใช้จากโรงงาน และจากชุมชน ตลอดจนการใช้ดินเป็นที่ถมวัสดุเหลือใช้ ทำให้เกิดการสะสมธาตุพิษต่างๆ ได้ในดิน แหล่งของธาตุพิษที่สำคัญที่สุดคือ ของเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ดินเป็นแหล่งทิ้ง (landfill) ของเหลือใช้ในรูปกากตะกอนน้ำเสีย ทั้งจากโรงงานและแหล่งชุมชน เนื่องจากมีต้นทุนในการกำจัดน้อยที่สุด ทำให้พืชที่ปลูกดูดดึงธาตุพิษจนถึงระดับเป็นพิษ ซึ่งพืชที่ไม่แสดงอาการเป็นพิษแต่มีปริมาณธาตุพิษสูงย่อมเป็นตัวส่งถ่ายธาตุเหล่านี้ในห่วงโซ่อาหาร นอกจากนี้ในกากตะกอนน้ำ

โสโครกบางชนิดยังมีปริมาณแคดเมียมที่สูงกว่าปริมาณในปุ๋ยคอก (มูลโค) ถึง 400 เท่า และทำให้ดินที่ใช้ทิ้งกากเหล่านี้มีปริมาณแคดเมียมสูงกว่าดินที่ไม่เป็นแหล่งทิ้งเกือบ 30 เท่า

2.3 คุณสมบัติของดิน (soil properties)

2.3.1 เนื้อดิน (soil texture) หมายถึง สัดส่วนสัมพัทธ์ของอนุภาคในกลุ่มขนาดดินทราย ร่วน และดินเหนียว ซึ่งเนื้อดินจะเป็นประเภทใดนั้นย่อมขึ้นอยู่กับสมบัติเด่นของกลุ่มขนาดหลักในดินชนิดนั้น ดินในสภาพธรรมชาติย่อมประกอบด้วยอนุภาคอนินทรีย์ขนาดต่างๆ คลุกเคล้ากันไป เมื่อได้แบ่งขนาดของดินออกเป็นกลุ่มๆ แล้ว ทำให้เข้าใจลักษณะ และสมบัติของดินได้ง่ายขึ้น เพราะการจัดกลุ่มขนาดของดินนั้นได้จัดตามสมบัติของอนุภาคดินแต่ละอนุภาคที่คล้ายคลึงกันเข้าไว้ด้วยกัน

ในสภาพธรรมชาติที่ประกอบด้วยอนุภาคดินขนาดต่างๆ นั้น แต่ละกลุ่มขนาดของอนุภาคก็ย่อมแสดงสมบัติเด่นไว้ตามธรรมชาติ โดยอนุภาคของกลุ่มขนาดใดที่มีอยู่เป็นจำนวนมากจึงถือเป็นกลุ่มขนาดหลักของดิน ซึ่งดินประเภทนั้นย่อมมีสมบัติ และคุณลักษณะเด่นของกลุ่มขนาดหลักนั้น สามารถแบ่งประเภทเนื้อดินได้ 3 กลุ่ม ได้แก่

1) ดินเนื้อหยาบหรือดินทราย (sandy soils) หมายถึง ดินที่แสดงสมบัติเด่นของอนุภาคในกลุ่มขนาดทรายในระดับความเด่นชัดที่มากกว่าสมบัติเด่นของอนุภาคในกลุ่มดินร่วน และดินเหนียว ประเภทเนื้อดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ทราย (sand) และทรายร่วน (loamy sand)

2) ดินร่วน (loamy soils) หมายถึง ดินที่แสดงสมบัติเด่นของอนุภาคในกลุ่มขนาดหลักทั้ง 3 กลุ่มในระดับความเด่นชัดที่ไม่แตกต่างกัน หรือแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ดินที่มีเนื้อดินเป็นร่วนปนทราย (sandy loam) ดินที่มีประเภทเนื้อดินเป็นร่วน (loam) ร่วนปนซิลท์ (silt loam) ดินที่มีประเภทเนื้อดินเป็นร่วนเหนียว (clay loam) ร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และร่วนเหนียวปนซิลท์ (silty clay loam)

3) ดินเนื้อละเอียดหรือดินเหนียว (clayey soils) หมายถึง ดินที่แสดงสมบัติเด่นของอนุภาคในกลุ่มขนาดดินเหนียวในระดับความเด่นชัดที่มากกว่าสมบัติเด่นของอนุภาคในกลุ่มขนาดหลักอีก 2 กลุ่มมาก ประเภทเนื้อดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ เหนียวปนทราย (sandy clay) เหนียวปนซิลท์ (silty clay) และเหนียว (clay) นอกจากนั้นดินยังมีความเกี่ยวพันกับสมบัติของดินที่สำคัญบางประการ ดังต่อไปนี้

1) เนื้อดินกับพื้นที่ผิวจำเพาะ

2) เนื้อดินกับความพรุนของดิน

3) เนื้อดินกับการดูดซับ (adsorption) และการดูดซึม (absorption)

4) เนื้อดินกับอินทรียวัตถุในดิน

5) เนื้อดินกับสภาพความชื้นดิน และการเคลื่อนย้ายของน้ำ

2.3.2 โครงสร้างดิน (soil structure)

โดยทั่วไปในสภาพธรรมชาติไม่ได้อยู่ในลักษณะอนุภาคปฐมภูมิ (primary particle) อันเป็นลักษณะอนุภาคดินเดี่ยวๆ แต่จะเชื่อมยึดกับอนุภาคข้างเคียงโดยอิทธิพลของสารเชื่อม (cementing agent) เกิดเป็นอนุภาคทุติยภูมิ (secondary particle) ที่นิยมเรียกกันว่าเม็ดดิน (soil aggregate) เม็ดดินเหล่านี้ส่วนมากมีรูปทรงที่คล้ายคลึงกัน เม็ดดินที่มีรูปร่าง และขนาดพอที่จะถือได้ว่าเป็นตัวแทนส่วนใหญ่ของเม็ดดินในชั้นดินนั้นเรียกว่า หน่วยโครงสร้างดิน (structural unit) ซึ่งเมื่อเชื่อมยึดกันเข้าก็จะได้โครงสร้างดิน

2.3.3 ความหนาแน่นและความพรุนของดิน (density and porosity)

ความหนาแน่นของดินมี 2 ประการคือ ความหนาแน่นรวม และความหนาแน่นอนุภาค ความหนาแน่นรวม (bulk density, Db) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของดินขนาดที่แห้งสนิทกับปริมาตรทั้งหมดของดิน (ปริมาตรของส่วนประกอบทุกส่วนรวมกัน) ส่วนความหนาแน่นอนุภาค (particle density, Dp) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของดินขณะที่ดินแห้งสนิทกับปริมาตรของส่วนที่เป็นอนุภาคดิน (soil particle) เท่านั้น สำหรับความพรุนของดินนิยมบอกเป็นค่าความพรุนทั้งหมด (total porosity, E) ซึ่งหมายถึง ปริมาตรของส่วนที่ไม่ใช่ของแข็งในดิน เมื่อคิดเป็นร้อยละของปริมาณทั้งหมดของดิน

ความสัมพันธ์ของค่าทั้งสามดังกล่าวสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$E = \left[1 - \frac{Db}{Dp} \right] X\ 100$$

E = ความพรุนของดิน

Db = ความหนาแน่นรวม

Dp = ความหนาแน่นอนุภาค

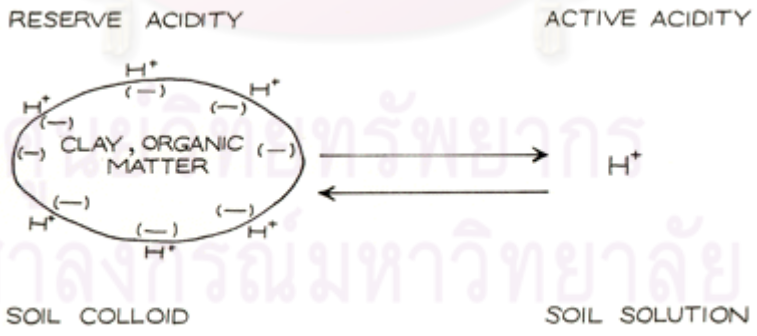
ค่าความหนาแน่นรวมคำนวณโดยเทียบน้ำหนักแห้งของดินกับปริมาตรรวมทั้งส่วนที่เป็นของแข็ง และส่วนที่เป็นช่องในดิน ดินที่มีความหนาแน่นรวมต่ำ หมายความได้ว่าดินมีส่วนที่เป็นช่องมาก โดยดินมีเนื้อละเอียดจึงมีความพรุนของดินมากขึ้นด้วย ดังนั้นความหนาแน่นรวมของดินเนื้อละเอียดจึงต่ำกว่าของดินเนื้อหยาบ

2.3.4 ค่าความเป็นกรด – ด่างของดิน (pH)

การวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน คล้ายคลึงกับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ คือ การวัด pH ของดิน แต่ที่ต่างกันมากคือ ดินนั้นมีความเป็นกรดอยู่ 2 ชนิด คือ สภาพกรดจริง และสภาพกรดแฝง

1) สภาพกรดจริง (active acidity) คือ ส่วนของ H^+ ที่ถูกปลดปล่อยออกมาในสารละลายดินเป็นตัวแสดงความเป็นกรดที่แท้จริง เนื่องจาก pH ของดินแสดงถึงความเข้มข้นของกรดส่วนนี้เท่านั้น

2) สภาพกรดแฝง (reserve acidty) คือ H^+ แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable H^+) ซึ่งถูกดูดซับที่ผิวคอลลอยด์ดิน และออกมาเป็นสารละลายดินได้ด้วยปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange reaction) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพกรดแฝงและสภาพกรดจริง (Allen Barker, 1999)

ความเป็นกรดจะรุนแรงเท่าไรนั้นวัดได้จากสภาพกรดจริง แต่ความเป็นกรดจะอยู่ได้นานเท่าใดนั้นเมื่อทำให้หมดความเป็นกรด (ทำให้เป็นกลาง) ก็จะขึ้นอยู่กับปริมาณของสภาพกรดแฝงที่มีอยู่ การวัดความเป็นกรดของดินปัจจุบันวัดได้แต่เพียงระดับของสภาพกรดจริงที่มีอยู่ในดิน ส่วนระดับของสภาพกรดแฝงไม่นิยมวัดกัน ซึ่งจะวัดกันก็ต่อเมื่อต้องการทราบปริมาณความต้องการปูนที่จะใช้เพื่อปรับระดับความเป็นกรดของดินให้ลดลงเท่านั้น โดยปัจจุบันสามารถจำแนกสภาพกรดในดินเป็น 3 แบบ ได้แก่

1) สภาพกรดที่ตกค้าง (residual acidity) คือ สภาพกรดในดินซึ่งถูกสะเทินได้ด้วยปูนหรือวัสดุที่เป็นด่าง แต่เกลือที่ไม่มีคุณสมบัติบัฟเฟอร์นั้น ไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนได้

2) สภาพกรดซึ่งถูกแทนที่ได้ด้วยเกลือ (salt-replaceable acidity) คือ อะลูมินัม และไฮโดรเจน ซึ่งถูกดูดซับที่ผิวคอลลอยด์ดิน และถูกแทนที่ด้วยเกลือที่ไม่มีคุณสมบัติบัฟเฟอร์ เช่น โพแทสเซียมคลอไรด์หรือโซเดียมคลอไรด์

3) สภาพกรดทั้งหมด (total acidity) คือ กรดทั้งหมดที่มีอยู่ในดิน สามารถหาได้ 2 วิธี คือ (1) สภาพกรดทั้งหมด = CEC ของดิน – เบส (base) ซึ่งแลกเปลี่ยนได้ และ (2) สภาพกรดทั้งหมด = สภาพกรดที่ตกค้าง + สภาพกรดซึ่งอาจถูกแทนที่ได้ด้วยเกลือ

2.3.5 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity; CEC)

ในดินที่มีอินทรียวัตถุนั้น มักพบการแตกตัวของกลุ่มอนุมูลบางตัวจากสารประกอบอินทรีย์สามารถทำให้มีประจุได้เช่นกัน ซึ่งประจุที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นประจุลบ ดินจึงมีความสามารถดูดแคตไอออนไว้ได้ และเนื่องจากดินแต่ละชนิดมีปริมาณอนุภาคดินเหนียวและอินทรียวัตถุไม่เท่ากัน จึงทำให้มีความจุแคตไอออนไม่เท่ากัน แคตไอออนที่ถูกดูดซับ (adsorbed cation) กับคอลลอยด์ดินจะสามารถแลกเปลี่ยนได้กับแคตไอออนในสารละลายดิน จึงได้ชื่อว่า แคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable cation) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนจึงมีความหมายว่า ปริมาณแคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้ ค่าที่วัดได้จึงมีหน่วยเป็น me/100g ดินแห้ง ซึ่งปัจจุบันนิยมบอกเป็นเซ็นติโมล/กิโลกรัมดินแห้ง หน้าดินของดินทั่วไปจะมีค่า CEC ระหว่าง 0.5 - 50 me/100g ถ้าระดับ CEC ของดินต่ำ หมายความว่า ดินชนิดนั้นมีปริมาณอนุภาคดินเหนียวหรือมีอินทรียวัตถุอยู่น้อย แก้ไขได้โดยการเติมดินหรือเพิ่มดินเหนียวให้ได้ 1% เพื่อเพิ่มค่า CEC ให้

ได้เท่ากับ 0.5 me/100 g นั้น เป็นสิ่งที่ทำได้ยากกว่าการเติมดินเหนียวให้ได้ 1% เพื่อให้ได้ค่า CEC มากเป็น 4 เท่าของการเพิ่มปริมาณดินเหนียว

2.3.6 สภาพออกซิเดชัน-รีดักชันของดิน (oxidation and reduction)

การออกซิเดชัน (oxidation state) ของดินเกิดจากการระบายน้ำ และอากาศของดิน สภาพอากาศในดินเป็นตัวกำหนดชนิดจุลินทรีย์ดินที่จะเป็นตัวการย่อยสลายสารอินทรีย์ และการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนในดิน หากดินมีการระบายอากาศดี การสลายตัวของคาร์บอนอินทรีย์จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่หากดินขาดออกซิเจน จะพบว่า การสลายตัวไม่สมบูรณ์ ทำให้ได้กรดอินทรีย์ สำหรับการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนก็เช่นกัน โดยไนโตรเจนอินทรีย์จะเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียก่อน หากดินมีการถ่ายเทอากาศดี จากนั้นจะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) โดยจุลินทรีย์ดินจากแอมโมเนียเป็นไนเตรต แต่ถ้าดินขาดออกซิเจน จุลินทรีย์จะใช้ไนเตรตในกระบวนการหายใจได้แก๊สไนโตรเจน ซึ่งเป็นกระบวนการรีดิวส์ ดังนั้น ศักดิ์รีดอกซ์ของดินมีความสำคัญมาก

2.4 **การล้างดิน** (soil washing)

การล้างดินเป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดสิ่งที่ปนเปื้อนออกจากดินโดยปล่อยดินปนเปื้อนไว้ที่เดิม และทำการบำบัดในพื้นที่ (USEPA, 1993) ซึ่งเป็นการย้ายการปนเปื้อนจากดินสู่น้ำ (Zhang et al., 2010a) โดยใช้หลักการการชะล้างด้วยสารละลายที่เหมาะสม เช่น น้ำ หรือ ตัวสกัดทางเคมี ซึ่งตัวสกัดทางเคมี ได้แก่ สารละลายที่เป็นกรด เช่น ไฮโดรคลอริก (HCl) ซัลฟูริก (H_2SO_4) ไนตริก (HNO_3) ฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือ กรดอินทรีย์อ่อนๆ เช่น อะซิตริก (CH_3COOH) เป็นต้น สารละลายที่เป็นเกลือ หรือสารละลายที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นต้น สารละลายคีเลตติงเอเจนต์ เช่น EDTA เป็นต้น สารละลายที่เป็นสารลดแรงตึงผิว เช่น TWEEN 80 และ SDS เป็นต้น สารละลายที่เป็นรีดิวซิงค์เอเจนต์หรือออกซิไดซิงค์เอเจนต์ เช่น โซเดียมเมตตาไบซัลไฟต์ ($Na_2S_2O_5$) เป็นต้น ซึ่งสารละลายลดแรงตึงผิวนอกจากสามารถใช้ในการสกัดสารอินทรีย์ได้แล้วนั้น สารลดแรงตึงผิวที่มีคุณสมบัติเป็นกรดสามารถสกัดโลหะหนักที่มีพันธะเคมีกับคาร์บอเนต (carbonate) และออกไซด์ (oxide) ได้ (Mulligan et al., 1999) และสารละลายกรดแก่ หรือสารละลายคีเลตติงเอเจนต์สามารถใช้ในการกำจัดโลหะหนัก ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวและคีเลตติงเอเจนต์จึงมีความสำคัญอย่างมากในการชะล้างดิน เพราะดินส่วนใหญ่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และโลหะหนัก โดยความสามารถในการ

ชะล้างสิ่งปนเปื้อนออกจากดิน ยังขึ้นอยู่กับขนาดของดิน ความพรุน โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของดิน (นริศรา เนียมฤทธิ์, 2549)

2.5 สารคีเลต (chelate)

สารคีเลตจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน โดยสารประกอบเชิงซ้อน เกิดจากอะตอมกลาง (อะตอมของโลหะหรือไอออนบวก ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว) ทำปฏิกิริยากับลิแกนด์ (ligand หรือ complexing agent) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวแก่อะตอมกลาง โดยลิแกนด์อาจอยู่ในรูปของไอออนหรือโมเลกุลที่มีประจุลบ หรือเป็นกลางทางไฟฟ้าก็ได้ จำนวนพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมกลางกับลิแกนด์ในสารประกอบเชิงซ้อนเรียกว่า เลขโคออร์ดิเนชัน (coordination number)

ลิแกนด์ที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันหรืออะตอมที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้ 1 ตัว แก่อะตอมกลาง เรียกว่า ยูนิเดนเตด (unidentate) ถ้าลิแกนด์มีหมู่ฟังก์ชันหรืออะตอมที่สามารถให้อิเล็กตรอน 2 หมู่ โดยให้อิเล็กตรอนแก่อะตอมกลางตัวเดียวกันหมู่ละ 1 ตัว เรียกว่า ไบเดนเตด (bidentate) และลิแกนด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ให้อิเล็กตรอนมากกว่า 2 ตัวขึ้นไป สามารถเรียกโดยรวมว่า ลิแกนด์ชนิดพอลิเดนเตด (polydentate)

นอกจากนี้หากลิแกนด์ในสารประกอบเชิงซ้อนเป็นชนิดไบเดนเตดหรือพอลิเดนเตด อาจเรียกลิแกนด์ดังกล่าวอีกรูปหนึ่งว่า สารคีเลต ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนไซคลิก (cyclic complex) เช่น $Cu(NH_2CH_2COO)_2$

2.5.1 การเลือกสารคีเลตติงเอเจนต์ที่ใช้ในการสกัดโลหะหนักออกจากดิน ควรคำนึงถึงปัจจัย 4 ปัจจัยดังนี้ (Sun et al., 2001)

1) สารคีเลตติงเอเจนต์ควรจะต้องมีความเสถียรสูงในช่วง pH ที่กว้าง

2) การย่อยสลายทางชีวภาพของสารคีเลต และสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักควรมีค่าต่ำหรือสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการล้างดิน

3) สารประกอบของโลหะหนักในน้ำชะล้างต้องไม่สามารถกลับมาดูดซับบนผิวดินได้อีก

4) สารคีเลตที่นำมาใช้ควรมีความคุ้มค่า คุ้มราคา และเหมาะสมกับประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความเสถียรของสารประกอบโลหะกับคีเลต คือ (USEPA, 1994)

1) ขนาดและจำนวนของวงแหวน

2) ลิแกนด์ของอะตอมซึ่งแทนที่อะตอมอื่นในวงแหวน

3) ธรรมชาติของโลหะ

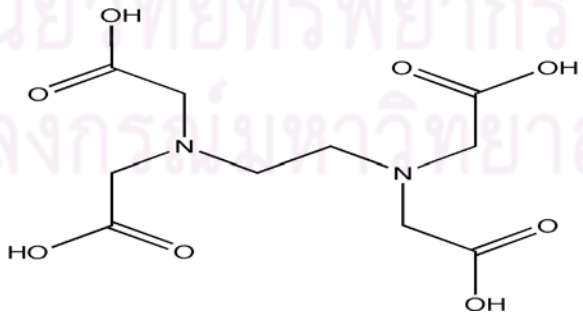
4) pH ของสารละลายที่ใช้ในการล้างดิน

5) ดินที่มีปริมาณแคลไซด์มาก

2.5.3 EDTA (ethylene diaminete traacetic acid)

1) โครงสร้างของ EDTA

ลิแกนด์ในสารประกอบเชิงซ้อนอาจเป็นสารประกอบอนินทรีย์หรืออินทรีย์ก็ได้ โดยลิแกนด์ชนิดของสารอนินทรีย์ที่ใช้โดยทั่วไปคือ แอมโมเนีย น้ำ และหมู่เฮไลด์ (คลอไรด์) ส่วนสารประกอบอินทรีย์ ส่วนใหญ่มีคุณสมบัติเป็นลิแกนด์แบบพอลิเดนเตต โดยสารประกอบอินทรีย์ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ สารละลายกรดเอธิลีนไดเอมีนเตตระแอซีติกหรืออีดีทีเอ (ethylene diaminete traacetic acid; EDTA)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสาร EDTA

ที่มา: Maryadele และคณะ (2001)

EDTA เป็นสารประกอบเชิงซ้อนชนิดเฮกซะเดนเตด (Hexadentate) สามารถให้ 6 ตัวจากหมู่เอมีน 2 ตัว และจากหมู่คาร์บอกซิเลต 4 ตัว เมื่อเกิดพันธะกับโลหะ EDTA ทำหน้าที่เสมือนกรงล้อมรอบไอออนโลหะ เมื่อ EDTA เกิดการแตกตัวเป็นไอออน จะเกิดประจุลบ จำนวน 4 ประจุที่สามารถเกิดพันธะกับโลหะ ซึ่งสารประกอบระหว่างโลหะกับ EDTA มีความเสถียรมาก (Oviedo and Rodriguez, 2003)

2) การเข้าทำปฏิกิริยาของ EDTA กับโลหะ

EDTA มีคุณสมบัติเป็นกรดเตตระโปรติก (tetraprotic acid; แตกตัวได้ 4 ครั้ง) และปริมาณสัดส่วนในแต่ละองค์ประกอบของ EDTA ขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย ปฏิกิริยาการแตกตัวของ EDTA แสดงได้ดังนี้

(กำหนดให้ H_4Y แทนสารละลาย EDTA)

$$H_4Y + H_2O \rightleftharpoons H_3Y^- + H_3O^+ \qquad Ka_1 = 1.02 \times 10^{-2}$$

$$H_3Y^- + H_2O \rightleftharpoons H_2Y^{2-} + H_3O^+ \qquad Ka_2 = 2.14 \times 10^{-3}$$

$$H_2Y^{2-} + H_2O \rightleftharpoons HY^{3-} + H_3O^+ \qquad Ka_3 = 6.92 \times 10^{-7}$$

$$HY^{3-} + H_2O \rightleftharpoons Y^{4-} + H_3O^+ \qquad Ka_4 = 5.50 \times 10^{-11}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในทางการค้าสารละลาย EDTA มักถูกเตรียมอยู่ในรูปเกลือไดโซเดียม ($Na_2H_2Y.2H_2O$) เมื่ออยู่ในตัวทำละลายน้ำจะอยู่ในรูป H_2Y^{2-} ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับโลหะทุกชนิดในอัตราส่วน 1:1 (Saifullah et al., 2009) เช่น

$$M^{2+} + H_2Y^{2-} \rightleftharpoons MY^{2-} + 2H^+$$

$$M^{3+} + H_2Y^{2-} \rightleftharpoons MY^{-} + 2H^+$$

$$M^{4+} + H_2Y^{2-} \rightleftharpoons MY + 2H^+$$

หรือ $$M^{n+} + H_2Y^{2-} \rightleftharpoons MY^{(n-4)+} + 2H^+$$

จากสมการเมื่อ H_2Y^{2-} 1 โมล ทำปฏิกิริยาไอออนโลหะ 1 โมล จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อน 1 โมล และ H^+ 2 โมล ดังนั้นจากปฏิกิริยา ความเข้มข้นของ H^+ หรือ pH ของสารละลาย จะมีผลต่อการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น

ถ้าหาก pH มีค่าต่ำเกินไป (H^+ มาก) จะมีผลทำให้สารประกอบเชิงซ้อนมีความเสถียรน้อยลง (พิจารณาตามหลักการของเลอชาเตอร์ลิเยร์) โดยสารประกอบเชิงซ้อนชนิดต่างๆ มีความเสถียรที่ pH แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดง pH ที่มีผลต่อความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนโลหะบางชนิดกับ EDTA

pH ต่ำสุดที่สารประกอบเชิงซ้อนเสถียร	ไอออนโลหะ
1 - 3	Zr^{4+}, Hf^{4+}, Th^{4+}, Bi^{3+}, Fe^{3+}
4 - 6	Pb^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Mn^{2+}, Fe^{2+}, Al^{2+}, Cd^{2+}, Sn^{2+}
8 - 10	Ca^{2+}, Sr^{2+}, Ba^{2+}, Mg^{2+}

จากผลของ pH ต่อความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนโลหะกับ EDTA และองค์ประกอบของ EDTA ในสารละลาย ทำให้เมื่อใช้สารละลาย EDTA เป็นตัวไทเทรต (titration) เพื่อหาปริมาณสาร จึงต้องมีการควบคุม pH ด้วย

ดังนั้นการไทเทรต (titration) นิยมปรับสารละลายให้มี pH $\geq$ 10 เพื่อความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนส่วนใหญ่ ซึ่งส่งผลทำให้ EDTA มีองค์ประกอบเดียวที่เด่น นั้นคือ Y^{4-} โดยที่สภาวะสมดุลระหว่าง Y^{4-} กับไอออนโลหะ (M^{n+}) แสดงดังนี้

$$M^{n+} + Y^{4-} \rightleftharpoons MY^{(n-4)}$$

$$K_{MY} = \frac{[MY^{(n-4)+}]}{[M^{n+}][Y^{4-}]}$$

$$K_{MY} = \frac{[MY^{(n-4)+}]}{[M^{n+}]\alpha_4 C_T}$$

ถ้ากำหนดให้ $K'_{MY} = K_{MY}\alpha_4$

$$K_{MY} = \frac{[MY^{(n-4)+}]}{[M^{n+}]C_T}$$

K'_{MY} หรือ $\alpha_4 C_T$ เป็นค่าคงที่สมดุลปฏิกิริยาการเกิดสารเชิงซ้อนที่ขึ้นอยู่กับสภาวะ (conditional formation constant) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตาม pH

EDTA เป็นสารคีเลตสังเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการกำจัดโลหะหนักจากดิน เนื่องจาก (Lim et al., 2005)

1) EDTA มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักที่มีประจุบวก

2) การชะล้างดินด้วย EDTA นั้นสามารถทำได้ในช่วงชนิดของดินกว้าง

3) EDTA สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (การย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ)

2.6 **สารลดแรงตึงผิว** (surfactants)

สารลดแรงตึงผิวมีคุณสมบัติในการดูดซับบนผิวของตัวกลาง โครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบแอมฟิฟาติก (amphiphatic structure) คือ ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วหรือส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic portion) และส่วนที่ไม่มีขั้วหรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic portion) ส่วนที่มีขั้วเป็นส่วนที่ละลายน้ำได้ และส่วนที่ไม่มีขั้วละลายน้ำได้ต่ำ ส่วนมากเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวในการกำจัดสารปนเปื้อนขึ้นกับการรวมตัวของโมเลกุลเป็นไมเซลล์ (Micelle) โดยโมเลกุลจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มโดยหันส่วนที่มีขั้วออกมาด้านนอก และด้านในเป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว ซึ่งความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่จะทำให้โครงสร้างรวมตัวกันเป็นไมเซลล์ได้นั้น จะต้องมีความเข้มข้นต่ำที่สุดที่จุดวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (critical micelle concentration, CMC) เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่ำกว่าจุดวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ การรวมตัวของโมเลกุลจะเป็นแบบฮีไมไมเซลล์ (hemimicelle) และแอดไมเซลล์ (admicelle) (รุจิเรข จันทร์อำไพ, 2546)

2.6.1 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2548)

สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ตามลักษณะหรือประจุของส่วนที่ชอบน้ำ ได้แก่

1) anionic surfactant เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุไฟฟ้าบน hydrophilic ให้ประจุลบ ส่วนมากแสดงอยู่ในรูป carboxylate, sulfate, sulfonate หรือ phosphate สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ใช้มากในอุตสาหกรรมประเภท ผงซักฟอก ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด น้ำยาล้างจาน เป็นต้น โดยใช้มากถึง 49% ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด เนื่องจากสามารถใช้ขจัดคราบสกปรกได้ดี

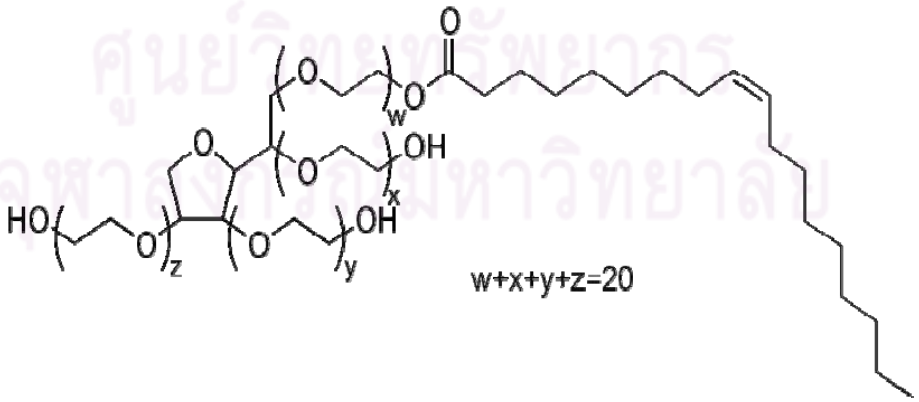
2) cationic surfactant เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุไฟฟ้าบน hydrophilic ให้ประจุบวก ส่วนมากมักเป็นพวก quaternary ammonium สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูง (pH 10 -11) เนื่องจาก ammonium salt จะมีการสูญเสียประจุบวก ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ สารลดแรงตึงผิวประเภท cationic จะทำให้เกิดการระคายเคืองมากกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภท anionic นิยมใช้ในพวกน้ำยาปรับผ้านุ่ม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับการจัดแต่งทรงผม เป็นต้น

3) nonionic surfactant สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะต่างจากสารลดแรงตึงผิวประเภท anionic และ cationic ตรงที่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ โดยมีพวก polyether หรือ polyhydroxyl เป็นกลุ่มที่แสดงคุณสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุ ใช้มากในผงซักฟอก น้ำยาล้างถ้วยชาม ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิว เป็นต้น

4) amphoteric surfactant หรือ zwitterions เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบน hydrophilic สามารถให้ได้ทั้งประจุบวกและลบ โดยจะแสดงคุณสมบัติประเภทใดขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อม ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นด่าง (pH>7) ประจุไฟฟ้าบน hydrophilic จะให้ประจุลบ ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นกรด (pH<7) ประจุไฟฟ้าบน hydrophilic จะให้ประจุบวก และในสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดการให้ประจุไฟฟ้าบน hydrophilic สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิวหรือผม ในปัจจุบันยังใช้น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่น

2.6.2 TWEEN 80 (polysorbate 80)

สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ สาร TWEEN 80 (polysorbate 80) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทไม่มีประจุ สูตรโครงสร้างของ TWEEN 80 คือ $C_{64}H_{124}O_{27}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และมีน้ำหนักโมเลกุลทั้งหมด เท่ากับ 1,310 กรัม มีค่า HLB เท่ากับ 15 ซึ่งเป็นค่าที่ระบุว่าสารลดแรงตึงผิวนี้มีความชอบไปทางน้ำหรือน้ำมัน โดย HLB มีค่าตั้งแต่ 0 – 20 โดย 0 ชอบน้ำมันที่สุด และ 20 นั้นชอบน้ำที่สุด และมีค่า CMC เท่ากับ 0.000012 โมล หรือ เท่ากับ 0.012 มิลลิโมล ซึ่งคุณสมบัติทางเคมีของสาร TWEEN 80 แสดงไว้ในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสาร TWEEN 80

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีของสาร TWEEN 80 (Mouton, 2009)

ชื่อทางการค้า	ชื่อทางเคมี	สูตรโครงสร้าง	HLB*	CMC** (M)	น้ำหนักโมเลกุล
TWEEN 80	Polyoxyethylenesorbitan monooleate	$C_{64}H_{124}O_{27}$	15	1.2×10^{-5}	1,310

หมายเหตุ : *HLB = hydrophilic-lipophilic balance

**CMC = critical micelle concentration

2.7 โลหะหนัก

ธาตุโลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป โดยไม่รวมโลหะที่เป็นโลหะแอลคาไล (alkali) และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นธาตุในตารางธาตุที่มีเลขเชิงอะตอม (atomic number) ในช่วง 23 - 92 อยู่ในคาบที่ 4 - 7 (มลิวรรณ บุญเสนอ, 2544)

2.7.1 ตะกั่ว (lead, Pb)

ตะกั่วในธรรมชาติมี 2 รูปคือ รูปของสารอนินทรีย์ (Inorganic lead) อยู่ในรูปของเกลือหรือออกไซด์ของตะกั่ว และในรูปของสารอินทรีย์ (organic lead) พบมากได้แก่ tetraethyl lead และ tetramethyl lead ตะกั่วอินทรีย์จะถูกดูดซึมเข้าทางผิวหนังได้ง่าย ส่วนตะกั่วอนินทรีย์จะไม่ซึมผ่านผิวหนัง (เกษม จันทร์แก้ว, 2541)

1) คุณสมบัติทั่วไป

ตะกั่วเป็นโลหะธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 207.19 และอยู่ในกลุ่มธาตุหมู่ IV A ของตารางธาตุ มีวาเลนซีเท่ากับ 1, 2 และ 4 โดยตะกั่วส่วนมากจะอยู่ในสภาวะวาเลนซี 2 ซึ่งเสถียรมากที่สุด คุณสมบัติอื่นๆ แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทั่วไปของตะกั่ว (ทิพวรรณ พจนาภรณ์, 2552)

คุณสมบัติ	รายละเอียด
เลขอะตอม	82
น้ำหนักอะตอม	207.19 amu
จุดหลอมเหลว	327 °C
จุดเดือด	1749 °C
ความหนาแน่นที่ 20 ºC	11.34 g/cc
โครงสร้างอิเลคโทรนิค	$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^2$
เลขออกซิเดชั่นสามัญ	+2, +4
โครงสร้างผลึก	cubic face centered
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	179.5 KJ/mol
ความร้อนจำเพาะที่ 25ºC	26.650 J/(mol·K)
การนำความร้อนที่ 300 K	35.3 W/(m·K)
ความต้านทนไฟฟ้าที่ 20 ºC	208 nΩ·m
ความดันไอที่ 987 ºC	1 mm
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ 25 ºC	28.9 µm/(m·K)
ความแข็ง (brinell hardness number)	4.2
ความร้องแฝงของการหลอมเหลว	4.77 KJ/mol
ความแข็งโมห์ส	1.5
ความแข็งบริเนล	38.3 MPa

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ประโยชน์ของตะกั่ว

ตะกั่วโมโนออกไซด์ (lead monoxide, PbO) หรือ litharge ใช้เป็นสารสีเหลืองผสมสีทาบ้าน

ตะกั่วไดออกไซด์ (lead dioxide, PbO_2) ใช้ทำเป็นขั่วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์และเครื่องจักร

ตะกั่วคาร์บอเนต (lead carbonate, $PbCO_3$) ผสมกับ lead hydroxide, $Pb(OH)_2$ รวมกันเรียกว่า สีน้ำมัน หมึกพิมพ์ และสีพลาสติก เป็นต้น

ตะกั่วออกไซด์ (lead oxide, Pb_3O_4) หรือ “red lead” หรือตะกั่วแดง ใช้เป็นสีทาโลหะเพื่อกันสนิม หรือที่ชาวบ้านเรียกว่าสีสำหรับโปะรถยนต์

3) โทษของตะกั่ว

การที่ร่างกายได้รับสารตะกั่วสะสมเป็นเวลานานถึงระดับอันตราย อาจก่อให้เกิดความผิดปกติของระบบย่อยอาหารและระบบประสาท ในเด็กที่ได้รับสารตะกั่วมักมีอาการทางสมอง เช่น สมองเล็กผิดปกติ ในผู้ใหญ่ตะกั่วจะทำลายประสาทส่วนปลาย แขนขาจะมีอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรง ทำให้การเดินและการจับต้องสิ่งของไม่สามารถกระทำได้เช่นคนปกติ นอกจากนั้นตะกั่วยังก่อให้เกิดโรคโลหิตจาง เนื่องจากตะกั่วไปรบกวนการสร้างฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง ตะกั่วที่สะสมมากเกินไปในร่างกาย ยังเป็นเหตุให้เกิดความพิการของไต ทำให้ค่อยๆ ลดประสิทธิภาพในการขับถ่ายกรดยูริค

4) ค่ามาตรฐานของตะกั่ว (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

ค่ามาตรฐานความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำดื่มไม่ควรเกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ต้องไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ต้องไม่เกิน 750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2.7.2 โครเมียม (Chromium, Cr)

ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีการนำโครเมียมและสารประกอบโครเมียมมาใช้หลายประเภท เช่น การชุบโลหะ ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ผลิตโลหะ alloy (ผสมกับ nickle) ผลิตเม็ดสี ชุบเครื่องประดับ การย้อมผ้า การฟอกหนังสัตว์ เป็นต้น

1) คุณสมบัติทั่วไป

โครเมียมเป็นโลหะธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 52.01 เป็นสมาชิกของหมู่ธาตุ IV B ของตารางธาตุ หรือกลุ่ม transitional elements โครเมียมและสารประกอบโครเมียมมีหลายกลุ่ม โดยแบ่งตาม valency ได้แก่ valency 0, 1, 2, 3, 4 และ 6 ซึ่งกลุ่ม valency 3 (trivalent chromium : CrIII) และ valency 6 (hexavalent chromium : Cr(IV)) จะเป็นกลุ่มที่มีความสำคัญ ทั้งในด้านการนำมาใช้ประโยชน์และผลต่อสุขภาพของคน คุณสมบัติอื่นๆ แสดงในตารางที่ 2.4

2) การแบ่งกลุ่มของโครเมียมตามคุณสมบัติทางเคมี (ศูนย์พิษวิทยาโรงพยาบาลรามาธิบดี, 2544)

(1) chromium metal และ alloy กลุ่มนี้จะรวมถึงเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) และ chromium containing-alloy โดยทั่วไปกลุ่มนี้จะมีความเป็นพิษค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น

(2) divalent chromium compound (Cr^{2+}) หรือ chromous compounds ได้แก่ chromous chloride ($CrCl_2$) และ chromous sulfate ($CrSO_4$) กลุ่มนี้จะมีความเป็นพิษน้อย

(3) trivalent chromium compound (Cr^{3+}) หรือ chromic compound เป็นที่ทราบกันว่า trivalent chromium เป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อร่างกายในขบวนการ glucose metabloism ส่วน compound อื่นๆ ที่พบในกลุ่มนี้ ได้แก่ chromic oxide (Cr_2O_3), chromic sulfate ($Cr_2[SO_4]_3$), chromic chloride ($CrCl_3$), chromic potassium sulfate ($KCr[SO_4]_2$) และ chromite ore ($FeOCr_2O_3$)

(4) hexavalent chromium compound (Cr^{6+}) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อยคือ

(4.1) กลุ่มที่ละลายน้ำได้ (water-soluble hexavalent compounds) ได้แก่ chromic acid, anhydride of chromic acid, monochromate, dichromate of sodium, potassium, ammonium, cesium, rubidium และ lithium เป็นต้น

(4.2) กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำได้ (water-insoluble hexavalent compounds) ได้แก่ zinc chromate, calcium chromate, lead chromate, barium chromate, strontium chromate และ sintered chromium trioxide เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทั่วไปของโครเมียม (สุภาพร แป้งทา, 2552)

คุณสมบัติ	รายละเอียด
เลขอะตอม	24
น้ำหนักอะตอม	51.996 amu
จุดหลอมเหลว	1907 °C
จุดเดือด	2199 °C
ความหนาแน่นที่ 20 ºC	7.19 g/cc
โครงสร้างอิเลคโทรนิก	(Ar) $4s^1$ $3d^5$
เลขออกซิเดชั่นสามัญ	+2 , +3 และ +6
โครงสร้างผลึก	cubic body centered
ไอโซโทปเสถียร	^{50} Cr (4.31%), ^{52} Cr (83.76 %)
	^{53} Cr (9.55%), ^{54} Cr (2.356 %)
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	339.5 KJ/mol
ความร้อนจำเพาะที่ 25 ºC	23.35 J/(mol·K)
การนำความร้อนที่ 300 K	93.9 W/(m·K)
ความต้านทนไฟฟ้าที่ 20 ºC	125 nΩ·m
ความดันไอที่ 1656 ºC	1 mm
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ 25 ºC	4.9 µm/(m·K)
ความแข็ง (brinell hardness number)	8.5
ความร้องแฝงของการหลอมเหลว	8.0 KJ/mol
ความแข็งโมห์ส	8.5
ความแข็งบริเนล	1120

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) ประโยชน์ของโครเมียม

โลหะโครเมียมถูกนำมาใช้มากในการชุบเคลือบโลหะเพื่อกันสนิม และให้เป็นเงางาม ใช้ใส่ลงในโลหะผสมทั้งหลายโดยเฉพาะในเหล็กกล้า สารประกอบโครเมต (chromate) ถูกใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง สารพวกไดโครเมต (dichromate) เป็นส่วนประกอบของสีย้อมวัสดุต่างๆ และผสมในน้ำกรดแบตเตอรี่ สังกะสีโครเมตใช้เป็นสีรองพื้นก่อนเคลือบด้วยสีอย่างอื่น Cr_2O_3 และกรดโครมิคมีฤทธิ์กัดเนื้อเยื่อ จึงใช้เป็นยากัดหูด และยาทาภายนอกร่างกาย

4) โทษของโครเมียม

(1) ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (acute toxicity)

มักพบในกรณีได้รับโดยการกิน hexavalent chromium เช่น chromic acid จะทำให้เกิด acute gastroenteritis ร่วมกับ yellow-green vomitus หรือ hematemesis, hepatic necrosis, gastrointestinal hemorrhage acute tubular necrosis และ renal failure นอกจากนี้ ในรายที่กิน hexavalent chromium ในปริมาณมากๆ จะทำให้มี vertigo, thirst, abdominal pain, bloody diarrhea ในรายที่รุนแรงอาจจะพบความผิดปกติเหล่านี้ร่วมด้วย เช่น hepatorenal syndrome, severe coagulopathy, intravascular hemolysis และอาจเสียชีวิตได้ โดยปริมาณที่ทำให้เสียชีวิตได้ในผู้ใหญ่ คือ 1-3 กรัม

(2) ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง (chronic toxicity)

มักพบในคนงานที่ต้องทำงานสัมผัสกับโครเมียมเป็นเวลานานๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

(2.1) ความเป็นพิษต่อผิวหนัง (ไมตรี, 2531)

กรดโครมิคหรือสารโครเมต สามารถทำลายเนื้อเยื่อเฉพาะแห่ง โดยทำลายสภาพธรรมชาติของโปรตีน ทำให้กลายเป็นแผลผุพองตามผิวหนังเรียกว่า chromic holes ทำให้มีการระคายเคืองของตา และทางเดินหายใจ ถ้าได้รับสารประกอบโครเมตทางปาก เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะทำให้ปวดท้อง กระเพาะลำไส้เป็นแผลอักเสบ อ่อนเพลีย และปวดตามข้อ ตับอักเสบ ซึ่งอาจเป็นโรคดีซ่านได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(2.2) การเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง

โดย The international agency for research on cancer (IARC) และ US toxicology program จัด hexavalent chromium เป็น human carcinogen ด้วยความสามารถในการละลายน้ำที่ดีของสารประกอบโครเมียม จึงพบว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดมะเร็งปอด เพราะไปรบกวนการสังเคราะห์ดีเอ็นเอ ซึ่งพบค่อนข้างมากกว่ามะเร็งชนิดอื่น ในการชุบโลหะด้วยโครเมียม จะแช่โลหะที่ต้องการชุบลงในสารละลายของกรดโครมิคแล้วผ่านกระแสไฟตรงลงไปบนอีเลคโทรด ขบวนการชุบโครเมียมนี้จะมีความร้อนทำให้เกิดละอองเล็กๆ ของกรดโครมิคเดือดกระจายขึ้นมาในอากาศเหนือถังชุบนั้นอยู่เสมอ จึงทำให้บุคคลผู้มีอาชีพเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมชุบโครเมียมได้รับสารโครเมียมสะสมทางปอดเป็นประจำ และเกิดล้มป่วยในเวลาต่อมา

5) ค่ามาตรฐานของโครเมียม

ค่ามาตรฐานความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำดื่มไม่ควรเกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร และในอากาศบริเวณที่มีชุมชนอาศัยไม่ควรเกิน 0.028 ไมโครกรัมต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร ค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ต้องไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจาก การอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ต้องไม่เกิน 640 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tandy *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักได้แก่ สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง จากดินที่ใช้ในการทำการเกษตรกรรม โดยใช้สารคีเลตคือ EDTA, NTA, EDDS, IDSA และ MGDA ที่ระดับความเข้มข้น 2 ระดับ ได้แก่ 0.4 และ 4 มิลลิโมล อัตราส่วนระหว่างดินต่อสารละลายเท่ากับ 1 ต่อ 50 เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้อง ผลจากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง ที่ใช้สารคีเลตต่างๆ เป็นดังนี้ EDDS > NTA > IDSA > MGDA > EDTA และสำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7 โดยสารคีเลตต่างๆ เป็นดังนี้ NTA > EDDS > EDTA > MGDA > IDSA และที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 EDDS และ IDSA ไม่สามารถกำจัดสังกะสีออกมาได้ เมื่อเปรียบเทียบกับสารคีเลตตัวอื่นๆ สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัด Pb โดยการใช้สารคีเลต 3 ชนิด ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 และ 7 ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วด้วยสาร EDTA > NTA > EDDS

Cheng *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาผลของ TWEEN 80 และอินทรีย์วัตถุต่อพฤติกรรมของ PAHs (Phenanthrene และ Pyrene) ในดินด้วยการล้างดิน โดยการนำไปเขย่าที่อัตราเร็ว 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 - 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลจากการศึกษาพบว่าที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 เท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัด Phenanthrene และ Pyrene ได้ 2.1% และ 5.8% ตามลำดับ และการล้างด้วย TWEEN 80 ร่วมกับอินทรีย์วัตถุนั้น สามารถกำจัด Phenanthrene และ Pyrene ได้ 16.2% และ 10.9% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้ TWEEN 80 ร่วมกับอินทรียวัตถุสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด PAHs ได้มากกว่าการใช้สารเพียงชนิดเดียว

Ehsan *et al.* (2006) ได้ทำการล้างดินปนเปื้อนตะกั่วและโครเมียม โดยใช้ EDTA สารละลายผสมระหว่าง EDTA กับสารลดแรงตึงผิว (Surfactant; anionic) ได้แก่ TritonX-301 และ TritonXQS-20 และสารละลายผสมระหว่าง EDTA กับสารลดแรงตึงผิว (Surfactant; nonionic) ได้แก่ Brij 98 ซึ่งระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 2 มิลลิโมล และความเข้มข้นของสารละลายผสมระหว่าง EDTA 2 มิลลิโมล และสารลดแรงตึงผิว 30 กรัมต่อลิตร เวลาที่ใช้ในการล้างดินคือ 10 นาที ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ EDTA สารละลายผสมระหว่าง EDTA กับ TritonX-301 สารละลายผสมระหว่าง EDTA กับ TritonXQS-20 และสารละลายผสมระหว่าง EDTA กับ Brij 98 มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเท่ากับ 66, 61, 67 และ 73% ตามลำดับ และสารละลายดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 3, 4, 5 และ 4% ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าสารละลายที่นำมาใช้ในการล้างดินมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าโครเมียมที่ปนเปื้อนในดิน

Moutsatsou *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาการล้างดินปนเปื้อนโลหะตะกั่ว จากการทำเหมืองแร่ โดยการล้างด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 โมล ที่อัตราเร็วของการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1, 2, 4 และ 8 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาพบว่า สาร EDTA มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วด้วยวิธีการล้างดินเท่ากับ 44, 33, 37 และ 32% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า EDTA มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วที่เวลาน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ชั่วโมง ในสภาวะที่สารละลายมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำ (pH น้อยกว่าหรือเท่ากับ 7)

Andrade *et al.* (2007) ทำการศึกษาดินที่ปนเปื้อนตะกั่วจากโรงงานอุตสาหกรรมแบตเตอรี่รถยนต์ ด้วยวิธีการล้างดิน โดยมีระดับของการปนเปื้อนตะกั่วประมาณ 39,100 ไมโครกรัมต่อกรัม และได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารโซเดียมอีดีทีเอ (Na_2EDTA) และไดแอมโมเนียอีดีทีเอ ($[NH_4]_2EDTA$) ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0.2 โมล อัตราส่วนดินต่อสารละลายเท่ากับ 1:1 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า สารคีเลตทั้งสองชนิดมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 6,712 และ 6,870 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติดังแสดงให้เห็นว่า โซเดียมอีดีทีเอ และไดแอมโมเนียอีดีทีเอ มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในการกำจัดตะกั่ว

Di Palma *et al.* (2007) ศึกษาการล้างดินตะกอนที่ปนเปื้อนตะกั่วจากท่าเรือด้วยการใช้สารคีเลตได้แก่ EDTA ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0.05 และ 0.1 โมล อัตราเร็วของการเขย่าเท่ากับ 175 รอบต่อนาที ผลจากการศึกษาพบว่า EDTA สามารถจับกับโลหะในรูปของคาร์บอเนต ออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ และอินทรียวัตถุได้ดี โดยประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วที่ดีที่สุด คือ ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 0.1 โมล ซึ่งมีอัตราส่วนดินต่อสารละลายเท่ากับ 1:8 สามารถกำจัดตะกั่วได้มากถึง 99.71% รองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 0.05 โมล และมีอัตราส่วนดินต่อสารละลายเท่ากับ 1:5 สามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 93.72% และความเข้มข้นที่น้อยที่สุดที่สามารถกำจัดตะกั่วได้จากการศึกษาครั้งนี้คือ ความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 0.05 โมล อัตราส่วนดินต่อสารละลายเท่ากับ 1:12.5 ซึ่งปัจจัยดังกล่าวสามารถกำจัดตะกั่วได้เพียง 56.68%

Zhang *et al.* (2007) ศึกษาการกำจัดตะกั่วในดินปนเปื้อนโดยการล้างดินด้วยสารคีเลตได้แก่ EDTA ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0.27 และ 0.54 มิลลิโมล และการใช้สารลดแรงตึงผิวได้แก่ SDS ที่ระดับความเข้มข้นคือ 5 และ 20 กรัมต่อลิตร และการล้างดินด้วย EDTA ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 0.27 และ 0.54 มิลลิโมล และตามด้วย SDS ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5 และ 20 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้เท่ากับ 7 ด้วย กรดไนตริก (HNO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งมีการใช้ในอัตราส่วนดินต่อสารละลายเท่ากับ 1:25 และนำไปเขย่าที่อัตราเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลจากการศึกษาครั้งนี้พบว่า สารคีเลตคือ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.27 และ 0.54 มิลลิโมล มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 79±2 และ 97±3% ตามลำดับ สำหรับสารลดแรงตึงผิวได้แก่ SDS ที่ระดับความเข้มข้น 5 และ 20 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 23±2 และ 30±1% ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้ EDTA ล้างก่อน ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0.27

และ 0.54 มิลลิโมล ตามด้วย SDS ที่ระดับความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 84 และ 97% ตามลำดับ และการล้างด้วย EDTA ก่อน ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0.27 และ 0.54 มิลลิโมล และตามด้วย SDS ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 85% และ 97% ตามลำดับ

นริศรา เนียมฤทธิ์ (2549) ได้ศึกษาการล้างทองแดง เหล็ก แมงกานีส และตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้สารละลาย EDTA และสารละลายผสมระหว่าง EDTA และโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($Na_2S_2O_5$) จากการศึกษาพบว่า สารละลายที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะสูงที่สุดคือ สารละลาย 0.15 โมลของ EDTA และสารละลายผสมระหว่าง 0.10 โมลของ EDTA และ 0.25 โมลของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($Na_2S_2O_5$) ส่วนอัตราส่วนที่เหมาะสมในการล้างดินคือ 1 กรัม ต่อสารละลาย 30 มิลลิลิตร และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการล้างโลหะหนักด้วย EDTA และสารละลายผสมพบว่า สารละลายผสมมีประสิทธิภาพในการล้างโลหะหนักได้ดีกว่าสารละลาย EDTA เพียงชนิดเดียว

Zhang et al. (2008) ได้ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วในดินปนเปื้อนโดยวิธีการล้างดินด้วยสารคีเลตที่ใช้คือ EDTA ที่ระดับความเข้มข้นระหว่าง EDTA ต่อ ตะกั่ว เท่ากับ 1:1 และ 2:1 และใช้สารลดแรงตึงผิวคือ SDS ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5,000 และ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้มีการใช้ EDTA ก่อนแล้วตามด้วย SDS ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่อ ตะกั่ว เท่ากับ 1:1 และ 2:1 และใช้ SDS ที่ระดับความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลจากการศึกษาพบว่า การล้างดินด้วย EDTA ที่ระดับความเข้มข้นระหว่าง EDTA ต่อ ตะกั่ว เท่ากับ 1:1 และ 2:1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 78 และ 94% ตามลำดับ สำหรับ SDS ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5,000 และ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 23 และ 30% ตามลำดับ ในขณะที่การล้างด้วย EDTA ที่ระดับความเข้มข้นระหว่าง EDTA ต่อ ตะกั่ว เท่ากับ 1:1 และ 2:1 ก่อนและตามด้วย SDS ที่ระดับความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 89.2 และ 98.7% ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1) กระดาษกรอง ยี่ห้อ whatman เบอร์ 40

2) น้ำปราศจากไอออน (distilled water; DI)

3) ขวดพลาสติกสำหรับใส่สารละลายขนาด 60 มิลลิลิตร และขนาด 120 มิลลิลิตร

4) พาราฟิล์ม (parafilm)

5) เครื่องแก้วชนิดต่างๆ เช่น บีกเกอร์ กระบอกตวง ปิเปต แท่งแก้ว กรวยกรอง ขวดปรับปริมาตร กระจกนาฬิกา ขวดรูปชมพู่

6) อุปกรณ์สำหรับการเตรียมตัวอย่างดิน เช่น ครกบดดิน ตระแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร

7) กระดาษฟรอยด์

8) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น Seven Easy pH ยี่ห้อ Mattler Toleda

9) เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด (analytical balance) รุ่น BP 221S ยี่ห้อ Sartorius

10) เครื่องอบอุณหภูมิสูง (hot air oven) รุ่น ULE500 ยี่ห้อ MEMMERT

11) เครื่องดูดอากาศ (hood) รุ่น Wiwatsan

12) เครื่องเขย่า (shaker) รุ่น OS-2 ยี่ห้อ Green Seriker2

13) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยไมโครเวฟ (microwave digestion) รุ่น ETHO SEL ยี่ห้อ MILSTONE

14) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชั่นสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (atomic absorption spectrophotometer) รุ่น Analis 800 ยี่ห้อ Perkin Elmer

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1) กรดไนตริกเข้มข้น (65% HNO_3) บริษัท MERCK ประเทศ Germany

2) กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (37% HCI) บริษัท MERCK ประเทศ Germany

3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริษัท MERCK ประเทศ Germany

4) ซัลฟูริก (H_2SO_4) บริษัท MERCK ประเทศ Germany

5) EDTA (ethylene diamine tetraacetic Acid) บริษัท Ajax Finechem ประเทศ Australia

6) TWEEN 80 (polysorbate 80) บริษัท RANKEM ประเทศ อินเดีย

3.3 การเตรียมดิน

3.3.1 การทดลองในครั้งนี้ใช้ดินที่ปนเปื้อนตะกั่วและโครเมียมสังเคราะห์ซึ่งเคยทำการทดลองปลูกสับปะรดเป็นตัวชี้วัดความเป็นพิษ โดยดินดังกล่าวปนเปื้อนโลหะหนักเป็นเวลา 1 ปี การทดลองเริ่มจากการนำดินส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น ซึ่งพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความชื้น (Moisture Content) เนื้อดิน (Soil Texture) อินทรียวัตถุ (Organic matter) ค่าประจุการนำไฟฟ้า (CEC) ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (TPb) ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (TCr) โดยคุณสมบัติทางกายภาพที่ศึกษา และวิธีวิเคราะห์ดิน ดังตารางที่ 3.1

3.3.2 นำดินที่เหลือคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำไปผึ่งไว้ในที่ร่มที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร คลุกเคล้าให้เข้ากันใส่ถุงซิป

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพที่ศึกษา และวิธีวิเคราะห์ดิน

คุณสมบัติ	หน่วย	วิธีการวิเคราะห์
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	-	Electrometric method
ดินเหนียว	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	Hydrometer method
ดินทรายแป้ง	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	Hydrometer method
ดินทราย	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	Hydrometer method
เนื้อดิน (Soil texture)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	Hydrometer method
อินทรียวัตถุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	Walkley-Black method
การแลกเปลี่ยนประจุ	เซ็นติโมลต่อกิโลกรัม	NH_4^+ saturation and distillation
ไนโตรเจนทั้งหมด	เปอร์เซ็นต์	Kjeldahl digestion
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Bay II method
โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Am.acetate 1N pH 7.0 extraction
โครเมียม และตะกั่วทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	USEPA method 3052

3.4 การเตรียมสารละลาย

สารละลาย EDTA และ TWEEN 80 ความเข้มข้น 3 ระดับ ได้แก่ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน หรือคิดเป็นระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 3,000, 6,000 และ 12,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ppm) และสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 10,480, 20,960 และ 41,920 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (ppm)

3.5 การดำเนินการทดลอง

วิธีการทดลองมีดังต่อไปนี้

3.5.1 การล้างดินด้วย EDTA

1) ชั่งดินตัวอย่างจำนวน 20 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flash) ขนาด 500 มิลลิลิตร

2) เตรียมสารละลาย EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ละลายในน้ำ 200 มิลลิลิตร โดยแยกชุดการทดลองกัน (ดังภาคผนวก ก)

3) ใส่สารละลาย EDTA ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุดินตัวอย่าง ปรับ pH ของสารละลายให้เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 ด้วยกรดไนตริก (HNO_3) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปิดฝาขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร

4) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (shaker) โดยใช้อัตราเร็วการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 รอบต่อนาทีอย่างต่อเนื่อง

5) ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 15, 30, 60, 90, 120, 180 นาที และทุกๆ 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับตัวอย่างดินนั้น ทำการเก็บที่ระดับความเข้มเข้ม pH อัตราเร็วของการเขย่า และเวลาที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงที่สุด และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์

3.5.2 การล้างดินด้วย TWEEN 80

1) ชั่งดินตัวอย่างจำนวน 20 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flash) ขนาด 500 มิลลิลิตร

2) เตรียมสารละลาย TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ละลายในน้ำ 200 มิลลิลิตร โดยแยกชุดการทดลองกัน

3) ใส่สารละลาย TWEEN 80 ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุดินตัวอย่าง ปรับ pH ของสารละลายให้เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 ด้วยกรดไนตริก (HNO_3) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปิดฝาขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร

4) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (shaker) โดยใช้อัตราเร็วการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 รอบต่อนาทีอย่างต่อเนื่อง

5) ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 15, 30, 60, 90, 120, 180 นาที และทุกๆ 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับตัวอย่างดินนั้น ทำการเก็บที่ระดับความเข้มเข้ม pH อัตราเร็วของการเขย่า และเวลาที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงที่สุด และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์

3.5.3 การล้างดินด้วยสารละลายผสมระหว่าง EDTA และ TWEEN 80

1) ชั่งดินตัวอย่างจำนวน 20 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flash) ขนาด 500 มิลลิลิตร

2) เตรียมสารละลายผสมระหว่าง EDTA และ TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการล้างดินด้วย EDTA และ TWEEN 80 ที่ระดับต่างๆ ละลายในน้ำ 200 มิลลิลิตร

3) ใส่สารละลายลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุดินตัวอย่าง ปรับ pH ของสารละลายให้เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 ด้วยกรดไนตริก (HNO_3) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปิดฝาขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร

4) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (shaker) โดยใช้อัตราเร็วการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 รอบต่อนาทีอย่างต่อเนื่อง

5) ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลา 15, 30, 60, 90, 120, 180 นาที และทุกๆ 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับตัวอย่างดินนั้น ทำการเก็บที่ระดับความเข้มเข้ม pH อัตราเร็วของการเขย่า และเวลาที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงที่สุด และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์

3.5.4 การล้างดินด้วย EDTA ก่อน แล้วตามด้วย TWEEN 80 และการล้างดินด้วย TWEEN 80 ก่อน แล้วตามด้วย EDTA

1) ชั่งดินตัวอย่างจำนวน 20 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flash) ขนาด 500 มิลลิลิตร

2) เตรียมสารละลาย EDTA และ TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการล้างดินด้วย EDTA และ TWEEN 80 ที่ระดับต่างๆ ละลายในน้ำ 200 มิลลิลิตร

3) ใส่สารละลายลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุดินตัวอย่าง ปรับ pH ของสารละลายที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการล้างดินด้วย EDTA และ TWEEN 80 ที่ระดับต่างๆ ด้วยกรดไนตริก (HNO_3) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปิดฝาขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร

4) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (shaker) โดยใช้อัตราเร็วรอบของการเขย่าที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการล้างดินด้วย EDTA และ TWEEN 80 ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าต่างๆ

5) ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการล้างดินด้วย EDTA และ TWEEN 80 ที่ระดับต่างๆ สำหรับตัวอย่างดินนั้น ทำการเก็บเฉพาะที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงที่สุด และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์

3.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและดิน

1) การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วทั้งหมด และโครเมียมทั้งหมดในตัวอย่างน้ำ ใช้วิธีการของ USEPA method 3051A (USEPA, 1998) โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำหลังทำการเขย่าที่เวลา 15, 30, 60, 90, 120, 180 นาที และทุกๆ 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วทั้งหมด และโครเมียมทั้งหมดในตัวอย่างดินนั้นใช้วิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996) นำตัวอย่างมาย่อยด้วยกรด (acid digestion) โดยใช้เครื่องไมโครเวฟ (microwave digestion) และตรวจวัดหาปริมาณโครเมียม และตะกั่วทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอร์ปชั่นเสปกโตรมิเตอร์ (atomic absorption spectrometer; AAS)

2) การวิเคราะห์หาสมดุลมวลสาร (mass balance) ของตะกั่ว และโครเมียมในชุดการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงที่สุดเท่านั้น โดยปริมาณตะกั่วทั้งหมด และโครเมียมทั้งหมดในดินก่อนทำการทดลองเท่ากับ ผลรวมของปริมาณตะกั่วทั้งหมด และโครเมียมทั้งหมดในดินกับปริมาณตะกั่วทั้งหมด และโครเมียมทั้งหมดในน้ำชะล้างหลังการทดลอง

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณโลหะหนักจากการทดลองล้างดิน โดยใช้ ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's New Multiple Rang Test (DMRT) ทั้งนี้ การวิเคราะห์ทางสถิติดังกล่าวนั้น จะปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติคือ Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการทดลองล้างดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว และโครเมียม โดยใช้สารคีเลตคือ EDTA และสารลดแรงตึงผิวคือ TWEEN 80 ในการล้าง โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ ระดับความเข้มข้นของสารคีเลต และสารลดแรงตึงผิว ค่าความเป็นกรด-ด่าง อัตราเร็วรอบของการเขย่า และเวลาในการล้างดินเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งการรายงานผล และวิจารณ์ผลการวิจัยในครั้งนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ 4 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 การล้างดินด้วย EDTA

ส่วนที่ 2 การล้างดินด้วย TWEEN 80

ส่วนที่ 3 การล้างดินด้วยสารละลายผสมระหว่าง EDTA และ TWEEN 80

ส่วนที่ 4 การล้างดินด้วย EDTA ก่อนแล้วตามด้วย TWEEN 80 และการล้างดินด้วย TWEEN 80 ก่อนแล้วตามด้วย EDTA

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินทดลอง

การทดลองในครั้งนี้ ใช้ดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว และโครเมียมสังเคราะห์ ซึ่งเคยทำการทดลองปลูกสับปะรดเป็นตัวชี้วัดความเป็นพิษ โดยดินดังกล่าวปนเปื้อนโลหะหนักเป็นเวลา 2 ปี ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย มีอัตราส่วนของ Sand: Silt: Clay เท่ากับ 65.20: 9.20: 28.60 ซึ่งดินที่มีปริมาณทรายมากสามารถล้างดินได้ดี (USEPA, 1993) โดยดินมีค่า pH เท่ากับ 3.57 ซึ่งถือได้ว่าเป็นดินที่มีความเป็นกรดรุนแรงมาก (Extremely acid) (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) สำหรับความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีค่าเท่ากับ 3.3 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ($cmol_{(c)}kg^{-1}$) ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.37 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร (dS/m) ปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่าเท่ากับ 0.6 เปอร์เซนต์ ซึ่งจัดได้ว่าดินมีปริมาณอินทรียวัตถุน้อย เพราะโดยปกติดินที่ดีควรมีอินทรียวัตถุมากกว่า 1.5 เปอร์เซนต์ (ยงยุทธ โอสถสภา, 2543) ส่วนปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในดินที่ใช้ในการทดลองมีค่า 1,238±173 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดินมีค่า 466.4±70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งเกินกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และเกษตรกรรมอยู่มาก

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพ และเคมีของดินทดลอง

สมบัติของดิน	ค่าที่วิเคราะห์
ดินเหนียว (%, w/w)	28.6
ดินทรายแป้ง (%, w/w)	9.2
ดินทราย (%, w/w)	65.2
ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)	3.57
เนื้อดิน (Soil Texture)	ร่วนเหนียวปนทราย
ค่าการนำไฟฟ้าที่ 25 °C (dS m^{-1})	0.37
อินทรียวัตถุ (%)	0.6
การแลกเปลี่ยนประจุ (c mol(c) kg^{-1})	3.3
ไนโตรเจน (%)	0.03
โพแทสเซียม (mg/kg)	564
ฟอสฟอรัส (mg/kg)	8
ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (mg/kg)	1,238±173
ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (mg/kg)	466.4±70

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ผลการล้างดินด้วย EDTA

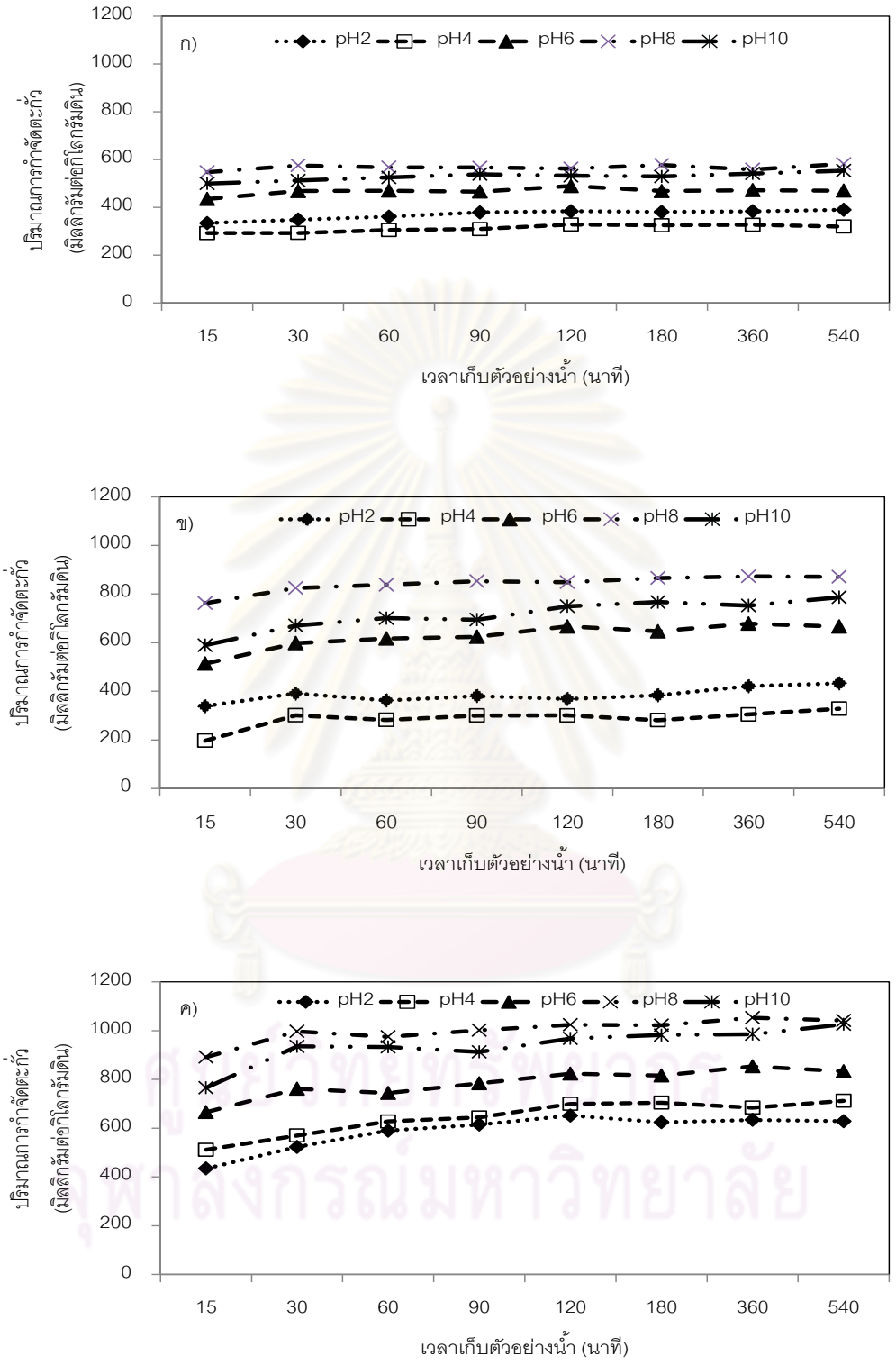
ระดับความเข้มข้นของ EDTA ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ปรับ pH เป็น 2, 4, 6, 8 และ 10 จากนั้นนำไปเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 15, 30, 60, 90, 120, 180, 360 และ 540 นาที

4.2.1 ผลการศึกษา pH ต่อการล้างดิน

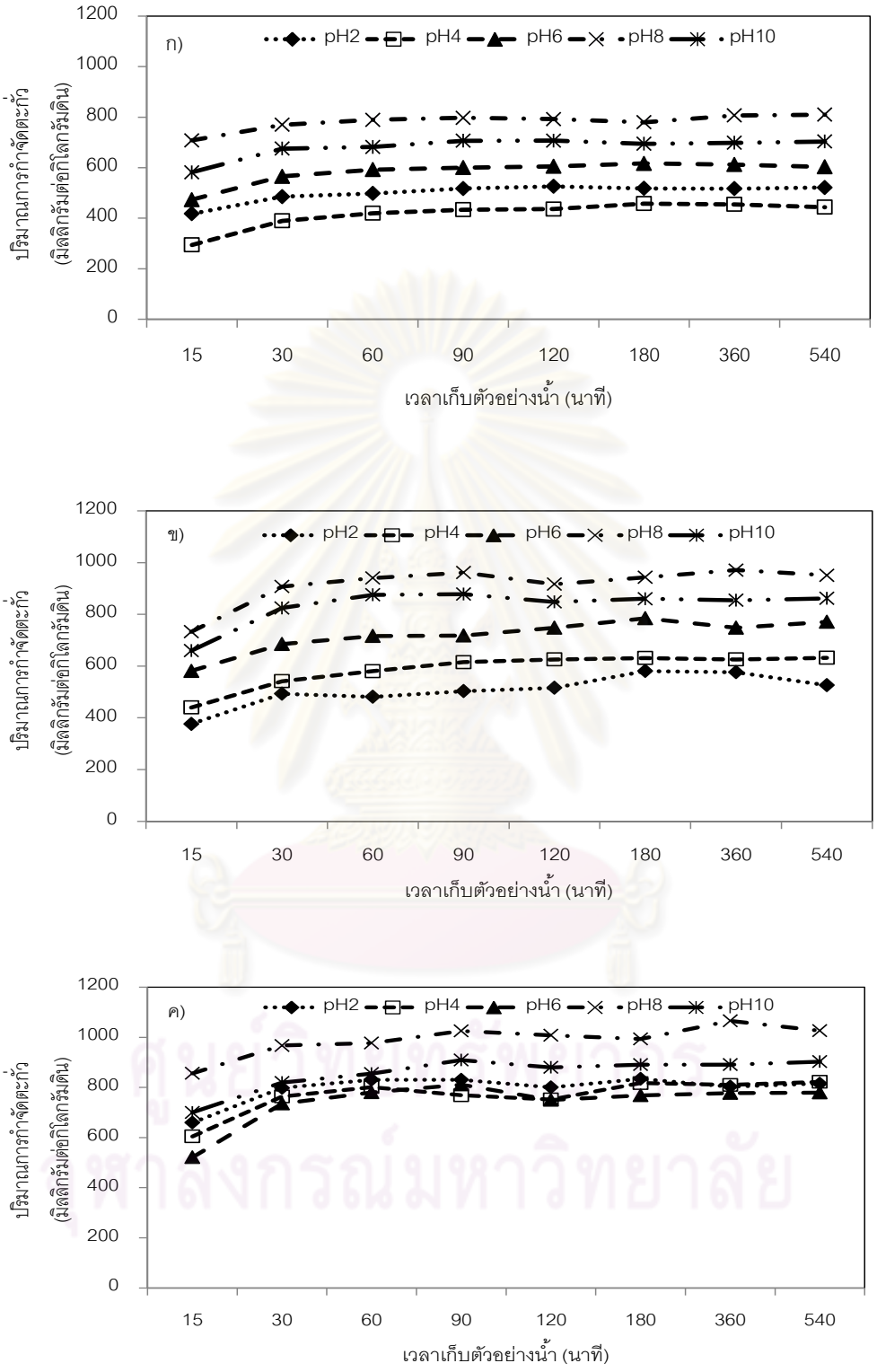
จากการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 15, 30, 60, 90, 120, 180, 360 และ 540 นาที แสดงให้เห็นว่า ที่ทุกระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ทุกค่าของ pH ทุกอัตราเร็วรอบของการเขย่าพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น สามารถกำจัดตะกั่ว และโครเมียมได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเวลาในการสมดุลสารในการกำจัดโลหะหนักคือ 30 นาที ซึ่งสามารถกำจัดตะกั่ว และโครเมียมได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ดังรูปที่ 4.1 - 4.6 ดังนั้นการรายงานผลการทดลองในครั้งนี้จึงนำเสนอเฉพาะที่เวลา 30 นาทีเท่านั้น ซึ่งเป็นเวลาสมดุลสารในการกำจัดโลหะหนัก จากการศึกษา pH ที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่ว พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm โดย EDTA สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่ pH 8 ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.7ก โดย EDTA สามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 46.52%, 62.16% และ 61.25% หรือคิดเป็น 575.92, 769.54 และ 758.28 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับรอบของการเขย่า ส่วนที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่ pH 8 ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.7ข ซึ่งสามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 66.62%, 73.26% และ 73.59% หรือคิดเป็น 824.76, 906.96 และ 911.04 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่ pH 8 ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.7ค โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 80.55%, 78.13% และ 78.37% หรือคิดเป็น 997.23, 967.25 และ 970.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ระดับของ pH 8 สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด หรือสามารถกล่าวได้ว่าที่ pH 6, 8 และ 10 สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าที่ pH 2 และ 4 ในทุกระดับความเข้มข้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang *et al*. (2006) ที่ทำการศึกษา การล้างดินปนเปื้อนตะกั่ว และ

สังกะสี พบว่า การล้างดินด้วย EDTA ที่ pH 6-9 สามารถกำจัดตะกั่วได้ดี เนื่องจาก EDTA สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับตะกั่ว (Pb-EDTA) ที่มีความเสถียรมากที่สุด ซึ่งความเสถียรของ EDTA สามารถเปลี่ยนแปลงได้น้อยมากในช่วง pH กว้าง

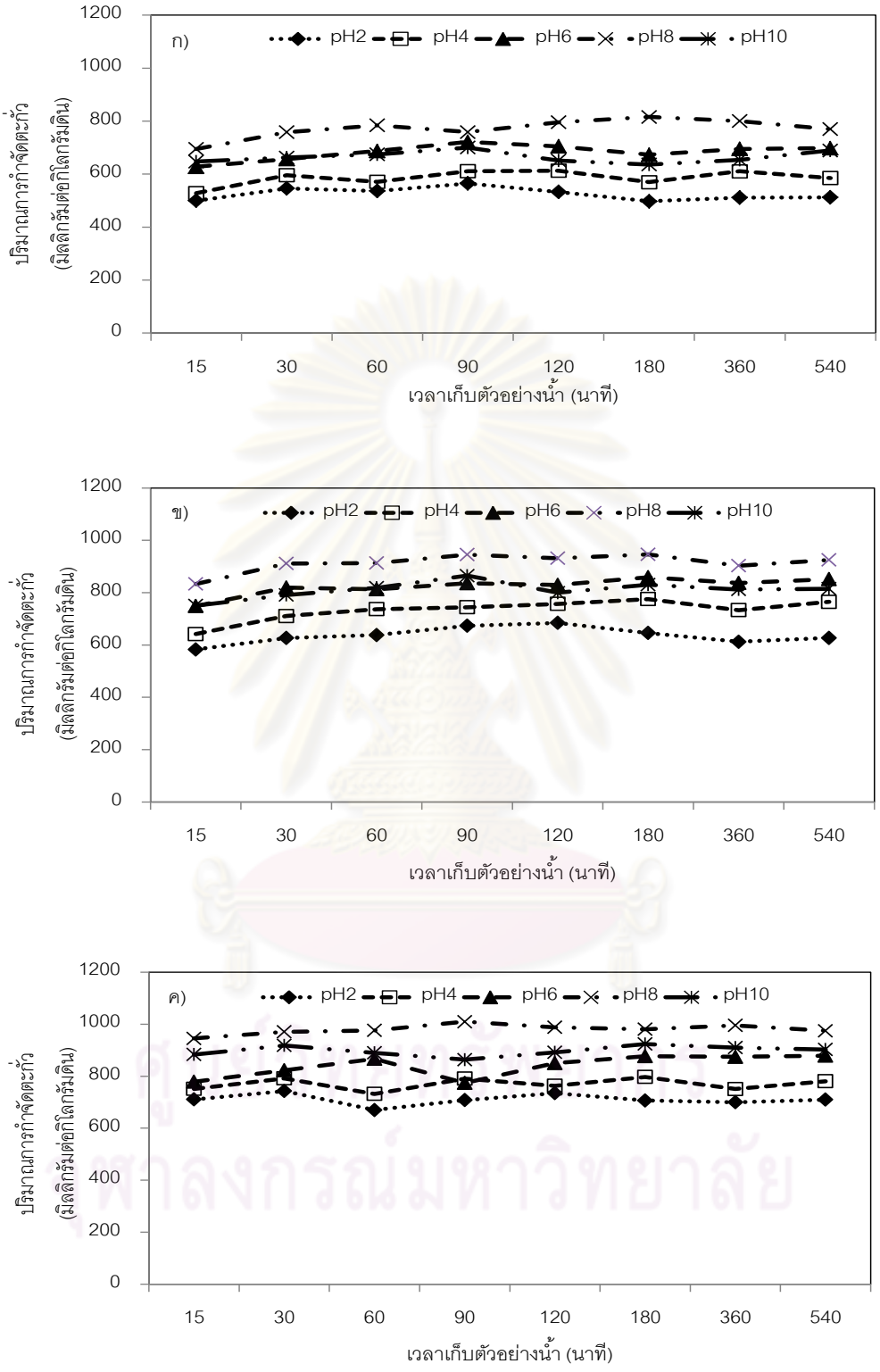
สำหรับการกำจัดโครเมียมด้วยการล้างดินนั้น จากการศึกษา pH ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียม พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 และ 150 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุดที่ pH 10 ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 12.77% และ 26.84% หรือคิดเป็น 59.56 และ 125.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับของรอบการเขย่า และที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่ pH 6 ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 11.21% หรือคิดเป็น 52.28 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังรูปที่ 4.8ก สำหรับที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุดที่ pH 10 ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.8ข โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 16.93%, 26.76% และ 35.57% หรือคิดเป็น 78.96, 124.81 และ 165.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุดที่ pH 10 เช่นกัน ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.8ค สามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 17.71%, 38.54% และ 35.8% หรือคิดเป็น 82.60, 179.75 และ 166.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า pH 10 สามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุด จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ไม่สอดคล้องกับการศึกษาของ Reddy *et. al.* (2004) ที่ทำการศึกษาปัจจัยของการใช้สาร EDTA ในการกำจัดโลหะหนักได้แก่ โครเมียม นิเกิล และแคดเมียม ในดินเหนียว (ดินเหนียว 90% และดินร่วน 10%) ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 และ 0.2 โมล พบว่าสามารถกำจัดโครเมียมได้ดีทุกระดับ pH ที่ทำการศึกษาคือ 2, 4.2-4.7, 5, 7 และ 10 โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้ 95±5% ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันทั้งนี้เนื่องจากดินที่ใช้ในการศึกษามีความต่างที่ และต่างๆ ชนิดกัน โดยดินที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นดินร่วนเหนียวปนทราย (ทราย 65.2% และดินเหนียว 28.6%) สำหรับการกำจัดนิเกิล และแคดเมียมพบว่า สามารถกำจัดได้ดีที่ pH ระหว่าง 2 ถึง 5 และที่ระดับความเข้มข้น 0.1 โมล สามารถกำจัดนิเกิลได้ดีกว่าที่ระดับความเข้มข้น 0.2 โมล



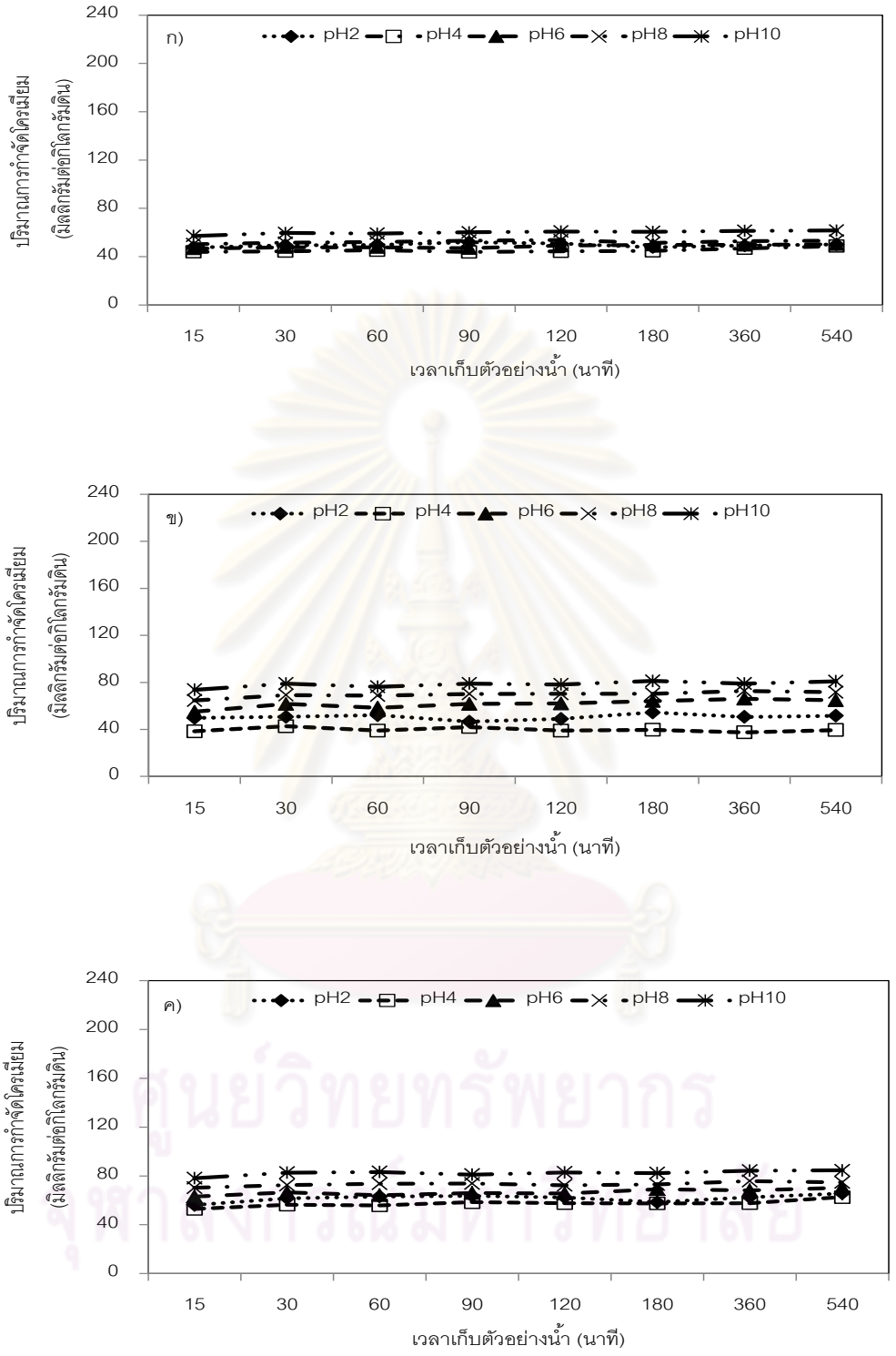
รูปที่ 4.1 แสดงเวลาในการสมดุลสารของตะกั่ว ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



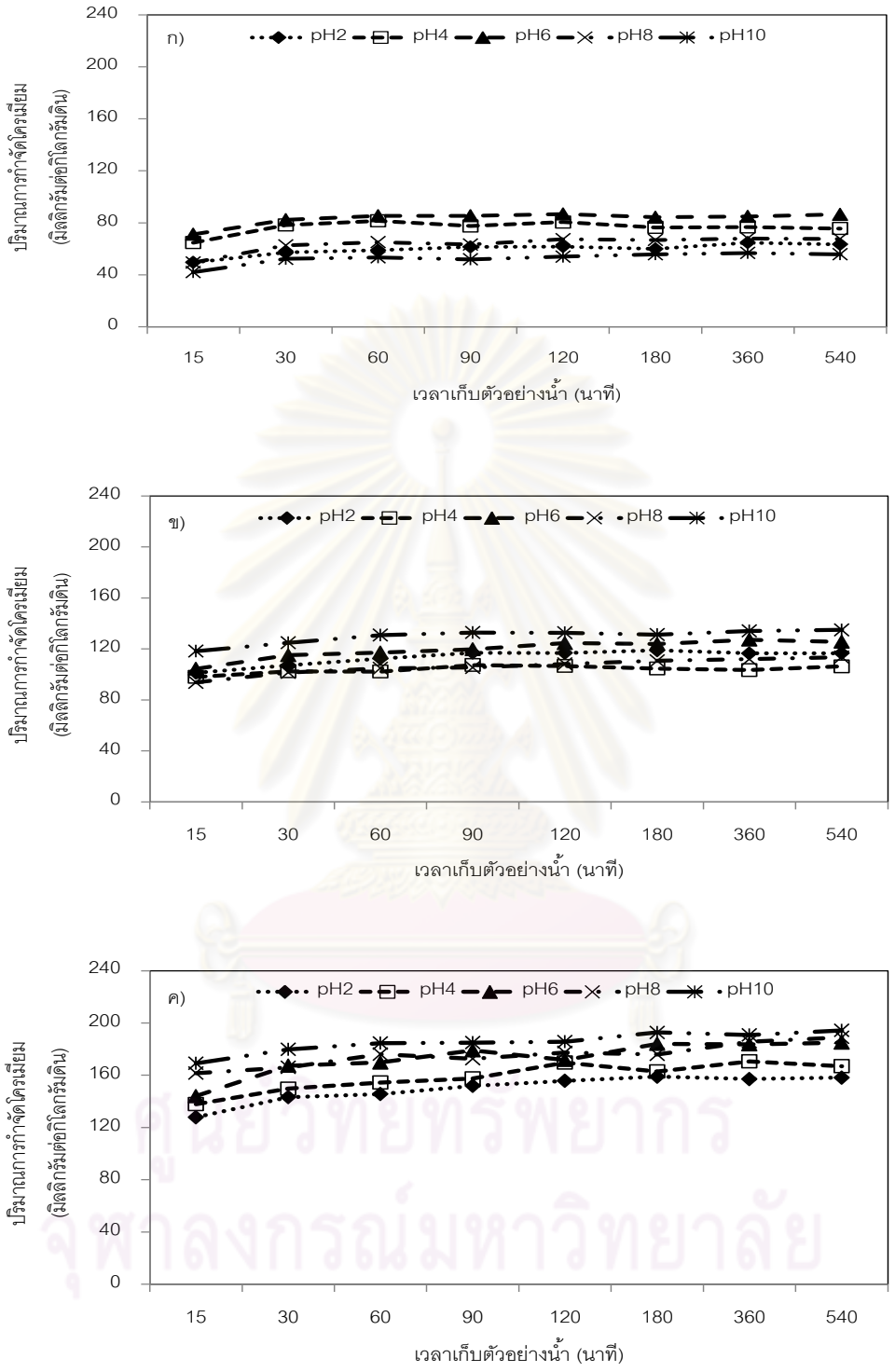
รูปที่ 4.2 แสดงเวลาในการสมดุลสารของตะกั่ว ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



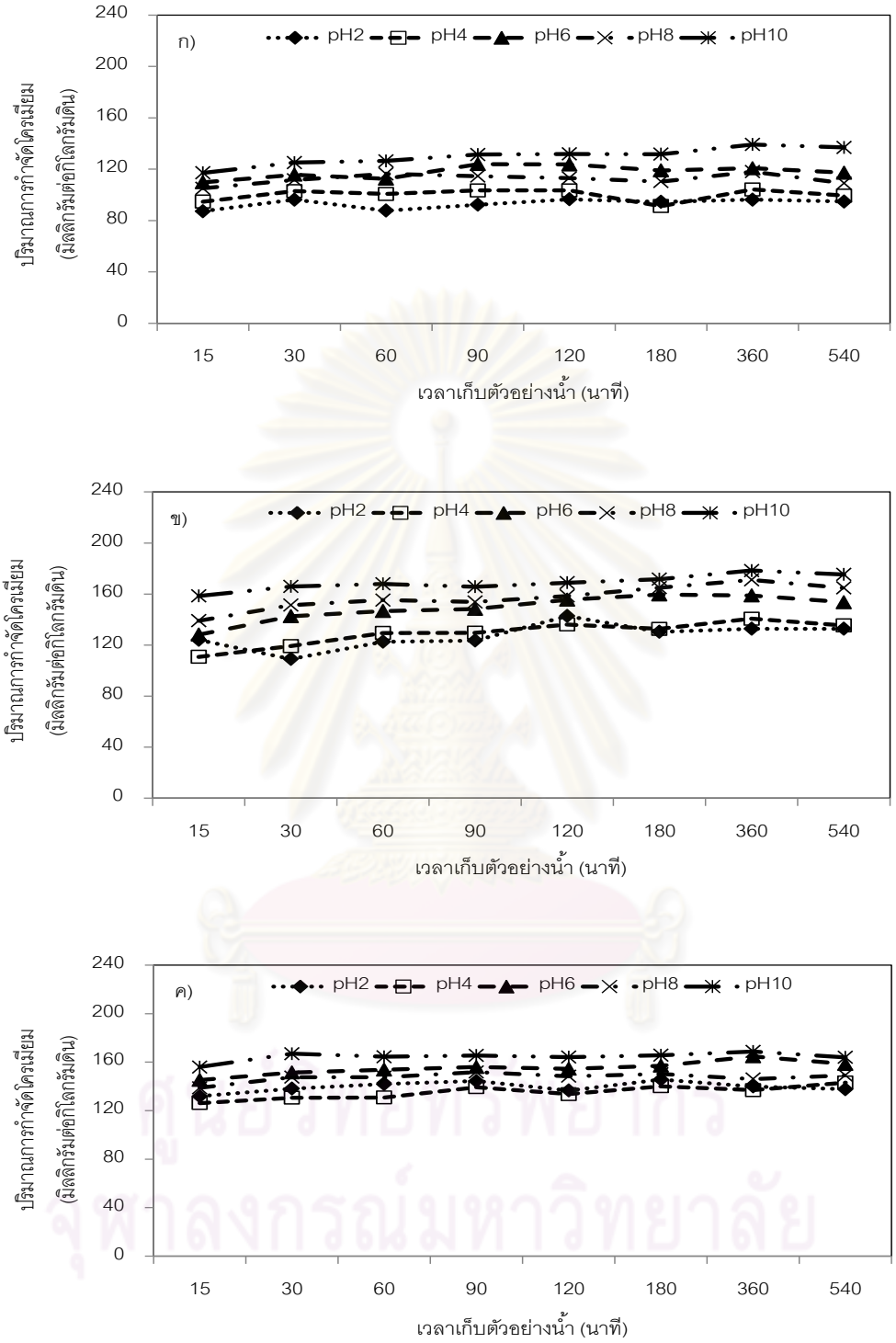
รูปที่ 4.3 แสดงเวลาในการสมดุลสารของตะกั่ว ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



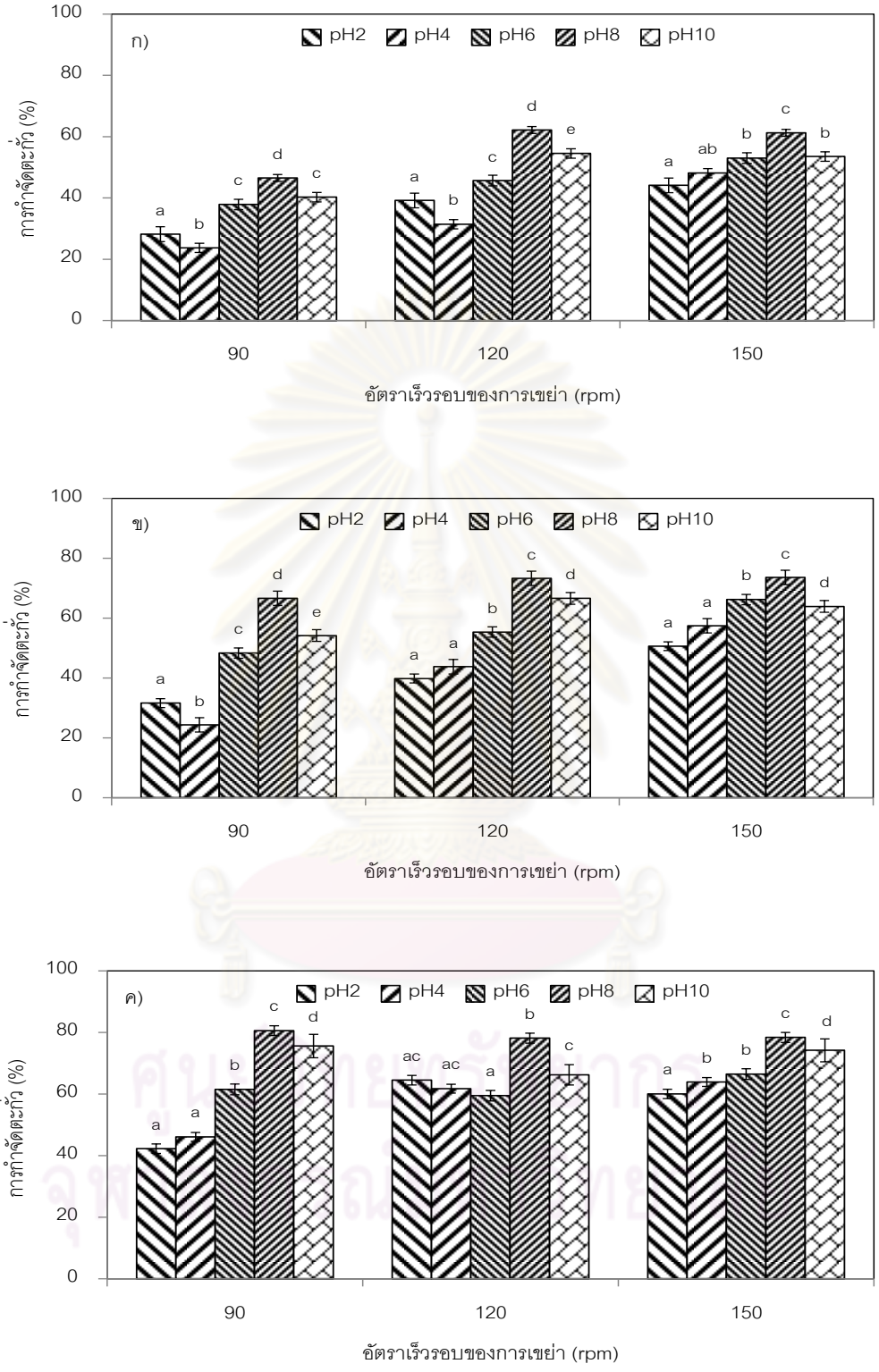
รูปที่ 4.4 แสดงเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



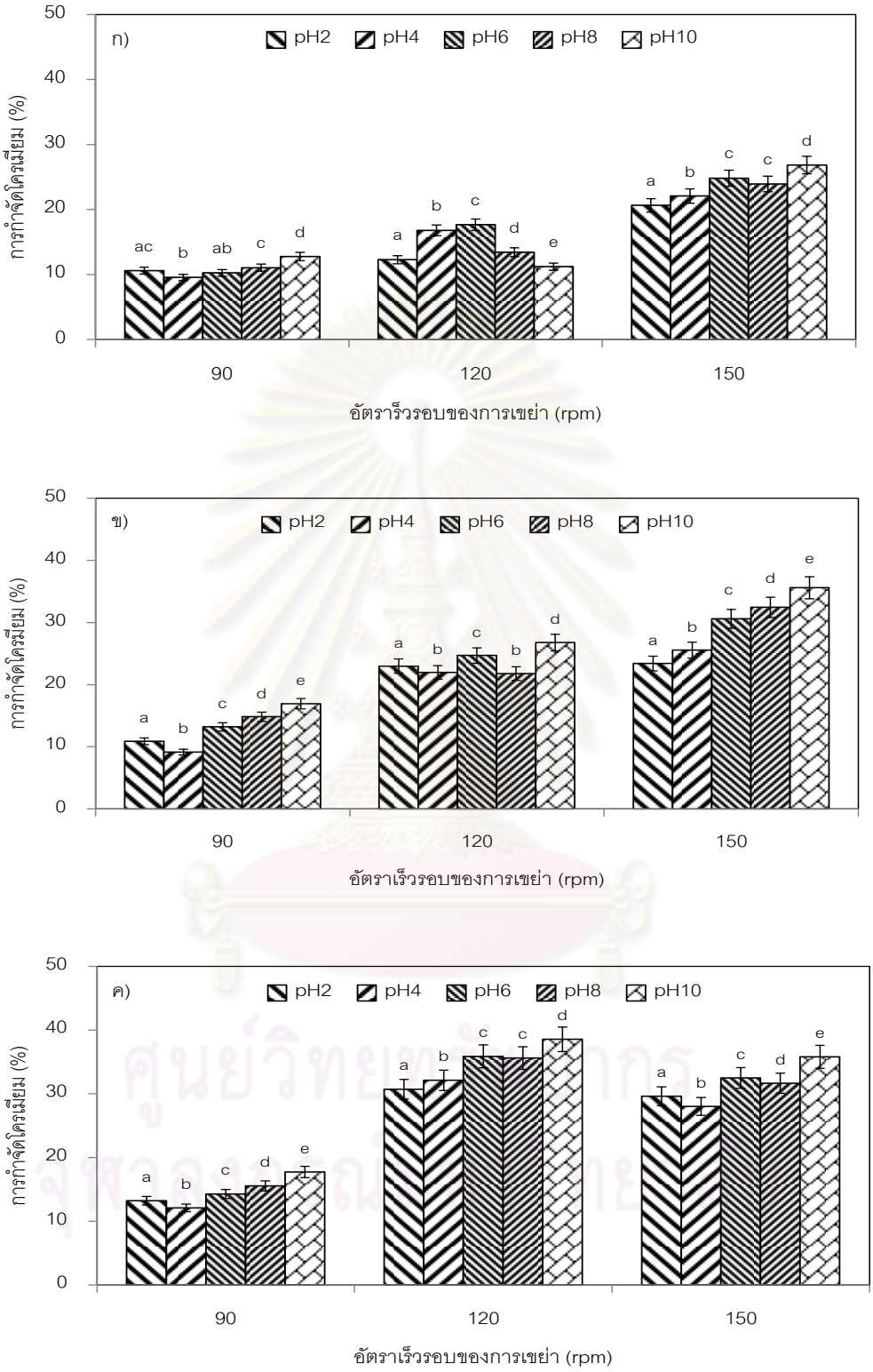
รูปที่ 4.5 แสดงเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



รูปที่ 4.6 แสดงเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



รูปที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วที่ pH และระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

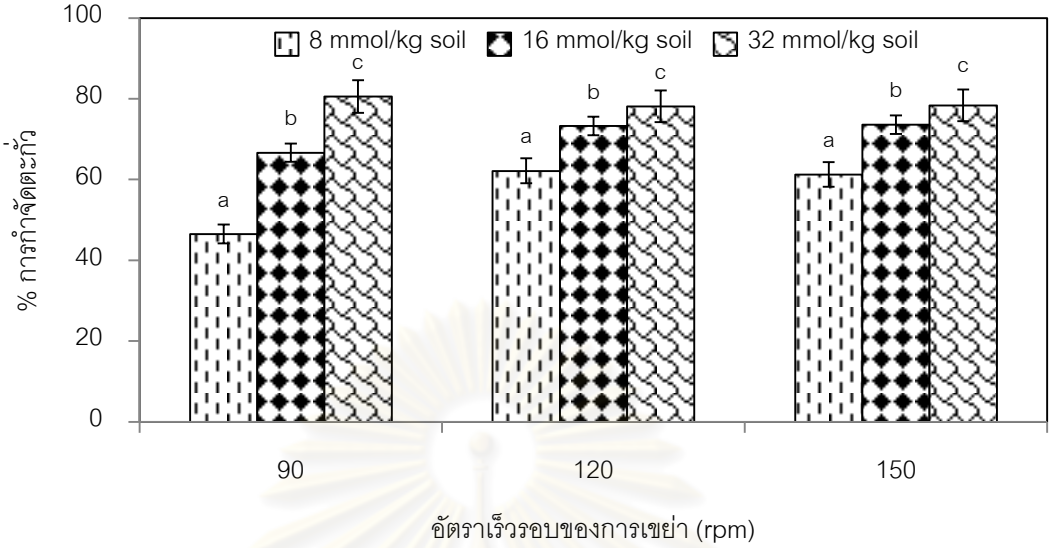


รูปที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียมที่ pH และระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

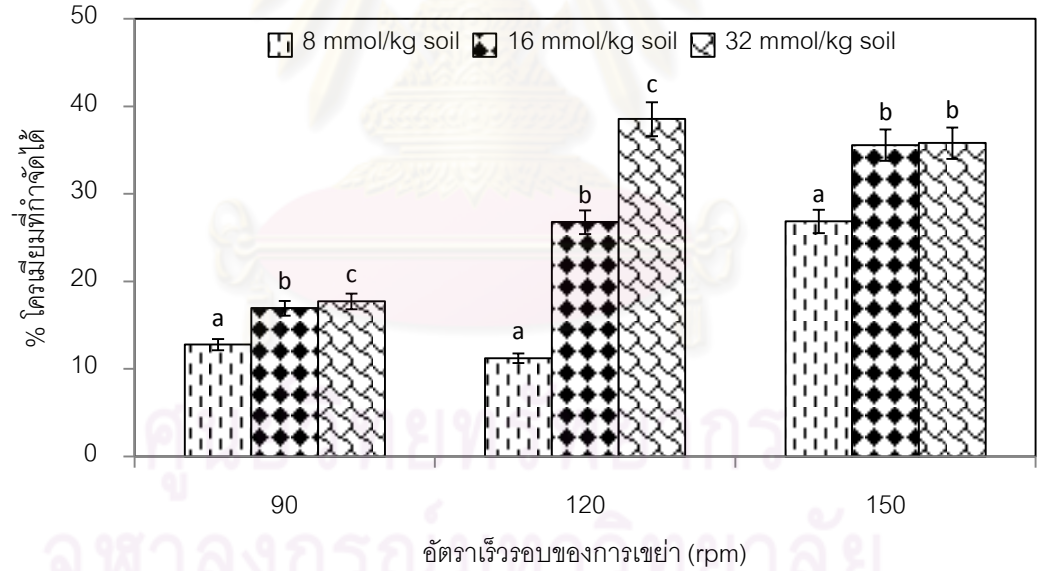
4.2.2 ผลการศึกษาระดับความเข้มข้นของ EDTA ต่อการล้างดิน

ผลการศึกษาระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ในการกำจัดตะกั่ว ที่ pH 8 ซึ่งเป็น pH ที่เหมาะสม และสามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด จากนั้นนำไปเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm เก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่สมดุลสารแล้ว พบว่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของ EDTA และเมื่อเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถกำจัดตะกั่วได้ 46.52%, 66.62% และ 80.55% หรือคิดเป็น 575.92, 824.76 และ 997.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งแตกต่างจากระดับความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สำหรับการเขย่าที่อัตราเร็วรอบเท่ากับ 120 rpm โดยมีระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถกำจัดตะกั่วได้ 62.16%, 73.26% และ 78.13% หรือคิดเป็น 769.54, 906.96 และ 967.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งสามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และมีความแตกต่างจากระดับความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm โดยที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถกำจัดตะกั่วได้ 61.25%, 73.59% และ 78.37% หรือคิดเป็น 758.28, 911.04 และ 970.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งสามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และมีความแตกต่างจากระดับความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วคือ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ทุกอัตราเร็วรอบของการเขย่า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Khodadoust *et al.* (2004) ที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.01, 0.05 และ 0.1 โมล ในการกำจัดตะกั่ว และสังกะสีที่ปนเปื้อนในดิน พบว่า ประสิทธิภาพของ EDTA เพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยสามารถกำจัดสังกะสีได้ประมาณ 12 – 14% และสามารถกำจัดตะกั่วได้ 15 – 45% นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Manochehri *et al.* (2006) ที่ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักมีพิษจากดินแคลคาเรียส (calcareous) โดยใช้สาร EDTA พบว่า เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของ EDTA จาก 0.0001 โมล เป็น 0.05 โมล สามารถกำจัดตะกั่วได้เพิ่มขึ้น โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้สูงสุดที่ระดับความเข้มข้น 0.05 โมล สามารถกำจัดได้ 45%

สำหรับผลการศึกษาระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ในการกำจัดโครเมียม ที่ pH 10 ซึ่งเป็น pH ที่เหมาะสม และสามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุด โดยได้นำตัวอย่างไปเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm เก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่สมดุลสารแล้ว พบว่า เมื่อเขย่าที่อัตราเร็วรอบเท่ากับ 90 และ 120 rpm เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของสาร EDTA มากขึ้น สามารถกำจัดโครเมียมได้เพิ่มขึ้น และเมื่อเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm โดยมีระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 12.77%, 16.93% และ 17.71% หรือคิดเป็น 59.56, 78.96 และ 82.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งแตกต่างจากระดับความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สำหรับอัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และที่ระดับความเข้มข้น 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 11.21%, 26.76% และ 38.54% หรือคิดเป็น 52.28, 124.81 และ 179.75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งแตกต่างจากระดับความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อเพิ่มอัตราเร็วรอบของการเขย่าเป็น 150 rpm ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถกำจัดโครเมียมได้ 26.84% หรือคิดเป็น 125.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งแตกต่างจากระดับความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นเป็น 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า สามารถกำจัดโครเมียมได้มากไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ซึ่งสามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 35.57% และ 35.80% หรือคิดเป็น 165.90 และ 166.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า ที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมคือ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ทุกอัตราเร็วรอบของการเขย่า ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang *et al*. (2010b) ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสาร EDTA และการเคลื่อนที่ของโครเมียมในดิน โดยการล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.0005, 0.001 และ 0.005 โมล จากการศึกษาพบว่า สามารถกำจัดโครเมียมได้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของ EDTA และสามารถกำจัดโครเมียมได้ไม่เกิน 11% นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Jean *et al*. (2007) ที่ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของโครเมียม และนิเกิล จากดินปนเปื้อนโดยใช้สารคีเลตคือ EDTA จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารคีเลต ทำให้สามารถกำจัดโครเมียม และนิเกิลได้เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.9 แสดงระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่ว ที่ pH 8 ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที

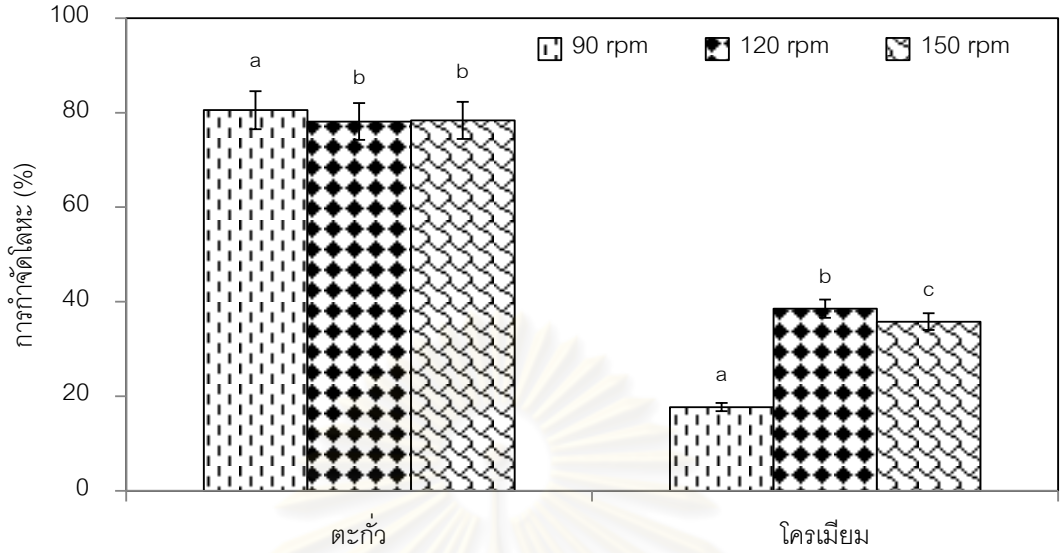


รูปที่ 4.10 แสดงระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียม ที่ pH 10 ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที

4.2.3 ผลการศึกษาอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการล้างดิน

ผลการศึกษาอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดตะกั่ว ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 8 โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 30 นาที พบว่า เมื่อเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 80.55% หรือคิดเป็น 997.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งแตกต่างจากอัตราเร็วรอบการเขย่าอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อเพิ่มอัตราเร็วรอบของการเขย่าเป็น 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 78.13% และ 78.37% หรือคิดเป็น 967.25 และ 970.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งสามารถกำจัดตะกั่วได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ดังรูปที่ 4.11 ดังนั้นจากการทดลองในครั้งนี้แสดงให้เห็นได้ว่า ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด และเมื่ออัตราเร็วรอบของการเขย่าเพิ่มขึ้นสามารถกำจัดตะกั่วได้น้อยลงเล็กน้อย จากการศึกษาในครั้งนี้ยังพบว่า มีความสอดคล้องกับ Khalkhaliant *el al*. (2006) ซึ่งศึกษาการกำจัดโลหะหนักในดินร่วนปนทราย โดยใช้สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0.005 และ 0.01 โมล พบว่า ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 180 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ 54.5 และ 77.8% ตามลำดับของความเข้มข้นของสาร EDTA แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 180 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้น้อยกว่าอัตราเร็วรอบของการเขย่าที่ทำการศึกษาในครั้งนี้

สำหรับผลการศึกษาอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดโครเมียม ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 30 นาที พบว่า เมื่อเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 17.71%, 38.54% และ 35.8% หรือคิดเป็น 82.60, 179.75 และ 166.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากอัตราเร็วรอบของการเขย่าอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.11 โดยสามารถสรุปได้ว่า ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด ซึ่งผลของการศึกษาอัตราเร็วการเขย่าในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Abumaizar *et al*. (1999) ที่ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินด้วยวิธีการล้างดิน โดยเขย่าที่อัตราเร็วของการเขย่าท่ากับ 175 rpm และอัตราส่วนระหว่างดินต่อสารละลายเท่ากับ 1:25 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 0.01 โมล สามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 19.9±4.1% และเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นเป็น 0.1 โมล สามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 35.1±1.4% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราเร็วรอบของการเขย่าสามารถกำจัดโครเมียมได้น้อยกว่าที่อัตราเร็วรอบที่ได้ทำการศึกษาในครั้งนี้คือ 120 และ 150 rpm



รูปที่ 4.11 แสดงอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดตะกั่ว ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 8 และอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดโครเมียม ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที

4.2.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว และโครเมียม ด้วยสาร EDTA

ผลการทดลองประสิทธิภาพการล้างดินปนเปื้อนตะกั่วพบว่า สามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 8 เขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm ณ เวลาของการเก็บตัวอย่างน้ำที่ 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่สมดุลสารแล้ว โดยประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเท่ากับ 80.55% แสดงให้เห็นว่า EDTA มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ดี เนื่องจากตะกั่วสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA ได้ดี ผลการศึกษาครั้งนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Hong and Jiang (2004) ที่ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่ว โดยใช้สารคีเลตคือ EDTA, TMDTA, NTMP และ GCG เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารคีเลตทุกชนิด พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของสารคีเลตเพิ่มขึ้น โดยสาร EDTA สามารถกำจัดตะกั่วได้มากกว่า 80% และมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วคือ EDTA > TMDTA > NTMP > GCG

สำหรับผลการทดลองประสิทธิภาพการล้างดินปนเปื้อนโครเมียมพบว่า สาร EDTA มีความสามารถในการกำจัดโครเมียมได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm ณ จุดสมดุลสารที่เวลา 30 นาที ซึ่ง

มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 38.54% แสดงให้เห็นว่า EDTA มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมได้น้อย เนื่องจากโครเมียมจะอยู่ในรูปประจุลบ ดังสมการ

$$2CrO_4^{2-} + 2H^+ \leftrightarrow 2HCrO_4^- \leftrightarrow Cr_2O_7^{2-} + H_2O$$

ทั้งนี้สาร EDTA สามารถอยู่ในรูปประจุลบได้เช่นกัน ทำให้โครเมียมไม่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA ได้ จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว และโครเมียมในการทดลองครั้งนี้ มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Lim *et al.* (2004) ที่ทำการศึกษาการใช้สารคีเลต และกรดไนตริกกำจัดโลหะหนักในดินปนเปื้อน พบว่า สาร EDTA ซึ่งเป็นสารคีเลตชนิดหนึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว และแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินที่เป็นกรดได้มากกว่าการใช้กรดไนตริก และยังพบว่า เวลาที่ใช้ในการเขย่าเพียง 15 นาที เมื่อล้างดินด้วยสารคีเลต สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมนั้น พบว่า สารคีเลตติงเอเจนต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้น้อยมาก ซึ่งการกำจัดโครเมียมต้องใช้ที่ระดับความเข้มข้นของสารคีเลตสูง

4.3 **ผลการล้างดินด้วย** TWEEN 80

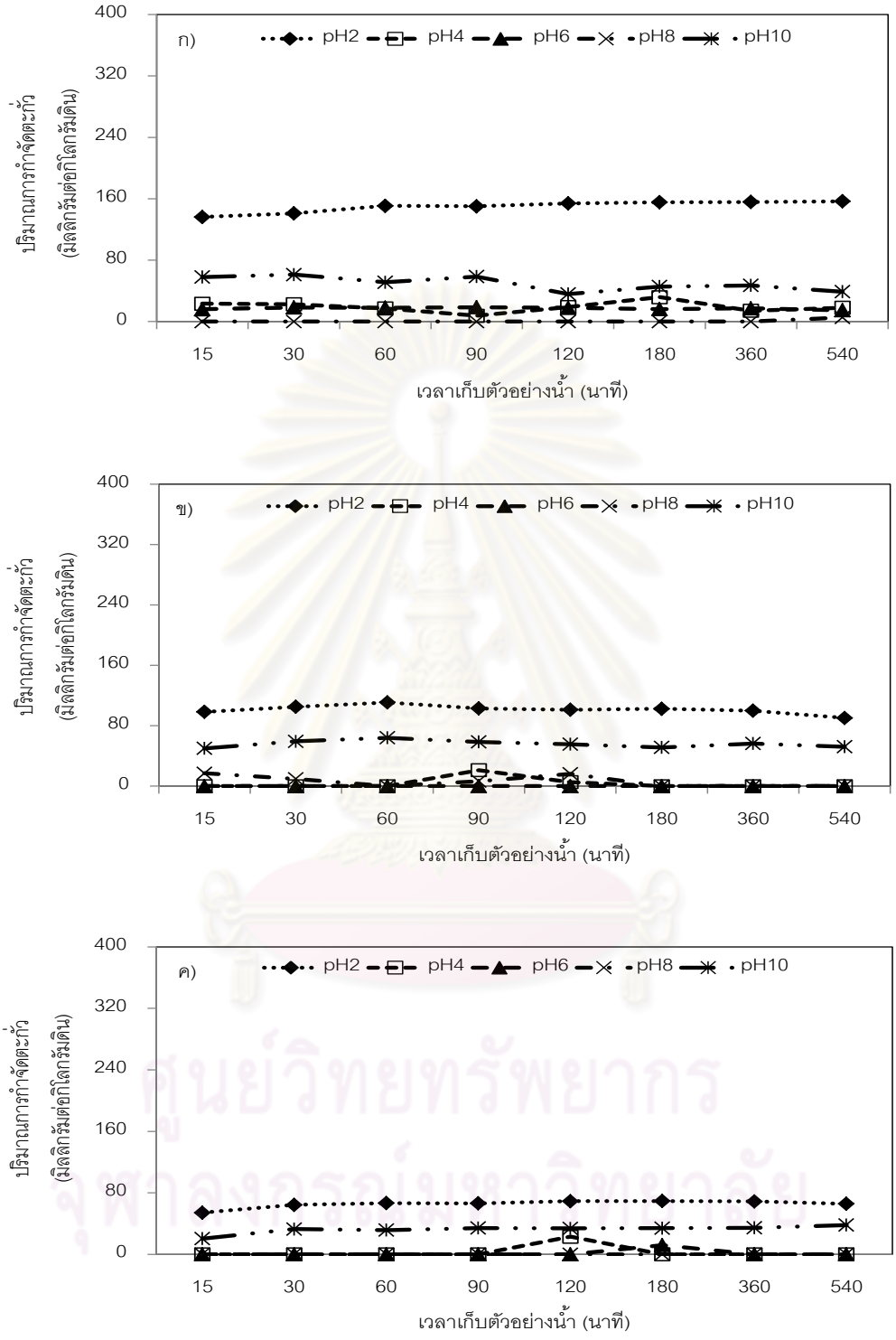
ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ปรับ pH เป็น 2, 4, 6, 8 และ 10 จากนั้นนำไปเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 15, 30, 60, 90, 120, 180, 360 และ 540 นาที

4.3.1 ผลการศึกษา pH ต่อการล้างดิน

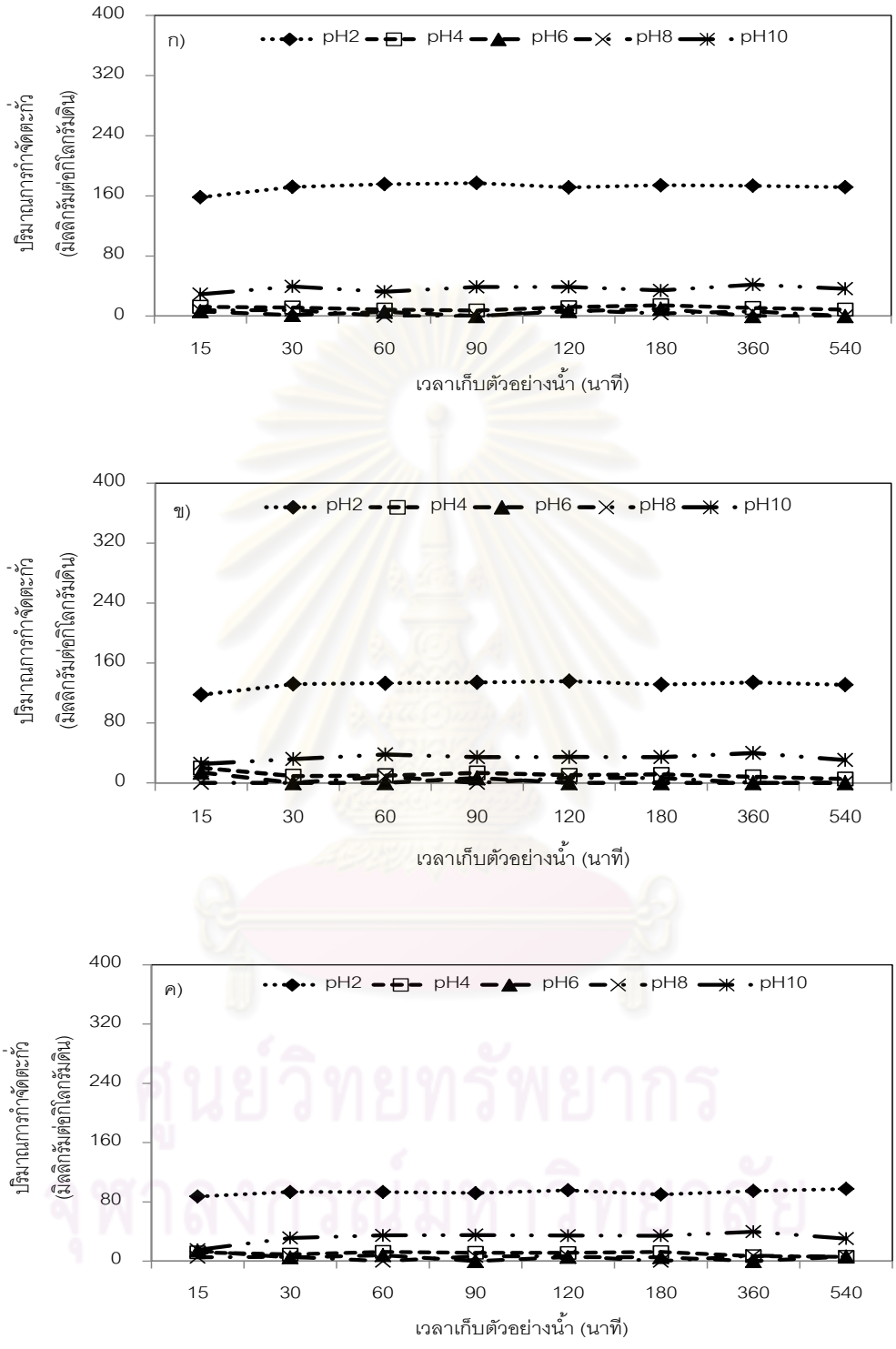
จากการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลาต่างๆ แสดงให้เห็นว่า ที่ทุกระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ค่าของ pH และอัตราเร็วรอบของการเขย่า เวลาในการสมดุลสารในการกำจัดตะกั่วและโครเมียมคือ 30 นาที แสดงดังรูปที่ 4.12 - 4.17 ดังนั้นการรายงานผลการทดลองครั้งนี้จึงเสนอที่เวลาดังกล่าวเท่านั้น จากการศึกษา pH ที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่ว พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เท่ากับ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เมื่อทำการเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm พบว่าที่ระดับ pH 2 สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.18ก ซึ่งสามารถกำจัดตะกั่วได้ 11.39%, 13.88% และ 19.53% หรือเท่ากับ 141.00, 171.83 และ 241.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

โดยนำไปเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่ pH 2 ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.18ข สามารถกำจัดตะกั่วได้ 8.48%, 10.64% และ 14.02% หรือคิดเป็น 104.98, 131.72 และ 173.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับอัตราเร็วรอบของการเขย่า และเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เป็น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm ที่ pH 2 สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดเช่นกัน และแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.18ค โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้ 5.2%, 7.55% และ 6.5% หรือ 64.38, 93.47 และ 80.47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า TWEEN 80 สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่ pH 2 สำหรับ pH อื่นๆ สามารถกำจัดตะกั่วได้น้อยมาก หรือไม่สามารถกำจัดตะกั่วได้เลย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารลดแรงตึงผิวที่เป็นกรดสามารถกำจัดโลหะหนักที่สร้างพันธะกับสารจำพวกคาร์บอเนตและออกไซด์ในดินได้ที่ pH ต่ำ (Dermont *et al*, 2007)

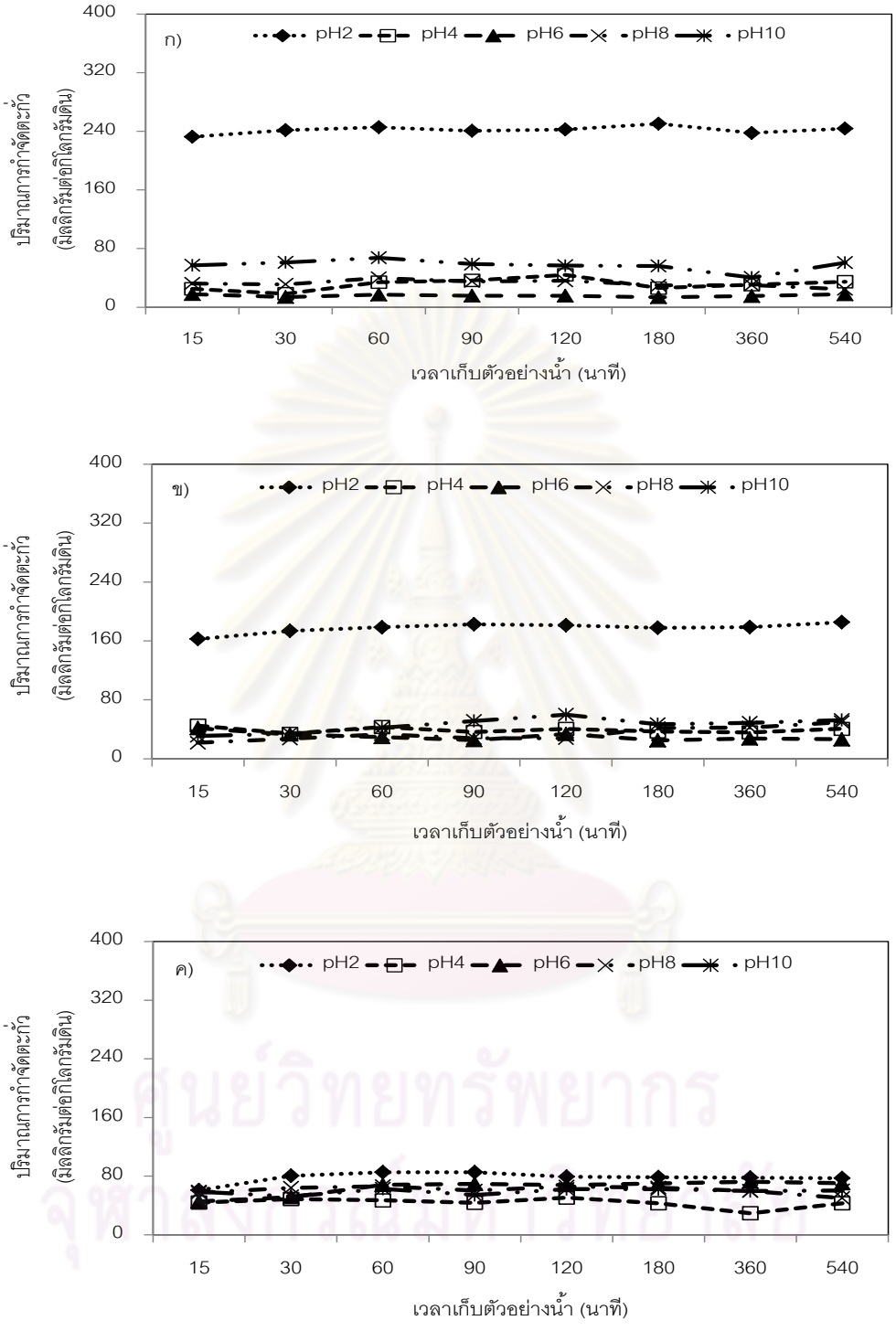
สำหรับการกำจัดโครเมียมด้วยการล้างดินนั้น จากการศึกษา pH ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการล้างดิน พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ที่ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่น้อยที่สุดที่ทำการทดลอง แล้วเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm ที่ระดับ pH 10 เป็นระดับ pH ที่สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.19ก โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้ 1.84%, 3.48% และ 9.67% หรือเท่ากับ 8.58, 16.23 และ 45.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับของอัตราการเขย่า สำหรับที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เท่ากับ 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm พบว่า pH ที่สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุดคือ pH 10 ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.19ข ซึ่งสามารถกำจัดโครเมียมได้ 5.98%, 4.31% และ 9.79% หรือคิดเป็น 27.89, 20.10 และ 45.66 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่มากที่สุดที่ได้ทำการทดลอง เขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm พบว่า สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุดที่ pH 10 เช่นกัน ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.19ค โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้ 7.79%, 5.69% และ 9.86% หรือเท่ากับ 36.33, 26.54 และ 45.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า pH 10 สามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุด



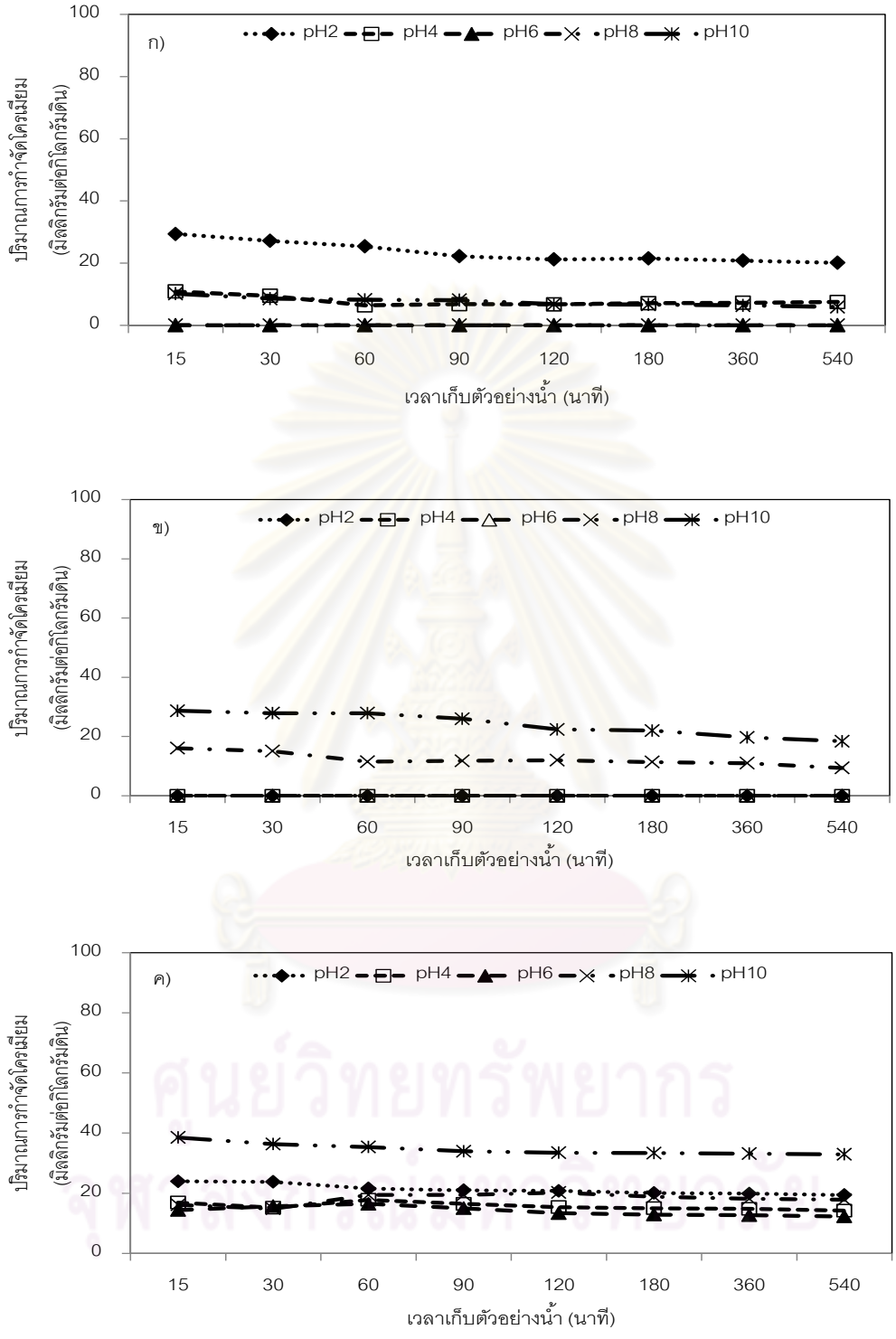
รูปที่ 4.12 แสดงเวลาในการสมดุลสารของตะกั่ว ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของTWEEN 80 ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



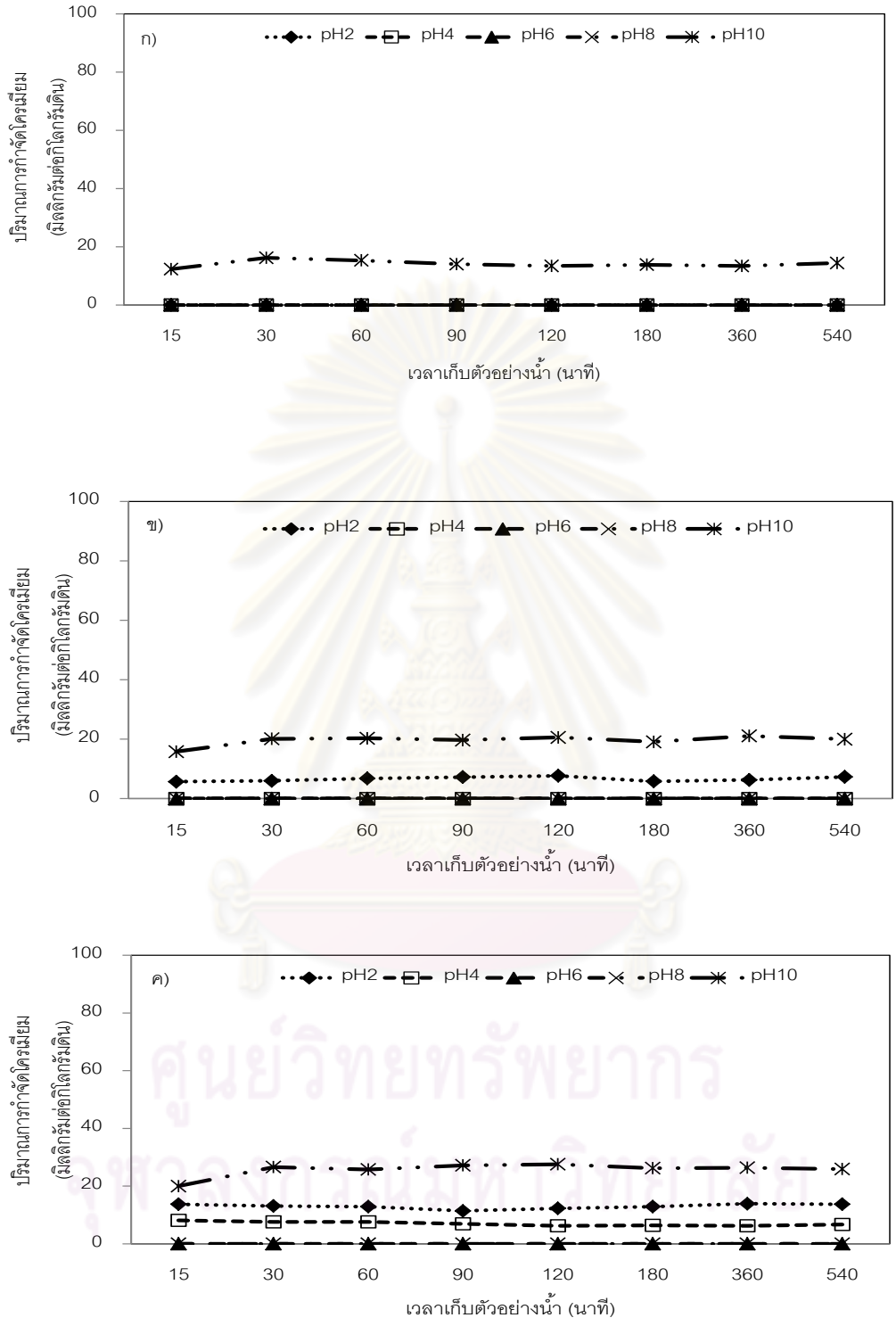
รูปที่ 4.13 แสดงเวลาในการสมดุลสารของตะกั่ว ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



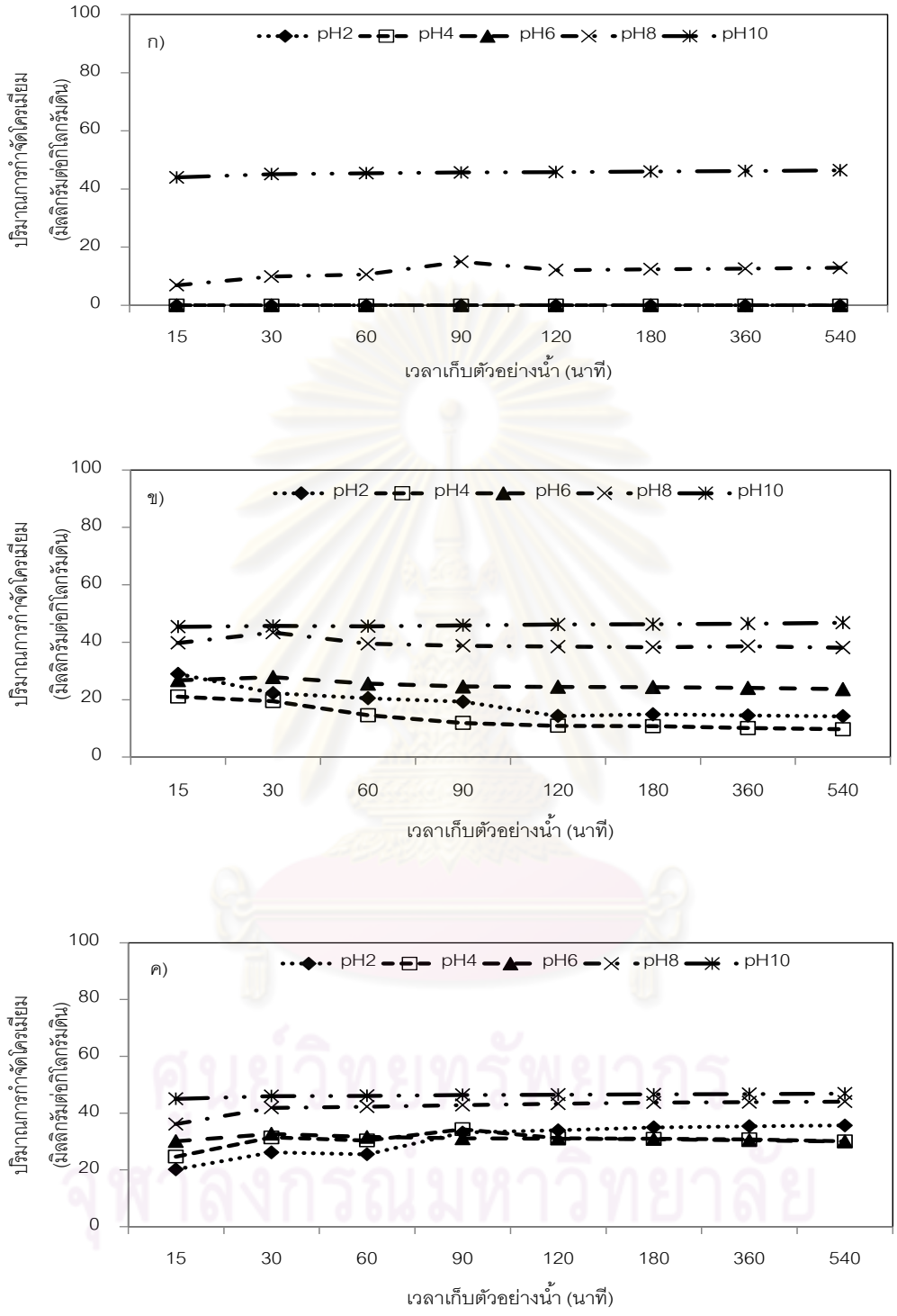
รูปที่ 4.14 แสดงเวลาในการสมดุลสารของตะกั่ว ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



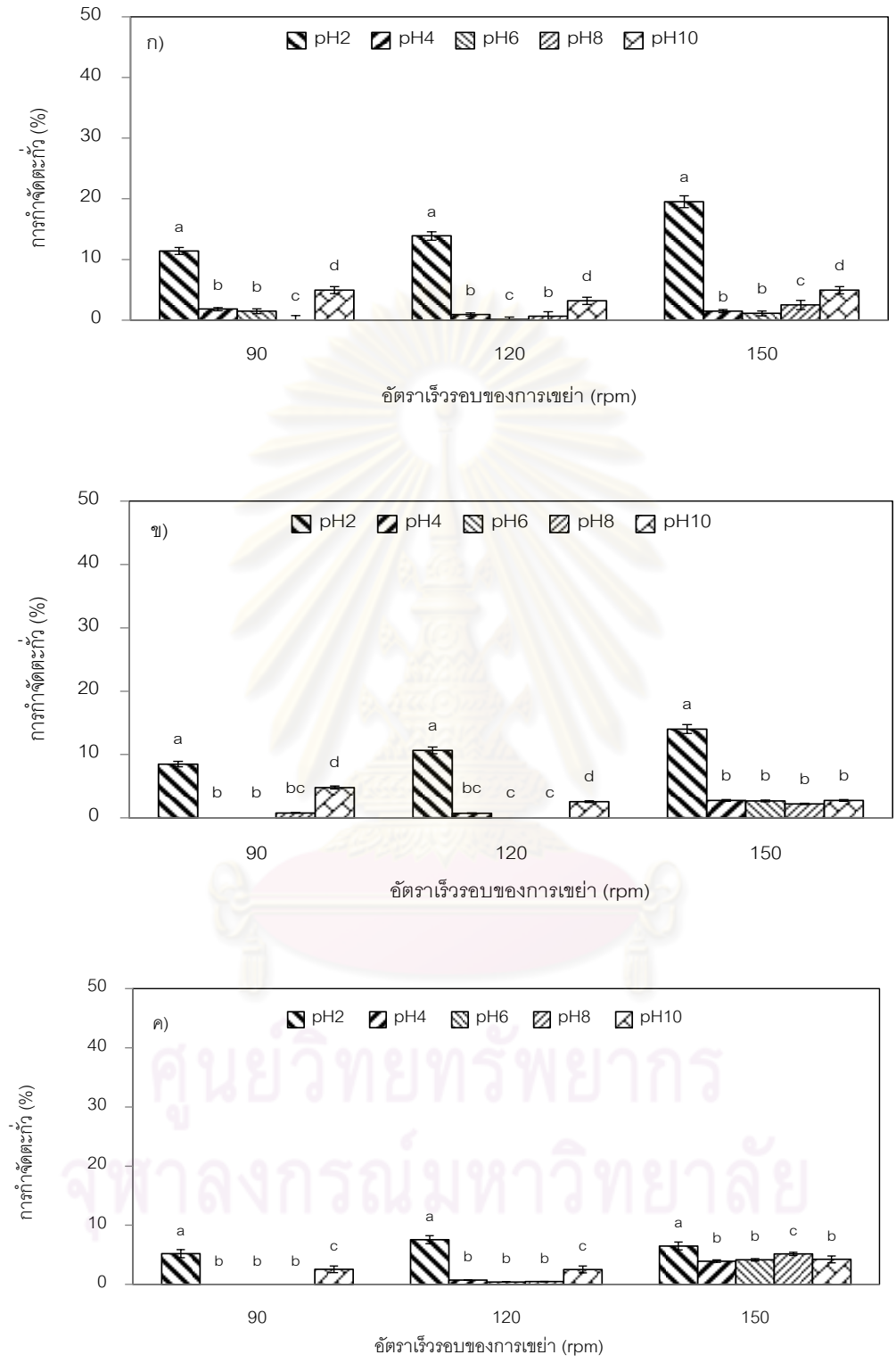
รูปที่ 4.15 แสดงเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



รูปที่ 4.16 แสดงเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

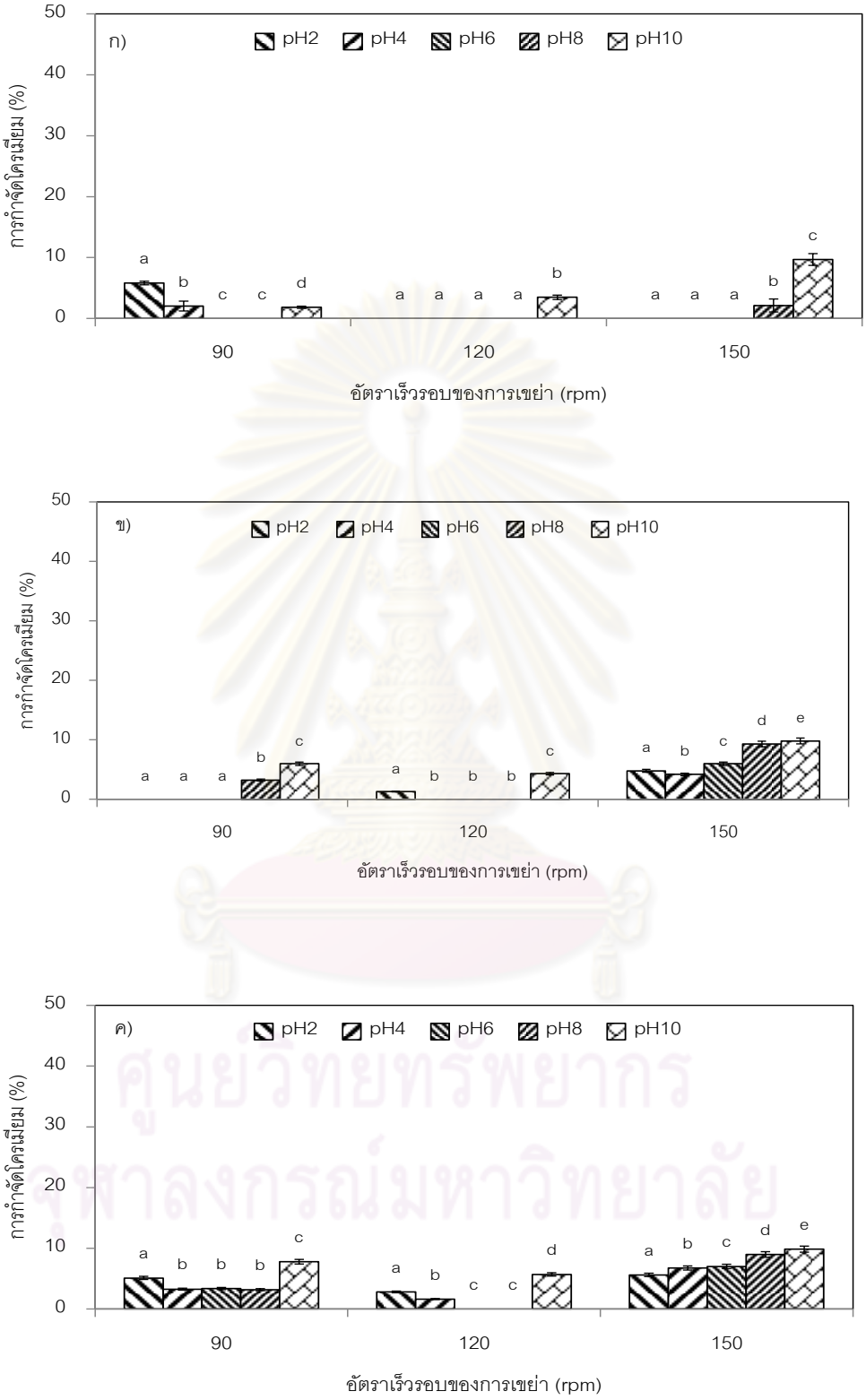


รูปที่ 4.17 แสดงเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm และที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) ระดับความเข้มข้น 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



รูปที่ 4.18 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ก) 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียมด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ก) 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ข) 16 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ค) 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

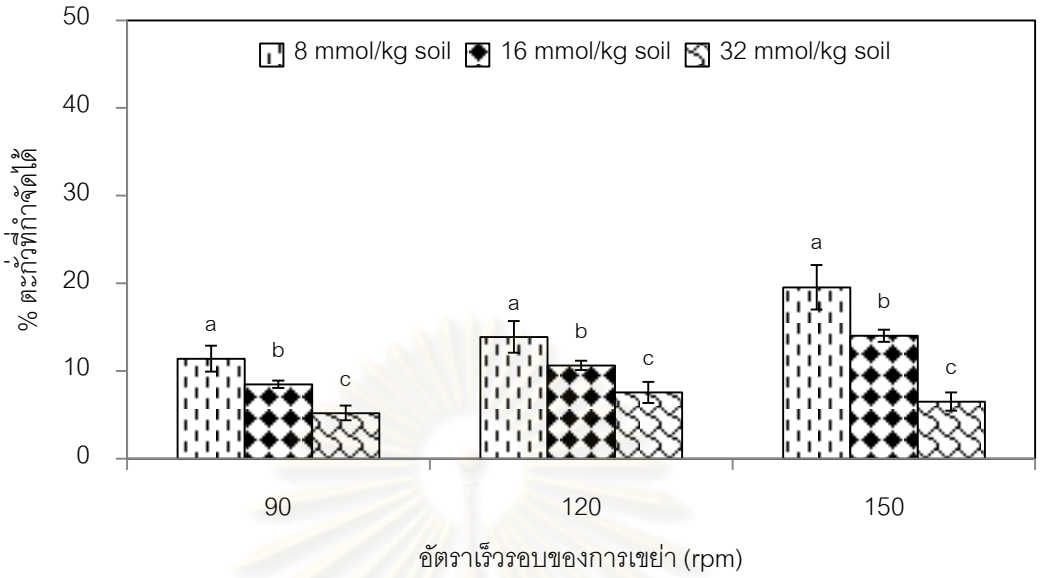
4.3.2 ผลการศึกษาระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่อการล้างดิน

ผลการศึกษาระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ในการกำจัดตะกั่ว ที่ pH 2 ซึ่งเป็น pH ที่เหมาะสม และสามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด โดยเก็บตัวอย่างน้ำ ณ เวลา 30 นาที พบว่า ทุกอัตราเร็วรอบของการเขย่าที่ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้มากขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เท่ากับ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถกำจัดตะกั่วได้ 11.39%, 8.48% และ 5.2% หรือคิดเป็น 141.01, 104.98 และ 64.38 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เท่ากับ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งแตกต่างจากระดับความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สำหรับที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าที่ 120 rpm ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เท่ากับ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้ 13.88%, 10.64% และ 7.55% หรือ 171.83, 131.72 และ 93.47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีการกำจัดตะกั่วได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เท่ากับ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งแตกต่างจากระดับความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm ที่ระดับความเข้มข้น 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งสามารถกำจัดตะกั่วได้ 19.53%, 14.02% และ 6.5% หรือเท่ากับ 241.73, 173.57 และ 80.47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เท่ากับ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด ซึ่งแตกต่างจากระดับความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่า ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วคือ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ในทุกๆ อัตราเร็วรอบของการเขย่า ซึ่งการทดลองครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Maturi *et al.* (2008) ที่ทำการศึกษาสารคีเลต และสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ล้างดินปนเปื้อนตะกั่ว สังกะสี และฟีนอฟทาลีน พบว่า การรวมตัวเป็นโมเลกุลไมเซลล์ (Micelle) ของ TWEEN 80 สามารถเกิดขึ้นได้ที่ระดับความเข้มข้นของ TWEEN 80 ต่ำๆ ซึ่งประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวในการกำจัดสารปนเปื้อนยังขึ้นอยู่กับการรวมตัวของโมเลกุลไมเซลล์ ซึ่งโมเลกุลจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มโดยหันส่วนที่มีขั้วออกมาด้านนอก และด้านในซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว (รุจิเรข จันทร์อำไพ, 2546)

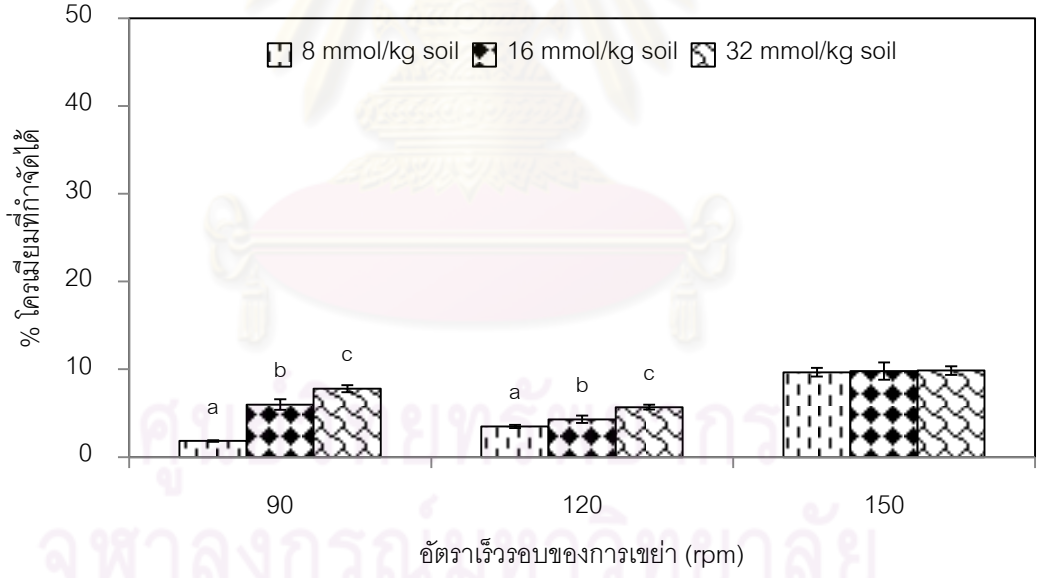
สำหรับการศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ต่อการกำจัดโครเมียม พบว่า pH ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมที่ดีที่สุดได้แก่ pH 10 โดยการเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm และเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 30 นาที ผลการศึกษาพบว่า

ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 และ 120 rpm เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 มากขึ้นสามารถกำจัดโครเมียมได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน และที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เท่ากับ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้ 1.84%, 5.98% และ 7.79% หรือเท่ากับ 8.58, 27.89 และ 36.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากระดับความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สำหรับที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ของสาร TWEEN 80 สามารถกำจัดโครเมียม 3.48%, 4.31% และ 5.69% หรือคิดเป็น 16.23, 20.10 และ 26.54 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากระดับความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อเพิ่มอัตราเร็วรอบของการเขย่าเป็น 150 rpm ที่ระดับความเข้มข้น 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถกำจัดโครเมียมได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ซึ่งสามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 9.67%, 9.79% และ 9.86% หรือเท่ากับ 45.10, 45.66 และ 45.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่า ที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมคือ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ทุกอัตราเร็วรอบของการเขย่า ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Villa et al. (2010) ที่ได้ทำการศึกษาการล้างดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิวคือ TX – 100 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ พบว่า เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของ TX – 100 จาก 3 CMC (CMC คือความเข้มข้นที่น้อยที่สุดในการเกิดไมเซลล์) เป็น 12 CMC สามารถกำจัดโครเมียมได้เพิ่มขึ้นจาก 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 0.14 มิลลิกรัมต่อลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 แสดงระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่ว ที่ pH 2 ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที



รูปที่ 4.21 แสดงระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียม ที่ pH 10 ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที

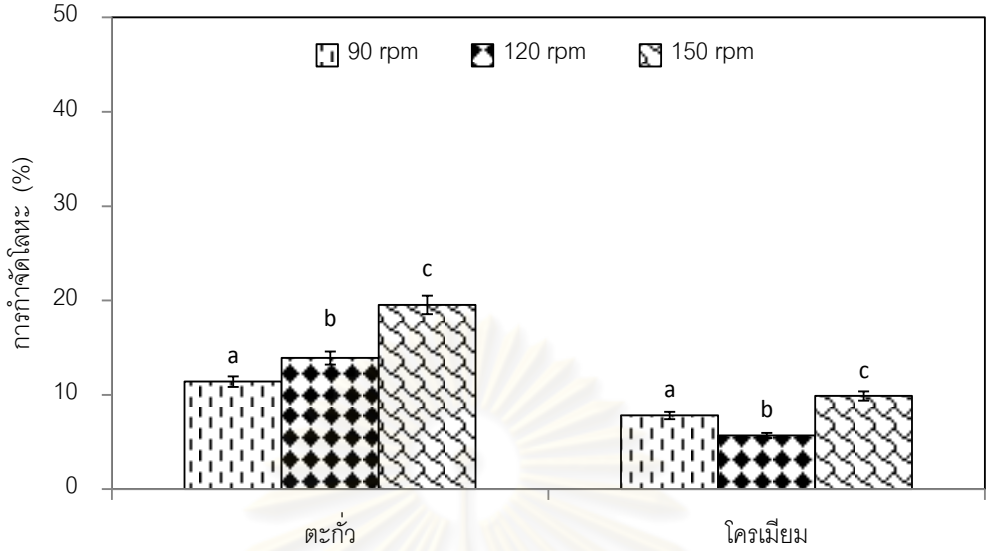
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.3 ผลการศึกษาอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการล้างดิน

ผลการศึกษาอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดตะกั่ว ที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เท่ากับ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 2 ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้น และ pH ที่สามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด ทั้งนี้ทุกๆ อัตราเร็วรอบของการเขย่าที่เพิ่มขึ้น พบว่า สามารถกำจัดตะกั่วได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยอัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ 11.39%, 13.88% และ 19.53% หรือเท่ากับ 141.01, 171.83 และ 241.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งแตกต่างจากอัตราเร็วรอบการเขย่าอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.22 อย่างไรก็ตามจากการทดลองครั้งนี้ยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด และมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Slizovskiy et al. (2010) ซึ่งทำการศึกษา การล้างดินปนเปื้อนโลหะหนักด้วยสารลดแรงตึงผิวคือ Ammonyx KP ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 200 rpm พบว่า สามารถกำจัดตะกั่วได้ 33.6% แสดงให้เห็นว่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่ามากขึ้น จะสามารถกำจัดตะกั่วได้เพิ่มขึ้น และยังพบว่าที่ระดับ pH 3.6 สามารถกำจัดตะกั่วได้มากกว่าที่ระดับ pH 5 และ 7

สำหรับการศึกษาผลของอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดโครเมียม พบว่า สามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุด ที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 ณ เวลาของการสมดุลสารที่ 30 นาที และเมื่อทำการเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm พบว่า สามารถกำจัดโครเมียมได้ 7.79%, 5.69% และ 9.86% หรือคิดเป็น 36.33, 26.54 และ 45.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากอัตราเร็วรอบการเขย่าอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งจากการทดลองครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า อัตราเร็วที่สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุดคือ ที่อัตราเร็วของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.22 แสดงอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดตะกั่ว ที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ที่ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 2 และอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดโครเมียม ที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 ที่ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที

4.3.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว และโครเมียม ด้วยสาร TWEEN 80

ผลการทดลองประสิทธิภาพการล้างดินปนเปื้อนตะกั่วด้วยสาร TWEEN 80 พบว่าสามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 2 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm เก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่สมดุลสารแล้ว สามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 19.53% แสดงให้เห็นว่า TWEEN 80 มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้น้อย

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการล้างดินที่ปนเปื้อนโครเมียมโดยสาร TWEEN 80 พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของสาร TWEEN 80 เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm เก็บตัวอย่างน้ำ ณ เวลา 30 นาที โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุดสามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 9.86% แสดงให้เห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของสาร TWEEN 80 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมนั้น สามารถกำจัดได้น้อยมากเช่นกัน

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว และโครเมียมในการวิจัยครั้งนี้ พบว่าสามารถกำจัดได้น้อยอาจเนื่องจาก สารลดแรงตึงผิวที่ใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุไฟฟ้า

เมื่อละลายน้ำแล้ว จึงเกิดการแตกตัวให้ประจุบวกเช่นเดียวกับตะกั่ว และโครเมียม ทำให้ไม่สามารถกำจัดโลหะเหล่านี้ได้ดี และยังพบว่า มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Pichtel (2009) ที่ทำการศึกษา การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารคีเลตคือ EDTA และ NTA กับสารลดแรงตึงผิวประจุลบ คือ SDS พบว่า สาร EDTA เมื่อละลายน้ำแล้ว จะมีประสิทธิภาพมากกว่าสาร NTA ในการกำจัดตะกั่ว และโครเมียมได้ผลมากขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของสารคีเลตเพิ่มขึ้น โดยที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 0.1 โมล สามารถกำจัดตะกั่วได้ 100% ที่ระดับ pH 4.3 และสามารถกำจัดตะกั่ว และโครเมียมได้ 96.20% และ 54% ที่ระดับ pH 12 ส่วนสาร SDS มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว 30 – 40.5% ที่ระดับ pH 4.4 – 10.9 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเท่ากับ 29 – 35% ที่ระดับ pH 2.2 – 3.2

4.4 ผลการล้างดินด้วยสารละลายผสมระหว่าง EDTA และ TWEEN 80

การทดลองในส่วนนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้แก่

1) ชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมล ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมล ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีซึ่งได้จากการทดลองในส่วนก่อนหน้านี้

2) ชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมล ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมล ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่ได้จากทดลองในส่วนก่อนหน้านี้

4.4.1 ผลการศึกษา pH ต่อการล้างดิน

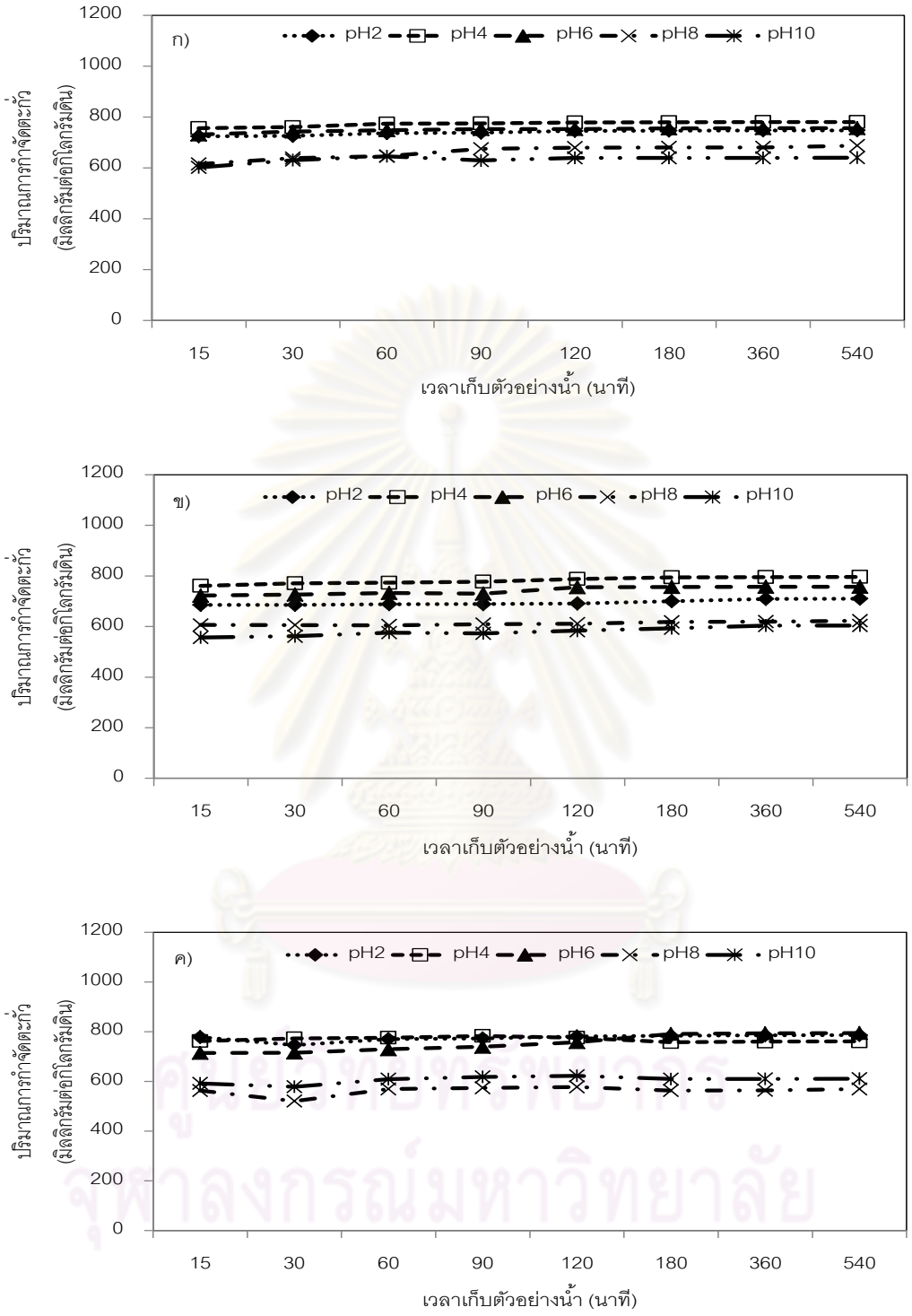
จากการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 15, 30, 60, 90, 120, 180, 360 และ 540 นาที แสดงให้เห็นว่า ที่ทุกชุดการทดลองในการกำจัดตะกั่ว ค่า pH และอัตราเร็วรอบของการเขย่า เวลาในการสมดุลสารในการกำจัดตะกั่ว และโครเมียมคือ 30 นาที ดังรูปที่ 4.23 - 4.26 ดังนั้นผลการทดลองครั้งนี้ได้ทำการศึกษา pH ที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่ว โดยในชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ที่ทุกอัตราเร็วรอบของการเขย่า ได้แก่ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่ pH 4 ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 61.39%, 62.28% และ 62.43% หรือคิดเป็น 760.01,

771.03 และ 772.89 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.27ก และจากการศึกษา pH ที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่ว ในชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า เมื่อเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm pH 6 สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และพบว่า สามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 48.83% หรือคิดเป็น 604.52 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อนำไปเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm พพบว่า pH ที่สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดได้แก่ pH 2 ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 54.45% หรือเท่ากับ 674.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อนำไปเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่ pH 4 และแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งพบว่า สามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 57.10% หรือเท่ากับ 706.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังรูปที่ 4.27ข จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า pH 2, 4 และ 6 สามารถกำจัดตะกั่วได้ดี ที่ทุกชุดการทดลอง แต่สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่ pH 4 ทั้งในชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

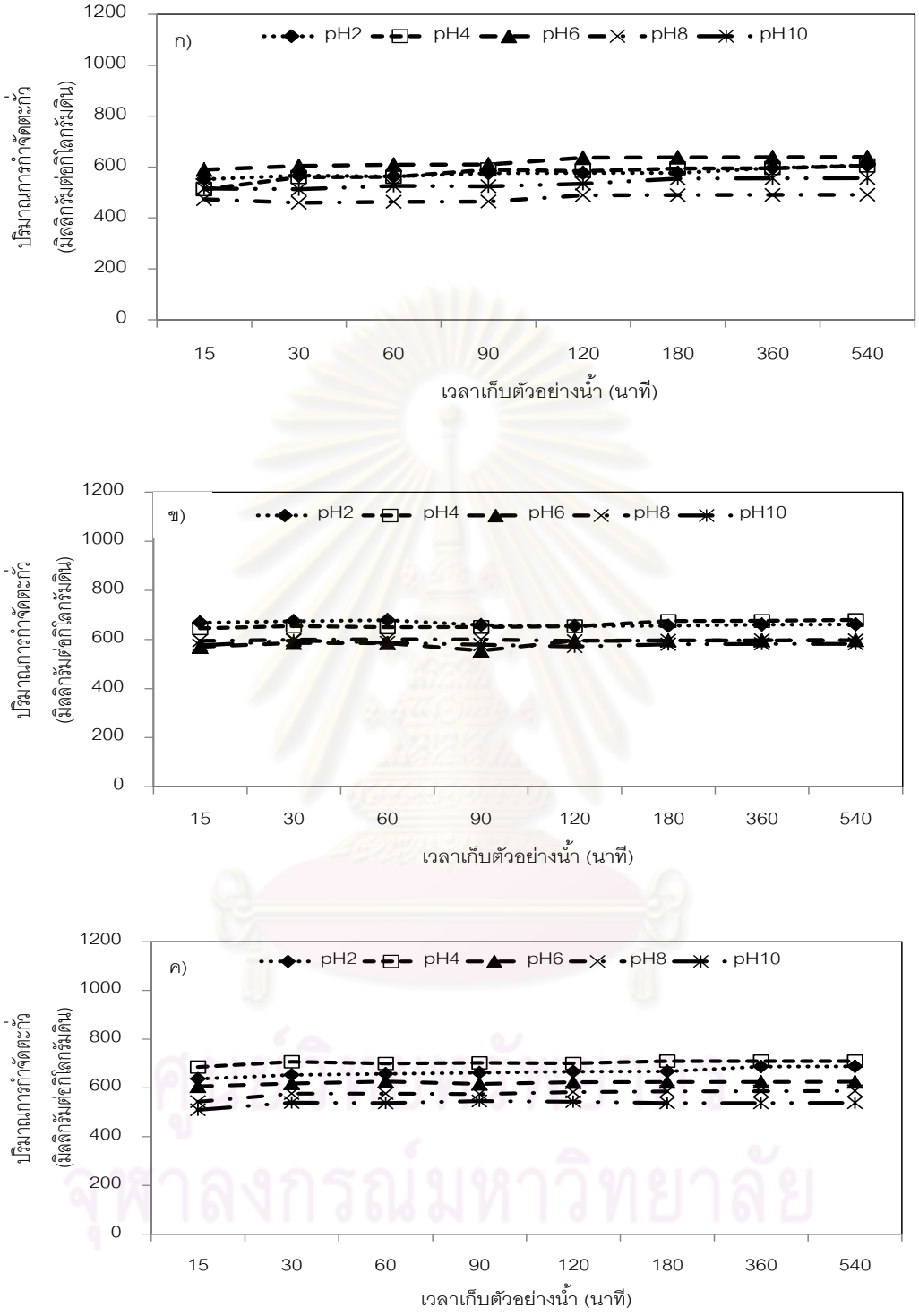
สำหรับการกำจัดโครเมียมนั้น จากการศึกษา pH ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการล้างดิน ณ เวลา 30 นาที ในชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm จากการทดลองพบว่า สามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุดที่ pH 6 และ 8 ซึ่งสามารถกำจัดโครเมียมได้ไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยที่ระดับ pH 6 สามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 12.04% หรือคิดเป็น 56.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และที่ระดับ pH 8 สามารถกำจัดโครเมียมได้ 12.30% หรือ 57.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุดที่ pH 6 และ 10 ซึ่งสามารถกำจัดโครเมียมได้มากไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 11.51% และ 11.95% หรือคิดเป็น 53.68 และ 55.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm ซึ่งเป็นอัตราเร็วที่มากที่สุดที่ได้ทำการทดลอง โครเมียมถูกกำจัดได้มากที่สุดที่ pH 6 ซึ่งแตกต่างจาก

pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) พบว่า สามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 16.12% หรือ 75.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังรูปที่ 4.28ก สำหรับการศึกษา pH ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียม ในชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน จากการศึกษาพบว่า ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm ระดับ pH 10 สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด ซึ่งแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 19.88% หรือ 92.72 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุดที่ pH 6 โดยแตกต่างจาก pH อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และยังสามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 27.58 และ 11.95% หรือคิดเป็น 128.62 และ 55.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับของอัตราเร็วการเขย่า ดังรูปที่ 4.28ข จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า pH 6, 8 และ 10 สามารถกำจัดโครเมียมได้ดี ในทุกชุดการทดลอง แต่สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุดที่ pH 6 ของชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

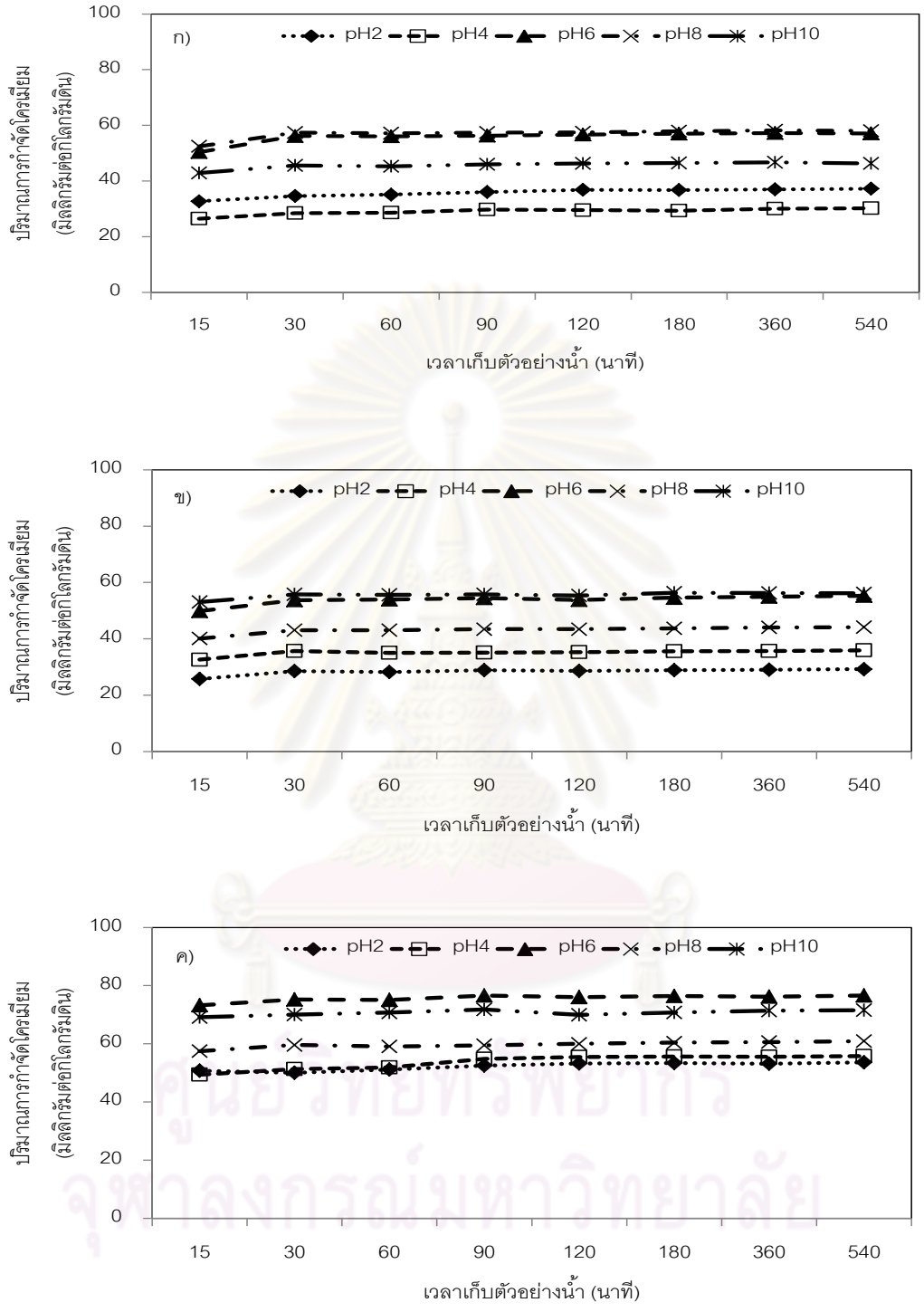
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



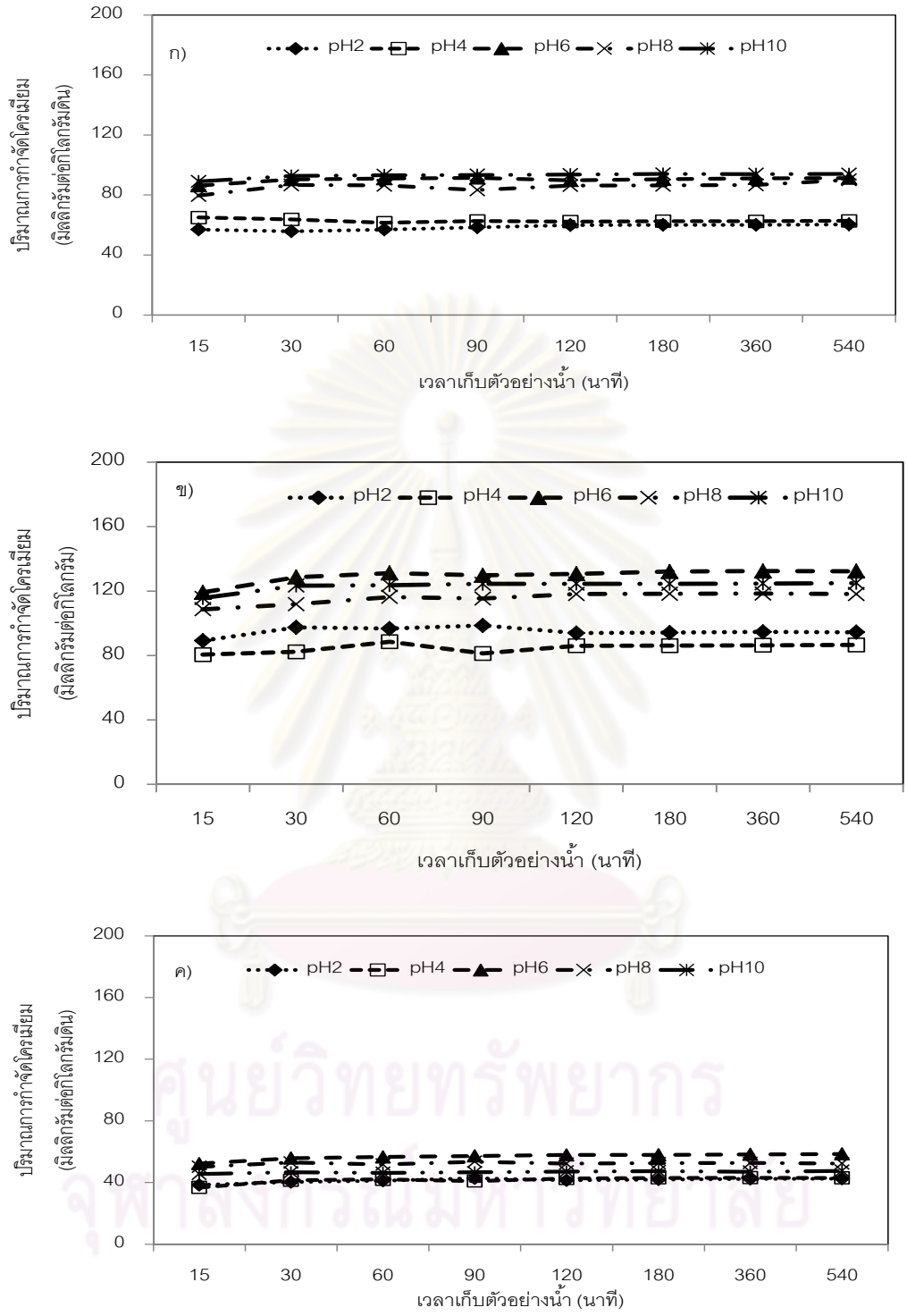
รูปที่ 4.23 แสดงปริมาณการกำจัดตะกั่วในช่วงเวลาการเก็บน้ำต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ TWEEN 80 เท่ากับ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่อัตราเร็วต่างๆ ก) อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm ข) อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และ ค) อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm



รูปที่ 4.24 แสดงปริมาณการกำจัดตะกั่วในช่วงเวลาการเก็บน้ำต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ TWEEN 80 เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่อัตราเร็วต่างๆ ก) อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm ข) อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และ ค) อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm

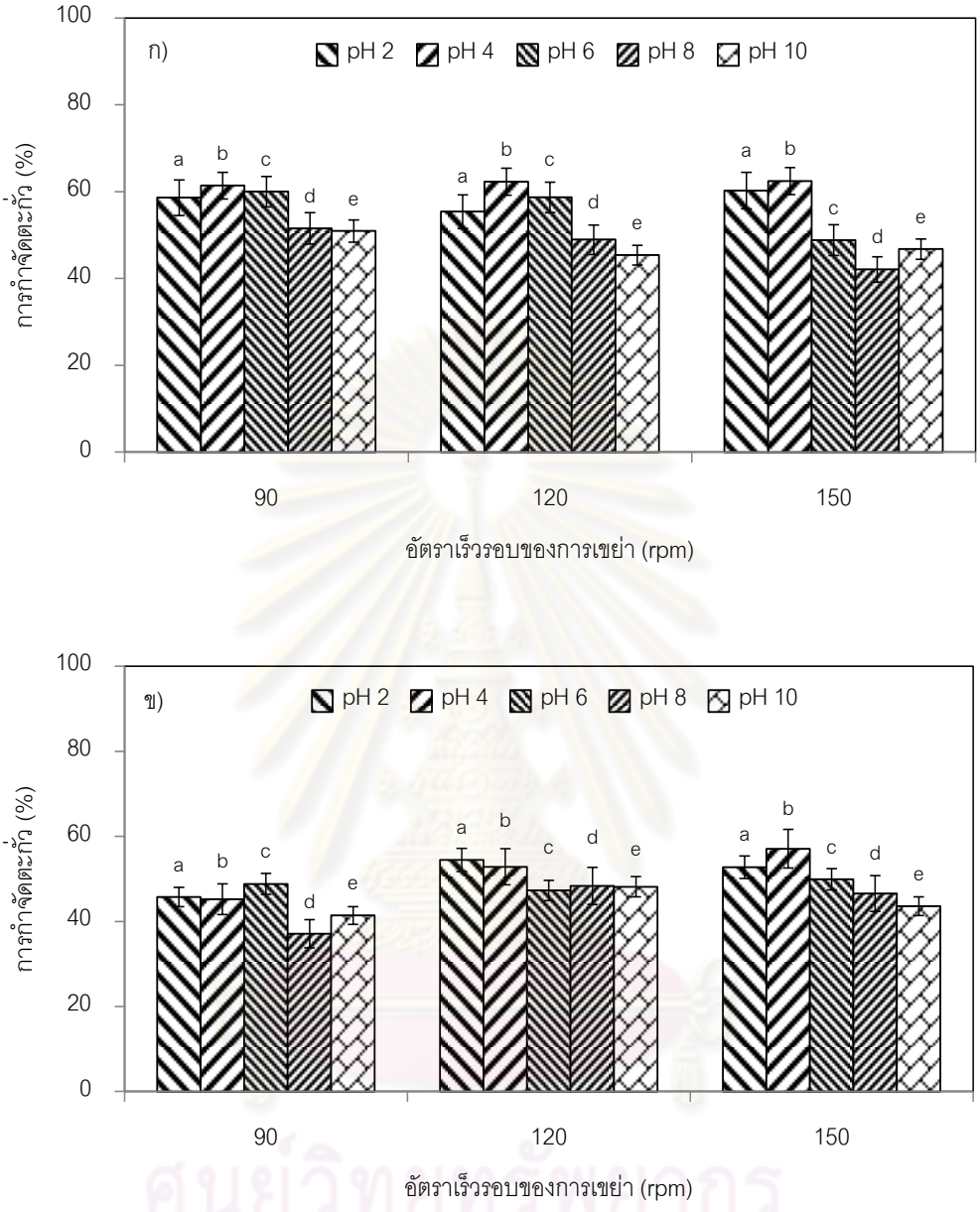


รูปที่ 4.25 แสดงปริมาณการกำจัดโครเมียมในช่วงเวลาการเก็บน้ำต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ TWEEN 80 เท่ากับ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่อัตราเร็วต่างๆ ก) อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm ข) อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และ ค) อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm

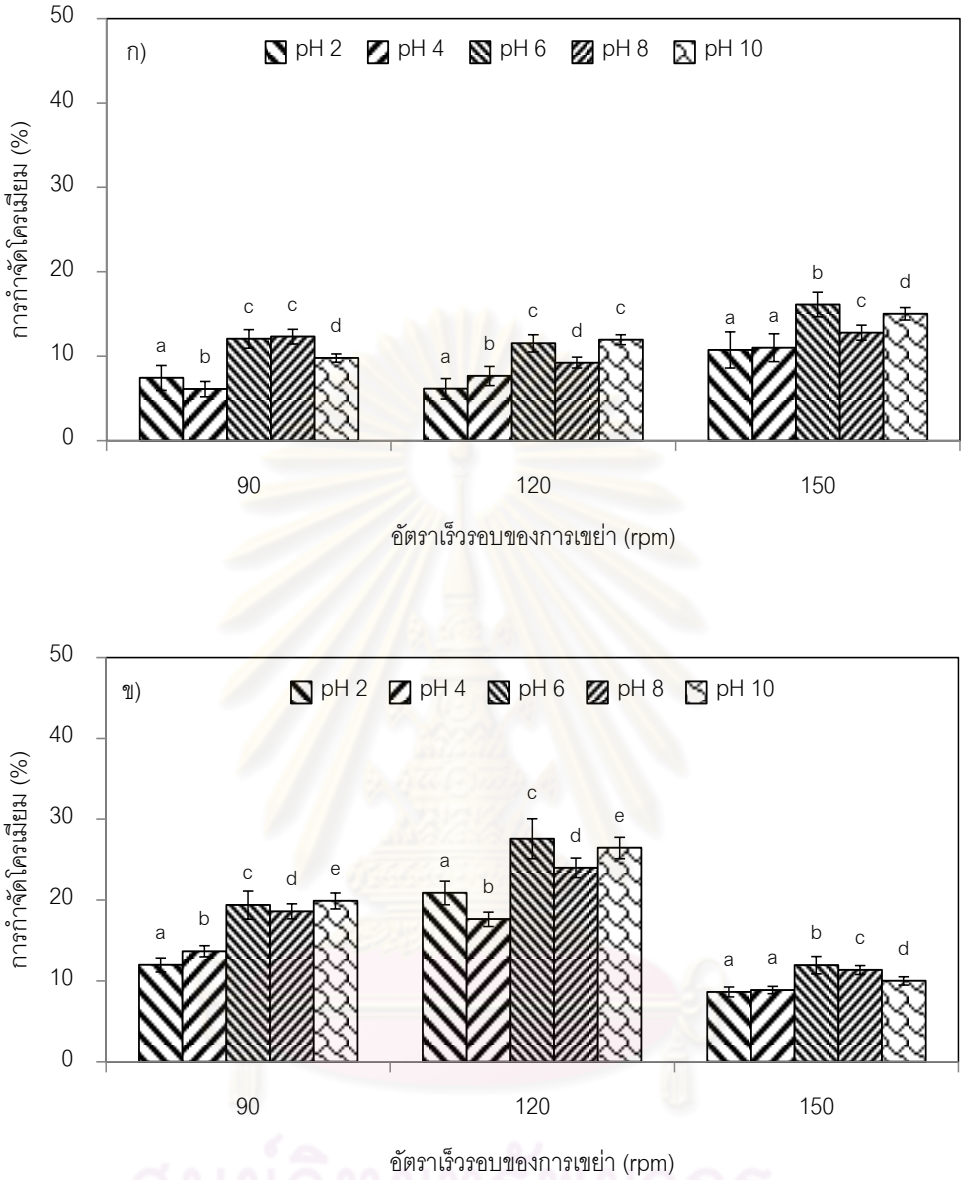


รูปที่ 4.26 แสดงปริมาณการกำจัดโครเมียมในช่วงเวลาการเก็บน้ำต่างๆ ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ TWEEN 80 เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่อัตราเร็วต่างๆ ก) อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm ข) อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm และ ค) อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.27 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่ว ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมต่างๆ ก)ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับ TWEEN 80 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ข) ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับ TWEEN 80 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



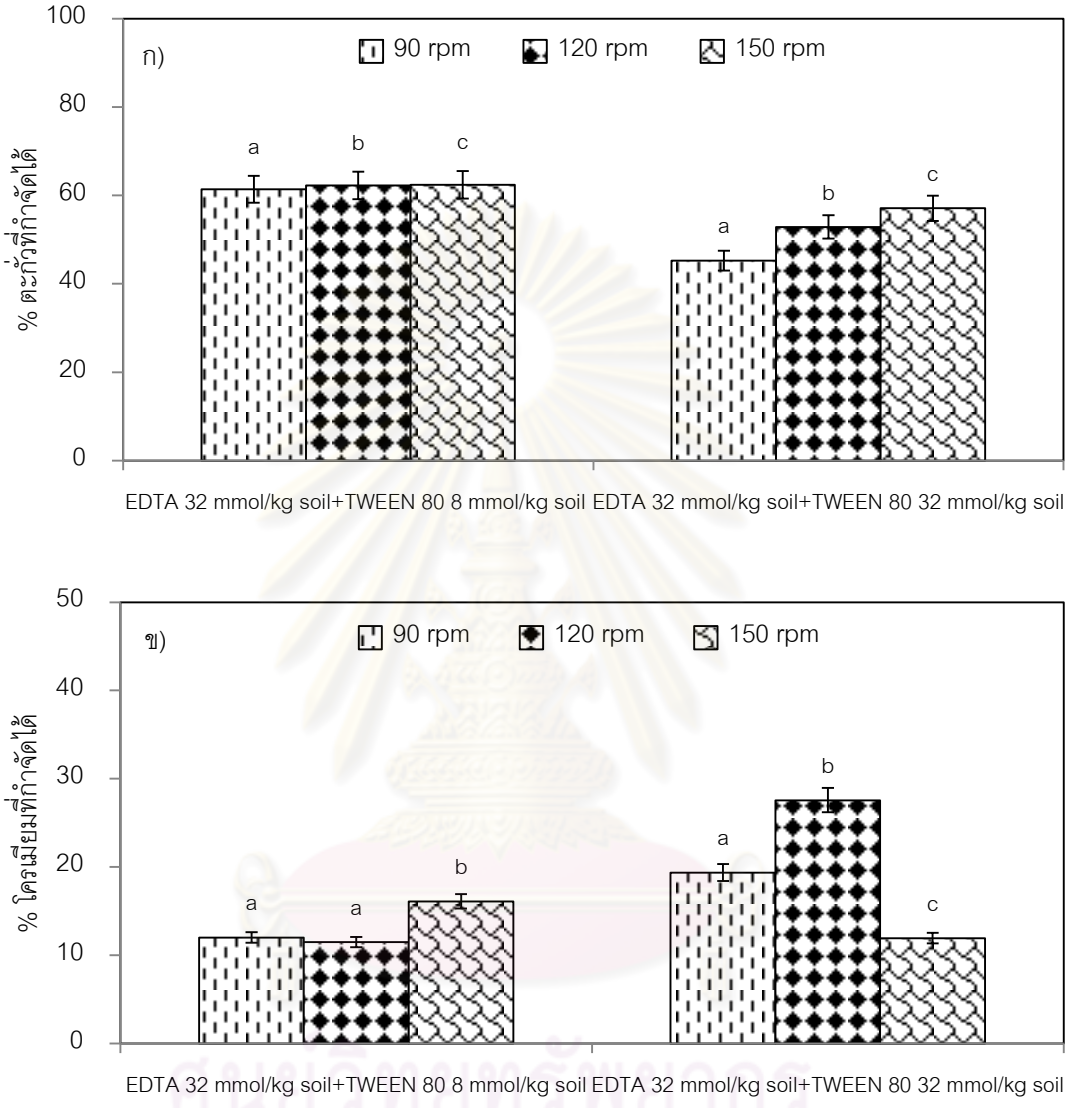
รูปที่ 4.28 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมต่างๆ ก) ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับ TWEEN 80 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ ข) ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับ TWEEN 80 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

4.4.2 ผลการศึกษาอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการล้างดิน

ผลการศึกษาอัตราเร็วรอบของการเขย่าต่อการกำจัดตะกั่ว ในชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยที่ระดับ pH 4 เป็น pH ที่สามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด จากการทดลองพบว่า ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 61.39%, 62.28% และ 62.43% หรือคิดเป็น 760.01, 771.03 และ 772.89 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากอัตราเร็วรอบการเขย่าอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กล่าวได้ว่า ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดในชุดการทดลองนี้ ส่วนชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่ง pH ที่สามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด คือ pH 4 ณ เวลา 30 นาที โดยที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm ตะกั่วถูกกำจัดได้เท่ากับ 45.24%, 52.86% และ 57.10% หรือ 560.07, 654.41 และ 706.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากอัตราเร็วรอบการเขย่าอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.29ก แสดงให้เห็นว่า อัตราเร็วรอบของการเขย่าที่สามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุดคือ 150 rpm เช่นกันในชุดการทดลองนี้

สำหรับการศึกษาผลของการกำจัดโครเมียมที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าต่างๆ โดยชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุดที่ระดับ pH 6 พบว่า เมื่อเขย่าที่อัตราเร็วรอบเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 12.04%, 11.51% และ 16.12% หรือคิดเป็น 56.15, 53.68 และ 75.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับของอัตราเร็วการเขย่า ซึ่งแตกต่างจากอัตราเร็วรอบการเขย่าอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด ส่วนชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ pH 6 สามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุดเช่นกัน ณ เวลา 30 นาที และยังพบว่า ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับ 19.38%, 27.58% และ 11.95% หรือคิดเป็น 90.39, 128.62 และ 55.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากอัตราเร็วรอบการเขย่าอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.29ข แสดงให้เห็นว่า อัตราเร็วรอบของการเขย่าที่สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุดในชุดการทดลองครั้งนี้เท่ากับ 120 rpm



รูปที่ 4.29 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่ว และโครเมียมด้วยสารละลายผสม ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมต่างๆ ก) ตะกั่ว และ ข) โครเมียม

4.4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว และโครเมียม ด้วยสารละลายผสม

ผลการทดลองประสิทธิภาพของการล้างดินปนเปื้อนตะกั่วพบว่า ในชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ที่ pH 4 ที่มีการเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm เป็น pH และอัตราเร็วรอบของการเขย่าที่เหมาะสม และสามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด เมื่อทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่สมดุลสารแล้ว โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้สูงสุดเท่ากับ 62.43% และ 57.1% ตามลำดับของชุดการทดลอง ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้น้อยกว่าการใช้สาร EDTA เพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang *et al*. (2008) ที่ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยสารคีเลตคือ EDTA ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวคือ SDS ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทมีประจุลบ พบว่า สารละลายผสมระหว่าง EDTA และ SDS สามารถกำจัดตะกั่วได้น้อยกว่าการล้างดินด้วยสาร EDTA เพียงอย่างเดียว อีกทั้งสารละลายผสมนี้สามารถกำจัดตะกั่วได้มากกว่าการใช้สาร SDS ในการล้างดินเพียงอย่างเดียว

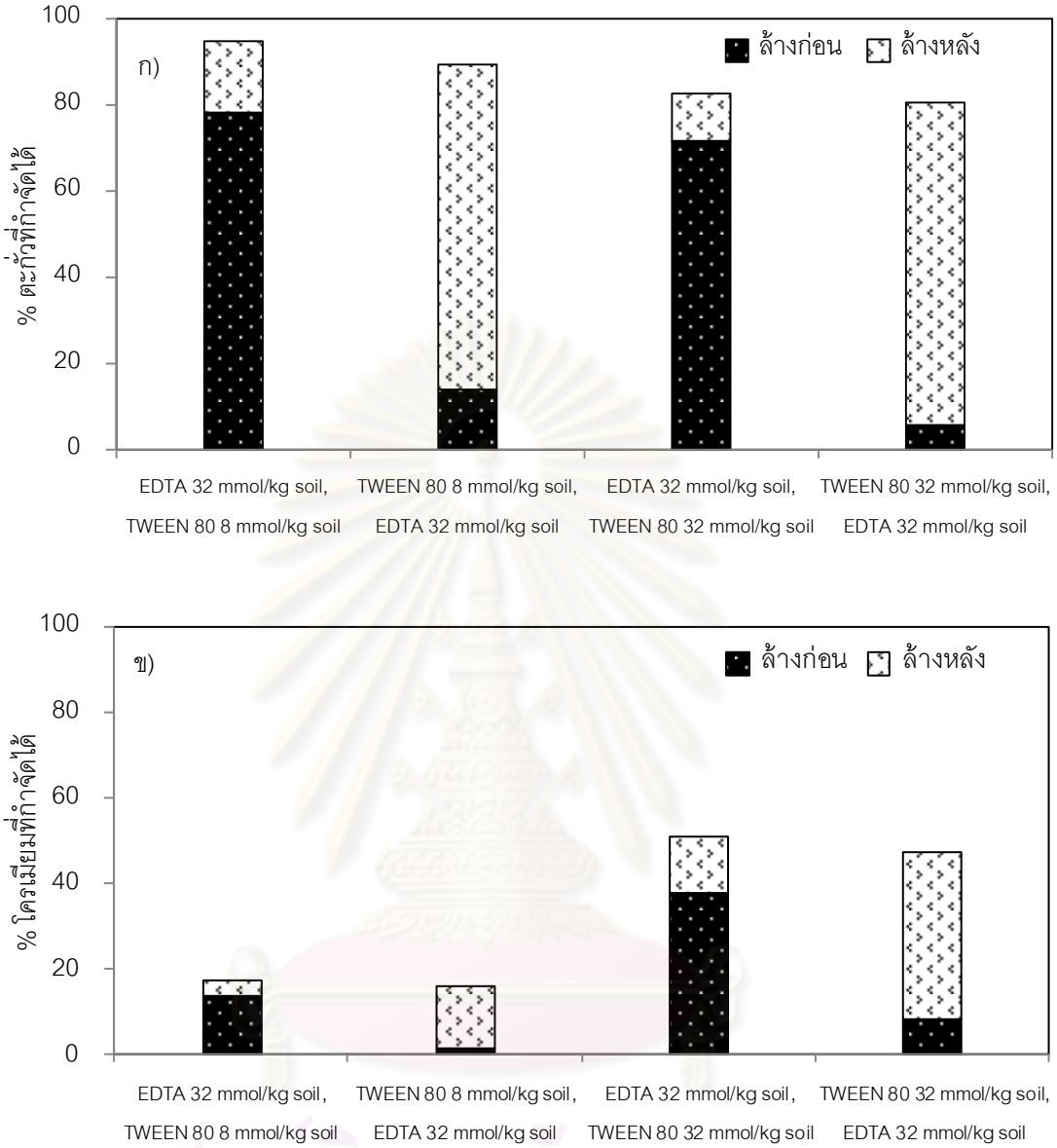
จากผลการทดลองประสิทธิภาพการล้างดินปนเปื้อนโครเมียมพบว่า การล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm และ pH 6 ซึ่งเป็นอัตราเร็วรอบของการเขย่า และ pH ที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมได้มากที่สุด จากการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่สมดุลสารแล้ว โดยกำจัดโครเมียมได้สูงสุดเท่ากับ 16.12% ส่วนชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ที่ pH 6 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด เท่ากับ 27.58 %

4.5 ผลการล้างดินด้วยสาร EDTA ก่อน แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 และการล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ก่อน แล้วตามด้วยสาร EDTA

จากผลการทดลองการล้างดินปนเปื้อนตะกั่วด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 8 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm แล้วตามด้วยการล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 2 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm พบว่า สามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับ 94.78% หรือ 1,173.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับการล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 2 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm แล้วตามด้วยการล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ pH 8 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ 89.37% หรือคิดเป็น 1,106.40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนการล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm แล้วตามด้วยการล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ 82.67% หรือ 1,023.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งการล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm แล้วตามด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ 80.54% หรือเท่ากับ 997.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังรูปที่ 4.30ก นอกจากนี้จากการทดลองล้างดินปนเปื้อนตะกั่ว พบว่า การล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 8 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm ก่อน แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 2 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้มากกว่าทุกชุดการทดลอง โดยสามารถกำจัดได้เท่ากับ 94.78% หรือคิดเป็น 1,173.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งการวิจัยครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Maturi and Reddy. (2008) ที่ศึกษาการกำจัดตะกั่ว สังกะสี และฟีนอฟทาลีนในดินปนเปื้อน พบว่า การล้างดินด้วยด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.2 โมล แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก และการล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก แล้วตามด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.2 โมล สามารถกำจัดตะกั่วและสังกะสีได้มีประสิทธิภาพเท่ากัน ซึ่งสามารถกำจัดตะกั่วและสังกะสีได้ 100% สำหรับการกำจัดฟีนอฟทาลีนนั้น พบว่า การล้างดินด้วยด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.2 โมล แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก

สามารถกำจัดฟีนอฟทาลีนได้ 93% และการล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก แล้วตามด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.2 โมล สามารถกำจัดฟีนอฟทาลีนได้ใกล้เคียง 100% เต็ม แสดงให้เห็นว่าการล้างดินด้วยสาร EDTA ก่อน แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 นั้น สามารถกำจัดตะกั่วได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ผลการทดลองการล้างดินปนเปื้อนโครเมียมพบว่า การล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 8 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm ก่อน แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 2 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้ 17.03% หรือคิดเป็น 79.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยการล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 2 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm ก่อน แล้วตามด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ pH 8 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้ 15.81% หรือคิดเป็น 73.74 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนการล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm ก่อน แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้ 50.77% หรือคิดเป็น 236.77 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับการล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ก่อน ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm ก่อน แล้วตามด้วย EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้ 47.14% หรือเท่ากับ 219.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และจากการทดลองล้างดินปนเปื้อนโครเมียมยังพบว่า การล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm ก่อน แล้วตามด้วย TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าทุกชุดการทดลอง โดยสามารถกำจัดได้เท่ากับ 50.77% คิดเป็น 236.77 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังรูปที่ 4.30ข



รูปที่ 4.30 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่ว และโครเมียม ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ก) ตะกั่ว และ ข) โครเมียม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 สมดุลมวล (mass balance) การกำจัดตะกั่วและโครเมียมด้วยการล้างดิน

ในการทำสมดุลมวล เพื่อศึกษาปริมาณตะกั่ว และโครเมียมทั้งหมดที่มีอยู่ในระบบ โดยได้ทำการศึกษาเฉพาะในชุดการทดลองที่สามารถกำจัดตะกั่ว และโครเมียมได้ดีที่สุด การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม และตะกั่วในดินทดลองที่ใช้ดิน 20 กรัม มีปริมาณตะกั่ว และโครเมียมเท่ากับ 24.76 และ 9.328 มิลลิกรัม ตามลำดับ โดยปริมาณโครเมียม และตะกั่วที่อยู่ในสารละลาย และดินทดลองที่ได้จากการเก็บตัวอย่างที่เวลา 30 นาที มีค่าเท่ากับปริมาณตะกั่ว และโครเมียมทั้งหมดที่พบในดินทดลองก่อนการล้างดิน จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า การล้างดินด้วย EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลก่อน แล้วล้างดินตามด้วย TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมล เป็นชุดการทดลองที่สามารถกำจัดตะกั่ว และโครเมียมได้ดีที่สุด โดยสมดุลมวลของการทดลองแสดงรายละเอียดได้ในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ปริมาณโครเมียม และตะกั่ว ที่หายไปนั้นอาจติดกับภาชนะ และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง จึงทำให้โครเมียม และตะกั่วบางส่วนหายไปจากระบบ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของตะกั่ว และโครเมียมที่หายไป โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 2.79 และ 8.76% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 สมดุลมวลของการทดลองที่สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด

EDTA 32 mmol/kg soil ก่อน แล้ว ตามด้วย	TPb ในสารละลายที่ได้จากการทดลองต่อดิน 20 กรัม (มิลลิกรัม)	เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	TPb ในดินหลังจากการทดลอง (มิลลิกรัม)	เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ผลรวมปริมาณโลหะทั้งหมดในระบบ (%)
TWEEN 80 8 mmol/kg soil	23.60 23.44 23.36	23.47	94.79	0.59 0.64 0.55	0.60	2.42	97.21

ตารางที่ 4.3 สมดุลมวลของการทดลองที่สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด

EDTA 32 mmol/kg soil ก่อน แล้วตามด้วย	TCr ในสารละลายที่ได้จากการทดลองต่อดิน 20 กรัม (มิลลิกรัม)	เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	TCr ในดินหลังจากการทดลอง (มิลลิกรัม)	เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ผลรวมปริมาณโลหะทั้งหมดในระบบ (%)
TWEEN 80 32 mmol/kg soil	4.74 4.74 4.73	4.74	50.80	3.89 3.67 3.49	3.68	39.44	90.24

4.7 การคำนวณค่าใช้จ่าย

การคำนวณค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว และโครเมียมร่วมกับการใช้สาร EDTA และ TWEEN 80 จากการศึกษาผลของการล้างดินปนเปื้อนตะกั่ว และโครเมียม พบว่า สาร TWEEN 80 มีประสิทธิภาพในการล้างดินค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สาร EDTA ซึ่งผลการศึกษาการล้างดินด้วยสาร EDTA ก่อน แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการกำจัดตะกั่ว และโครเมียม และเมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายระหว่างสาร EDTA และ TWEEN 80 โดยคิดเป็นต้นทุนในการกำจัดตะกั่ว และโครเมียมต่อไร่ของการกำจัดในพื้นที่จริง โดยการกำจัดตะกั่วใช้ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดินล้างก่อน แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด สำหรับการกำจัดโครเมียมใช้ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดินล้างก่อน แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด ดังตารางที่ 4.4 จากตารางพบว่า ค่าการลงทุนในการล้างดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว และโครเมียมด้วยสาร EDTA มีค่าใช้จ่ายต่อไร่เท่ากับ 574,080 บาทต่อไร่ ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการกำจัดที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากสาร EDTA ที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นสารเคมีในเกรด analytical reagent โดยมีประสิทธิภาพ 99 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้จึงได้ทำการคำนวณการใช้สาร EDTA ในเกรด commercial ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดต่อไร่เท่ากับ 55,200 บาท (วิธีคำนวณดังภาคผนวก ก) ดังนั้นจากค่าใช้จ่ายในการกำจัดข้างต้น พบว่าในกรณีที่จะนำสาร EDTA ไปใช้ในการบำบัดในพื้นที่จริง เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการบำบัด อาจนำสาร EDTA ในเกรด commercial ไปประยุกต์ใช้ได้ เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าสาร EDTA ใน

เกรด analytical reagent ประมาณ 10 เท่า ซึ่งเป็นความสามารถในการกำจัดที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (บาทต่อไร่)

สารคีเลตและสารลดแรงตึงผิว	ราคา (บาท/ไร่)
EDTA (analytical reagent; A.R.)	574,080
EDTA (commercial grade)	55,200
TWEEN 80 (8 mmol/kg)	370,840
TWEEN 80 (32 mmol/kg)	1,482,090

หมายเหตุ วิธีคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก

สำหรับการล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ค่าใช้จ่ายในการล้างดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว และโครเมียม มีค่าใช้จ่ายต่อไร่เท่ากับ 370,840 บาทต่อไร่ และที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า มีค่าใช้จ่ายต่อไร่เท่ากับ 1,482,090 บาทต่อไร่ ดังนั้นในการกำจัดตะกั่วโดยการล้างดินด้วยสาร EDTA ก่อนที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า มีค่าใช้จ่ายต่อไร่รวมกัน 426,040 บาทต่อไร่ และสำหรับการล้างดินปนเปื้อนโครเมียมด้วยสาร EDTA ก่อนที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า มีค่าใช้จ่ายต่อไร่รวมคิดเป็น 1,537,290 บาทต่อไร่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการกำจัดตะกั่ว และโครเมียม ด้วยสารคีเลตคือ EDTA และสารลดแรงตึงผิวคือ TWEEN 80 โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ 4 ส่วน ดังนี้

1) ผลการล้างดินด้วย EDTA

ระดับความเข้มข้นของ EDTA ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ปรับ pH เป็น 2, 4, 6, 8 และ 10 จากนั้นนำไปเขย่าที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm เก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 15, 30, 60, 90, 120, 180, 360 และ 540 นาที จากการศึกษาเพื่อหา pH ระดับความเข้มข้นของสาร อัตราเร็วรอบของการเขย่า และเวลาในการสมดุลสาร พบว่า สาร EDTA สามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุดที่ pH 8 ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm ณ เวลาสมดุลสารที่ 30 นาที และจากการทดลองเพื่อหา pH ระดับความเข้มข้นของสาร อัตราเร็วรอบของการเขย่าและเวลาในการสมดุลสารของโครเมียม พบว่า สาร EDTA สามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุดที่ pH 10 ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm เป็นระยะเวลา 30 นาที

2) ผลการล้างดินด้วย TWEEN 80

จากการล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8, 16 และ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ปรับ pH เป็น 2, 4, 6, 8 และ 10 แล้วนำไปเขย่าด้วยอัตราเร็วรอบเท่ากับ 90, 120 และ 150 rpm จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 15, 30, 60, 90, 120, 180, 360 และ 540 นาที เพื่อศึกษา pH ระดับความเข้มข้นของสาร อัตราเร็วรอบของการเขย่า และเวลาในการสมดุลสาร พบว่า สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดที่ pH 2 ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm ณ ระยะเวลาของการสมดุลสาร 30 นาที และสามารถกำจัดโครเมียมได้มากที่สุดที่ pH 10 ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm ณ ระยะเวลาของการสมดุลสาร 30 นาที

3) ผลการล้างดินด้วยสารละลายผสมระหว่าง EDTA และ TWEEN 80

การทดลองในส่วนนี้แบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้แก่ (1) ชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ (2) ชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผลการทดลองพบว่า ในชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถกำจัดตะกั่วได้มากที่สุด ที่ pH 4 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm เป็นระยะเวลา 30 นาที ส่วนชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผสมกับสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่าสามารถกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด ที่ pH 6 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm เป็นเวลา 30 นาที

4) ผลการล้างดินด้วย EDTA ก่อน แล้วตามด้วย TWEEN 80 และการล้างดินด้วย TWEEN 80 ก่อน แล้วตามด้วย EDTA

การทดลองในส่วนนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลองคือ (1) ชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ก่อน ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 8 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 2 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm (2) ชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ก่อน ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 2 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm แล้วตามด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 8 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm (3) ชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ก่อน ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm แล้วตามด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm และ (4) ชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร TWEEN 80 ก่อน ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm แล้วตามด้วยสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm ผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ก่อน ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 8 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 90 rpm แล้วตามด้วยสาร

TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 2 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด สำหรับชุดการทดลองที่ดีที่สุดในการกำจัดโครเมียมคือ ชุดการทดลองที่ล้างดินด้วยสาร EDTA ก่อน ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 120 rpm แล้วล้างตามด้วยสาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน pH 10 อัตราเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 150 rpm

5) การล้างดินด้วย EDTA และ TWEEN 80 นั้นพบว่า EDTA สามารถกำจัดตะกั่วได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่สามารถกำจัดโครเมียมได้น้อย ในขณะที่สาร TWEEN 80 นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ค่อนข้างน้อย และไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในดิน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรนำสาร EDTA และสาร TWEEN 80 ทดลองกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

2) ทดลองใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดอื่นๆ ร่วมกับสาร EDTA ซึ่งอาจจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากดินได้ดีขึ้น

3) ควรทดลองนำสาร TWEEN 80 ไปล้างดินที่มีการปนเปื้อนสารอินทรียวัตถุ สารกำจัดศัตรูพืช ซึ่งอาจมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการกำจัดสารเหล่านี้มากกว่าการกำจัดโลหะหนัก

4) ควรนำระดับความเข้มข้นของสารทดลอง ระดับของ pH และอัตราเร็วรอบของการเขย่าไปใช้กำจัดโลหะหนักในดินแหล่งอื่นๆ ที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว และโครเมียม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. พ.ร.บ. กฎหมาย และมาตรฐาน. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th. [2554 มกราคม 1]

กรมวิทยาศาสตร์บริการ. สารลดแรงตึงผิว. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_7_2548_surfactant.pdf. [2554 มกราคม 2]

เกษม จันทร์แก้ว. 2551. วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชัชพล ทรงสุนทรวงศ์. 2549. มนุษย์กับสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี. โลหะหนัก: ตัวการปัญหาสิ่งแวดล้อม.[ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=7. [2554 มกราคม 4]

ทิพวรรณ พจนาภรณ์. 2552. ผลของอีดีทีเอและอีดีดีเอสต่อการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วโดยใช้สับปะรดที่ปลูกในดินปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นริศรา เนียมฤทธิ์. 2549. การล้างโลหะหนักออกจากดินที่ปนเปื้อนโดยใช้สารละลายผสมระหว่างโซเดียมอีดีทีเอและโซเดียมเมตตาไบซัลไฟต์และการนำสารละลายผสมกลับมาใช้ใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

มลิวรรณ บุญเสนอ. 2544. พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ไมตรี สุทธจิตต์. 2531. สารพิษรอบตัวเรา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ดาวคอมกราฟิค.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2543. ธาตุอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รุจิเรข จันทร์อำไพ. 2546. การกำจัดสังกะสีจากดินปนเปื้อนน้ำมันเครื่องใช้แล้วโดยสารลดแรงตึงผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุภมาศ พณิชศักดิ์พัฒนา. 2545. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์พิษวิทยาโรงพยาบาลรามาธิบดี. โครเมียม. [ออนไลน์]. 2544. แหล่งที่มา: http://www2.ra.mahidol.ac.th/poisoncenter/bulletin/bul%20%2001/v9n4/Chromium.html. [2554 มกราคม 2]

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [สสวท.]. ปัญหามลพิษทางดิน. [ออนไลน์]. 2547. แหล่งที่มา: http://www3.ipst.ac.th/research/assets/web/mahidol/ecology(3)/chapter4/chapter4_soil9.htm. [2554 มกราคม 4]

สุภาพร แป้งทา. 2552. การใช้สับปะรดเป็นตัวชี้วัดความเป็นพิษของโครเมียมและตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Abumaizar, R.J., and Smith, E.H. 1999. Heavy Metal Contaminants Removal by Soil Washing. Journal of Hazardous Materials. 70: 71-86.

Allen V.B. Organic Farming and Gardening guide For Fertilization of Horticultural Crops. [online]. 1999. Available from: http://www-unix.oit.umass.edu/~psoil120/guide/chapter8.html. [1999, March 23]

Andrade, M.D., Prasher, S.O., and Hendershot, W.H. 2007. Optimizing the molarity of a EDTA washing solution for saturated-soil remediation of trace metal contaminated soils. Environmental Pollution. 147: 781-790.

Cheng, K.Y., and Wong, J.W.C. 2006. Combined effect of nonionic surfactant Tween 80 and DOM on the behaviors of PAHs in soil-water system. Chemosphere. 62: 1907-1916.

Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., and Richer, M. 2007. Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications. Journal of Hazardous Materials. 152: 1-31.

Ehsan, S., Prasher, S.O., and Marshall, W.D. 2006. A Washing Procedure to Mobilize Mixed Contaminants from Soil: II. Heavy Metals. J Environ Qual. 35, 2084-2091.

Hong, P.K.A., and Jiang, W. 2004. Factors in the Selection of Chelating Agents for Extraction of Lead from Contaminated Soil: Effectiveness, Selectivity, and Recoverability. American Chemical Society, 421-432.

Jean, L., Bordas, F.C., and Bollinger, J-C. 2007. Chromium and Nickel Mobilization from a Contaminated Soil Using Chelants. Environmental Pollution. 147: 729-736.

Khalkhaliani, D.N., Mesdaghinia, A.R., Mahvi, A.H., Nouri, J., and Vaezi, F. 2006. An Experimental study of Heavy Metal Extraction, Using Various Concentration of EDTA in a Sandy Loam Soils. Pakistan Journal of Biological Sciences. 9(5): 837-842.

Khodadoust, P., Reddy, K.R., and Maturi, K. 2004. Effect of different extraction agents on metal and organic contaminant removal from a field soil. Journal of Hazardous Materials. 117: 15-24.

Lim, T.T., Chui, P.C., and Goh, K.H. 2005. Process Evalution for Optimization of EDTA Use and Recovery for Heavy Metal Removal from a Contaminated Soil. Chemosphere. 58, 1031-1040.

Lim, T.T., Tay, J.H., and Wang J.Y. 2004. Chelating-Agent-Enhanced Heavy Metal Extraction from a Contaminated Acidic Soil. J. Envir. Engrg, 59-66.

Manouchehri, N., Besancon, S., and Bermond, A. 2006. Major and Trace Metal Extraction from Soil by EDTA: Equilibrium and Kinetic Studies. Analytica Chimica Acta. 559: 105–112.

Maryadele, J., et.al. 2001. The Merck Index An Encyclopedia of Chemicals, drugs, andbiolgical. New Jersey: Merck & Co.

Maturi, K., Khodadoust, P., and Reddy, R.M. 2008. Comparison of Extractants for Removal of Lead, Zinc, and Phenanthrene from Manufactured Gas Plant Field Soil. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Wast Management. 12(4): 230-238.

Maturi, K., and Reddy, R. 2008. Extractants for the Removal of Mixed Contaminants from Soils. Soil & Sediment Contamination. 17: 586-608.

Mouton, J., Mercier, G., and Blais, J.F. 2009. Amphoteric Surfactants for PAH and Lead Polluted-Soil Treatment Using Flotation. Water Air Soil Pollut. 197: 381-393.

Moutsatsou, A., Gregou, M., Matsas, D., and Protonotarios, V. 2006. Washing as a Remediation Technology Applicable in Soils Heavily Polluted by Mining-Metallurgical Activities. Chemosphere. 63: 1632-1640.

Muligan, C.N., Yong, R.N., and Gibbs, B.F. 1999. On the Use of Biosurfactants for the Removal of Heavy Metals from Oil-contaminated Soil. Environ. Prog. 18: 50-54.

Oviedo, C., and Rodriguez, J. 2003. EDTA: the chelating agent under environmental scrutiny. Quim. Nova 26: 901–905.

Palma, D.L., and Mecozzi, R. 2007. Heavy metals mobilization from harbour sediments using EDTA and citric acid as chelating agents. Journal of Hazardous Materials. 147: 768-775.

Pichtel, J., and Pichtel, T.M. 2009. Comparison of Solvents for Ex Situ Removal of Chromium and Lead from Contaminated Soil. Environmental Engineering Science. 14(2): 97-104.

Reddy, K.R., Danda, S., and Saichek, R.E. 2004. Complicating Factors of Using Ethylenediamine Tetraacetic Acid to Enhance Electrokinetic Remediation of Multiple Heavy Metals in Clayey Soils. Journal of Environmental Engineering. 130: 11(1357).

Saifullah, M.E., et.al. 2009. EDTA-assisted Pb phytoextraction. Chemosphere. 74: 1279–1291.

Slizovskiy, L.B., Kelsey, J.W., and Hatzinger, P.B. 2010. Surfactant-Facilitate Remediation of Metal-contaminated Soils: Efficacy and Toxicological Consequences to Earthworms. Environmental Toxicology and Chemistry, 112-123.

Sun, B., Zhao, F.J., Lombi, E., and McGrath, S.P. 2001. Leaching of Heavy Metals from Contaminated Soil Using EDTA. Environmental Pollution. 113: 111-120.

Tandy, S., et.al. 2003. Extraction of Heavy Metals from Soils Using Biodegradable Chelating Agents. Environmental Science & Technology. 38: 937-944.

USEPA. 1992. Chromium, Hexavalent (colorimetric). Method 7196A, Washington D.C., USA.

USEPA. 1993. Innovation Site Remediation Technology Soil Washing/Soil Flushing Volume3. Office of Solid Waste and Emergency. Washington D.C., USA.

USEPA. 1994. A Literature Review Summary of Metals Extraction Processes Used to Remove Lead from Soils. Office of Research and Development. Cincinnati, OH, USA.

USEPA. 1996. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. Method. 3052, Washington D.C., USA.

USEPA. 1998. Microwave assisted acid digestion of aqueous samples and extracts. Method 3051A, Washington D.C., USA.

Villa, R.D., Trovo, A.G., and Pupo, N.R.F. 2010. Soil Remediation using a coupled process: Soil Washing with Surfactant Followed by Photo-Fenton Oxidation. Journal of Hazardous Materials. 174: 770-775.

Zhang, W., and Lo, I.M.C. 2006. EDTA-Enhanced Washing for Remediation of Pb- and/or Zn-Contaminated Soils. Journal of Enviromental Engineering. 132(10): 1282-1288.

Zhang, W., Tsang, D.C.W., and Lo, I.M.C. 2007. Removal of Pb and MDF from contaminated soils by EDTA- and SDS-enhanced washing. Chemosphere. 66: 2025-2034.

Zhang, W., Tsang, D.C.W., and Lo, I.M.C. 2008. Removal of Pb by EDTA-washing in the presence of hydrophobic organic contaminants or anionic surfactant. Journal of Hazardous Materials. 155: 433-439.

Zhang, W., et.al. 2010a. Influence of Soil Washing with a Chelator on Subsequent Chemical Immobilization of Heavy Metal in a Contaminated Soil. Journal of Hazardous Materials. 178: 578-587.

Zhang, W., Haung, H., Tan, F., Wang, H., and Qiu, R. 2010b. Influence of EDTA Washing on the Species and mobility of Heavy Metals Residual in Soils. Journal of Hazardous Materials. 173: 369-376.

Zou, Z., et.al. 2009. The study of operating variables in soil washing with EDTA. Environmental Pollution. 157: 229-236.

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
สูตรการคำนวณหาปริมาณสาร

1. การหาปริมาณโครเมียม และตะกั่วทั้งหมดในตัวอย่าง

$$\text{การหาปริมาณโครเมียม และตะกั่วทั้งหมดในตัวอย่าง} = \frac{A \times B}{C \times 1000}$$

A คือ ความเข้มข้นของตะกั่ว และโครเมียมทั้งหมดจากการวัด AAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B คือ ปริมาณสารละลายที่นำไปวิเคราะห์

C คือ น้ำหนักแห้งหรือปริมาณของตัวอย่าง (กรัมหรือลิตร)

2. วิธีคำนวณเปอร์เซ็นต์โลหะหนักที่กำจัดได้

$$\%\ \text{โลหะหนักที่กำจัดได้} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยของโลหะหนักที่ได้จาก AAS}}{\text{ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน}} \times 100$$

3. การคำนวณสารคีเลต

จากสูตร $N_1V_1 = N_2V_2$

N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น

V_1 คือ ปริมาตรสารละลายเข้มข้นตั้งต้น

N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายในดิน

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการเตรียม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การคำนวณค่าใช้จ่าย

กำหนด ให้ความลึกของดินบน (top soil) อยู่ระหว่าง 0-30 เซนติเมตร (คำนวณความลึกของดินบนที่ 17 เซนติเมตร)

ความหนาแน่นของดิน เท่ากับ 1.13 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

1 ไร่ เท่ากับ 1,600 ตารางเมตร

ดิน 1 ไร่ = 1,600 m^2 x 1.13 x 100 g/m^3 x 0.17 m

= 30,370 กก.

สารละลายที่ใช้ล้างดินมีความเข้มข้น เท่ากับ 32 มิลลิโมล ต่อ 1 กิโลกรัมดิน

สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมล ต่อ 1 กิโลกรัมดิน เท่ากับ 12 กรัม

ดังนั้น ดิน 1 ไร่ จะต้องใช้สาร EDTA = 30,730 กก. x 12 ก./กก.

= 368 กก.

4.1 สาร EDTA ในเกรด analytical reagent; (A.R.) ประสิทธิภาพ 99%

สาร EDTA 0.5 กิโลกรัม ราคา = 780 บาท

สาร EDTA 368 กิโลกรัม ราคา = $\frac{368 \times 780}{0.5}$ บาท

เพราะฉะนั้นสาร EDTA เกรด A.R. มีต้นทุนในการบำบัดต่อไร่ = 574,080 บาท

4.2 สาร EDTA ในเกรด commercial ประสิทธิภาพประมาณ 90%

สาร EDTA 1 กิโลกรัม ราคา = 150 บาท

สาร EDTA 368 กิโลกรัม ราคา = $\frac{368 \times 150}{1}$ บาท

เพราะฉะนั้นสาร EDTA เกรด commercial มีต้นทุนในการบำบัดต่อไร่ = 55,200 บาท

4.3 สาร TWEEN 80 ในเกรด analytical reagent; (A.R.) ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

สาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิโมล ต่อ 1 กิโลกรัมดิน เท่ากับ 9.5 มิลลิกรัม

ดังนั้น ดิน 1 ไร่ จะต้องใช้สาร TWEEN 80 = 30,730 กก. x 9.5 มล./กก.

= 292 ลิตร

สาร TWEEN 80 ปริมาตร 0.5 ลิตร ราคา = 635 บาท

สาร TWEEN 80 ปริมาตร 292 ลิตร ราคา = $\frac{292 \times 635}{0.5}$ บาท

เพราะฉะนั้นสาร TWEEN 80 มีต้นทุนในการบำบัดต่อไร่ = 370,840 บาท

4.4 สาร TWEEN 80 ในเกรด analytical reagent; (A.R.) ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

สาร TWEEN 80 ที่ระดับความเข้มข้น 32 มิลลิโมล ต่อ 1 กิโลกรัมดิน เท่ากับ 38 มิลลิกรัม

ดังนั้น ดิน 1 ไร่ จะต้องใช้สาร TWEEN 80 = 30,730 กก. x 38 มล./กก.

= 1,167 ลิตร

สาร TWEEN 80 ปริมาตร 0.5 ลิตร ราคา = 635 บาท

สาร TWEEN 80 ปริมาตร 1,167 ลิตร ราคา = $\frac{1,167 \times 635}{0.5}$ บาท

เพราะฉะนั้นสาร TWEEN 80 มีต้นทุนในการบำบัดต่อไร่ = 1,482,090 บาท

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
ปริมาณตะกั่ว และโครเมียมที่กำจัดได้ ด้วยปัจจัยต่าง ๆ ที่สามารถกำจัดได้มากที่สุด

ตารางที่ ข1 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยสาร EDTA

EDTA (มิลลิโมล)	อัตราเร็วรอบของการเขย่า (rpm)	PH	เวลาการเก็บน้ำ (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่กำจัดได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
32	90	pH 8	15	890.14	892.26	891.86	891.42	72.00
			30	998.41	989.74	1003.54	997.23	80.55
			60	973.44	974.87	975.55	974.63	78.73
			90	1000.91	1002.26	1001.42	1001.53	80.90
			120	1024.48	1022.36	1024.32	1023.72	82.69
			180	1021.86	1023.85	1021.28	1022.33	82.58
			360	1053.65	1052.13	1054.39	1053.39	85.09
			540	1040.36	1042.71	1042.57	1041.88	84.16

ตารางที่ ข2 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยสาร TWEEN 80

TWEEN 80 (มิลลิโมล)	อัตราเร็วรอบของการเขย่า (rpm)	pH	เวลาการเก็บน้ำ (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่กำจัดได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
8	150	pH 2	15	231.76	232.48	233.59	232.61	18.79
			30	240.87	241.69	242.63	241.73	19.53
			60	244.17	246.58	246.05	245.60	19.84
			90	241.64	240.54	240.37	240.85	19.45
			120	241.81	242.89	243.10	242.60	19.60
			180	251.64	250.82	249.13	250.35	20.22
			360	236.53	238.20	238.82	237.85	19.21
			540	243.04	244.34	244.34	243.85	19.7

ตารางที่ ข3 ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยสาร EDTA

EDTA (มิลลิโมล)	อัตราเร็วรอบของการเขย่า (rpm)	pH	เวลาการเก็บน้ำ (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่กำจัดได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
32	120	pH 10	15	164.34	172.56	170.49	169.13	36.26
			30	179.80	180.43	179.02	179.75	38.54
			60	189.91	185.52	178.46	184.63	39.59
			90	183.46	187.23	183.89	184.86	39.64
			120	188.14	183.46	185.29	185.63	39.80
			180	197.72	193.17	187.36	192.75	41.33
			360	186.53	192.63	193.48	190.88	40.93
			540	194.16	195.27	193.71	194.38	41.68

ตารางที่ ข4 ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยสาร TWEEN 80

TWEEN 80 (มิลลิโมล)	อัตราเร็วรอบของการเขย่า (rpm)	pH	เวลาการเก็บน้ำ (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่กำจัดได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
150	32	pH 10	15	45.09	44.18	45.67	44.98	9.64
			30	45.53	46.22	46.19	45.98	9.86
			60	45.36	47.84	45.04	46.08	9.88
			90	46.12	47.08	45.94	46.38	9.94
			120	46.42	47.39	45.63	46.48	9.97
			180	46.97	46.14	46.63	46.58	9.99
			360	46.83	46.24	46.97	46.68	10.01
			540	47.09	46.53	47.02	46.88	10.05

ตารางที่ ข5 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยสารละลายผสมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

EDTA + TWEEN 80 (มิลลิโมล)	อัตราเร็วรอบของการเขย่า (rpm)	pH	เวลาการเก็บน้ำ (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่กำจัดได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
32+8	150	pH 4	15	759.32	762.18	764.35	761.94	61.55
			30	772.16	773.34	773.17	772.89	62.43
			60	774.81	775.65	777.21	775.68	62.66
			90	782.45	782.17	783.6	782.74	63.23
			120	775.19	775.94	775.61	775.58	62.65
			180	756.23	757.48	759.54	757.75	61.21
			360	759.26	761.24	759.05	759.85	61.38
			540	761.84	759.62	760.76	760.74	61.45
32+32	150	pH 4	15	685.37	686.33	683.66	685.12	55.34
			30	706.04	706.87	707.88	706.93	57.1
			60	701.24	708.41	690.20	699.95	56.54
			90	702.84	701.93	701.98	702.25	56.72
			120	700.88	701.64	698.53	700.35	56.57
			180	709.31	710.53	708.42	709.42	57.30
			360	709.72	710.67	709.04	709.81	57.34
			540	711.04	711.48	707.51	710.01	57.35

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข6 ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยสารละลายผสมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

EDTA + TWEEN 80 (มิลลิโมล)	อัตราเร็วรอบของการเขย่า (rpm)	pH	เวลาการเก็บน้ำ (นาที)	ปริมาณโครเมียมที่กำจัดได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
32+8	150	pH 6	15	72.67	73.48	73.48	73.21	15.70
			30	76.18	75.93	73.49	75.20	16.12
			60	74.28	76.16	74.86	75.10	16.10
			90	76.74	77.08	75.98	76.60	16.42
			120	75.24	76.93	75.83	76.00	16.29
			180	76.54	77.26	75.40	76.40	16.38
			360	76.84	76.13	75.63	76.20	16.34
			540	76.49	77.32	76.60	75.99	16.42
32+32	120	pH 6	15	120.48	118.64	118.3	119.14	25.55
			30	127.63	128.91	129.32	128.62	27.58
			60	132.48	131.69	129.19	131.12	28.11
			90	129.31	130.35	129.50	129.72	27.81
			120	131.33	130.28	130.55	130.72	28.03
			180	133.41	132.52	130.43	132.12	28.33
			360	132.83	133.04	131.39	132.42	28.39
			540	132.46	133.62	130.88	132.32	28.37

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข7 ปริมาณตะกั่วและโครเมียมที่กำจัดได้ด้วยการล้างดินด้วย EDTA แล้วตามด้วย TWEEN 80 และ TWEEN 80 แล้วตามด้วย EDTA ที่ปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสม

ล้างก่อน	ล้างหลัง	โลหะหนักที่ต้องการกำจัด	ปริมาณตะกั่วและโครเมียมที่กำจัดได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
EDTA 32 มิลลิโมล	TWEEN 80 8 มิลลิโมล	TPb	1180.24	1171.79	1167.96	1173.33	94.78
		TCr	78.32	79.16	80.81	79.43	17.03
TWEEN 80 8 มิลลิโมล	EDTA 32 มิลลิโมล	TPb	1105.30	1104.87	1109.03	1106.4	89.37
		TCr	73.14	74.32	73.76	73.74	15.81
EDTA 32 มิลลิโมล	TWEEN 80 32 มิลลิโมล	TPb	1024.11	1023.53	1022.53	1023.39	82.67
		TCr	236.93	237.07	236.31	236.77	50.77
TWEEN 80 32 มิลลิโมล	EDTA 32 มิลลิโมล	TPb	998.41	997.48	995.2	997.03	80.54
		TCr	218.82	219.91	220.82	219.85	47.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข8 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยน้ำ DI

อัตราเร็วรอบของการเขย่า (rpm)	30 นาที			60 นาที			120 นาที		
	TPb (mg/Kg)	เฉลี่ย	% การกำจัด	TPb (mg/Kg)	เฉลี่ย	% การกำจัด	TPb (mg/Kg)	เฉลี่ย	% การกำจัด
90	54.76 55.98 54.86	55.20	4.46	60.87 59.39 60.88	60.38	4.88	53.54 53.78 54.17	53.83	4.35
120	49.05 50.64 51.93	50.54	4.08	56.24 57.61 56.07	56.64	4.58	56.35 57.82 58.15	57.44	4.64
150	50.93 51.03 52.96	51.64	4.17	63.19 65.01 62.60	63.60	5.14	65.27 66.84 67.06	66.39	5.36

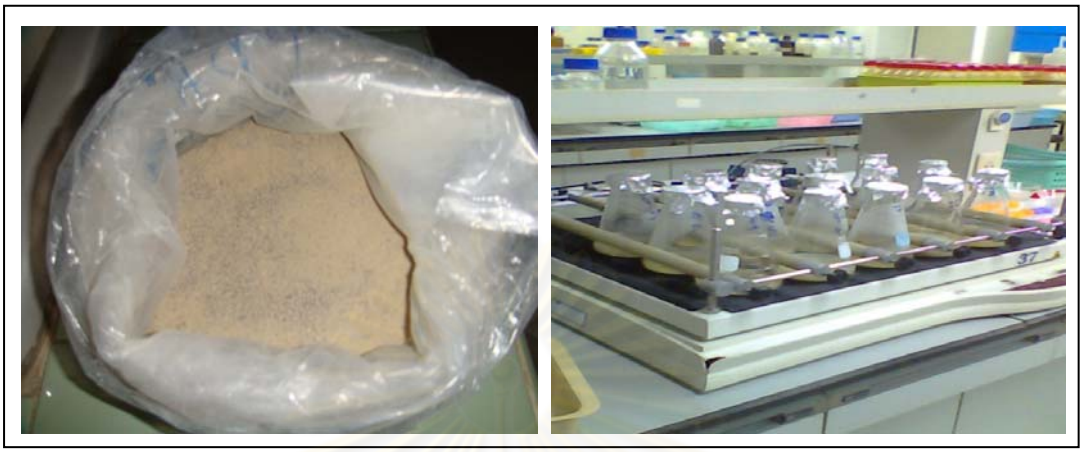
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข9 ปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่กำจัดได้ด้วยน้ำ DI

อัตราเร็วรอบของการเขย่า (rpm)	30 นาที			60 นาที			120 นาที		
	TCr (mg/Kg)	เฉลี่ย	% การกำจัด	TCr (mg/Kg)	เฉลี่ย	% การกำจัด	TCr (mg/Kg)	เฉลี่ย	% การกำจัด
90	0 0 0	0	0	0 0 0	0	0	0 0 0	0	0
120	0 0 0	0	0	4.67 5.37 4.96	5.00	1.07	6.36 6.78 6.03	6.39	1.37
150	0 0 0	0	0	6.86 6.73	6.48	1.39	6.54 6.96 7.14	6.88	1.48

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

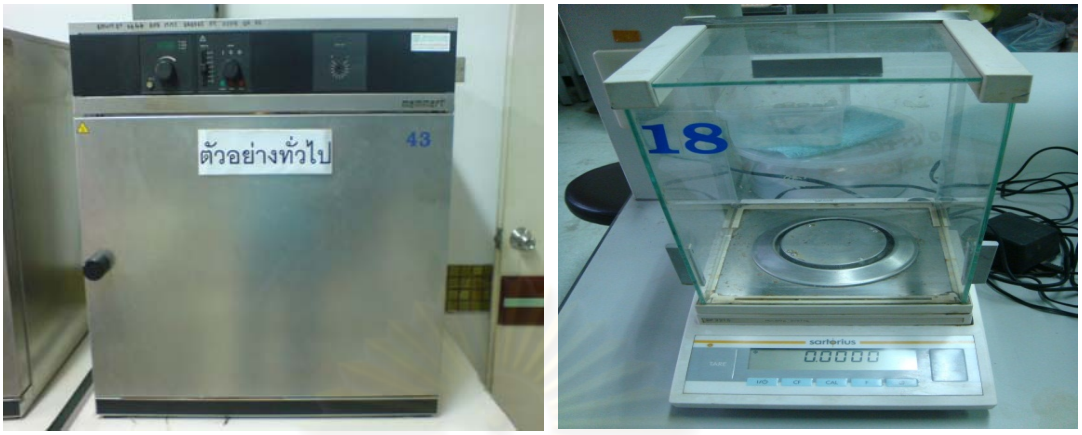
ภาคผนวก ค
รูปแสดงการเตรียมตัวอย่าง และเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ค1 แสดงดินปนเปื้อนตะกั่ว และโครเมียมที่ใช้ทดลองล้างดิน และการเขย่าที่อัตราเร็วรอบต่างๆ

รูปที่ ค2 แสดงการทดลองหาปริมาณตะกั่ว และโครเมียม

รูปที่ ค3 แสดงไมโครปิเปต (micropipette) และเครื่องเขย่า (shaker)



รูปที่ ค4 แสดงตู้อบ (oven) และเครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด (analytical balance)

รูปที่ ค5 แสดงเครื่องย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (microwave digestion)

รูปที่ ค6 เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (atomic absorption spectrometer; AAS)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนวพร เทศทศพร เกิดเมื่อ วันที่ 3 มีนาคม 2529 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ (อัญมณีและเครื่องประดับ) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เมื่อปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และระหว่างการศึกษาได้เข้าร่วมเสนอผลงานวิจัย ในการประชุมวิชาการระดับชาติ โดยได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานดังต่อไปนี้

นวพร เทศทศพร และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. “การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอีดีทีเอ และทวีน 80 ในการล้างดินปนเปื้อนตะกั่ว.” หนังสือประมวลผลการประชุมวิชาการ (Proceeding) ในการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 7 “ก้าวย่างตามพ่อ สานต่อการศึกษา พัฒนาชาติไทย” จัดโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ณ ศูนย์อาคารเรียนรู้ 2 ห้อง LH2-202 วันที่ 7-8 ธันวาคม 2553. 726-733.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย