ผลของอีดีทีเอและอีดีดีเอสต่อการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วโดยใช้สับปะรดที่ปลูกในดินปนเปื้อน

นางสาวทิพวรรณ พจนาภรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF EDTA AND EDDS ON PHYTOEXTRACTION OF CHROMIUM AND LEAD IN CONTAMINATED SOIL USING *Ananas comosus* (L.) Merr.

Miss Tippawan Pojanaporn

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอีดีทีเอและอีดีดีเอสต่อการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วโดยใช้สับปะรดที่ปลูกในดินปนเปื้อน
โดย	นางสาวทิพวรรณ พจนาภรณ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ พัฒนผลไพบูลย์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. เชาวน์ นกอยู่)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทิพวรรณ พจนาภรณ์: ผลของอีดีทีเอและอีดีดีเอสต่อการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วโดยใช้สับปะรดที่ปลูกในดินปนเปื้อน. (EFFECT OF EDTA AND EDDS ON PHYTOEXTRACTION OF CHROMIUM AND LEAD IN CONTAMINATED SOIL USING *Ananas comosus* (L.) Merr. อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 145 หน้า.

การศึกษาผลของสารคีเลตต่อการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วโดยการปลูกสับปะรด (*Ananas comosus* (L.) Merr.) ในดินปนเปื้อน และดูแลรักษาในเรือนเพาะชำประมาณ 30 วัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 7 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารโครเมียม ตะกั่ว และสารคีเลต (Blank) 2) ชุดที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต โดยใช้โพแทสเซียมไดโครเมท ($K_2Cr_2O_7$) ที่ระดับความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน 3) ชุดที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมและสาร EDTA 4) ชุดที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมและสาร EDDS 5) ชุดที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต โดยใช้ตะกั่วไนเตรท ($Pb(NO_3)_2$) ที่ระดับความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน 6) ชุดที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และ 7) ชุดที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วและสาร EDDS โดยเติมสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำการเก็บเกี่ยวพืชทุกๆ 30, 60, 90 และ 120 วัน และวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมด โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ตะกั่วทั้งหมดในดิน และพืช (ส่วนบนดิน และส่วนใต้ดิน) นอกจากนี้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของสับปะรด โดยพิจารณาจากน้ำหนักแห้งของพืช ความยาวราก และการสังเกตความเป็นพิษจากการแสดงอาการของสับปะรด ผลการศึกษาในครั้งนี้ พบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว สาร EDTA ช่วยดูดดึงตะกั่วไปไว้ในส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดินของสับปะรดที่ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว 60 วัน มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 288.14 และ 796.66 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่ใส่สารประกอบโครเมียมพบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA สามารถช่วยดูดดึงโครเมียมไปไว้ในส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดินของสับปะรดที่ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว 90 วัน มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 545.72 และ 2,267.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยสาร EDTA สามารถเพิ่มการสะสมโครเมียม และตะกั่วในส่วนต่างๆ ของสับปะรดได้สูงกว่าสาร EDDS ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสาร EDTA มีประสิทธิภาพดีกว่าสาร EDDS ในการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินได้ นอกจากนี้สารคีเลตทั้ง 2 ชนิด ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโต และการแสดงความเป็นพิษของสับปะรดอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต ทิพวรรณ พจนาภรณ์

ปีการศึกษา 2552 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษา

5087141620 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : EDTA/ EDDS/ Cr/ Pb/ PHYTOREMEDIATION/ *Ananas comosus* (L.) Merr.

TIPPAWAN POJANAPORN: EFFECT OF EDTA AND EDDS ON PHYTOEXTRACTION OF CHROMIUM AND LEAD IN CONTAMINATED SOIL USING *Ananas comosus* (L.) Merr. THESIS ADVISOR: PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D., 145 pp.

The effects of chelating agents on chromium and lead absorption were studied by planting pineapple, *Ananas comosus* (L.) Merr. in contaminated soil. All plant samples were grown in a nursery for 30 days then plant samples were separated into seven sets. Set 1) did not have anything added (Blank), 2) this set had only added chromium, Potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$), at the rate of 400 milligrams per kilogram soil, 3) this set had added Potassium dichromate and Ethylene Diamine Tetraacetic Acid (EDTA),) one of the chelating agents, 4) this set contained both Potassium dichromate and Ethylene Diamine Dissucinate (EDDS), the second chelating agent, 5) this set had only added Lead(II)nitrate ($Pb(NO_3)_2$), at the rate of 500 milligrams per kilogram soil 6) this set was treated with both Lead(II)nitrate and Ethylene Diamine Tetraacetic Acid (EDTA) and 7) this set contained both Lead(II)nitrate and Ethylene Diamine Dissucinate (EDDS). The chelating agent's concentration was 2 millimole per kilogram soil. Soil and plant contamination was determined by analyzing the total chromium (Total Cr), chromium hexavalance (Cr(VI)) and total amount of lead (Total Pb) 30, 60, 90 and 120 days after planting. The analysis divided the plant samples into aboveground and underground parts. Plants were also analyzed by dry weight, root length and expressions of toxicity, withered leaves and yellow leaf symptoms. The results of this study showed that the EDTA agent had the highest lead absorption efficiency with the plant sample absorbing 288.14 milligrams of lead per kilogram in aboveground part, and 796.66 milligrams per kilogram in underground part after 60 days. The EDTA agent also had high chromium absorption efficiency with plant sample absorbing chromium at 545.72 milligrams per kilogram in aboveground part, and 2,267.99 milligrams per kilogram in underground part after 90 days. Moreover, the EDTA agent caused higher chromium and lead accumulation and higher chromium and lead absorption efficiency from contaminated soil than the EDDS agent. The EDTA and EDDS agents did not affect pineapple growth. Expression of toxic symptoms were statistically significant with relationships of 0.05 ($P \leq 0.05$) compared with control sets.

Field of Study : Environmental Science Student's Signature Tippawan Pojanaporn

Academic Year : 2009 Advisor's Signature Pantawat Sampanpanish

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณา ความช่วยเหลือ ความอนุเคราะห์จากบุคคลผู้มีพระคุณหลายๆ ท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ พัฒนผลไพบูลย์ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ และ ดร. เชาวน์ นกอยู่ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นที่มีส่วนสำคัญในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ได้รับทุนจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนบางส่วนในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ (พี่ตุ๊ก พี่จิ๋ม พี่ดำ) สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวก และให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ คุณขวัญ คุณวิเชียร คุณสุธินี ที่ให้ความช่วยเหลือในการออกภาคสนาม ขอขอบคุณ คุณสุภาพร แป้งทา และคุณกมลทิพย์ ดอกปทุม ที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาระหว่างที่ทำการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อประสิทธิ์ คุณแม่สัมหวาน พจนาภรณ์ และบุคคลในครอบครัว ที่ให้กำลังใจ และให้เงินทุนสนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 2

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย..... 3

1.4 ขอบเขตการศึกษา..... 3

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย..... 3

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 โลหะหนัก..... 5

2.1.1 โครเมียม..... 5

1) ลักษณะของโครเมียม..... 5

2) รูปของโครเมียม..... 6

3) แหล่งที่พบ..... 7

4) สมบัติทางเคมี..... 7

5) การนำโครเมียมมาใช้ประโยชน์..... 8

6) โครเมียมในธรรมชาติ..... 8

7) ความเป็นพิษของโครเมียม..... 10

2.1.2 ตะกั่ว..... 12

1) ลักษณะของตะกั่ว..... 12

2) แหล่งที่พบ..... 13

3) สมบัติทางเคมี..... 13

4) การนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์..... 13

5) ตะกั่วในธรรมชาติ..... 15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

6) ความเป็นพิษของตะกั่ว..... 16
2.1.3 การสะสมโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม..... 17
2.3.1.1 การสะสมโลหะหนักในดิน..... 17
2.3.1.2 การสะสมโลหะหนักในพืช..... 18
2.2 การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation)..... 19
2.2.1 ความหมาย..... 19
2.2.2 ประเภทของ phytoremediation..... 20
2.2.3 หลักการทำงานของ phytoremediation..... 24
2.2.4 ข้อดีและข้อจำกัดของ phytoremediation..... 27
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักในดินและพืช..... 29
2.3.1 ชนิดของโลหะหนัก..... 29
2.3.2 รูปทางเคมีของโลหะหนัก..... 29
2.3.3 ชนิดของพืชและส่วนต่างๆ ของพืช..... 29
2.3.4 ลักษณะสมบัติและองค์ประกอบบางอย่างของดิน..... 30
2.3.5 สภาพแวดล้อมต่อความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักของพืช..... 30
2.4 สารคีเลต..... 31
2.4.1 ความหมายของสารคีเลต..... 31
2.4.2 ประเภทของสารคีเลต..... 32
2.4.3 การใช้ประโยชน์สารคีเลต..... 33
2.4.4 การใช้สารคีเลตในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน..... 33
2.4.5 สารคีเลตที่เลือกใช้ในงานวิจัย..... 34
1) อีดีทีเอ (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid)..... 34
1.1) ความเป็นพิษของสาร EDTA..... 35
1.2) การสลายตัวของสาร EDTA..... 35
1.3) สาร EDTA กับการบำบัดโลหะหนักในดิน..... 36
2) อีดีดีเอส (Ethylene Diamine Disuccinate)..... 37
2.1) ความเป็นพิษของสาร EDDS..... 38
2.2) การสลายตัวของสาร EDDS..... 38
2.3) สาร EDDS กับการบำบัดโลหะหนักในดิน..... 39

บทที่ หน้า

2.5 สับปะรด (*Ananas comosus* (L.) Merr.) 40
2.5.1 ลักษณะทางพฤษศาสตร์ของสับปะรด 40
2.5.2 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสับปะรด 42
2.5.3 การเก็บเกี่ยวสับปะรด 43
2.5.4 โรคและแมลง 43
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 44
2.6.1 งานวิจัยด้านการศึกษา Phytoremediation 44
2.6.2 งานวิจัยด้านการใช้สารคีเลต 47
3 วิธีดำเนินการวิจัย 51
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 51
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกพืช 51
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพืช 51
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง 52
3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง 53
3.2 สถานที่ดำเนินการวิจัย 53
3.2.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดิน 53
3.2.2 การศึกษาวิจัยในเรือนเพาะชำ 53
3.3 ระยะเวลาการวิจัย 54
3.4 การดำเนินการวิจัย 55
3.4.1 การเตรียมดินและภาชนะปลูก 56
3.4.2 การเตรียมพืช 57
3.4.3 การเตรียมสารประกอบโครเมียมและตะกั่ว 58
3.4.4 การเตรียมสารคีเลต 58
3.4.5 การดำเนินงานทดลอง 59
3.4.6 การเก็บตัวอย่าง 60
3.4.7 การวิเคราะห์ตัวอย่าง 60
3.4.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 61
4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง 62
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง 62

บทที่ หน้า

4.2 ลักษณะทางกายภาพ เคมี ปริมาณการสะสมโครเมียมและตะกั่วในดินทดลอง..... 64
4.2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC)..... 64
1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินทดลอง..... 65
1.1) ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม..... 66
1.2) ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว..... 66
2) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ในดินทดลอง..... 67
2.1) ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม..... 67
2.2) ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว..... 68
4.2.2 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการสะสมโครเมียมและตะกั่วในดิน.. 70
1) ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการสะสมโครเมียมในดิน…..... 71
2) ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ในดิน..... 71
3) ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการสะสมตะกั่วในดิน..... 73
4.3 ผลของการเติมสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วของสับปะรด..... 74
4.3.1 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมของสับปะรด….. 75
1) ปริมาณการดูดดึงโครเมียมทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรด... 75
2) ปริมาณการดูดดึงโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนเหนือดินของสับปะรด..... 76
3) ปริมาณการดูดดึงโครเมียมทั้งหมดในส่วนใต้ดินของสับปะรด..... 78
4) ปริมาณการดูดดึงโครเมียมเลนท์เฮกซาวาและโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนใต้ดินของสับปะรด..... 79
4.3.2 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงตะกั่วของสับปะรด…..... 81
1) ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรด..... 81
2) ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของสับปะรด..... 82
4.4 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการเจริญเติบโตของสับปะรด..... 84

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

4.4.1 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนต่างๆ ของสับปะรด..... 84
1) ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม..... 85
1.1) น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดินของชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม..... 85
1.2) น้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินของชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม..... 85
2) ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว..... 87
2.1) น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดินของชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว..... 87
2.2) น้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินของชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว..... 88
4.4.2 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของสับปะรด..... 90
1) ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม..... 90
1.1) ความสูงส่วนเหนือดินของชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม.. 90
1.2) ความสูงส่วนใต้ดินของชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม..... 91
2) ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว..... 93
2.1) ความสูงส่วนเหนือดินของชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว..... 93
2.2) ความสูงส่วนใต้ดินของชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว..... 94
4.5 ความสามารถของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วโดยสับปะรด..... 96
4.5.1 ความสามารถของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมโดยสับปะรด..... 96
4.5.2 ความสามารถของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงตะกั่วโดยสับปะรด..... 97
4.6 การคำนวณค่าใช้จ่าย..... 98
4.7 ประสิทธิภาพและสมดุลมวล (Mass Balance) ของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วด้วยสับปะรด..... 100

บทที่ หน้า

4.7.1 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อประสิทธิภาพในการดูดดึงโครเมียมของสับปะรด..... 100
4.7.2 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วของสับปะรด..... 102
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 108
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 108
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 110
รายการอ้างอิง..... 111
ภาคผนวก ก..... 125
ภาคผนวก ข..... 130
ภาคผนวก ค..... 142
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 145

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะของโครเมียม	5
2.2	ลักษณะของตะกั่ว	12
2.3	คุณสมบัติของสาร EDTA	34
2.4	คุณสมบัติของสาร EDDS	37
3.1	วันที่เก็บตัวอย่างดินและพืชในเรือนทดลอง	54
3.2	พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ดินที่นำมาศึกษา	57
3.3	ปริมาณสารประกอบโครเมียมและตะกั่วที่ใส่ลงในดิน	58
3.4	ปริมาณสารคีเลตที่ใส่ลงในดิน	59
4.1	คุณสมบัติเบื้องต้นของดินทดลอง	63
4.2	ชุดการทดลอง 7 ชุดการทดลองที่ทำการศึกษา	64
4.3	ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการปลูกพืช	65
4.4	ค่าความเป็นกรด-ด่างของชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม	67
4.5	ค่าความเป็นกรด-ด่างของชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว	67
4.6	ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ในดิน	73
4.7	แสดงค่าใช้จ่ายในการลงทุน (บาทต่อไร่)	99
4.8	สมดุลมวลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมของสับปะรด	105
4.9	สมดุลมวลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงตะกั่วของสับปะรด	106
4.10	เปรียบเทียบความสามารถของสาร EDTA ในการดูดดึงโลหะหนักของพืชชนิดต่างๆ	107

ตารางผนวก หน้า

ข1	ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดิน.....	130
ข2	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในดิน.....	131
ข3	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ในดิน.....	132
ข4	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน.....	133
ข5	ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรด.....	134
ข6	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในส่วนเหนือดินของสับปะรด.....	135
ข7	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนเหนือดินของสับปะรด.....	136
ข8	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรด.....	137
ข9	ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในส่วนใต้ของสับปะรด.....	138
ข10	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในส่วนใต้ดินของสับปะรด.....	139
ข11	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนใต้ดินของสับปะรด.....	140
ข12	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของสับปะรด.....	141

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการ Phytoremediation.....	19
2.2	ประเภทของ Phytoextraction……....	21
2.3	กลไกการทำงานของ Phytoextraction.....	22
2.4	ประเภทของ Phytoremediation.....	25
2.5	การดูดดึงโครเมียม และตะกั่วเข้าสู่รากพืชโดยกระบวนการ Phytoextraction…	26
2.6	สูตรโครงสร้างสาร EDTA.....	34
2.7	สูตรโครงสร้างสาร EDDS.....	37
2.8	ส่วนประกอบของต้นสับปะรด.....	40
3.1	แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	55
4.1	ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินในชุดการทดลอง ก) ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม และ ข) ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วที่ระยะเวลาต่างๆ	69
4.2	การสะสมโลหะหนักในดินที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง ก) โครเมียม และ ข) ตะกั่ว.....	72
4.3	ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง.....	76
4.4	ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ ในส่วนเหนือดินของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง.....	77
4.5	ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนใต้ดินของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง.....	79
4.6	ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนใต้ดินของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง.....	80
4.7	ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง.....	82

รูปที่ หน้า

4.8 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง..... 84
4.9 น้ำหนักแห้งของสับปะรดในแต่ละชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง ก) ส่วนเหนือดิน ข) ส่วนใต้ดิน..... 87
4.10 น้ำหนักแห้งของสับปะรดในแต่ละชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง ก) ส่วนเหนือดิน ข) ส่วนใต้ดิน..... 89
4.11 ความสูงของสับปะรดในชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง ก) ส่วนเหนือดิน และ ข) ส่วนใต้ดิน..... 92
4.12 ความสูงของสับปะรดในชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง ก) ส่วนเหนือดิน และ ข) ส่วนใต้ดิน..... 95
4.13 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง..... 97
4.14 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง. 98
4.15 ประสิทธิภาพของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง..... 101
4.16 ประสิทธิภาพของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงตะกั่วที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง..... 103

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปประกอบภาคผนวก หน้า

ค1	ก) การเตรียมดิน และ ข) การเตรียมพืชทดลอง.....	142
ค2	การเตรียมภาชนะปลูก และการปลูกพืชลงในภาชนะปลูก.....	142
ค3	การทดลองในโรงเรือนเพาะชำ.....	142
ค4	การเก็บตัวอย่างพืช.....	143
ค5	การวัดความสูง และชั่งน้ำหนักพืช.....	143
ค6	ก) การอบตัวอย่างดิน และ ข) การอบตัวอย่างพืช.....	143
ค7	เครื่องย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion).....	144
ค8	เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (AAS).....	144
ค9	เครื่องยูวี-สเปกโตรโฟโตรมิเตอร์ (UV-Spectrophotometer).....	144

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มของการพัฒนาหรือการขยายตัวที่สูงขึ้น โดยเฉพาะการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมที่มักก่อให้เกิดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ มลพิษทางอากาศ มลพิษทางน้ำ มลพิษทางดิน ขยะ และของเสียอันตราย ซึ่งจากการศึกษาปริมาณของเสียอันตรายที่เกิดจากอุตสาหกรรมทั่วประเทศ พบว่า ในปี 2550 มี ปริมาณของเสียอันตรายรวมทั่วประเทศ 1,558,743.23 ตันต่อปี โดยมีปริมาณของเสียในภาคเหนือ 26,514.57 ตันต่อปี ภาคตะวันออกรวม 1,092,672.97 ตันต่อปี ภาคกลางรวม 415,314.83 ตันต่อปี ภาคตะวันออกเฉียงเหนือรวม 14,691.6 ตันต่อปี และมีปริมาณของเสียรวมในภาคใต้เท่ากับ 6,943.73 ตันต่อปี (ศูนย์บริการข้อมูลสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม, 2551) ดังจะเห็นได้ว่าภาคตะวันออกมีปริมาณของเสียอันตรายสูงที่สุด หรือกล่าวได้ว่ากิจกรรมที่เป็นแหล่งก่อมลพิษด้านต่างๆ มากที่สุดคือ กลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งภาคตะวันออกโดยเฉพาะบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด มีปริมาณกากของเสียอันตรายจากนิคมอุตสาหกรรม และนอกพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมในปริมาณมาก (สำนักโรงงานอุตสาหกรรมรายสาขา 6 กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551) โดยมีการขออนุญาตนำของเสียอันตรายออกนอกโรงงานเฉลี่ยประมาณ 1,046 ตันต่อวัน ทั้งนี้ของเสียอันตรายบางส่วนมีการลักลอบนำไปทิ้งในพื้นที่ว่างเปล่า ริมถนน ริมชายป่า และพื้นที่เกษตรกรรม โดยเฉพาะในพื้นที่ตำบลมาบข่า อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง มีการลักลอบนำสารพิษอุตสาหกรรมไปทิ้ง เช่น ยาหมดอายุ เศษเหล็ก กากตะกรันโลหะจากนิคมอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ในอำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยกรมควบคุมมลพิษได้เข้าไปทำการตรวจสอบพบว่า มีการลักลอบทิ้งของเสียอันตรายจำนวนมากกว่า 50 ตัน ฝังอยู่ใต้ไร่สับปะรด และมันสำปะหลังในบริเวณพื้นที่ดังกล่าวประมาณ 1 ไร่ (ข่าวภูมิภาคสำนักประชาสัมพันธ์เขต 7 จังหวัดระยอง, 2551 และผู้จัดการออนไลน์, 2552) ทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนัก เช่น สังกะสี ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว และโครเมียมในดินของพื้นที่ดังกล่าว ที่สำคัญคือ พื้นที่ดังกล่าวอยู่ใกล้ชุมชน และเป็นพื้นที่ที่ทำการเกษตรกรรม ซึ่งเป็นการทำลายสิ่งแวดล้อม และส่งผลต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียง โดยโลหะหนักเหล่านี้มีความเป็นพิษต่อมนุษย์ พืช และสัตว์ สามารถเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) และสะสมใน

สิ่งมีชีวิต (Bioaccumulation) ดังนั้นปัญหามลพิษทางดินที่เกิดจากการปนเปื้อนของโลหะหนักจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรศึกษา เพื่อหาวิธีการป้องกัน และแก้ไขปัญหาที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540)

ปัจจุบันเทคโนโลยีการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินมีวิธีการบำบัดหลากหลายวิธี เช่น การใช้จุลินทรีย์ในการดูดซึม (ทินพันธุ์ เนตรแพ, 2545) การใช้วิธีการทางเคมี (Chemical Treatment) การใช้วิธีการทางกายภาพ (Physical Treatment) รวมทั้งวิธีการทางชีวภาพ (Biological Treatment) โดยเฉพาะการใช้พืชสีเขียวที่มีชีวิต (Green Plant หรือ Living Plant) หรือที่เรียกว่า การบำบัด และฟื้นฟูการปนเปื้อนด้วยวิธีการใช้พืช (Phytoremediation) ซึ่งเป็นการบำบัด และฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโดยใช้พืชเป็นตัวช่วยในการดูดดึงโลหะหนักไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช (Sampanpanish *et al* , 2006 และ 2007) ซึ่งถือเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจและได้รับความนิยมในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการนี้เป็นการใช้พืชเพื่อแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม และถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากหรือซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายน้อย นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำพืชมาแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักที่ตกค้างในดินร่วมกับการใช้สารคีเลต (Chelating Agent) เพื่อช่วยให้พืชดูดดึงโลหะหนักไว้ในส่วนต่างๆ ได้มากขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้สารคีเลต ได้แก่ สาร EDTA และสาร EDDS ที่ทำการปลูกข้าวโพด และพืชตระกูลถั่วช่วยดูดดึง ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) และแคดเมียม (Cd) ที่ปนเปื้อนในดิน (Luo et al, 2004) และการใช้สารคีเลตช่วยในการดูดดึงโครเมียมและนิเกิลในดินที่ปนเปื้อนร่วมกับการปลูกผักกาดเขียวปลี (Hsiao et al, 2007)

อย่างไรก็ตามภาคตะวันออก เช่น จังหวัดระยอง และชลบุรี มีพื้นที่ทำการเกษตรที่มีการปลูกสับปะรดและมันสำปะหลังเป็นส่วนมาก โดยเฉพาะสับปะรดซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศ และมีความทนทาน สามารถปลูกได้แทบทุกภูมิภาคของประเทศไทย ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จึงคาดว่าสับปะรดจะมีประสิทธิภาพในการดูดดึงโลหะหนักได้ดี ดังนั้นจึงได้เลือกพืชชนิดนี้มาทำการศึกษาถึงความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักออกจากดินร่วมกับการใช้สารคีเลต ช่วยในการดูดดึงโลหะหนักให้เกิดประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถของสาร EDTA และ EDDS ในการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วโดยสับปะรดที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของสาร EDTA และ EDDS ถึงความเป็นพิษต่อการเจริญเติบโตและการสะสมโครเมียม และตะกั่วในสับปะรดส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดิน

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสาร EDTA และ EDDS ต่อการสะสมโครเมียม และตะกั่วในสับปะรด

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การปลูกสับปะรดในดินที่ปนเปื้อนโครเมียม และตะกั่ว คาดว่าสาร EDTA และ EDDS ที่เติมลงในดินจะสามารถช่วยให้พืชศึกษามีความสามารถในการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วได้ดีขึ้น และการเติมสารทั้งสองชนิดจะไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของสับปะรด

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 ดินที่ใช้ในการทดลองได้มาจาก ตำบลมาบข่า อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง

1.4.2 สารที่ทำการศึกษาวิจัย

1) สารละลายมาตฐานตะกั่วไนเตรท ($Pb(NO_3)_2$)

2) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)

3) สารคีเลตที่ใช้ในการทดลอง คือ เอทิลีนไดแอมีนเทตระแอซิตริก (Ethylene Diaminete Traacetic Acid; EDTA) และเอททิลีนไดแอมีนดิสซัคซิเนท (Ethylene Diamine Disuccinate; EDDS)

1.4.3 พืชที่ทำการศึกษาวิจัย คือ สับปะรด พันธุ์ปัตตาเวีย (*Ananas comosus* (L.) Merr.)

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

การบำบัด และฟื้นฟูการปนเปื้อนด้วยการใช้พืช (Phytoremediation) หมายถึง การนำพืชมาใช้ในการบำบัดดิน โคลน กากตะกอน หรือน้ำ ที่เกิดการปนเปื้อนโดยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ซึ่งการบำบัดนี้อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำ และแร่ธาตุอาหารผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืชโดยการเปลี่ยนสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษหรือมีความเป็นพิษลดลง (Environmental Protection Agency, 2000)

สารคีเลต (Chelating Agent) หมายถึง สารอินทรีย์เคมี ซึ่งสามารถรวมกับจุลธาตุอาหารที่มีประจุบวกได้แก่ เหล็ก สังกะสี ทองแดง แมงกานีส และตะกั่ว เป็นต้น ปฏิกิริยาการรวมนี้เรียกว่า chelation จะได้คีเลต โดยสารคีเลตจะล้อมแคตไอออนของธาตุที่เป็นโลหะไม่ให้ประจุลบจากที่อื่นเข้าทำปฏิกิริยาได้ ทำให้จุลธาตุคีเลตนี้ไม่เกิดการตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ของโลหะ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ผลการศึกษาทำให้ทราบความสามารถ และประสิทธิภาพของสารคีเลตในการช่วยดูดดึงโลหะหนักสู่พืช

1.6.2 ได้วิธีการปฏิบัติในการกำจัดโครเมียม และตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินที่ง่าย สะดวก และมีต้นทุนต่ำ

1.6.3 ทราบแนวทางในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโครเมียม และตะกั่ว บริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ตำบลมาบข่า อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง

1.6.4 สามารถนำผลจากการศึกษาไปใช้ได้ในสภาพพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะสูงตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมในช่วง 23-92 จากจำนวนทั้งหมด 105 ธาตุในตารางธาตุจะเป็นโลหะหนัก 68 ธาตุ จากจำนวนธาตุที่เป็นโลหะทั้งหมด 83 ธาตุ โลหะหนักถือว่าเป็นโลหะปริมาณน้อย (Trace Metals) ที่ได้รับความนิยม และให้ความสนใจมากเพื่อการศึกษาวิจัย คือ กลุ่มของโครเมียม (Cr) แมงกานิส (Mn) เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) นิเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) เงิน (Ag) แคดเมียม (Cd) และปรอท (Hg) ซึ่งส่วนมากอยู่ในกลุ่มของธาตุทรานซิชัน (Transition Elements) นอกจากนี้ยังมีธาตุรีเพรสเซ็นเตตีป (Representative Elements) คือ ตะกั่ว (Pb) อาร์เซนิค (As) ซิลิเนียม (Se) และพลวง (Sb) (โสภา พรรณ, 2534) ธาตุโลหะหนักมีจำนวนหลายธาตุในที่นี้จะกล่าวถึง 2 ธาตุ ได้แก่ โครเมียม และตะกั่ว เนื่องจากเป็นธาตุโลหะหนักที่พบการปนเปื้อนบริเวณพื้นที่ที่ทำการศึกษา

2.1.1 **โครเมียม** (Chromium)

1) **ลักษณะของโครเมียม** สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของโครเมียม

คุณสมบัติ	รายละเอียด
เลขอะตอม	24
น้ำหนักอะตอม	51.996 amu
จุดหลอมเหลว	1907 °C
จุดเดือด	2199° C
ความหนาแน่นที่ 20° C	7.19 g/cc
โครงสร้างอิเลคโทรนิก	(Ar) 4s1 $3d^5$
เลขออกซิเดชั่นสามัญ	+2 , +3 และ +6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 °C	23.35 J/(mol·K)
การนำความร้อนที่ 300 K	93.9 W/(m·K)
ความต้านทนไฟฟ้าที่ 20 ^{0}C	125 nΩ·m
ความดันไอที่ 1656 ^{0}C	1 mm
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ 25 °C	4.9 µm/(m·K)
ความแข็ง (Brinell hardness number)	8.5
ความร้องแฝงของการหลอมเหลว	21.0 KJ/mol
ความแข็งโมห์ส	8.5
ความแข็งบริเนล	1120

2) รูปของโครเมียม

Wood and Holliday (1976) กล่าวถึง โครเมียมในธรรมชาติว่าสามารถพบได้ 3 รูปคือ โครเมียม (II) โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 โครเมียม (II) ออกไซด์ (CrO) เป็นเบสิกออกไซด์ (Oxide Basic) โครเมียม (II) เปลี่ยนรูปเป็นโครเมียม (III) ได้ง่ายแม้ทิ้งไว้ในอากาศ

2.2 โครเมียม (III) ออกไซด์ (Cr_2O_3) เป็นแอมโฟเทอริกออกไซด์ (Oxide Amphoteric) สารละลายเกลือโครเมียม (III) เก็บไว้ได้นานโดยไม่เกิดออกซิเดชั่นหรือรีดักชั่น

2.3 โครเมียม (VI) ออกไซด์ (CrO_3) เป็นอะซิดิกออกไซด์ (Oxide Acidic) โครเมียม (VI) ในสารละลายด่างอยู่ในรูปโครเมท (CrO_4^{2-}) มีสีเหลือง และสารละลายกรดจะอยู่ในรูปไดโครเมท ($Cr_2O_7^{2-}$) มีสีส้ม

3) แหล่งที่พบ

Merian (1984) สรุปว่าแหล่งกำเนิดโครเมียมมี 3 แหล่ง คือ

3.1 การระเบิดของภูเขาไฟ (น้อยกว่าร้อยละ 1)

3.2 กระบวนการทางกายภาพ (ประมาณร้อยละ 30) ซึ่งประกอบด้วย การแตกตัวของดินและหิน และจากการชะล้างจากดินและหิน

3.3 จากการกระทำของมนุษย์ (ประมาณร้อยละ 70)

โครเมียมในธรรมชาติ ส่วนใหญ่อยู่ในรูป โครเมียมไตรวาเลนท์ [Cr (III)] แต่กิจกรรมทางอุตสาหกรรมต่างๆ จะมีการปลดปล่อยโครเมียมเฮกซวาเลนท์ [Cr (VI)] ออกมา เช่นเหมืองแร่จะปล่อยโครมไอรอน ($FeO.Cr_2O_3$) และโครไมต์ และจากอุตสาหกรรมเหล็กทนไฟ เป็นต้น

4) สมบัติทางเคมี

4.1) สารประกอบโครเมียมมีเลขออกซิเดชั่นได้หลายค่าที่สำคัญ ได้แก่ +2, +3 และ +6 ในบางกรณีอาจมีเลขออกซิเดชั่น +4 และ +5 ได้ เช่น ในสารประกอบประเภทโครเมียมพีนิล (Chromium Phenyl Compound) และอาจเป็นศูนย์ได้ในสารคาร์โบนิล ($Cr(CO)_6$) สารประกอบของโครเมียมจำนวนมากมีสี และสีเข้ม เช่น โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) มีสีเขียว โครเมียมซัลเฟต ($Cr_2(SO_4)_3$) มีสีม่วงแดง โครเมียมไตรฟลูออรีน ($CrF_3.4H_2O$) หรือ ($CrF_3.9H_2O$) มีสีเขียว เป็นต้น

4.2) โลหะโครเมียมอยู่ในรูปที่ว่องไว ทำปฏิกิริยาทันทีกับกรดอนินทรีย์เจือจางทั่วไปเกิดสารละลายสีน้ำเงินที่มีโครเมียม (II) อยู่ด้วย พร้อมกับให้แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ออกมาอิออนโครเมียม (Cr^{+2}) ในสารละลายดูดออกซิเจน (O_2) จากอากาศอย่างรวดเร็ว เปลี่ยนไปเป็นโครเมียม (Cr^{+3}) ที่มีสีเขียว

4.3) โลหะโครเมียมทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ เช่น กรดไนตริก กรดฟอสฟอริก กรดคลอริก และกรดเปอร์คลอริก จะเกิดออกไซด์ชั้นบาง ๆ เคลือบที่ผิว ทำให้โลหะที่อยู่ข้างในไม่สามารถถูก

ออกซิไดซ์หรือทำปฏิกิริยาต่อไป จึงไม่สามารถทำปฏิกิริยากับกรดอ่อนทั่วไป เรียกโครเมียมที่มีออกไซด์ของโครเมียมเคลือบอยู่ว่าอยู่ในรูป Passive ซึ่งสามารถต่อต้านการผุกร่อนได้เป็นอย่างดี

4.4) โครเมียมสามารถเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชัน (Coordination) หรือสารเชิงซ้อน (Complex Compound) ที่มีเลขโคออดิเนชัน 6 เช่น ไตรโครเมียมแอมโมเนีย $Cr_3(NH_3)_6$ โครเมียมโมโนไฮเดรต $(Cr(H_2O)_6)^{3+}$ และโครเมียมไฮเดรตโมโนคาร์บอน $(Cr(H_2O)_4C_{l2})^{+}$ เป็นต้น

5) การนำโครเมียมมาใช้ประโยชน์

โครเมียมถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก รงควัตถุ สีทา สีย้อม สารยืดอายุไม้ และสารป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ การชุบโครเมียม การฟอกหนัง การผลิตเตาเผาความร้อนสูง การเคลือบผิวโลหะ การผลิตอัลลอยด์ และเครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น

6) โครเมียมในธรรมชาติ

6.1) โครเมียมในบรรยากาศ

ในบรรยากาศนั้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จะเกิดรีดักชันมากกว่าออกซิเดชันเนื่องจากสารรีดิวซ์ในบรรยากาศ เช่น วาเนเดียมไอออน (V^{2+}), เฟอรัสไอออน (Fe^{2+}), ไฮโดรเจนซลไฟด์ (H_2S), ไฮโดรเจนซัลไฟต์ไอออน (HSO^3), ไนโตรไดออกไซด์ (NO^{2-}), สารอินทรีย์ และค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งในการศึกษาทั้งทางทฤษฎีของ Seigneur และ Constantinou, 1995 และการปฏิบัติของ Grohse, 1988 พบว่า โครเมียมเฮกซาวาเลนท์สามารถเกิดรีดักชันอย่างรวดเร็วในบรรยากาศ โดยมีการประเมินค่าครึ่งชีวิตในบรรยากาศของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ กลายเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ อยู่ในช่วงระหว่าง 16 ชั่วโมง ถึง 4.8 วัน (USEPA,1984) อย่างไรก็ตามโครเมียมไตรวาเลนท์ สามารถเปลี่ยนเป็นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ได้ในบรรยากาศโดยสารออกซิไดซ์ เช่น โอโซน ที่อยู่ในบรรยากาศ (WHO, 1988)

6.2) โครเมียมในน้ำ

ในแหล่งน้ำการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ สามารถพบได้ภายใต้สภาวะที่หลากหลายโดยสารรีดิวซ์ที่สำคัญที่พบในน้ำ คือ สารอินทรีย์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซัลเฟอร์ (S), เหล็กซัลไฟด์ (FeS_2), แอมโมเนีย (NH_3) และไนเตรท (NO^{3-}) (Bodek, 1988) โดยสภาวะการเกิดรีดักชันของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด Kaczynski และ Kieber, 1994 ได้ทำการศึกษาการเกิดออกซิเดชันของโครเมียมไตรวาเลนท์ โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ในน้ำธรรมชาติและในตะกอน โดยพบว่า โครเมียมดังกล่าวมีค่าครึ่งชีวิตอยู่ในช่วง 2-9 ปี

6.3) โครเมียมในดิน

ดินที่ปนเปื้อนโครเมียมเกิดจากการตกตะกอนของโครเมียมในบรรยากาศ หรือเกิดจากการฝังกลบของเสียที่มีการปนเปื้อนโครเมียม โครเมียมในดินสามารถเกิดการออกซิเดชัน รีดักชัน การดูดซับ (Sorption) การตกตะกอน (Sedimentation) และการละลายคืนได้ (Dissolution) ได้(Barceloux, 1999) สารออกซิไดซ์ที่พบในดิน ได้แก่ ออกซิเจน (O_2) และ แมงกานีสเปอร์ออกไซด์(MnO_2) สามารถออกซิไดซ์โครเมียมไตรวาเลนท์ไปเป็นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ได้ดี (Cary et. al, 1982) ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซวาเลนท์ ในดินที่มีมากจะคงอยู่ได้นานหลายปี (Baron, 1996) Bloomfield และ Pruden (1980) ทำการศึกษาและวิจัย พบว่า การเกิดรีดักชันของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จะเกิดภายใต้สภาวะขาดออกซิเจน และเกิดขึ้นในดินที่ประกอบไปด้วยพืชที่ยังไม่ย่อยสลาย ซึ่งในการศึกษาประสิทธิภาพการเกิดรีดักชันในดิน พบว่า สามารถเกิดขึ้นได้ดีในดินที่มีค่าพีเอช (pH) ต่ำ และดินชั้นล่างจะเกิดรีดักชันได้น้อยแต่จะดูดซับโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ได้ดีกว่าดินชั้นบนที่มีค่า pH เดียวกัน (Saleh, 1989) ซึ่งมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และเกษตรกรรมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ต้องไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจาก การอยู่อาศัยและเกษตรกรรมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ต้องไม่เกิน 640 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2547)

6.4) โครเมียมในสิ่งมีชีวิต

6.4.1) พืช

เมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของพืชบนดินที่มีปริมาณโครเมียมสูงกับดินปกติ พบว่า โครเมียมจะสะสมที่บริเวณราก และมีเพียงส่วนน้อยที่จะสะสมอยู่ตามลำต้นเหนือพื้นดิน (WHO, 1988) และจากการศึกษาของ Smith (1989) พบว่า ในใบไม้จะมีปริมาณโครเมียม สูงกว่าเนื้อไม้หรือเมล็ด โดยในสภาวะที่มีโครเมียม ดินที่มีค่าพีเอช (pH) เป็นเบสหรือกลางสามารถทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดีกว่าดินที่มีค่าพีเอช (pH) เป็นกรด

6.4.2) สัตว์น้ำ

จากการศึกษาของ Elwood (1980) พบว่า โครเมียมเข้าสู่ปลาผ่านทางห่วงโซ่อาหารได้ อย่างไรก็ดี Knoll และ Fromm, (1960) และ Buhler, (1977) ได้ค้นพบว่า โครเมียมสามารถซึมผ่านเหงือกของปลา และสะสมตัวอย่างรวดเร็วที่บริเวณอวัยวะต่าง ๆ ในขณะที่ Arillo และ Melodia (1990) พบว่า ผิวของปลาจะมีเมือกที่ประกอบด้วยโมเลกุลกลุ่มโปรตีน (Protien-Bound Sulfhydryl Group) ซึ่งสามารถลดปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ได้โดยไม่ต้องใช้เอนไซม์

7) ความเป็นพิษของโครเมียม

7.1) พิษต่อพืชน้ำ

โครเมียมมีพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำในระดับต่ำ และภายใต้บรรยากาศส่วนใหญ่นั้น พบว่า ปรอท แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว นิเกิล และสังกะสี มีพิษมากกว่าโครเมียม แม้ว่าจะมีระดับปฏิกิริยาที่มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชถึง 0.5-5 มิลลิกรัมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ต่อลิตร แต่โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ก็มีส่วนช่วยในการเจริญเติบโตของพืชน้ำบางชนิดได้ ซึ่งความเป็นพิษต่อพืชของโครเมียมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ค่า pH และชนิดของโลหะหนักชนิดอื่นๆ

7.2) พิษต่อสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง

พิษแบบเฉียบพลันของโครเมียมต่อสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในน้ำจืด จากการศึกษาของ Rehwoldt et al. (1973) พบว่า ในเวลา 90 ชั่วโมง LC_{50} ของโครเมียมไตรวาเลนท์ ในสัตว์ 7 ชนิด มีค่าระหว่าง 3-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ มีค่าระหว่าง 0.1-20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในน้ำทะเลโครเมียมจะมีพิษน้อย เนื่องจากมีการยับยั้งโดย Cation ส่วนพิษแบบเรื้อรังของโครเมียมจะทำให้มีอาการมึนงง ยับยั้งการเจริญเติบโต ทำให้ขนาดของร่างกายเล็กลง และอาจทำให้อัตราการเจริญพันธุ์ และการรอดชีวิตของรุ่นลูกหลานลดลง

7.3) พิษต่อปลา

จากการศึกษาของ Pickering และ Henderson (1966) พบว่า ปลาจะมีโอกาสในการรับพิษของโครเมียมน้อยกว่าสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง โดยพบว่า ในเวลา 90 ชั่วโมง LC_{50} ของโครเมียมไตรวาเลนท์ และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำจืดมีค่าระหว่าง 3.5-118 มิลลิกรัมต่อลิตร สาเหตุที่มีความแตกต่างมากเนื่องจากการตอบสนองของสัตว์แต่ละชนิด นอกจากนี้ค่า pH ของน้ำและขนาดของตัวปลาก็มีผลต่อความเป็นพิษด้วย โดย Van der Putte et al. (1981) พบว่า LC_{50} ของปลา Rainbow Trout ลดลงจาก 53 เป็น 16 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อค่า pH ลดลงจาก 7.8 เป็น 6.5 และความเป็นพิษจะเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า เมื่อน้ำหนักของปลาลดลงจาก 13 เป็น 0.1 กรัม นอกจากนี้อุณหภูมิก็มีผลต่อการรับพิษของปลาเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของปลาด้วย

7.4) พิษต่อมนุษย์

โครเมียมจะไม่ก่อให้เกิดพิษเฉียบพลันต่อมนุษย์ เนื่องจากโครเมียมในธรรมชาติมีความคงตัวสูง โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ มีความเป็นพิษสูงกว่าโครเมียมไตรวาเลนท์ เนื่องจากเป็นสารก่อให้เกิดการระคายเคือง และมีฤทธิ์กัดกร่อน สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้โดยทางเดินอาหาร ผิวหนัง และทางเดินหายใจ ผู้ที่ประกอบอาชีพที่ต้องสูดควันของกรดโครมิค (CrO_3) หรือฝุ่นโครเมียมเข้าสู่ร่างกายเป็นประจำอาจทำให้ผนังจมูกถูกทำลายเป็นรู ทะลุ หรืออาจเป็นมะเร็งปอดได้ ในสภาพธรรมชาติโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ จะถูกรีดิวซ์ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ ซึ่งจะช่วยลดความเป็นพิษของ

โครเมียมที่ระบายทิ้งออกมา จากการศึกษาของ Lofroth และ Ames (1978) พบว่า โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ มีคุณสมบัติก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม (Mutagenic) ส่วนอันตรายที่เกิดจากโครเมียมไตรวาเลนท์ ยังไม่มีผลการสรุปที่แน่นอน (Akatsuka and Fairhal, 1934)

2.1.2 ตะกั่ว (Lead)

1) ลักษณะของตะกั่ว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของตะกั่ว

คุณสมบัติ	รายละเอียด
เลขอะตอม	82
น้ำหนักอะตอม	207.19 amu
จุดหลอมเหลว	327 ^{0}C
จุดเดือด	1749 ^{0}C
ความหนาแน่นที่ 20 ^{0}C	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 25^{0}C	26.650 J/(mol·K)
การนำความร้อนที่ 300 K	35.3 W/(m·K)
ความต้านทนไฟฟ้าที่ 20 ^{0}C	208 nΩ·m
ความดันไอที่ 987 ^{0}C	1 mm
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ 25^{0}C	28.9 μm/(m·K)
ความแข็ง (Brinell hardness number)	4.2
ความร้องแฝงของการหลอมเหลว	4.77 KJ/mol
ความแข็งโมห์ส	1.5
ความแข็งบริเนล	38.3 MPa

2) แหล่งที่พบ

ในธรรมชาติตะกั่วมีแหล่งกำเนิดจากหินอัคนี และหินแปร มีประมาณ 10-20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Hawley, 1977) ในหินปูน หินทราย หินดินดาน และดิน มีประมาณ 5-10, 10-40, 20 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และที่พบมากคือ หินฟอสเฟต ซึ่งมีปริมาณมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Sheldon et al.,1953) ตะกั่วในธรรมชาติมักจะพบในรูปของตะกั่วซัลไฟด์ ตะกั่วซัลเฟต ตะกั่วที่พบในเปลือกโลกทั้งหมดจะอยู่ในรูปของแร่ที่สำคัญ ได้แก่ กาลีนา (Galena; (PbS)) เซอรัสไซต์ (Cerussite; ($PbCO_3$) แองกลีไซต์ (Anglesite; ($PbSO_4$)) ไพโรมอร์ไฟท์ (Pyromophite; ($Pb_3Cl(PO_4)_3$)) มิเนียม (Minium) และโครโคไอท์ (Crocite; ($PbCrO_4$)) (Reilly, 1980) หรืออาจพบตะกั่วรวมอยู่กับโลหะอื่นๆ เช่น ทองแดง สังกะสี เงิน และแคดเมียม เป็นต้น

3) สมบัติทางเคมี

ตะกั่วเป็นธาตุที่มีการนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลายเป็นโลหะหนักที่พบได้ในแหล่งแร่ธรรมชาติหลายชนิดที่สำคัญที่สุดได้แก่ กาลีนา, แองกลีไซต์ และเซอรัสไซต์ (David, 1985) ตะกั่วบริสุทธิ์มีสีเทาอมฟ้า (Silvergray) มีความทนทานต่อการกัดกร่อน ตะกั่วเป็นโลหะที่ขยายตัวมากเมื่อได้รับความร้อนและสามารถผสมเข้ากับโลหะต่างๆ ได้ดี รวมทั้งการทำปฏิกิริยาทางเคมีเกิดเป็นเกลือของตะกั่วต่างๆได้ ตะกั่วมีอยู่ทั้งในรูปของตะกั่วอนินทรีย์ ซึ่งมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +4 และรูปของตะกั่วอินทรีย์ ซึ่งจะมีพันธะ Pb-C ตั้งแต่ 1-4 พันธะ (Hutchinson และ Meema, 1987) สารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่วโดยทั่วไปละลายน้ำได้ไม่ดี ยกเว้นพวกสารประกอบไนเตรตคลอไรท์ ($No^{3-}Cl$) คลอไรด์ (Cl) และพวกที่อยู่ในรูปของเกลือกับกรดอินทรีย์ เช่น ตะกั่วออกซาเลท (Pb_2O_4) (David, 1985) ละลายได้ดีในกรดไนตริกเจือจางละลายได้อย่างช้าๆ ในน้ำที่เป็นกรดอย่างอ่อนนำไฟฟ้าไม่ดี แต่ดูดเสียง และคลื่นสั่นสะเทือนได้ดี (WHO, 1977)

4) การนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์

การนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ 3 ลักษณะ คือ (Krenkel, 1973)

4.1) ตะกั่วโลหะมีคุณสมบัติที่คงทนต่อการผุกร่อน (Resistance to Corrosion) และอ่อนตัว หลอมเหลวง่ายสามารถป้องกันการแผ่รังสี จึงใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การหล่อตัวพิมพ์ หุ้มสายเคเบิล สายไฟฟ้า สายโทรศัพท์ หัวกระสุนปืน ชุบเคลือบโลหะอื่นเพื่อป้องกันสนิม เชื่อมบัดกรี อุปกรณ์ป้องกันรังสีจากเครื่องเอกซเรย์ เครื่องปฏิกรณ์พลังงานปรมาณู และนำไปทำโลหะผสมต่างๆ เป็นต้น

4.2) ตะกั่วอนินทรีย์ เกลือของตะกั่วหลายชนิดได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ตะกั่วกระจัดกระจายโดยทั่วไป เนื่องจากจำนวนที่ใช้อยู่เป็นจำนวนมาก

4.2.1) ตะกั่วออกไซด์ (Lead Oxide) เช่น ตะกั่วมอนอกไซด์ (Lead Monoxide: PbO) ตะกั่วแดง (Red Lead: Pb_3O_4) และตะกั่วไดออกไซด์ (Lead Dioxide: PbO_2) ซึ่งนำมาใช้ในอุตสาหกรรมแบตเตอรี สีกันสนิม แก้วคริสตัล ยาง และเครื่องเคลือบ เป็นต้น

4.2.2) ตะกั่วคาร์บอเนต (Lead Carbonate: $PbCO_3$) ตะกั่วซัลเฟต (Lead Sulfate: $PbSO_4$) และตะกั่วโครเมต (Lead Chromate: $PbCrO_4$) ใช้ในอุตสาหกรรมสี ผสมในฝุ่นสีขาว สีน้ำมัน หมึกพิมพ์ และสีพลาสติก เป็นต้น

4.2.3) ตะกั่วแอซีเทรต (Lead Acetate: $Pb(CH_3COO)_2$) เป็นเกลือของตะกั่วที่ละลายน้ำได้ดี ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และครีมใส่ผม เป็นต้น

4.2.4) ตะกั่วไนเทรต (Lead Nitrate: $Pb(NO_3)_2$) ใช้ในอุตสาหกรรมยาง และพลาสติก เป็นต้น

4.2.5) ตะกั่วแอซีเนต (Lead Arsenate: $PbO.As_2O_5$) ใช้ในทางอุตสาหกรรมผลิตยาฆ่าแมลง และยาปราบศัตรูพืช เป็นต้น

4.2.6) ตะกั่วซิลิเกต (Lead Silicate: $PbSiO_3$) ใช้ผสมในกระเบื้อง เครื่องเคลือบเซรามิกเพื่อให้เกิดความเงางาม และมีผิวเรียบ

4.3) ตะกั่วอินทรีย์ ได้แก่ ตะกั่วสเตียเรต (Lead Stearate: $Pb(C_{10}H35O_2)_2$) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแลคเกอร์ น้ำมันหล่อลื่น และจารบี เป็นต้น

5) ตะกั่วในธรรมชาติ

5.1) ตะกั่วในบรรยากาศ

ตะกั่วในบรรยากาศเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง การปะทุของภูเขาไฟ การทดลองระเบิดนิวเคลียล์ การสลายตัวของสารกัมมันตภาพรังสี เป็นต้น ในอากาศจะพบตะกั่วในรูปของ Particulate ตะกั่วในอากาศตกลงมายังผิวโลก 1-2 ไมโครกรัมต่อปีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Committee on Biological Effects of Amospheric Pollutant, 1972) ส่วนตะกั่วที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีตะกั่วผสมอยู่ และตะกั่วที่ถูกปล่อยจากรถยนต์ส่วนใหญ่มีขนาด 0.2-0.4 ไมครอน จัดเป็นขนาดของฝุ่นละอองที่ผ่านเข้าสู่ถุงลมในปอด และผ่านสู่กระแสเลือดได้ (ฝุ่นขนาดเล็กกว่า 0.75 ไมครอน สามารถผ่านเข้าสู่ถุงลมในปอดได้) ซึ่งฝุ่นเหล่านี้ 25% ยังคงแพร่กระจายอยู่ในอากาศ และถูกพัดพาไปตามกระแสลม อีก 75% จะเปลี่ยนไปเป็นออกไซด์หรือคาร์บอเนต และรวมตัวเป็นฝุ่นขนาดใหญ่ ซึ่งจะตกลงสู่เบื้องล่างเป็นเหตุให้ดิน และน้ำบริเวณใกล้เคียงกับถนนมีตะกั่วปนเปื้อนอยู่มาก

5.2) ตะกั่วในน้ำ

แหล่งน้ำโดยส่วนใหญ่พบปริมาณตะกั่วเพียงเล็กน้อย หากแต่บริเวณแหล่งเกษตรกรรม ชุมชน และแหล่งอุตสาหกรรมจะพบปริมาณตะกั่วสูงขึ้น โดยมาตรฐานน้ำบริโภคกำหนดปริมาณตะกั่วให้มีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 นักสมุทรศาสตร์ได้ทำการศึกษาการแพร่กระจายของตะกั่วในมหาสมุทร พบว่า น้ำในชั้นผิวดินมีปริมาณตะกั่วเจือปนมากกว่าน้ำในระดับลึก (ยุพดี, 2540)

5.3) ตะกั่วในดิน

ปริมาณตะกั่วในดินธรรมชาติ มีอยู่ประมาณ 2-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เฉลี่ยประมาณ 10-50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (National Acdemy of Science,1972) ตะกั่วส่วนมากจะสะสมอยู่บนผิวหน้าของดิน (หรือลึกลงไปในกรณีของพื้นที่เพาะปลูก) ตะกั่วที่สะสมบนผิวดินจะถูกกินโดยสัตว์กินหญ้าหรือจุลินทรีย์ในดิน และเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ทำให้คนได้รับสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้ (Hutchinson และ Meema, 1987) ซึ่งมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และเกษตรกรรมตะกั่วต้องไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมตะกั่วต้องไม่เกิน 750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2547)

6) ความเป็นพิษของตะกั่ว

6.1) พิษต่อพืช

ตะกั่วเข้าสู่พืช ได้ 2 ทาง คือ ทางราก และใบ โดยเมื่อตะกั่วเข้าสู่พืชแล้วจะสะสมอยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์ ไมโตรครอนเดรีย (Mitochondria) และคลอโรพลาสต์ (Chloroplast) ระดับปกติของตะกั่วในพืช คือ 0.5 - 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ระดับความเป็นพิษจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และพืช (Goodbold และ Huttermann, 1986) ตะกั่วในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำได้เล็กน้อย พืชสามารถดูดดึงตะกั่วได้น้อยเมื่อเทียบกับโลหะหนักชนิดอื่น เช่น แคดเมียม และนิเกิล จึงไม่ค่อยปรากฏความเป็นพิษของตะกั่วสู่พืช โดยพืชบางชนิดมีความสามารถในการสะสมตะกั่วในปริมาณที่สูง

6.2) พิษต่อสัตว์

สัตว์น้ำจะได้รับตะกั่วผ่านทางผิวหนัง เหงือก ทางเดินอาหาร โดยสารประกอบตะกั่วอินทรีย์มีความเป็นพิษสูงกว่าสารประกอบตะกั่วอนินทรีย์ ซึ่งความเป็นพิษจะเพิ่มขึ้นตามลำดับของการเกิด Alkylation (Chau และคณะ, 1980) ความกระด้างของน้ำมีผลต่อความเป็นพิษของสารประกอบ

อนินทรีย์ของตะกั่ว คือ ถ้าความกระด้างของน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้พิษตะกั่วลดลง เนื่องจากในน้ำมีแคลเซียม และแมกนีเซียมมาก ส่วนในสัตว์บก พบว่า ถ้าตะกั่วในดินสูง สัตว์จะมีการสะสมตะกั่วในร่างกายในปริมาณเพิ่มขึ้น เช่น ไส้เดือน และหนู เป็นต้น

6.3) พิษต่อมนุษย์

ตะกั่วจากสิ่งแวดล้อมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง ได้แก่ ระบบทางเดินหายใจ ทางผิวหนัง และระบบทางเดินอาหาร โดยอาการแพ้พิษของตะกั่ว สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประการ คือ

6.3.1) การแพ้พิษตะกั่วชนิดเฉียบพลัน มักจะเกิดจากการบริโภคสิ่งของหรืออาหารที่มีสารตะกั่วเจือปนอยู่ในปริมาณมากหรือร่างกายได้รับเข้าไปในปริมาณมากทันทีทันใด โดยถ้าเป็นตะกั่วชนิดอนินทรีย์จะมีอาการกระหายน้ำ ปวดแสบปวดร้อนในท้องอาเจียน ท้องร่วง ท้องผูก อุจจาระดำ อาจตายภายใน 2-3 วัน สำหรับการแพ้พิษตะกั่วอินทรีย์ ส่วนมาก จะมีอาการทางประสาท เช่น หงุดหงิด คลุ้มคลั่ง เกิดความสับสน ในที่สุดอาจถึงตายได้

6.3.2) การแพ้พิษตะกั่วชนิดเรื้อรัง มักจะเกิดในกรณีที่ได้รับสารตะกั่วหรือสารประกอบของตะกั่วเข้าไปทีละน้อย แต่มากกว่าที่ร่างกายจะสามารถขับถ่ายออกไปได้จึงเกิดการสะสมอยู่ในร่างกายจนมีอาการเกิดขึ้น โดยอาการที่พบ คือ ปวดท้องอย่างรุนแรง ท้องผูก ข้อมือนิ้วมือเป็นอัมพาต กล้ามเนื้อไม่มีกำลัง เส้นเลือดแดงแข็งตัว ปวดศีรษะ อ่อนเพลีย เกิดโลหิตจางเนื่องจากตะกั่วขัดขวางการสร้างฮีโมโกบินของเม็ดเลือดแดง และในบางรายอาจมีอาการทางจิต ซึมเศร้า ร่วมด้วย

2.1.3 การสะสมโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม

2.1.3.1 การสะสมโลหะหนักในดิน

โดยปกติผิวโลกจะมีโลหะหนักสะสมอยู่บริเวณหนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการผุพังและสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิดดิน ความเข้มข้นของโลหะหนักในเปลือกโลก และในดินมีค่าผันแปร ได้ตามลักษณะของวัตถุต้นกำเนิด ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน เนื้อดิน และระดับความลึกของดินเป็นสำคัญ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีการเคลื่อนย้ายได้น้อย เนื่องจากมีความสามารถในการยึดเกาะอยู่ในส่วนที่เป็น

อนุภาคดินเหนียว (Clay Fraction) ได้ดี ดังนั้นดินที่เป็นดินเหนียวจึงมีโลหะหนักอยู่ในรูปที่ดูดดึงได้ง่าย (Available Form) ในสารละลายดินน้อยกว่าดินที่เป็นดินทรายซึ่งมีส่วนที่เป็น Clay Fraction น้อย โลหะหนักส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปของสารละลายดินของดินทรายมากกว่าดินเหนียว (Diaz and Polo, 1988) หากเปรียบเทียบความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะหนัก พบว่า โลหะหนักที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย คือ นิเกิล แคดเมียม และสังกะสี โลหะหนักที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ปานกลาง คือ ทองแดง ส่วนโลหะหนักที่เคลื่อนย้ายได้น้อย หรือไม่เคลื่อนย้ายเลย คือ ตะกั่ว ปรอท และโครเมียม อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของโลหะหนักอาจแปรผันตามความลึกของดิน เช่น น้ำที่ชะผ่านดินอาจทำให้โลหะหนักที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย เช่น สังกะสี และแคดเมียม เคลื่อนย้ายไปบริเวณอื่นทำให้ความเข้มข้นของสังกะสี และแคดเมียมลดลงตามความลึกของดิน แต่น้ำที่ชะผ่านดินจะไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตะกั่ว และโครเมียมตามความลึกของดิน เพราะตะกั่ว และโครเมียมเป็นโลหะหนักที่เคลื่อนย้ายได้น้อยมาก (Gillies et al., 1989) และจากการศึกษาของ Mohr (1979) โดยทำการศึกษาปริมาณของตะกั่ว แคดเมียม นิเกิล โครเมียม และปรอท ในดินที่ใส่ปุ๋ยหมักจากมูลฝอยชุมชน พบว่า ในดินบนจะเกิดการสะสมของโลหะหนักดังกล่าวมากที่สุด ขณะที่ปริมาณของนิเกิล และโครเมียมไม่เพิ่มขึ้นหรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วนปริมาณของปรอทไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

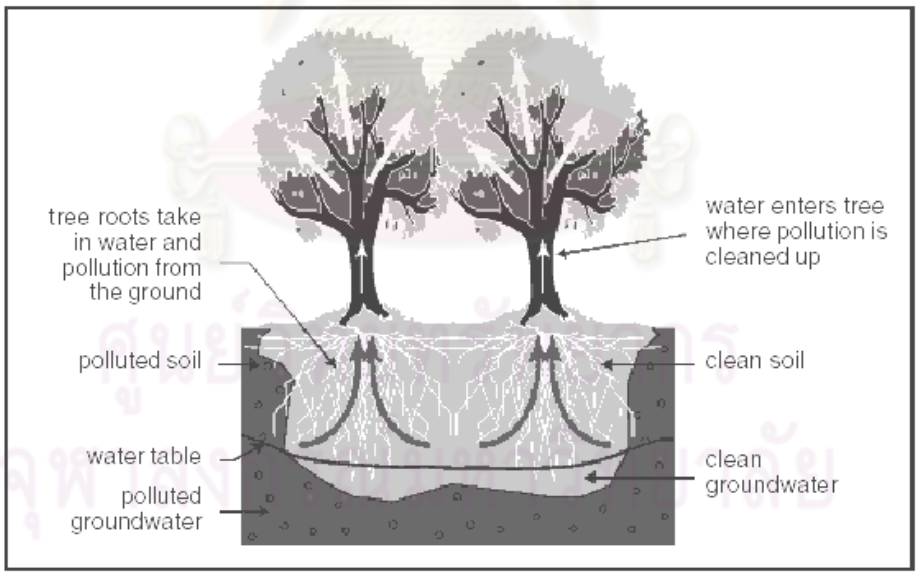
2.1.3.2 **การสะสมโลหะหนักในพืช**

พืชสามารถสะสมโลหะหนักได้จากดิน น้ำ อากาศ เพราะโลหะหนักสามารถเข้าสู่พืชได้ทั้งทางราก ลำต้น และใบ กระบวนการดูดดึง และสะสมโลหะหนักของรากพืชอาจเป็นแบบ Active Ion Absorbtion หรือ Passive Ion Absorbtion กลไกการดูดดึงแบบ Passive Ion Absorbtion อาจดึงดูดโดยวิธีการแลกเปลี่ยนอิออน (Ion Exchange) หรือวิธีการคายน้ำ (Convection) โดยกลไกจะเกิดในขณะที่พืชดูดน้ำเพื่อทดแทนการคายน้ำ ดังนั้นเมื่ออัตราการดูดอิออนเร็วเกินกว่าอัตราการคายน้ำ จึงทำให้เกิดภาวะ Concentration Gradient อย่างกะทันหันที่บริเวณรากพืช โลหะหนักจึงเคลื่อนเข้าสู่พืชได้โดยวิธีการแพร่จากดินเข้าสู่ราก (Culter and Rains, 1974) ซึ่งโลหะหนักชนิดหนึ่งๆ หากมีปริมาณเหมาะสมก็จะเป็นประโยชน์ต่อพืช หรือไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช ในขณะที่ปริมาณโลหะหนักที่สูงเกินไปมักจะส่งผลกระทบด้านการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตต่อพืชได้

2.2 การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation)

2.2.1 ความหมาย

การฟื้นฟูดินโดยการใช้พืช (Phytoremediation) มาจากรากศัพท์คำว่า "*Phyto*" ในภาษากรีกที่หมายถึง "*พืช*" รวมกับคำว่า "*Remediare*" ในภาษาลาตินที่หมายถึง "การบำบัดหรือการรักษา" (Cunningham et al., 1996) ซึ่งเมื่อนำทั้งสองคำนี้มารวมกัน หมายถึง เป็นเทคโนโลยีในการนำพืชมาใช้ในการบำบัดดิน โคลน กากตะกอน หรือน้ำ ที่เกิดการปนเปื้อนโดยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ (International Environmental Technology Centre, 2000) ซึ่งการบำบัดนี้อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำ และแร่ธาตุอาหารผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืช ในการเปลี่ยนสารปนเปื้อนให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษ หรือมีความเป็นพิษลดลง (Environmental Protection Agency, 2000) โดยสามารถแสดงกระบวนการ Phytoremediation ได้แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการ Phytoremediation

ที่มา: http://oceanworld.tamu.edu/resources/environmentbook/Images/phytoremediation.gif

2.2.2 ประเภทของ Phytoremediation

การบำบัดโดยพืชมีหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งตามกลไกของพืชที่ใช้ในการกำจัดสารพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ได้ดังต่อไปนี้ (ITRC, 1999; USEPA, 1998)

1) Phytoextraction

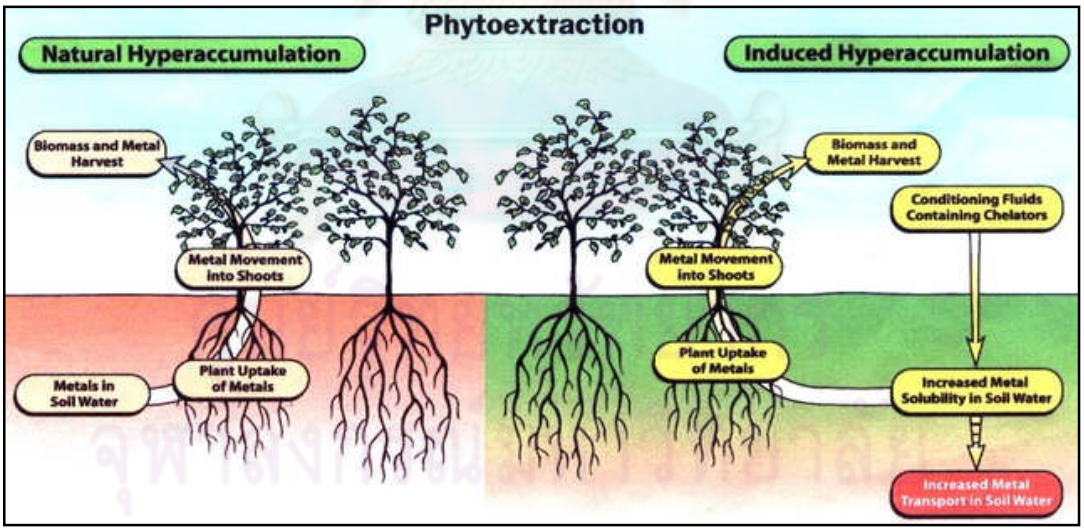
Phytoextraction หรือเรียกอีกอย่างว่า phytoaccumulation เป็นการใช้พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนัก โดยสามารถดูดซับ และเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากดินนำมารวมไว้ที่เดียวกันโดยรากพืช และเคลื่อนย้ายไปสะสมยังส่วนต่างๆ ของพืชได้ (Ensley, 2000) โดยพืชชนิดนั้นต้องเป็นพืชกลุ่ม Hyperaccumulation ที่สามารถสะสมโลหะหนักปริมาณมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่นๆ ดังนั้นพืชที่เลือกใช้ควรเป็นพืชที่สามารถพบได้ทั่วไปในปริเวณที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักมีความทนทานต่อโลหะหนักในระดับความเข้มข้นที่สูง ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้จึงจะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ดูดสารพิษต่างๆ ออกจากดิน

Phytoextraction เป็นการใช้พืชเพื่อบำบัดสารมลพิษที่อยู่ในดิน ตะกอนดิน โดยใช้พืชไปดูดซึมสารมลพิษโดยผ่านราก แล้วไปเก็บสะสมในเนื้อเยื่อพืชส่วนที่เป็น ลำต้น และ ใบ ทั้งนี้มีปัจจัยหลายประการที่จำกัดการบำบัดสารโลหะหนัก (Metal Phytoextraction) เช่น อัตราการดูดซึมสารโลหะหนักโดยราก การนำไปใช้ประโยชน์ของโลหะหนักโดยพืช (Metal Bioavailability) สัดส่วนของสารโลหะหนักที่ถูกดูดซึมโดยราก ความทนได้ของเซลล์พืชต่อสารโลหะหนักที่เป็นพิษ ดังนั้น พืชที่ใช้ในการบำบัดจึงควรมีความสามารถในการสะสมสารโลหะหนักโดยผ่านรากได้มาก และสามารถเคลื่อนย้ายสารโลหะหนักไปสู่ส่วนของต้นพืชได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ พืชควรมีกลไกลในการลดความเป็นพิษของสารโลหะหนัก (Detoxify) และมีความทนต่อปริมาณสารโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูง สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น เงิน แคดเมียม โคบอลต์ โครเมียม ทองแดง ปรอท แมงกานีส โมลิบดีนัม นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี เป็นต้น (จันทนี แจ่มแสงทอง, 2550)

ประเภทของ Phytoextraction แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ การบำบัดสารมลพิษโดยวิธีปลูกพืชในดินแบบธรรมชาติ (Natural Phytoextraction) และการบำบัดสารมลพิษโดยวิธีปลูกพืชในดินร่วมกับสารปรับปรุงดินต่างๆ (Induced Phytoextraction) ดังรูปที่ 2.2

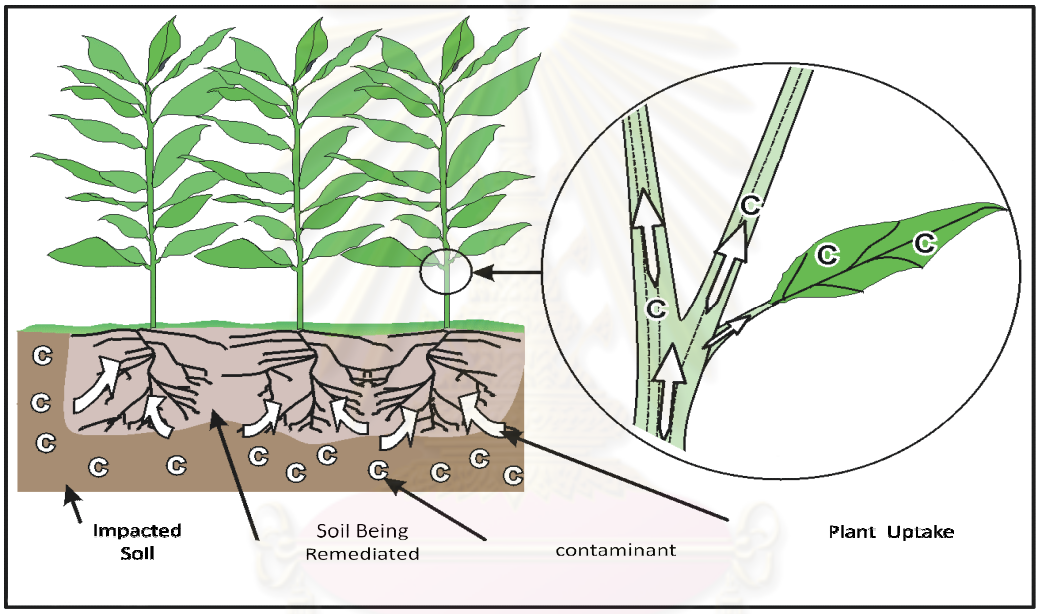
1) การบำบัดสารมลพิษโดยวิธีปลูกพืชในดินแบบธรรมชาติ (Natural Phytoextraction) เป็นการบำบัดสารมลพิษโดยวิธีการปลูกพืชในดินที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษ แล้วทำการรดน้ำใส่ปุ๋ยเท่าที่จำเป็น พืชบางชนิดสามารถเจริญเติบโตโดยไม่จำเป็นต้องใส่ปุ๋ยหรือรดน้ำ แต่อาศัยน้ำฝนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ส่วนใบ และลำต้นพืชที่มีการสะสมสารมลพิษจะถูกเก็บเกี่ยว และทำการบำบัดโดยวิธีที่เหมาะสมต่อไป พืชที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่จะเป็นพืชที่ชอบขึ้นตามธรรมชาติอยู่แล้ว และมีความทนทานต่อความเข้มข้นของโลหะหรือสารมลพิษอื่น ๆ โดยทั่วไปแล้ว พืชเหล่านี้จะเป็นพืชที่เจริญเติบโตไม่รวดเร็วนัก และเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้วจะมีขนาดที่ไม่ใหญ่นัก และมีรากตื้น

2) การบำบัดสารมลพิษโดยวิธีปลูกพืชในดินร่วมกับสารปรับปรุงดินต่างๆ (Induced Phytoextraction) เป็นการบำบัดสารมลพิษโดยการเลือกใช้พืชที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ตลอดอายุการเจริญเติบโตร่วมกับการเติมสารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ (Inducing Agent) เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษสู่พืชมากขึ้น ยังผลให้เพิ่มขีดความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ



รูปที่ 2.2 ประเภทของ Phytoextraction
ที่มา : http://www.itrcweb.org/PHYTO02.pdf

สำหรับกลไกการทำงานของ Phytoextraction ประกอบด้วยกระบวนการหลัก 2 ประการ คือ 1) การนำเข้าโลหะหนักโดยรากพืช โดยอาศัยการลำเลียงโลหะหนักผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ 2 ระบบ ได้แก่ การลำเลียงผ่านตัวลำเลียงประจุบวก และการแพร่ผ่านเข้าช่องที่เป็นประจุบวกสอง (Divalent Cation Membrance Channel) และ 2) การเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากสู่ยอดของพืช โลหะหนักจะถูกขนส่งผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) โดยอาศัยกระบวนการคายน้ำ (Transpiration) เป็นแรงดึง (Kochian, 1991) แสดงดังรูปที่ 2.3 ทั้งนี้ประเภทของ Phytoextraction สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 (a)



รูปที่ 2.3 กลไกการทำงานของ Phytoextraction
ที่มา : http://www.itrcweb.org/PHYTO02.pdf

2) Rhizofiltration

Rhizofiltration เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการกรอง ดูดซับ และรับเอาสารปนเปื้อนต่างๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลายรอบๆ บริเวณรากให้เข้าไปในรากของพืชได้ ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ มีความเหมาะสมในการนำไปกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ในแหล่งน้ำ หรือในดินที่มีความชุ่มของน้ำหรือระบบไฮโดรโพนิคส์ (Hydroponics) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 (b)

3) Phytostabilization

Phytostabilization เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการควบคุม หรือลดการเคลื่อนย้ายของสารพิษที่ปนเปื้อนในดิน และน้ำใต้ดินด้วยการตรึง และยึดไว้ที่ราก โดยรากของพืชจะดูด และตรึงสารปนเปื้อนไว้บนรากพืช ทำให้สารปนเปื้อนต่างๆ ภายในดินมีการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียร เกิดการตกตะกอน โดยกระบวนการดังกล่าวนี้ จะสามารถลดการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่เป็นพิษต่างๆ ภายในดิน และขัดขวางการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนลงไปสู่น้ำใต้ดินหรือในอากาศที่มีการเคลื่อนย้ายลดลง นอกจากนี้ Phytostabilization ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปลูกพืชคลุมดินในบริเวณที่มีการปนเปื้อน ทำให้สารปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นสูงลดระดับความเป็นพิษให้น้อยลง ด้วยการลดความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนโดยกษัยการลม (Wind Erosion) การเคลื่อนย้ายผิวหน้าดิน และการชะล้างสารปนเปื้อนลงไปสู่น้ำใต้ดิน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 (c)

4) Phytodegradation

Phytodegradation สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Phytotransformation เป็นการสลายตัวของโลหะหนักที่ปนเปื้อน โดยการดูดซับของพืชด้วย กระบวนการเมตาบอลิค (Metabolic) ภายในพืช หรือจากการสร้างสารประกอบต่างๆ ของพืช เช่น เอนไซม์ (Enzymes) สารพิษสามารถสร้างความเสียหายแก่พืชโดยการดูดใช้ธาตุอาหาร หรือการสะสมธาตุอาหารภายในเนื้อเยื่อของพืช ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 (d)

5) Rhizodegradation

Rhizodegradation หรือเรียกอีกอย่างว่า Phytostimulation, Rhizosphere, Biodegration หรือ Enhanced Rhizosphere Biodegration เป็นการสลายตัวของสารที่ปนเปื้อนในดิน ด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน โดยจุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ รา และแบคทีเรีย สามารถใช้หรือย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเป็นอาหารของมัน รวมทั้งจุลินทรีย์ยังสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อ

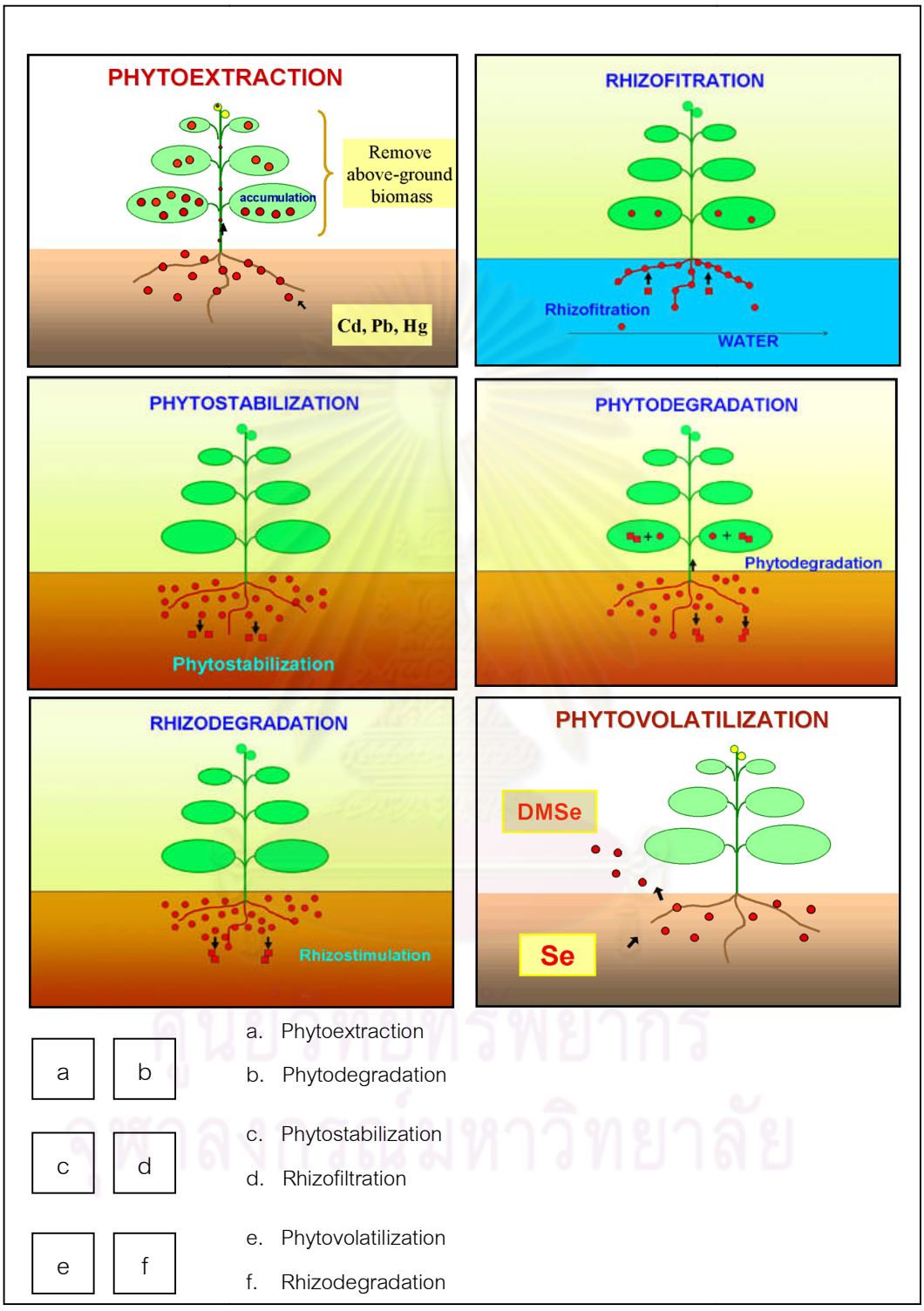
มนุษย์ และสิ่งแวดล้อม ให้มีความเป็นพิษน้อยลง โดยพืชจะปล่อยน้ำตาล แอลกฮอล์ และกรด ซึ่งจะไปยับยั้งอินทรีย์คาร์บอน (Organic Carbon) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ดิน และกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ Biodegration ซึ่งเป็นตัวช่วยทำให้ดินมีความร่วนซุยเพิ่มมากขึ้น และมีการเคลื่อนย้ายออกซิเจนกับน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 (e)

6) Phytovolatilization

Phytovolatilization คือการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการเป็นสื่อที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในดิน หรือในน้ำออกไปสู่อากาศ Phytovolatilization จะเกิดขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืชยืนต้น และพืชชนิดอื่นๆ ที่มีการดูดน้ำที่มีสารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์ปนเปื้อนเข้าไป และในบางครั้งการดูดสารปนเปื้อนดังกล่าวด้วยพืชนั้นจะผ่านไปยังใบ และจะมีการระเหยเป็นไอออกไปสู่บรรยากาศที่มีความเข้มข้นระดับต่ำ ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้จะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดสารปนเปื้อนที่เป็นพิษในดิน และน้ำได้เช่นกัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 (f)

2.2.3 **หลักการทำงานของ** Phytoremediation

การบำบัดสภาพดินที่มีการปนเปื้อนจากสารพิษโดยวิธีการทำ Phytoremediation นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างไม่ว่าจะเป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน จุลินทรีย์ ชนิดของพืช รูปแบบ และชนิดของสารปนเปื้อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวคือ สภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ คุณสมบัติของดิน สภาพทางอุทกธรณีวิทยา กลไกของพืช และผลกระทบที่เกิดจากการเกษตรกรรม แต่อย่างไรก็ตาม การทำ Phytoremediation นั้นจะอาศัยกระบวนการสำคัญๆ ที่นับว่าเป็นหลักการทำงานของ Phytoremediation ดังนี้ (USEPA, 2000)



รูปที่ 2.4 ประเภทของ Phytoremediation

ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2549

1) การดูดดึงสารปนเปื้อนโดยพืช

การดูดดึงสารปนเปื้อนโดยพืชนั้น เป็นการใช้พืชที่มีคุณสมบัติในการดูดสารปนเปื้อนต่างๆ ภายในดิน ซึ่งสารปนเปื้อนเหล่านี้อาจจะถูกนำมาเก็บสะสมเอาไว้ในพืช ใช้เป็นธาตุอาหาร และ/ หรือ ถูกเปลี่ยนรูปแล้วปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในสภาวะที่มีความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมลดลง วิธีที่อาศัยกระบวนการนี้ ได้แก่ Phytoextraction และ Phytovolatilization ซึ่งใน Phytoextraction นั้นจะอาศัยการดูดดึงสารปนเปื้อนจากดินไปเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช ส่วนวิธีการ Phytovolatilization นั้นจะอาศัยวิธีการดูดดึงสารปนเปื้อนจากดินแล้วปล่อยออกไปสู่บรรยากาศแทน ดังแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างแสดงการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วเข้าสู่รากพืชโดยกระบวนการ Phytoextraction (ดัดแปลงจาก International Environmental Technology Centre, 2000)

2) การกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพที่เกิดจากจุลินทรีย์ในดินโดยรากพืช

การกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพที่เกิดจากจุลินทรีย์ในดินโดยรากพืชนั้น เป็นกระบวนการที่รากพืชทำงานร่วมกับจุลินทรีย์บริเวณรากพืช เพื่อเป็นการเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารปนเปื้อนบริเวณรากพืชให้เกิดการสลายตัวเร็วขึ้น ซึ่งในบางครั้งทั้งพืช และจุลินทรีย์มีการหลั่งสารบางอย่างเพื่อมาย่อยสลายสารปนเปื้อนด้วยวิธีที่อาศัยกระบวนการนี้ ได้แก่ Rhizofiltration

3) การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดินโดยพืช

การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดินโดยพืช เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการปรับสภาพความเป็นพิษของสารปนเปื้อนที่มีอยู่ภายในดินให้มีความเป็นพิษลดลง ซึ่งพืชที่ใช้ในกระบวนการนี้ คือ พืชที่มีความสามารถในการ Phytostabilization ได้ กล่าวคือ พืชจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปของสารปนเปื้อนไม่ให้สามารถเคลื่อนที่ได้หรือเกิดการย่อยสลายไปในที่สุด

2.2.4 **ข้อดีและข้อจำกัดของ** Phytoremediation (สุธินี วดีศิริศักดิ์, 2550)

1) ข้อดีของ Phytoremediation

1.1) Phytoremediation เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสม ในการที่จะนำมาใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่บริเวณกว้าง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างใช้ค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการบำบัดดินโดยวิธีการอื่นๆ สาเหตุที่การทำ Phytoremediation มีค่าใช้จ่ายน้อยก็เนื่องมาจากอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก ไม่ต้องทำการเคลื่อนย้ายดินออกจากพื้นที่ ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ นอกจากนี้ การบำบัดโดยวิธีนี้ยังมีผลกระทบน้อยหรือไม่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเลย มีความปลอดภัยในการใช้มากกว่าการบำบัดโดยวิธีการอื่นๆ อีกด้วย

1.2) Phytoremediation กับพืชที่เป็น Hyperaccumulator Species นอกจากจะสามารถบำบัดโลหะหนักออกจากดินได้แล้ว ยังสามารถนำโลหะที่สกัดได้จากมวลชีวภาพไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำเอาโลหะหนักที่ได้ไปขาย ถือเป็นการเพิ่มคุณค่าในการทำ Phytoextraction เนื่องจากการเผามวลชีวภาพที่ได้จะได้พลังงานมา ซึ่งสามารถนำเอาพลังงานที่ได้นี้มาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ กำไรที่ได้จากการขายโลหะหนักเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นต้นทุนในการปลูกพืชในครั้งต่อไปได้อีกด้วย

1.3) Phytoremediation นั้นเป็นการปลูกพืชลงในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน ซึ่งพืชที่ปลูกไปนั้นจะช่วยลดการพังทลายของดิน ช่วยป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนัก ช่วยลดการปนเปื้อนของโลหะหนักไปยังพื้นที่อื่นหรือลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งเป็นการช่วยลดความเสี่ยงในการที่โลหะหนักเหล่านี้จะเข้าสู่ตัว

คนและสัตว์ได้ นอกจากนี้ พืชที่ปลูกยังสร้างสารอินทรีย์ที่มีส่วนช่วยในการพัฒนาเนื้อดิน และความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน และหากพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดมีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่ทำการบำบัดก็จะทำให้การแทรกซึมของสารอาหาร น้ำ ออกซิเจน และโลหะหนักในดินสู่พืชเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้พื้นที่บำบัดมีสภาพดีขึ้น ร่มรื่น ทำให้เกิดทัศนียภาพที่สวยงามแก่ผู้พบเห็น

1.4) พืชที่มีการสะสมของโลหะหนักเอาไว้ในปริมาณมากๆ จะช่วยทำให้พืชนั้นรอดพ้นจากการถูกกัดกินของแมลง เช่น หนอนผีเสื้อ ลดการเกิดโรคจากเชื้อรา และแบคทีเรีย เป็นต้น

2) ข้อเสียของ Phytoremediation

2.1) Phytoremediation ไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ลึกลงไปกว่าบริเวณรากพืชได้ นอกจากนี้ หากสารปนเปื้อนเหล่านั้นไม่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ก็จะไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารนั้นๆ ได้เช่นกัน

2.2) Phytoremediation ถูกจำกัดไว้ด้วยสภาพทางธรณีวิทยา สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ ที่ตั้งของแหล่งบำบัด ความสูงจากระดับน้ำใต้ดิน และความสามารถของเครื่องมือทางเกษตรกรรม เป็นต้น

2.3) ความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนของพืชแต่ละชนิดนั้นมีความแตกต่างกันไปดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาเพื่อคัดเลือกพืชที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดเป็นกรณีไป นอกจากนี้ในปัจจุบันยังขาดพืชที่มีความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนอีกมากจึงต้องมีการศึกษาต่อไป

2.4) Phytoremediation เป็นเทคนิคที่ขึ้นอยู่กับความสามารถของพืชและเป็นเทคนิคที่ใช้ระยะเวลานานไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้แก้ปัญหาการปนเปื้อนที่ต้องการแก้ไขในเวลาอันสั้นได้

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักในดินและพืช (อรรณพ หอมจันทร์, 2544)

2.3.1) **ชนิดของโลหะหนัก** ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการที่พืชจะดูดดึงโลหะหนักเหล่านี้ออกจากดิน เนื่องจากพืชนั้นมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักในแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือ พืชจะดูดดึงโลหะหนักชนิดที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าโลหะหนักชนิดที่ส่งผลเป็นพิษต่อพืชเพียงอย่างเดียว โลหะหนักโดยทั่วไปมีการเปลี่ยนแปลงวาเลนท์ซีอยู่เสมอ ในรูปไฮดรอกไซด์จะมีการละลายได้ต่ำ โลหะหนักแต่ละชนิดมีการปลดปล่อยสู่ดิน และดูดซึมสู่ส่วนต่างๆ ของพืชได้แตกต่างกัน เช่น สังกะสี ทองแดง แคดเมียม และนิเกิล พืชมีความสามารถในการดูดดึงไปใช้ได้ดีกว่า ตะกั่ว ปรอท และโครเมียม

2.3.2) **รูปทางเคมีของโลหะหนัก** การดูดดึงโลหะหนักโดยพืชนั้น ส่วนใหญ่แล้วโลหะหนักอยู่ในรูป Inorganic Salt ที่ละลายน้ำ พืชจะสามารถดูดดึงเข้าไปได้มากกว่าโลหะหนักในรูป Organic Compound

2.3.3) **ชนิดของพืชและส่วนต่าง ๆ ของพืช** พืชแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันไปเป็นผลทำให้ความสามารถของพืชในการดูดดึงโลหะหนักแต่ละชนิด แต่ละรูปแบบก็แตกต่างกันไปด้วย ตัวอย่างเช่น ผักคะน้ามีความสามารถในการดูดดึงสังกะสี (Zn) ในรูปของซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ได้ดีที่สุด ความเข้มข้นของโลหะหนักในพืชมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดพืช ส่วนของพืช และอายุของพืช โดยพืชแต่ละชนิดสามารถสะสมโลหะหนักได้แตกต่างกัน เนื่องจากความต้องการโลหะหนัก และความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักแตกต่างกัน Wang et al. (2004) ได้ทำการศึกษาโดยใช้ผักกาดเขียว *(Brassica juncea)* พบว่า ผักกาดเขียวมีกลไกในการทนทานต่อโลหะหนัก โดยส่วนรากจะมีการสร้างเอนไซน์ เพื่อต้านความเป็นพิษของโลหะหนัก เนื่องจากในสภาพดินที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก จะมีการกระตุ้นให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระในเซลล์พืชมากขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะทำลายเซลล์ของพืช ดังนั้นเอนไซน์ที่ต่อต้านอนุมูลอิสระของผักกาดเขียว จะทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น

2.3.4) ลักษณะสมบัติและองค์ประกอบบางอย่างของดิน

1) เนื้อดิน (Soil Texture) เนื้อดินที่แตกต่างกันสามารถทำให้รากของพืชเข้าถึงและดูดดึงโลหะหนักได้ต่างกัน

2) ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Drainage Status) การที่ดินสามารถอุ้มน้ำไว้ได้มากก็สามารถทำให้โลหะหนักเหล่านั้นสามารถอยู่ได้ในรูปแบบที่ง่ายขึ้น และพืชก็สามารถดูดดึงไปได้มากขึ้นเช่นกัน

3) ความสามารถในการดูดจับโลหะหนัก (Sorptive Capacity) หากดินดูดจับโลหะหนักไว้อย่างแน่นหนาแล้วโอกาสที่พืชจะดูดดึงไปได้ย่อมลดลงไปด้วย ดังนั้น มักพบว่า พืชที่สามารถดูดดึงและเคลื่อนย้ายโลหะหนักในดินทรายได้ดีกว่าในดินเหนียวอยู่เสมอ

4) ความเป็นกรด-ด่างในดิน จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในดิน โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของดินที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้การดูดดึงโลหะหนักของพืชลดลงได้ เพราะว่าอิออนของโลหะหนักต่างๆ ในรูปที่เปลี่ยนประจุได้ และละลายน้ำได้จะมีปริมาณลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้น

2.3.5) สภาพแวดล้อมต่อความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักของพืช

1) อุณหภูมิ (Temperature) มีผลต่อพืชมาก เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะพบว่าพืชจะดูดดึงแคดเมียม สังกะสี แมงกานีส และเหล็ก จากดินสู่พืชมากขึ้น

2) ช่วงวัน (Day Length) มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักของพืชเช่นกัน โดยที่ช่วงวันมากขึ้นพืชจะมีโอกาสในการสังเคราะห์แสงมากขึ้น ทำให้โอกาสที่พืชจะดูดดึงเอาโลหะหนักออกมาจากดินนั้นมีสูงขึ้นด้วย

3) ปริมาณของแสง (Intensity) มีส่วนในการดูดดึงโลหะหนักของพืชเช่นกัน เนื่องจากแสงที่มีความเข้มที่เหมาะสมกับพืชจะสามารถสังเคราะห์แสงได้ดี ทำให้การดูดดึงโลหะหนักที่อยู่ในดินเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4) ความชื้นของดิน (Moisture) มีส่วนที่พืชจะดูดดึงโลหะหนักไปจากดิน โดยจะพิจารณาจากการออสโมซิส (Osmosis) ซึ่งต้องมีความเหมาะสมของความชื้นในดินและพืชสามารถดูดซับสารต่างๆ ออกจากดินได้ด้วย

5) ความชื้นในอากาศ (Air Humidity) มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักในดินเช่นกัน เนื่องจากความชื้นในอากาศนั้นมีผลต่อการคายน้ำของพืช ถ้าพืชคายน้ำออกมาได้น้อย แรงดึงที่รากก็จะต่ำทำให้พืชดูดดึงสารต่างๆ ในดินได้น้อยลงเช่นกัน

2.4 สารคีเลต

2.4.1 ความหมายของสารคีเลต

สารคีเลต มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก ซึ่งหมายความว่า “กรงเล็บ” (Claw) เมื่อพิจารณาจากรากศัพท์แล้ว หมายความว่า สารอินทรีย์เคมี ซึ่งสามารถจะรวมตัว และคุ้มกันไม่ให้มีการตกตะกอนของแคตไอออนบางชนิด รวมทั้งจุลธาตุอาหารที่เป็นบวกทั้ง 4 ธาตุ ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสีด้วย ซึ่งสามารถเรียกปฏิกิริยารวมนี้ว่า Chelation และผลที่ได้จากปฏิกิริยานี้เรียกว่า Chelate โดยที่สารคีเลตจะล้อมแคตไอออนของธาตุที่เป็นโลหะ (Metallic Cation) เข้าไป และไม่เปิดโอกาสให้อนุมูลอื่นๆ เข้าไปเกาะกับโลหะธาตุที่เป็นประจุบวกนั้นได้ และทำให้โลหะธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารละลายคีเลตอยู่ในสารละลายที่มี pH สูงกว่า เมื่อโลหะธาตุเหล่านั้นเป็นแคตไอออนในสภาพสารละลายธรรมดา กล่าวคือ โลหะธาตุที่มีโครงสร้างอยู่ในสารคีเลตจะตกตะกอนกับไฮดรอกไซด์ของโลหะได้ยากขึ้น ดังนั้นพืชจึงสามารถดูดดึงไปใช้ได้ง่ายขึ้น และเป็นประโยชน์ต่อพืชมากขึ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

สารคีเลต (Chelating Agent) เป็นสารที่มีผลต่อการละลายของโลหะหนักในดิน และการดูดดึงของพืช เนื่องจากสารคีเลต เป็นสารเคมีที่สามารถรวม และป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนของแคตไอออนบางชนิด รวมถึงจุลธาตุ เช่น แมงกานีส สังกะสี เหล็ก ทองแดง และตะกั่ว เป็นต้น โดยสารคีเลตจะเข้าล้อมรอบแคตไอออนที่เป็นโลหะ (Metallic Cation) และไม่ยอมให้สารอื่นเข้ามาสร้างพันธะกับแคตไอออนเหล่านี้ โดยแคตไอออนที่มีสารคีเลตล้อมรอบจะคงอยู่ในสภาพสารละลายได้นาน และมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าแคตไอออนธรรมดา ทำให้พืชสามารถดูดดึงไปใช้ได้ง่ายขึ้น Jean et al., 2007 ศึกษาการสะสมโครเมียม และนิเกิลในพืช *Datura innoxia* โดยใช้สารคีเลต 2 ชนิด คือ กรด Citric Acid และสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำการเติมสารคีเลต 2 แบบ คือ เติมสารคีเลตครั้งเดียว และเติมสารคีเลตสองครั้ง ผลการทดลอง พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน การเติม Citric Acid แบบครั้งเดียว สามารถช่วยเพิ่มการสะสมโครเมียมในรากของพืชได้สูงสุด และการเติมสาร EDTA แบบครั้งเดียว ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถช่วยเพิ่มการสะสมนิเกิลในส่วนรากพืชได้สูงสุด เช่นกัน

2.4.2 ประเภทของสารคีเลต (Evangelou et al., 2007)

1) สารอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น เอธิลลีนไดเอมีนดิสซัสสิเนส (Ethylene Diamine Disuccinate; (EDDS)) และไนทริโลไตรแอซีติก (Nitrilotriacetic Acid; (NTA)) นอกจากนี้มีการแบ่งสารอินทรีย์ธรรมชาติจากสารกลุ่ม Natural Low Molecular Weight Organic Acid (NLMWOA) เช่น กรดฟีโนลิก (Phenolic Acid; (FA)), กรดซิตริก (Citric Acid; (CA)), กรดมาริก (Malic Acid; (MA)), กรดอะมิโน (Amino Acid; (AA)), กรดฮิวมิก (Humic Acid; (HA)) และฟูวิค (Fulvic Acid; (FA)) เป็นต้น

2) สารคีเลตสังเคราะห์ เช่น เอธิลลีนไดเอมีนเททระเอซิติกเอซิด (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; (EDTA)), ไฮดรอกซิลเอธิลลีนเททระเอซิติกเอซิด (Hydroxylethylene Tetraacetic Acid; (HEDTA)), ไดเอธิลลีนไตรอะมิโนเพนทระเอซิติกเอซิด (Diethylene Triamino Pentaacetic Acid; (DTPA)), เอธิลลีนไกโคเททระเอซิติกเอซิด (Ethylene Glycol Tetraacetic Acid; (EGTA)), เอธิลลีนไดเอมีนไดโอไฮดรอกซิลฟีนิลเอซิด (Ethylene Diamine Di-O-Hydroxyphenyl Acid; (EDDHA)), ไดไฮดรอกซิลฟีนิลอิมิโนไดเอซิติกเอซิด (*N*-(2- Hydroxyphenyl) Iminodiacetic Acid; (HEIDA)) เป็นต้น

2.4.3 การใช้ประโยชน์สารคีเลต

สารคีเลตมีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางทั้งในครัวเรือน และอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากสารคีเลตสามารถเกิดสารเชิงซ้อนกับโลหะได้ โดยไอออนของโลหะอาจจะสร้างความเสียหายในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมต่างๆ ด้วยสาเหตุนี้ จึงมีการนำสารคีเลตมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก นอกจากนี้มีการใช้ประโยชน์จากสารคีเลต เช่น สารประกอบในน้ำยาทำความสะอาดผิว การทำผงซักฟอก โรงงานชุบโลหะ โรงงานผลิตกระดาษเพื่อใช้เป็นสารฟอกขาว เป็นต้น (Oviedo และ Rodriguez, 2003)

2.4.4 การใช้สารคีเลตในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง Peter et al (1992) การใช้สารคีเลตกับการแก้ปัญหาดินปนเปื้อน ควรคำนึงถึงปัจจัย 4 ปัจจัยดังนี้

1) สารเคมี ควรมีความสามารถเกิดสารเชิงซ้อนที่เสถียรในช่วงพีเอชที่กว้างที่อัตราส่วนลิแกนต์ต่อโลหะเท่ากับ 1:1M

2) การย่อยสลายทางชีวภาพของสารคีเลต และสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักควรมีค่าต่ำ

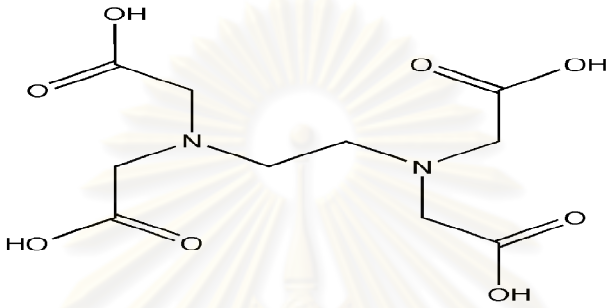
3) สารคีเลตที่ใช้ควรมีความเป็นพิษและอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ

4) คุ้มค่าต่อการนำมาใช้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.5 สารคีเลตที่เลือกใช้ในงานวิจัย

1) เอธิลลีนไดเอมีนเททระเอซิติกเอซิด (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; (EDTA)) มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.6 และมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างสาร EDTA

ที่มา: Maryadele และคณะ (2001)

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสาร EDTA

คุณสมบัติ	แสดงผล
สูตรทางเคมี	$C_6H_{16}O_8N_2$
ลักษณะ	เกร็ดหรือผงสีขาว
มวลโมเลกุล	292.25
พีเอช	2.5-3.0
ความสามารถในการละลายน้ำ	0.05 g/100 ml
ค่า chelation	3.39 mmol/g
จุดหลอมเหลว	240 องศาเซลเซียส

ที่มา: chemical (2003)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.1) ความเป็นพิษของสาร EDTA

สาร EDTA ไม่มีพิษร้ายแรงต่อมนุษย์ และหากหายใจเอาละอองฝุ่นของสาร EDTA เข้าไปอาจทำให้ไอหรือจาม การสัมผัสกับผิวหนังหรือลูกตาอาจทำให้ระคายเคืองต่อตาหรือแดงบริเวณผิวหนังที่สัมผัส แต่ถ้ากลืนหรือกินเข้าไปจะทำให้รู้สึกร้อนในกระเพาะหรือคลื่นไส้อาเจียน และหากได้รับในปริมาณมากอาจมีผลต่อไต ซึ่ง National Institute for Occupational Safety and Health, 2002 มีการศึกษาความเป็นพิษของสาร EDTA ต่อสัตว์ ซึ่งทำการทดสอบกับกระต่าย โดยใช้สาร EDTA 50% ทาใบหูนาน 20 ชั่วโมง พบว่า กระต่ายเกิดอาการระคายเคืองเล็กน้อย และเมื่อทำการทดสอบกับตาของกระต่าย โดยใช้สาร EDTA 50 มิลลิกรัม พบว่า ตาของกระต่ายเกิดการระคายเคือง มีอาการบวมน้ำ และเลือดออกหลังจากทดลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (BASF AG, 1973) และ Dufkova et al. (1984) ศึกษาพิษของไฮโดรเจนอีดีทีเอ (H_2EDTA) ที่ระดับความเข้มข้น 310 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สาหร่ายชนิด *Scenedesmus quadricauda* ผลการทดลอง พบว่า H_2EDTA มีผลทำให้สาหร่ายมีมวลชีวภาพลดลง เกิดการยับยั้งการแบ่งเซลล์ และการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ลดลง

1.2) การสลายตัวของสาร EDTA

Meer et al. (2005) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสารคีเลตสองชนิด ได้แก่สาร EDTA และ EDDS โดยใช้สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.8, 1.6 และ 4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำการศึกษาเป็นเวลา 40 วัน พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในดินมีความสัมพันธ์กับการย่อยสลายของสาร EDTA โดยดินชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ไม่พบการลดลงอย่างมีนัยสำคัญภายใน 40 วัน จากผลดังกล่าวทำให้ Meer และคณะประมาณค่าครึ่งชีวิตของสาร EDTA ได้เท่ากับ 36 วัน

Ginkel et al. (1999) ทำการศึกษาการย่อยสลายของสาร EDTA ในน้ำจาก 2 แหล่ง คือ น้ำจากแม่น้ำ และน้ำจากทะเลสาบ โดยใช้โซเดียมอีดีทีเอ (Na_2EDTA) ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6.5 และ 8.0 ซึ่งทำการทดลองในขวดแบบระบบปิด ผลการศึกษาพบว่า ที่ pH 6.5 ไม่พบการย่อยสลายของสาร EDTA หรือย่อยสลายได้เพียง 2-12% ใน 28 วันแรกของการทดลอง และที่ระยะเวลา 49 วันของการทดลองพบว่า การย่อยสลายของสาร EDTA มีค่าระหว่าง 60-83% สำหรับ

pH 8.0 พบว่า การย่อยสลายของสาร EDTA มีค่า 53-72% ใน 28 วัน และ 75-89% ที่ระยะเวลาของการทดลองเท่ากับ 35 วัน

1.3) สาร EDTA กับการบำบัดโลหะหนักในดิน

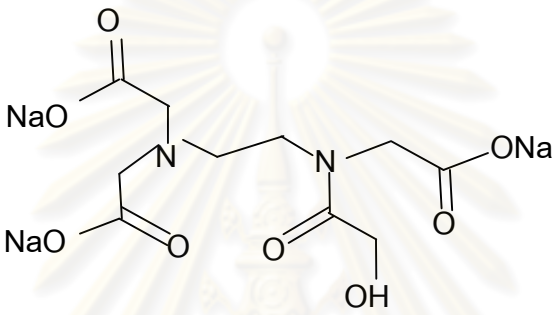
Greman *et al*. (2003) ทำการศึกษาการดูดดึงโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมจากดินปนเปื้อน โดยใช้ผักกาดเขียวปลี (*Brassia rapa* L.) และเติมสารคีเลต 2 ชนิด ได้แก่ สาร EDTA และ EDDS โดยทำการเติมสารคีเลต 2 แบบ โดยแบบที่ 1 เติมสารคีเลตครั้งเดียวที่ระดับความเข้มข้น 3, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ในวันที่ 22 หลังปลูก และเก็บตัวอย่างหลังจากนั้น 1 สัปดาห์ และแบบที่ 2 เติมสารคีเลต 2 ชนิดผสมกันโดยความเข้มข้นที่ใช้ได้แก่ 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และทำการเติมสารในวันที่ 1, 8, 15 และ 22 ทำการเก็บตัวอย่าง 4 ครั้งในวันที่ 7, 14, 21 และ 28 ผลการทดลองพบว่า การเติมสาร EDTA และ EDDS แบบครั้งเดียว ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมได้สูงที่สุด โดยสาร EDTA และEDDS ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดินทำให้ตะกั่วในส่วนยอดเพิ่มขึ้น 94.2 และ 102.3 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ส่วนสาร EDTA ช่วยเพิ่มการสะสมสังกะสี และแคดเมียมในใบได้ 4.3 และ 3.8 เท่า และสาร EDDS 4.7 และ 3.5 เท่า ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม จากการทดลองครั้งนี้ พบว่าสาร EDTA ช่วยในการดูดดึงตะกั่วได้ดีกว่าสาร EDDS

Turgut et al. (2004) ทำการศึกษาการดูดดึงโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม และนิเกิล โดยใช้ทานตะวันร่วมกับสารคีเลต คือสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 และ 0.3 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ผลการทดลองพบว่า สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.3 กรัมต่อกิโลกรัมดิน สามารถเพิ่มการสะสมโครเมียมในต้น และรากได้สูงสุด

Hsiao et al. (2007) ได้ทำการศึกษาการดูดดึงโครเมียม และนิเกิล โดยใช้ผักกาดเขียวร่วมกับสารคีเลต 4 ชนิดได้แก่ ออกซาลิคแอซิต (Oxalic Acid), ซิตริกแอซิด (Citric Acid), อีดีทีเอ (EDTA) และ ดีทีพีเอ (DTPA) ที่ระดับความเข้มข้น 0.05 และ 0.10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผลการทดลองพบว่า สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถสะสมโครเมียมได้มากที่สุดในส่วนเหนือดิน รองลงมาคือ ออกซาลิคเอซิต ที่ระดับความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ในส่วนใต้ดิน Citric Acid ที่ระดับความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดินสามารถสะสมโครเมียมได้มากที่สุด รองลงมาคือสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

โดยสาร EDTA สามารถช่วยในการดูดดึงนิเกิลมากที่สุดทั้งในส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดิน และพบว่าสาร EDTA และ DTPA มีส่วนทำให้ความยาวราก และจำนวนใบของผักกาดเขียวน้อยกว่าสารคีเลต Oxalic Acid และ Citric Acid

2) **เอธิลลีนไดอามินดิสซัสสิเนส** (Ethylene Diamine Disuccinate; (EDDS)) มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 และมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างสาร EDDS
ที่มา: Hauser, 2003

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของสาร EDDS

คุณสมบัติ	แสดงผล
สูตรทางเคมี	$C_{10}H_{13}O_8N_2$+3Na
ลักษณะ	ของเหลว
มวลโมเลกุล	292.25
พีเอช	10.1
จุดหลอมละลาย	311
ค่าการละลาย	>1000

ที่มา: Maryadele และคณะ (2001)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1) ความเป็นพิษของสาร EDDS

ปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาความเป็นพิษของสาร EDDS ต่อมนุษย์ แต่มีการทำการศึกษากับสัตว์โดยใช้หนูในการศึกษา โดยให้สาร EDDS ทางปากที่ระดับความเข้มข้น 0, 750, 1,000 และ 1,250 มิลลิกรัม พบว่า หนูทุกตัวรอดชีวิต และไม่แสดงอาการผิดปกติใดๆ นอกจากนี้ยังมีการทดลองความเป็นพิษต่อผิวหนังกับหนูเพศผู้ และเพศเมีย พบว่า ค่า LD_{50} ในหนูเพศผู้มีค่ามากกว่า 2,640 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม และค่า LD_{50} ในหนูเพศเมียมีค่ามากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม และสำหรับความเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจนั้นมีค่า LC_{50} (Lethal Concentration Fifty ค่าความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศที่สัตว์ทดลองสูดดมตายไปครึ่งหนึ่ง) จากการทดลองพบว่า มีค่าเท่ากับ 1.49 มิลลิกรัมต่อลิตร (USEPA, 2005) Schowanek et al. (1996) ได้ศึกษาความเป็นพิษต่อสาหร่าย *Chlorella vulgaris* โดยการใช้สาร EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสาร EDDS มีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *C. vulgaris* ลดลง 53 %

2.2) การสลายตัวของสาร EDDS

Tandy et al. (2004) ทำการศึกษาการล้างดินที่ปนเปื้อนทองแดง สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม นิเกิล และทำการหาค่าครึ่งชีวิตของสาร EDDS โดยในการทดลองได้ใส่สาร EDDS เริ่มต้นที่ 0.24 โมล พบว่าสาร EDDS หลังจากล้างดินแล้ว 7–14 วัน พบว่าสาร EDDS มีค่าครึ่งชีวิต เท่ากับ 4.18-5.60 วัน

Meers et al. (2007) ทำการหาการสลายตัวของ EDDS ด้วยวิธีการหาสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved Organic Carbon; (DOC) โดยใช้ TOC-500 ในการวิเคราะห์ ทำการศึกษาเป็นเวลา 200–240 ชั่วโมง ตามความเหมาะสม และทำการศึกษาในดิน 3 ชนิด คือ A1 คือ ดินเหนียวที่มีหินปูน A2 คือ เป็นดินมาจาก A1 แต่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม และสังกะสี และ A3 คือ ดินทรายที่มีกลิ่นเหม็น เกิดจากกิจกรรมทางอากาศที่พัดพาดินทรายมากองไว้ พบว่า ดิน A1 ที่ระยะเวลาการศึกษา 10 วัน EDDS มีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 7.9 วัน และที่ระยะเวลา 32 วัน สาร EDDS มีค่าครึ่งชีวิตเพิ่มขึ้นอีก 4 วัน และในดิน A2 ไม่พบการสลายตัวของสาร EDDS ใน 32 วัน

หลังจากทำการศึกษา และดิน A3 มีลักษณะคล้ายๆ กับดิน A2 โดยใน 25 วันแรกไม่พบการสลายตัวของสาร EDDS เช่นกัน

2.3) สาร EDDS กับการบำบัดโลหะหนักในดิน

Luo et al. (2006) ทำการศึกษาการดูดดึงโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม โดยใช้พืชใบเลี้ยงเดี่ยว และใบเลี้ยงคู่ทั้งหมด 18 ชนิด โดยใช้สารคีเลต ได้แก่สาร EDTA และ EDDS ซึ่งทำการปลูกพืชเป็นเวลา 35 วัน หลังจากนั้นทำการเติมสารคีเลตที่ระดับความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0, 1.5, 3 และ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 18-23 องศาเซลเซียส และทำการเก็บตัวอย่างดิน และพืชหลังจากนั้น 7 วัน พบว่า สาร EDDS สามารถเพิ่มการดูดดึงตะกั่วในพืช *chrysanthemum coronarium* ได้มากสุดที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดินโดยดีกว่าสาร EDTA ส่วนสาร EDTA สามารถดูดดึงตะกั่วในพืช *Zea mays* L. ได้ดีที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

Santos et al. (2006) ศึกษาการใช้สารคีเลต 2 ชนิด ได้แก่สาร EDTA และ EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เพื่อชักนำให้พืชดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วที่ปนเปื้อนดินโดยใช้หญ้า (*Brachiaria decumbens*) ผลการศึกษาพบว่าสาร EDTA มีผลกระทบต่อโลหะในสารละลายมากกว่าในดิน ส่วนสาร EDDS มีความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมน้อย และมีประสิทธิภาพในการชักนำให้ *B. decumbens* ดูดดึงโลหะหนักในดินได้ดีกว่าสาร EDTA นอกจากนี้สาร EDDS สามารถชักนำให้ *B. decumbens* ดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วสะสมไว้ในส่วนลำต้นเหนือดิน ทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 2.54, 2.74 และ 4.30 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ส่วนสาร EDTA สามารถชักนำให้ *B. decumbens* ดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วได้เท่ากับ 1.77, 1.11 และ 1.87 เท่าตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าสาร EDDS มีประสิทธิภาพมากกว่าสาร EDTA ในการชักนำให้เกิดการเคลื่อนย้ายประจุบวกของโลหะหนักจากรากพืชสู่ส่วนลำต้นเหนือดิน และจากการศึกษาในครั้งนี้ยังพบว่า *B. decumbens* สามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่ปนเปื้อน โดยไม่แสดงอาการให้เห็นถึงลักษณะความเป็นพิษ มีความทนทานต่อโลหะหนัก เจริญเติบโตเร็ว และมีมวลชีวภาพสูง

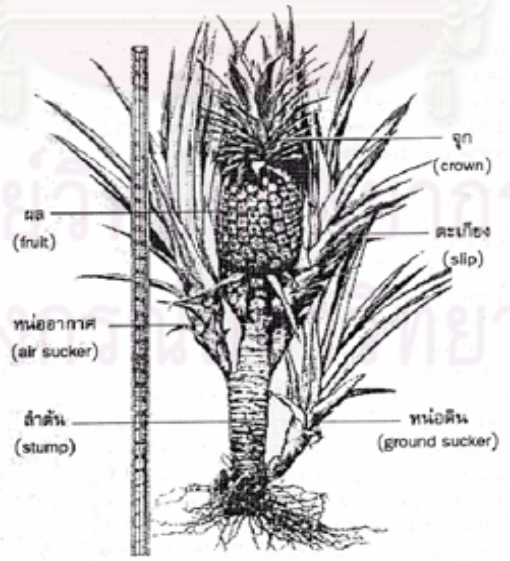
2.5 **สับปะรด** *Ananas comosus* (L.)Merr.

สับปะรดเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจำพวกไม้เนื้ออ่อนมีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปอเมริกาใต้ เป็นหนึ่งในพืชที่ปลูกในพื้นที่เขตร้อนและกึ่งเขตร้อน สามารถเก็บน้ำไว้ตามซอกใบได้เล็กน้อย และมีเซลล์พิเศษสำหรับเก็บน้ำเอาไว้ในใบ ทำให้สามารถทนในช่วงแห้งแล้งได้ดี (จารุพันธ์ ทองแถม, 2526)

2.5.1 **ลักษณะทางพฤษศาสตร์ของสับปะรด** (จินดารัฐ วีระวุฒิ, 2541)

สับปะรดมีชื่อสามัญ (Common Name) เรียกว่า pineapple ในทางพฤษศาสตร์สับปะรดจัดอยู่ในวงศ์ (Family) Bromeliaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Ananas comosus* (L.) Merr. แสดงได้ดังรูปที่ 2.8

1) ลำต้น สับปะรดเป็นพืชจำพวกไม้เนื้ออ่อน ลำต้นมีลักษณะสั้น และหนา ลำต้นมีความยาว 20-30 เซนติเมตร ส่วนที่กว้างที่สุดกว้างประมาณ 5 เซนติเมตร ลำต้นส่วนที่อยู่เหนือดินมักจะตั้งตรง ส่วนที่อยู่ใต้ดินโค้งเล็กน้อย ตามมุมใบมีตาซึ่งจะเจริญขึ้นมาเป็นหน่อได้ หน่อที่เจริญขึ้นมาจากตาบนลำต้นที่อยู่เหนือพื้นดินเรียกว่า หน่อข้างหรือหน่ออากาศ (Shoot หรือ Airsucker) ส่วนหน่อที่เจริญมาจากตาบนลำต้นที่ระดับผิวดินหรือใต้ดินเรียกว่า หน่อดิน (Ground Sucker)



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของต้นสับปะรด
ที่มา: http://gotoknow.org/file/sansanee1194.gif

2) ใบ ใบสับปะรดมีลักษณะเรียวยาว เป็นร่องโค้ง ช่วยให้มีความแข็งแรง และทนทานต่อการหักพับได้ดีเป็นพิเศษ การเรียงตัวของใบเป็นการเวียนรอบลำต้น มีการเรียงตัวแบบ (Phyllotaxy) เท่ากับ 5/13 หรือจำนวนใบที่เกิดเวียนรอบลำต้นไปได้ 5 รอบจะมีจำนวนใบเท่ากับ 13 ใบ และใบที่ 14 จะเกิดตรงกับตำแหน่งที่ 1 ของใบ ใบของต้นสับปะรดที่เจริญเติบโตใกล้ระยะออกดอกอาจแบ่งออกเป็นกลุ่มต่างๆ ตามรูปร่าง โดยตำแหน่งของใบบนลำต้น และอายุของใบ กล่าวได้ดังนี้คือ

- A-leaves เป็นกลุ่มของใบซึ่งอยู่ล่างสุดของลำต้น มีอายุมากที่สุด ส่วนของปลายใบเริ่มแห้งและไม่มีความสำคัญในด้านการสร้างอาหารจากกระบวนการสังเคราะห์แสงแล้ว
- B-leaves เป็นกลุ่มใบที่อยู่ถัดขึ้นมา แก่เต็มที่แล้ว มีส่วนในการสร้างอาหารได้บ้างเล็กน้อย
- C-leaves เป็นกลุ่มใบที่เจริญเต็มที่แล้ว สามารถสร้างอาหารให้สับปะรดได้ดีกว่ากลุ่ม B
- D-leaves เป็นกลุ่มใบที่อยู่ในระยะกำลังเจริญเติบโตทางสรีระเต็มที่ มีกิจกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตสูงสุด มักเป็นกลุ่มของใบที่มีความยาวมากที่สุด และเป็นกลุ่มที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สถานะทางสรีระที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต
- E-leaves เป็นกลุ่มใบที่ยังเจริญเติบโตไม่เต็มที่ ใบมีสีอ่อนกว่ากลุ่ม D
- F-leaves เป็นกลุ่มใบที่อ่อนที่สุด อยู่บริเวณปลายยอดของลำต้น มีขนาดเล็กที่สุด และมีสีเขียวจาง

3) ราก สับปะรดเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวมีอายุหลายปี เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้วพุ่มใบกว้าง และสูงประมาณ 100 เซนติเมตร รากเป็นระบบรากฝอย (Fibrous Root System) ประกอบด้วยราก (Adventitious Root) เป็นจำนวนมากเกิดจากจุดกำเนิดราก ซึ่งอยู่ทั่วใบตามมุมใบของลำต้นทั้งส่วนที่อยู่ใต้ผิวดิน และเหนือผิวดิน รากที่อยู่ใต้ผิวดินเรียกว่า รากดิน (Soil Root) รากเหล่านี้มักกระจายอยู่ในผิวดินตื้นๆ ส่วนรากที่เกิดตามมุมใบบนส่วนของลำต้นที่อยู่เหนือผิวดินเรียกว่า รากมุมใบ (Axillary Root) มักเกิดเวียนรอบลำต้นตามมุมใบ และอาจช่วยดูดน้ำ และธาตุอาหารให้ต้นสับปะรดได้

4) ดอก ลักษณะช่อดอกของสับปะรดเป็นแบบ Spike ช่อดอกของสับปะรดแต่ละช่อมีดอกย่อย 100- 200 ดอก ดอกย่อยแต่ละดอกเป็นดอกสมบูรณ์เพศ (Complete Flower)

5) ผลของสับปะรดเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องมีการผสมเกสร (Parthenocarpy) ผลเป็นผลรวม (Multiple Fruit) ประกอบด้วยผลย่อย 100-200 ผลเชื่อมติดกันเข้ากับแกนกลางของช่อดอก รูปผลเป็นทรงกระบอก กลมหรือรี ผลย่อยจะเรียงตัวเป็นเกลียวรอบแกนผล น้ำหนัก และขนาดของผลจะแตกต่างกันไปตามลักษณะพันธุ์ และความสมบูรณ์

6) พันธุ์ สับปะรดที่ปลูกเป็นการค้ามี 5 กลุ่ม ตามรูปร่างของใบ และผล คือ Cayenne, Queen, Pernambuco, Spanish และ Mordilona โดยพันธุ์ที่ทำการศึกษาอยู่ในกลุ่ม Cayenne ซึ่งเป็นกลุ่มที่นิยมปลูกในเขตร้อนทั่วโลกมากที่สุด ได้แก่ พันธุ์ปัตตาเวีย ซึ่งมีชื่อเรียกในประเทศไทยแตกต่างกัน เช่น สับปะรดศรีราชา สับปะรดปราณบุรี และกัลกัตตา เป็นต้น ลักษณะทั่วไปมีทรงต้นใหญ่กว่าพันธุ์อื่นๆ เจริญเติบโตเต็มที่สูงประมาณ 100 เซนติเมตร มีใบประมาณ 80 ใบ โดยใบที่ยาวที่สุด (D-Leave) มีความยาว 80-100 เซนติเมตร และกว้าง 4-5 เซนติเมตร ใบมีสีเข้ม ผิวใบด้านบนเป็นเงามัน ขอบใบเรียบอาจมีหนามที่ปลายใบเล็กน้อย (จารุพันธุ์ ทองแถม, 2526)

2.5.2 **สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสับปะรด**

1) ดิน สับปะรดขึ้นได้ดีในดินทุกชนิดที่มีการระบายน้ำดี แต่ชอบดินร่วน ดินร่วนปนทราย ดินปนลูกรัง ดินทรายชายทะเล และชอบที่ลาดเท ความลาดเอียงของพื้นที่ที่เหมาะสม 1-2 เปอร์เซ็นต์ มี pH อยู่ในช่วง 4.5-5.5 กรณีที่ pH สูงกว่า 6.0 จะทำให้ต้นเป็นโรคเน่าที่เกิดจากเชื้อไฟทอปธอร่า (*Phytophthora* spp.) และถ้า pH สูงถึง 7.5 จะทำให้ผลผลิตของสับปะรดลดลง สับปะรดมีความต้องการธาตุอาหาร ได้แก่ ฟอสฟอรัส แคลเซียม และแมกนีเซียม ในปริมาณค่อนข้างน้อย และมีความทนทานในสภาพที่มีธาตุอลูมิเนียม และแมงกานีสในดินสูงได้ดี

2) แสง สับปะรดเป็นพืชที่ต้องการแสงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเจริญเติบโตก่อนออกดอก ถ้าได้รับแสงไม่เพียงพอจะส่งผลกระทบทางลำต้น ใบ รวมถึงผลผลิตด้วย

3) อุณหภูมิ ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสับปะรดอยู่ในช่วง 20-32 องศาเซลเซียส ความแตกต่างของอุณหภูมิกลางวัน และกลางคืนไม่ควรเกิน 10 องศาเซลเซียส การเจริญของราก และการดูดธาตุอาหารของรากจะเป็นไปได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส ในขณะที่การยืดตัวของใบจะมีอัตราสูงสุดที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ถ้ามีอุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส จะทำให้

สับปะรดชะงักการเจริญเติบโต เนื่องจากรากสับปะรดไม่สามารถดูดธาตุอาหารพวกไนเตรทมาใช้ประโยชน์ได้ และถ้ามีอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้ใบ และผลของสับปะรดเกิดอาการไหม้ (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2522)

4) ความชื้น สับปะรดเป็นพืชที่ขึ้นได้ดีในที่แห้งแล้ง โดยสับปะรดมีการสังเคราะห์แสงแบบ (Crassulacean Acid Metabolism;(CAM)) มีการดึงดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เพื่อเปลี่ยนเป็นกรดในตอนกลางคืน และใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตในตอนกลางวัน ระบบดังกล่าวทำให้สับปะรดสามารถปิดรูหายใจในตอนกลางวัน เพื่อให้มีการใช้น้ำน้อยลง ทำให้ทนต่อสภาพแห้งแล้งได้ดีมาก แต่สับปะรดมีระบบรากค่อนข้างตื้นทำให้มีการชะงักการเจริญเติบโตในช่วงแล้งจัด โดยปริมาณน้ำฝนที่เพียงพอสำหรับความต้องการของสับปะรดอยู่ในช่วง 1,000-1,500 มิลลิเมตรต่อปี

2.5.3 การเก็บเกี่ยวสับปะรด

ผลสับปะรดใช้เวลาในการเจริญเติบโตตั้งแต่บังคับผลจนถึงระยะเก็บเกี่ยว 150-165 วัน โดยสีของเปลือกจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลือง

2.5.4 โรคและแมลง

1) โรคยอดเน่า และรากเน่า (Heart Rot and Root Rot) เป็นโรคที่พบมากที่สุด โดยพบในช่วงอายุ 1-3 เดือน ในต้นที่เป็นโรคจะพบว่า ส่วนของยอดจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำตาลอ่อนมีเหลือบสีแดงเล็กน้อย ขอบใบจะโค้งลงทางด้านล่าง เมื่อดึงส่วนยอดออกใบจะหลุดขึ้นมาเป็นกลุ่มเนื่องจากส่วนของโคนใบ และปลายยอดถูกทำลายไปแล้ว การป้องกันทำได้โดยปลูกในที่ที่มีการระบายอากาศดี

2) โรคโคนเน่า (Base Rot, Butt Rot) โรคโคนเน่ามักเกิดกับส่วนขยายพันธุ์โดยส่วนโคนจะมีรอยแผลเน่าดำ เนื้อเยื่อส่วนที่อ่อนนุ่มจะถูกทำลาย ต่อมาใบจะเริ่มเหี่ยว การป้องกันทำได้โดยหลีกเลี่ยงการปลูกในดินที่มีความชื้นมาก

3) โรคเหี่ยวจากเพลี้ยแป้ง (Mealy Bug Wilt) อาการจะปรากฏที่ระบบรากโดยรากจะหยุดการเจริญเติบโต และเน่าตาย หลังจากนั้นใบจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอมชมพู ปลายใบเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล มีรอยแผลแห้ง และม้วนเข้า การป้องกันทำได้โดยการควบคุมเพลี้ยแป้ง

4) อาการบ้าใบ หรือบ้าจุก (Fasciations) เป็นอาการที่สับปะรดมีการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อบางส่วนผิดปกติ ซึ่งความผิดปกติมักเกิดกับส่วนยอดของลำต้น ก้านผล หรือจุก อย่างไรก็ตามอาการบ้าใบหรือบ้าจุกไม่เกิดขึ้นไม่บ่อย และไม่มีการถ่ายทอดทางพันธุกรรม

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 งานวิจัยด้านการศึกษา Phytoremediation

จุรีพร สมพงษ์ และแจ่มจันทร์ บำรุงเกาะ (2545) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับสารตะกั่วในดิน โดยใช้ผักกาดเขียว (*Brassica juncea* (L.) Czern) กวางตุ้ง (*Brassica chinensis* Jusl.) และผักคะน้า (*Brassica alboglabra* Bailey) ทำการเก็บตัวอย่างพืชทั้งสามชนิดที่ช่วงอายุ 45, 55 และ 65 วัน พบว่า ที่ช่วงอายุ 45 วัน ผักกาดเขียว และกวางตุ้ง สามารถดูดซับสารตะกั่วสูงที่สุด มีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 1.44 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งสูงกว่าผักคะน้า (1.00 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง) และการดูดซับสารตะกั่วจะลดลงเมื่ออายุของผักมากขึ้น

สุภาพร พงศ์ธรพฤกษ์ (2545) ได้ทำการศึกษาการสะสมตะกั่ว และแคดเมียมในผัก 5 ชนิด ได้แก่ ผักบุ้ง คะน้า ผักกาดหอม ผักกาดเขียว และต้นหอม โดยให้มีสารตะกั่วปนเปื้อนในดินที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0, 10, 100, 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0, 2.5, 5, 10 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ผลการทดลองพบว่า ผักกาดหอมมีการสะสมตะกั่ว และแคดเมียมสูงกว่าผักชนิดอื่น โดยมีการสะสมตะกั่วมากที่สุดในส่วนรากมีค่าอยู่ในช่วง 41.54–139.31 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

จงจิตร แสงประจักษ์ และปาวีณา นิวรณุสิต (2546) ศึกษาความสามารถของไม้ประดับ 3 ชนิด คือ กระดุมทอง (*Melampodium paludosum* HBK.) ผักเป็ดเขียว (*Ahernanthera ficoides* (L.) R. Br) และแพรเซี่ยงไฮ้ (*Portulaca grandiflora* Hook. F.) ในการดูดซับสารตะกั่วในดิน ผลการทดลองพบว่า ผักเป็ดเขียว มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่วได้ดีกว่ากระดุมทอง และแพรเซี่ยงไฮ้ โดยการดูดซับสารตะกั่วมีค่าเท่ากับ 2.87, 2.74 และ 1.93 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ที่ช่วงอายุ 45, 55 และ 65 วัน ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณสารตะกั่วที่ตกค้างในแปลงดินทดลองที่มีปริมาณ สารตะกั่วเริ่มต้น 0.76 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง พบว่า ในแปลงดินทดลองปลูกผักเป็ดเขียว มีค่าปริมาณสารตะกั่วที่ตกค้างต่ำกว่าแปลงดินทดลองปลูกกระดุมทอง และแพรเซี่ยงไฮ้ โดยมีค่าเหลืออยู่ 0.32, 0.34 และ 0.42 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ที่ช่วงอายุ 45, 55 และ 65 วัน ตามลำดับ และค่าความเป็นกรด-ด่างในดินที่ช่วงอายุ 45, 55 และ 65 วัน มีค่าเท่ากับ 6.60, 6.37 และ 7.40 ตามลำดับ

นัยนันท์ อริยกานนท์ และคณะ (2546) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสะสมสังกะสีในผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea* Coss.) และผักกาดเขียวกวางตุ้ง (*Brassica chinensis* Linn.) โดยทำการปลูกพืชทั้งสองชนิดในดินที่เติมสังกะสี ที่ระดับความเข้มข้น 0, 10, 100 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ผลการทดลองพบว่า พืชสองชนิดมีการสะสมสังกะสีได้แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสังกะสีในดิน โดยผักกาดเขียวปลีสะสมสังกะสีได้มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 4,825 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งพืช เมื่อเติมสังกะสีในดิน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับผักกาดเขียวกวางตุ้งสะสมสังกะสีได้มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 4,766 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งพืช เมื่อเติมสังกะสีในดิน 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

Sampanpanish et al. (2004 และ 2005) ได้ศึกษาความสามารถของวัชพืชในประเทศไทยเพื่อดูดซับโครเมียมจากดิน โดยใช้วัชพืช 6 ชนิด ได้แก่ หญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) ขลู่ (*Pluchea indica*) ก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus*) หญ้าข้าวนก (*Echinochloa colonum*) หญ้าแฝก (*Vetiveria nemoralis*) และผักขม (*Amaranthus viridis)* พบว่า หญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) และขลู่ (*Pluchea indica*) มีความสามารถในการสะสมโครเมียมได้สูงสุดคือ 152.1 และ

151.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน เป็นเวลา 30 วัน โดยในต้นขลู่ (*Pluchea indica*) มีการสะสมโครเมียม ในราก ลำต้น และใบ คิดเป็น 27%, 38% และ 35% ของน้ำหนักโครเมียมที่ดูดซับทั้งหมด ตามลำดับ ส่วนหญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) มีการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ในราก ลำต้น และใบเท่ากับ 51%, 49% และ 0% ของน้ำหนักโครเมียมที่ดูดซับทั้งหมด นอกจากนี้ Sampanpanish et al. (2006) พบว่า การสะสมและเคลื่อนย้ายโครเมียมในเนื้อเยื่อของพืช ทำให้เกิดการดูดซับโครเมียมในดินที่มีการปนเปื้อนเพื่อสะสมในพืชซึ่งในต้นขลู่ (*Pluchea indica*) มีการสะสมโครเมียมมากกว่าในหญ้าแพรก

สรัตนา เสนาะ (2548) ศึกษาการดูดดึงสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว โดยใช้หญ้าแฝกทานตะวัน และข้าว สำหรับแฝกทำการศึกษา 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ราชบุรี และพันธุ์สุราษฎร์ธานี ผลการทดลองพบว่า แฝก และทานตะวันสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่ปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว โดยแฝกทั้ง 2 สายพันธุ์สามารถดูดดึงตะกั่วมาสะสมในลำต้น และใบได้ไม่แตกต่างกัน ส่วนทานตะวัน พบว่า ปริมาณการดูดดึงสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว มีการสะสมในลำต้น และใบ > ฐานรองดอก >ราก > เมล็ด สำหรับข้าว พบว่า สังกะสี แคดเมียม และตะกั่วมีผลทำให้ข้าวแสดงอาการใบเหลือง (Chlorosis) โดยมีการดูดดึงในส่วนรากได้มากกว่าลำต้น และใบ

ประยงค์ ศรีไพสนท์ (2548) ทำการศึกษาพืช 4 ชนิดในเรือนทดลอง ได้แก่ แฝกสายพันธุ์กำแพงเพชร หญ้ารูซี่ โสนแอฟริกัน และถั่วพุ่มดำ เพื่อดูดซึมตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 0, 10 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน การทดลองครั้งนี้พบว่า แฝกสายพันธุ์กำแพงเพชรสามารถดูดซึมตะกั่วได้สูงสุดในใบ และรากมีค่าเท่ากับ 0.48 และ 0.26 มิลลิกรัม ตามลำดับ สำหรับหญ้ารูซี่ดูดซึมตะกั่วในใบ และราก มีค่าเท่ากับ 0.23 และ 0.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โสนแอฟริกันดูดซึมตะกั่วในใบ และรากมีค่าเท่ากับ 0.18 และ 0.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และถั่วพุ่มดำดูดซึมตะกั่วในใบ และรากมีค่าเท่ากับ 0.23 และ 0.14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ จึงได้คัดเลือกแฝกสายพันธุ์กำแพงเพชร ไปปลูกในพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว 1,530 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า แฝกสามารถดูดซึมตะกั่วในใบได้มีค่าเท่ากับ 1.71 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และในรากมีค่าเท่ากับ 12.88 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

ศิริพร แสงจันทร์ (2549) ศึกษาการสะสมตะกั่ว และแคดเมียมในพืชผัก และไม้ดอก 3 ชนิด ได้แก่ คะน้า มะเขือเทศ และดาวเรือง ผลการทดลองพบว่า คะน้าไม่สามารถสะสมตะกั่ว และแคดเมียมได้ และดาวเรืองมีการสะสมตะกั่วอยู่ในช่วง 0.07-0.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน สำหรับมะเขือเทศสามารถสะสมตะกั่วในช่วง 0.13-0.19 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

2.6.2 งานวิจัยด้านการใช้สารคีเลต

Chen et al. (2001) ทำการศึกษาผลของสาร EDTA และ HEDTA ต่อการดูดดึงแคดเมียม โครเมียม และนิเกิล โดยใช้ทานตะวัน ด้วยการทำการเติมสาร EDTA และ HEDTA ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ผลการทดลอง พบว่า สาร EDTA และ HEDTA สามารถช่วยเพิ่มการดูดดึงแคดเมียม และนิเกิลในส่วนลำต้น (Shoot) สูงกว่าส่วนของราก (Root) สำหรับโครเมียม พบว่า สาร EDTA และ HEDTA สามารถช่วยในการดูดดึงโครเมียมในส่วนรากของพืชเท่านั้น

Luo et al. (2004) ทำการศึกษาการดูดดึงและเคลื่อนย้ายโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม ออกจากดินที่ปนเปื้อนโดยใช้ข้าวโพด (*Zeamay* L.) และพืชตระกูลถั่ว (*Phaseolus vulgaris* L.) ในการทดลองมีการใช้สารคีเลต 3 ชนิดคือสาร EDTA, EDDS และ Citric Acid ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1, 2.5 และ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ระยะเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่างคือ 7 และ 14 วันหลังจากใส่สารคีเลตแต่ละชนิด ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร EDDS มีผลกระทบต่อทองแดงในข้าวโพด และถั่วมากกว่าสาร EDTA โดยที่ความเข้มข้นของสาร EDDS ที่ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดินสามารถทำให้ทองแดงในส่วนลำต้นเหนือดินของพืชสูงขึ้น เท่ากับ 2,060 และ 5,130 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของข้าวโพดและถั่ว ตามลำดับ โดยเพิ่มขึ้น 45 และ 135 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้ใส่สารคีเลต ในขณะเดียวกันสาร EDTA สามารถทำให้ตะกั่วในส่วนเหนือดินของพืชเพิ่มสูงสุดเท่ากับ 270 และ 487 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของข้าวโพดและถั่ว ตามลำดับ โดยเพิ่มขึ้นเป็น 9 และ 43 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้ใส่สารคีเลต สำหรับความเข้มข้นของสังกะสีในส่วนลำต้นเหนือดินที่ใช้สาร EDDS สูงกว่าสาร EDTA สรุปได้ว่าสาร EDDS มีผลทำให้ทองแดง และสังกะสีอยู่ในรูปที่เคลื่อนย้ายได้ในพืชมากกว่าสาร EDTA ส่วนสาร EDTA มีผลทำให้ตะกั่ว และแคดเมียมอยู่ในรูปที่เคลื่อนย้ายได้ในพืชมากกว่าสาร EDDS

และการใช้สาร EDDS สามารถเพิ่มการดูดดึงทองแดงได้มากที่สุด ส่วนการใช้สาร EDTA สามารถเพิ่มการดูดดึงตะกั่วได้มากที่สุด ส่วน Citric Acid มีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักได้น้อยกว่าสาร EDTA และEDDS

Cao et al. (2007) ศึกษาการใช้สารคีเลต 2 ชนิด ได้แก่ EDDS และเมทิลไกซินไดอะซิตริกแอซิด (Methylglycin diacetic; MGDA) ที่ระดับความเข้มข้น คือ 4 และ 8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เพื่อเพิ่มการดูดดึงตะกั่ว และสังกะสีโดยการใช้ต้นบานเย็น (*Mirabilis jalapa*) ผลการศึกษาพบว่า สารคีเลตทั้ง 2 ชนิดมีผลต่อการเคลื่อนย้ายตะกั่ว กล่าวคือ ตะกั่วมีการสะสมและเคลื่อนย้ายเพิ่มขึ้นในพืชเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยสังกะสีไม่มีการสะสมและเคลื่อนย้ายเพิ่มขึ้นในพืชเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้คีเลตทั้ง 2 ชนิด มีอิทธิพลต่อการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในดินเพียงเล็กน้อย และสามารถทำให้แบคทีเรียบริเวณผิวรากพืชลดลง

January et al. (2007) ทำการศึกษาการดูดดึงแคดเมียม โครเมียม นิเกิล โดยใช้ทานตะวันที่ปลูกแบบไฮโดรโพนิค (Hydroponic) ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 30 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.708 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผลการทดลอง พบว่า สาร EDTA ช่วยเพิ่มการดูดดึงโครเมียมไว้ในส่วนราก (Root) และลำต้น (Stem) ของทานตะวันได้สูงกว่าแคดเมียม และนิเกิล สำหรับการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของพืช พบว่า สาร EDTA มีผลทำให้น้ำหนักแห้งของพืชลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสาร EDTA

Liu et al. (2007) ศึกษากุหลาบหิน (*Sedum alfredii* Hance) โดยใช้สารคีเลต 6 ชนิด ได้แก่ EDTA, DTPA, EDDS, Citric Acid, Oxalic Acid (ออกซาลิคแอซิต) และ Tartaric Acid (ทาทาริคแอซิต) โดยใช้ความเข้มข้นของสาร EDTA, DTPA และ EDDS เท่ากับ 1, 2, 4 และ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ส่วนกรด Citric Acid, Oxalic Acid และ Tartaric Acid ใช้ความเข้มข้นที่ระดับ 2, 4, 8 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึง ตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม และสังกะสี ผลการทดลอง พบว่า สาร EDTA มีประสิทธิภาพในการเพิ่มการดูดดึงตะกั่วได้สูงกว่าสาร DTPA, EDDS, Citric Acid, Oxalic Acid และ Tartaric Acid ที่ทุกระดับความเข้มข้น

Quartacci et al. (2007) ศึกษาการใช้สารคีเลต คือ ไนทริโทรแอซิติก (Nitrilotriacetic acid; NTA) และ EDDS โดยใช้ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดินเพื่อเพิ่มการดูดดึงสารหนู (As) แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้ผักกะหล่ำ (*Brassica carinata*) 9 สายพันธุ์โดยทำการทดลองปลูกในสารละลาย และปลูกในดิน โดยมีการประเมินผลจากการทดสอบการงอก และความยาวของรากพืช ผลการทดลองปลูกพืชตระกูลกะหล่ำ 9 ชนิด พบว่า พืชมีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้สูงที่สุดในส่วนยอด และพบว่ามวลชีวภาพไม่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดย EDDS มีประสิทธิภาพในการดูดดึงทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี มากกว่า NTA ในขณะที่สาร EDDS และ NTA มีประสิทธิภาพต่ำในการดูดดึงสารหนู และแคดเมียม นอกจากนี้ยังพบว่า กะหล่ำมีการเจริญเติบโตลดลง หากแต่มีความสามารถอยู่รอด และทนทานต่อโลหะหนักได้

Yu and Gu (2007) ศึกษาการใช้สาร EDTA ดูดดึงโครเมียมไตรวาเลนท์ (Cr^{3+}) และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (Cr^{6+}) โดยใช้ (*Salix matsudana* Koidz ผสมกับ *Salix alba* L.) และ *Salix babylonica* L. โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 6 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดการทดลองที่เติม Cr^{6+} และ EDTA (1:1, EDTA: 0.86 mM) 2) ชุดการทดลองที่เติม Cr^{6+} และ EDTA (1:0.5, EDTA: 0.43 mM) 3) ชุดการทดลองที่เติม Cr^{3+} และ EDTA (1:1, EDTA: 0.43 mM) 4) ชุดการทดลองที่เติม Cr^{3+} และ EDTA (1:0.5, EDTA: 0.22 mM) 5) ชุดการทดลองที่เติม Cr^{6+} และ 6) ชุดการทดลองที่เติม Cr^{3+} ผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่ใช้พืช (*Salix matsudana* Koidz ผสมกับ *Salix alba* L.) มีการสะสมโครเมียมมากที่สุดในส่วนรากของชุดการทดลองที่ใส่ Cr^{3+} สำหรับการทดลองกับ *Salix babylonica* L. พบว่า ชุดการทดลองที่ใส่ Cr^{3+} สามารถสะสมมากที่สุดในส่วนราก (Root) และลำต้นส่วนล่าง (Bottom Stem) สำหรับลำต้นส่วนบน (Top Stem) และใบ (Leaf) พบว่า ชุดการทดลองที่เติม Cr^{3+}, EDTA (1:1, EDTA: 0.43 mM) และ Cr^{3+}, EDTA (1:0.5, EDTA: 0.22 mM) สามารถสะสมโครเมียมใน *Salix babylonica* L. ได้สูงสุด จากผลการศึกษาข้างต้นทำให้พบว่า พืชมีความสามารถในการดูดดึงโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ได้น้อยกว่าโครเมียมไตรวาเลนท์ และพบว่าสาร EDTA ที่เติมลงไปมีผลต่อการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนของลำต้นส่วนบน และใบเพิ่มขึ้น

Epelde et al. (2008) ทำการเปรียบเทียบความสามารถของสารคีเลต 2 ชนิด คือ สาร EDTA และEDDS ที่ระดับความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินในการดูดดึงตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น

ของตะกั่วเท่ากับ 2,500 และ 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน โดยใช้พืช (*Cynara cardunculus* L.) ผลการทดลอง พบว่า สาร EDTA มีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วได้สูงกว่าสาร EDDS ทั้งในส่วนยอดและรากที่ระดับความเข้มข้นของสารตะกั่วเท่ากับ 2,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน สาร EDTA เพิ่มการดูดดึงตะกั่วในส่วนยอด และรากได้เท่ากับ 666.8 และ 1,450.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ สำหรับสาร EDDS เพิ่มการดูดดึงตะกั่วในส่วนยอด และรากได้เท่ากับ 77.2 และ 1,412.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ในขณะที่การทดสอบความเข้มข้นของสารตะกั่วเท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า สาร EDTA เพิ่มการดูดดึงตะกั่วในส่วนยอด และรากได้เท่ากับ 1332.0 และ 6695.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ส่วนสาร EDDS เพิ่มการดูดดึงตะกั่วในส่วนยอด และรากได้เท่ากับ 310.2 และ 4,165.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ และจากการศึกษาด้านน้ำหนักแห้ง พบว่าสาร EDTA และ EDDS มีผลทำให้น้ำหนักแห้งของพืชลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้เติมสาร คีเลตทั้ง 2 ชนิด นอกจากนี้สาร EDTA มีผลทำให้น้ำหนักแห้งของพืชลดลงน้อยกว่าสาร EDDS

Muhammad et al. (2009) ได้ทำการศึกษาความสามารถของ EDTA และ Citric Acid ที่ระดับความเข้มข้น 0, 2.5, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ในการดูดดึงแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และโครเมียม ที่ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดเท่ากับ 10, 50, 20 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ โดยใช้ธูปฤษี (*Typha angustifolia*) โดยทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 1, 5, 10 และ 15 วัน หลังจากเติมสาร EDTA และ Citric Acid ซึ่งการศึกษาครั้งนี้พบว่า สาร EDTA ที่ระดับเข้มข้นเท่ากับ 2.5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เพิ่มการดูดดึงโครเมียมได้สูงสุดที่ระยะเวลา 10 วัน มีค่าเท่ากับ 17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถเพิ่มการดูดดึงตะกั่วได้สูงสุดที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 10 วัน มีค่าเท่ากับ 60.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ทั้งนี้สาร EDTA ที่ทุกระดับความเข้มข้นสามารถเพิ่มการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วได้สูงกว่า Citric Acid

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกพืช

1) เรือนเพาะชำ

2) ดินที่นำมาทดลองในเรือนเพาะชำ เป็นตัวอย่างดินลึกประมาณ 0-30 เซนติเมตร จากพื้นที่บริเวณแปลงสับปะรด ตำบลมาบข่า อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง

3) สับปะรดพันธุ์ ปัตตาเวีย *Ananas comosus* (L.) Merr

4) ภาชนะปลูกเป็นถุงดำอย่างหนาเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และหุ้มด้วยถุงพลาสติกอย่างหนา

5) โพแทสเซียมไดโครเมท (Potassium dichromate; $K_2Cr_2O_7$) และตะกั่วไนเตรท (Lead(II)nitrate; Pb $(NO_3)_2$) ที่ระดับความเข้มข้น 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ

6) สารคีเลต 2 ชนิด คือ เอทิลีนไดแอมีนเทตระแอซิตริก (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; (EDTA)) ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน คิดเป็นความเข้มข้นของ EDTA ในดินเท่ากับ 584.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินหรือ 0.58 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และเอททิลีนไดแอมีนดิสซัคซิเนท (Ethylene Diamine Disuccinate; (EDDS)) ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน คิดเป็นความเข้มข้นของ EDDS ในดินเท่ากับ 578.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินหรือ 0.58 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

7) เครื่องชั่งหยาบ 1 ตำแหน่ง

8) ป้าย

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพืช

1) ถุงสำหรับเก็บตัวอย่างดินและพืช

2) ฉลากสำหรับติดตัวอย่างดิน และพืช

3) น้ำปราศจากไอออน (Deionize, DI)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4) มีดหรือกรรไกร

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) เครื่องแก้วชนิดต่างๆ เช่น บีกเกอร์ (Beaker) กระบอกตวง (Cylinder) ปิเปต (Pipet) กรวยกรอง (Funnel) แท่งแก้ว (glass rod) ขวดปรับปริมาตร (Volumetric Flask) กระจกนาฬิกา (Watch Grass) ขวดรูปชมพู่ (Erlyenmayer Flask)

2) ชุด Flask Buchner Filtration

3) ตะแกรงร่อนดินขนาด 2 มิลลิเมตร

4) ขวดพลาสติกสำหรับใส่สารสกัดขนาด 60 มิลลิลิตร

5) ถุงซิป

6) เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS) รุ่น Analyst 800, Perkin Elmer

7) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) รุ่น ETHOS SEL, MILESTONE

8) ตู้อบความร้อน (Hot Air Oven) รุ่น ULE 500, MEMMERT

9) เตาไฟฟ้า (Hot Plate) รุ่น Cimarec 2, Thermolyne

10) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิความร้อน (Hot Water Bath)

11) เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH Meter)

12) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC)

13) เครื่องวัดศักยภาพออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP Meter)

14) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่งพิกัด 220 กรัม รุ่น BP 221S ยี่ห้อ Sartorius

15) ปั๊มดูดอากาศ รุ่น NO35AN 18-IP20

16) เครื่องเขย่าแบบหมุนวน (Mechanical Shaker)

17) เครื่องบดตัวอย่างพืช (Blender)

18) ตู้ดูดอากาศ (Hood)

19) เครื่องยูวี-สเปกโตรโฟโตรมิเตอร์ (UV-Spectrophotometer)

3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) กรดไนตริกเข้มข้น (65% HNO_3)
2) กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (37% HCl)
3) กรดซัลฟูริกเข้มข้น (95-97% H_2SO_4)
4) กรดเปอร์คลอริก (70% $HClO_4$)
5) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% H_2O_2)
6) ตะกั่วไนเตรท ($Pb(NO_{3\ 2})$
7) โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)
8) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
9) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
10) ไดฟีนิลคาร์บาไซด์ (1-5 Diphenylcarbazide)
11) อะซิโตน (Acetone)

3.2 สถานที่ดำเนินการวิจัย

3.2.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดิน

ดินที่ใช้ในงานวิจัยเก็บมาจากตำบลมาบข่า อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง

3.2.2 การศึกษาวิจัยในเรือนเพาะชำ

การดำเนินการทดลองได้ปฏิบัติการในโรงเรือนโดยมีการคลุมหลังคาโรงเรือนด้วยพลาสติกใส และแสงสว่างสามารถส่องผ่านได้ 97 % ที่ชั้น 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการวิจัยในห้องปฏิบัติการ ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการชั้น 3 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมด ตะกั่วทั้งหมด และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ในตัวอย่างดิน และตัวอย่างพืช

3.3 ระยะเวลาการวิจัย

เริ่มดำเนินการวิจัยในระหว่างเดือนเมษายน 2551 ด้วยการค้นคว้าหาข้อมูล การทบทวนเอกสาร การวางแผนการวิจัย การเก็บตัวอย่าง การวิเคราะห์ผล วิจารณ์ และสรุปผลการวิจัย โดยสามารถแสดงรายละเอียดขั้นตอนของการศึกษาได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วันที่เก็บตัวอย่างดินและพืชในเรือนทดลอง

ขั้นตอนการศึกษา	วันที่		
สำรวจ และเก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติเบื้องต้น	27	เมษายน	2551
เก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติเบื้องต้นเพื่อนำมาปลูก	9	สิงหาคม	2551
วันปลูกสับปะรด	16	สิงหาคม	2551
ใส่สารประกอบโครเมียม และตะกั่ว	16	กันยายน	2551
ใส่สารคีเลต (สาร EDTA และ EDDS)	16	กันยายน	2551
เก็บตัวอย่างดิน และพืชครั้งที่ 1	17	ตุลาคม	2551
เก็บตัวอย่างดิน และพืชครั้งที่ 2	16	พฤศจิกายน	2551
เก็บตัวอย่างดิน และพืชครั้งที่ 3	16	ธันวาคม	2551
เก็บตัวอย่างดิน และพืชครั้งที่ 4	16	มกราคม	2552

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการศึกษาสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานในภาพรวมได้ดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การเตรียมดินและภาชนะปลูก

1) การเตรียมดิน

1.1) ทำการสำรวจพื้นที่ พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างดิน จากตำบลมาบข่า อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง โดยวิธีการสุ่มที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร นำตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมด (Total Cr) โครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ [Cr(VI)] โครเมียมไตรวาเลท์ [Cr(III)] และตะกั่วทั้งหมด (Total Pb)

1.2) ดินที่ใช้ในการปลูกพืชทดลอง นำมาจากบริเวณพื้นที่ตำบลมาบข่า อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง โดยการขุดดินทดลองด้วยวิธีการสุ่ม ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร จำนวน 600 กิโลกรัม นำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำดินมาทุบให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นใส่ถุงพลาสติกสีดำอย่างหนาเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ชั่งดิน 5 กิโลกรัมใส่ถุง และหุ้มด้วยถุงพลาสติกใสอย่างหนาเพื่อป้องกันน้ำที่รดต้นไม้ชะละลาย (Leachate) ออกนอกถุง

1.3) ทำการสุ่มดินตัวอย่างจากข้อ 1.2 มาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยทำการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส มาบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินเบื้องต้นดังตารางที่ 3.2

2) การเตรียมภาชนะปลูก

ใช้ถุงพลาสติกสีดำอย่างหนาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 48 เซนติเมตร รวมทั้งหมด 120 ถุง และเตรียมถุงพลาสติกใสอย่างหนาหุ้มอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันน้ำชะละลาย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ดินที่นำมาศึกษา

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีการวิเคราะห์
- ลักษณะเนื้อดิน (Soil Texture)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Hydrometer Method
- ความเป็นกรด-ด่างของดิน (pH)	-	pH Meter (ดิน: น้ำ = 1:1)
- ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	เซนติโมลต่อกิโลกรัม	NH4+ saturation and distillation
- ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร	Soils: Water 1:1
- ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (OM)	เปอร์เซ็นต์	Ashing
- ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (N)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Kjeldahl method
- ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (P)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Bray II extraction
- ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ (K)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Ammonium acitate 1N pH 7.0 extraction
- โครเมียมทั้งหมด (Total Cr)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	AAS
- ตะกั่วทั้งหมด (Total Pb)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	AAS
- โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ (Cr^{6+})	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	UV-Spectrophotometer

3.4.2 การเตรียมพืช

1) พืชที่ใช้ในการวิเคราะห์เบื้องต้น

ทำการสุ่มตัวอย่างหน่อพันธุ์สับปะรดประมาณ 3 หน่อ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณการสะสมโครเมียม และตะกั่วโดยการย่อยด้วยกรดไนตริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเครื่องไมโครเวฟ (Microwave Digestion) ตามวิธีการของ United States Environmental Protection Agency, Method 3052 (USEPA, 1996a) แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม และตะกั่วทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ปชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (AAS) ผลการวิเคราะห์พบว่า หน่อสับปะรดที่ใช้ในการทดลองไม่มีการสะสมหรือปนเปื้อนจากสารโครเมียม และตะกั่ว

2) พืชที่ใช้ปลูกในเรือนทดลอง

พืชที่ใช้ในงานวิจัย คือ สับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย *Ananas comosus* (L.) Merr. ทำการคัดเลือกหน่อของสับปะรดที่มีขนาด น้ำหนัก และความยาวใกล้เคียงกัน โดยสูงประมาณ 15-20 เซนติเมตร จำนวน 96 หน่อ

3.4.3 การเตรียมสารประกอบโครเมียมและตะกั่ว

การเตรียมสารประกอบโครเมียม และตะกั่ว โดยชั่งสารประกอบโพแทสเซียมไดโครเมท ($K_2Cr_2O_7$) และตะกั่วไนเตรท (Pb $(NO_3)_2$) ให้ได้ตามสัดส่วนความเข้มข้นของโครเมียม และตะกั่วในดินที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (ppm) ตามลำดับ โดยคำนวณจากน้ำหนักดิน 5 กิโลกรัมต่อภาชนะ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารประกอบโครเมียมและตะกั่วที่ใส่ลงในดิน

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณสารประกอบโพแทสเซียมไดโครเมท ($K_2Cr_2O_7$) และตะกั่วไนเตรท (Pb $(NO_3)_2$) (กรัมต่อภาชนะปลูก)
โครเมียม 400	4.79
ตะกั่ว 500	3.20

หมายเหตุ : วิธีคำนวณดังภาคผนวก ก

3.4.4 การเตรียมสารคีเลต

การเตรียมสารคีเลต 2 ชนิด ได้แก่ สาร EDTA และ EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยให้ได้ตามสัดส่วนความเข้มข้นในดินเท่ากับสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 584.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และสาร EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 578.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ดังตารางที่ 3.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 ปริมาณสารคีเลตที่ใส่ลงในดิน

ความเข้มข้นของสารคีเลต	ปริมาณสารคีเลต (กรัมต่อกิโลกรัมดิน)
EDTA 2 มิลลิโมล	0.77
EDDS 2 มิลลิโมล	0.58

หมายเหตุ : วิธีคำนวณดังภาคผนวก ก

3.4.5 การดำเนินงานทดลอง

ชั่งดินหนัก 5 กิโลกรัมใส่ภาชนะทดลองทั้งหมดจำนวน 120 ถุง แต่ละถุงหุ้มด้วยถุงพลาสติกอย่างหนา เพื่อรองรับโลหะหนักที่จะออกมากับน้ำที่รดต้นไม้ นำหน่อสับปะรดที่ผ่านการคัดเลือกแล้วปลูกลงในภาชนะที่เตรียมไว้ ดูแลรักษาโดยรดน้ำทุกวันวันละ 100 มิลลิลิตรหลังจากปลูกสับปะรดประมาณ 30 วัน ใส่สารประกอบสารประกอบโพแทสเซียมไดโครเมท ($K_2Cr_2O_7$) และตะกั่วไนเตรท ($Pb(NO_3)_2$) เท่ากับ 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ พร้อมทั้งเติมสารคีเลต 2 ชนิด ได้แก่สาร EDTA และ EDDS ที่มีความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ลงไปในแต่ละกระถาง ประกอบด้วยชุดการทดลอง ดังนี้ (1) ชุดการทดลองที่ปลูกพืชไม่ใส่โลหะหนักและสารคีเลต (blank) จำนวน 24 ถุง (2) ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต (สาร EDTA และ EDDS) จำนวน 12 ถุง (3) ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA จำนวน 12 ถุง (4) ชุดที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS จำนวน 12 ถุง (5) ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต (สาร EDTA และ EDDS) จำนวน 12 ถุง (6) ชุดที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA จำนวน 12 ถุง (7) ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS จำนวน 12 ถุง (8) ชุดการทดลองที่ไม่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต จำนวน 12 ถุง และ (9) ชุดการทดลองที่ไม่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต โดยมีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อค (Randomized Complete Block Design, RCBD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดูแลรักษา และทำการรดน้ำวันเว้นวันในตอนเช้าปริมาณน้ำ 100 มิลลิลิตรต่อกระถาง เพื่อไม่ให้สับปะรดชะงักการเจริญเติบโต ซึ่งในกรณีที่มีน้ำล้นออกมาถึงถุงพลาสติกชั้นนอกได้มีการดึงน้ำด้วยกาลักน้ำกลับไปในถุงใหม่โดยไม่ต้องรดน้ำในวันดังกล่าว และไม่ใส่ปุ๋ยตลอดการทดลอง

3.4.6 การเก็บตัวอย่าง

1) การเก็บตัวอย่างดิน โดยทำการเก็บตัวอย่างดินหลังจากใส่สารประกอบโครเมียม และตะกั่ว และสารคีเลต ทุกๆ 30 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง 120 วัน โดยเก็บตัวอย่างทั้งหมดจากถุง นำมารวมและผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับตัวอย่างดินที่เก็บมาแล้วนำมาผึ่งให้แห้งในร่มที่อุณหภูมิห้อง และนำมาบดให้ละเอียด และร่อนผ่านตระแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่น–รีดักชั่น (Oxidation Reduction Potential; ORP) และหาค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity: EC) จากนั้นนำตัวอย่างดินอีกส่วนนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง นำมาบดร่อนด้วยตระแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมด โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และตะกั่วทั้งหมด

2) การเก็บตัวอย่างพืช ทำการเก็บตัวอย่างพืชหลังจากใส่สารประกอบโครเมียม และตะกั่ว และสารคีเลต ทุกๆ 30 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง 120 วัน นำพืชมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา 3-4 ครั้ง และล้างด้วยน้ำกลั่น ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ทำการแยกพืชออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนบนดิน (Aboveground; stem and leaf) และส่วนใต้ดิน (Underground; stem and root) นำพืชมาชั่งน้ำหนักสด จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง และนำตัวอย่างพืชมาชั่งน้ำหนักแห้ง แล้วจึงบดให้ละเอียด และร่อนผ่านตระแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ใส่ถุงซิป และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมด โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และตะกั่วทั้งหมด

3.4.7 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) การวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่ไม่ได้อบนำมาวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และหาค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity: EC)

2) การวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่อบ และร่อนผ่านตระแกรง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก 0.5 กรัม นำมาย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 37% จำนวน 9 มิลลิลิตร กับ กรดไนตริก (HNO_3) 65% จำนวน 3 มิลลิลิตร ตามวิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996a) ด้วยเครื่องไมโครเวฟ (Microwave Digestion) และวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม และตะกั่วทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; (AAS)) สำหรับโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ใช้วิธีการของ USEPA method 3060 (USEPA, 1996a) และทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องยูวี-สเปกโตรโฟโตรมิเตอร์ (UV-Spectrophotometer)

3) การวิเคราะห์ตัวอย่างพืช ทำการวิเคราะห์ 2 ส่วนคือ ส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดินของสับปะรด นำตัวอย่างพืชที่บดผ่านตระแกรงแล้ว ชั่งน้ำหนัก 0.5 กรัม ย่อยด้วยกรดไนตริก 65% จำนวน 8 มิลลิลิตร กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% จำนวน 2 มิลลิลิตร ตามวิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996b) ด้วยเครื่องไมโครเวฟ (Microwave Digestion) และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม และตะกั่วทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; (AAS)) สำหรับโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ใช้วิธีการของ USEPA method 3060 (USEPA, 1996a) และทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องยูวี-สเปกโตรโฟโตรมิเตอร์ (UV-Spectrophotometer)

3.4.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์หาความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณการดูดดึง และสะสมโครเมียม และตะกั่วในดิน และปริมาณการสะสมโครเมียม และตะกั่วในพืช ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทั้งนี้การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดังกล่าวจะปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติคือ Statistical Package for the Social Science (SPSS)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินที่เก็บมาจากบริเวณพื้นที่แปลงสับปะรด ตำบลมาบข่า อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง (ดังตารางที่ 4.1) พบว่า ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย มีอัตราส่วนของ ทราย: ทรายแป้ง: เหนียว เท่ากับ 63.80: 5.40: 30.80 โดยดินมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.4 ซึ่งถือได้ว่าเป็นดินที่มีความเป็นกรดรุนแรงมาก (Extremely Acid) (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ซึ่งพืชแต่ละชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ดีในระดับพีเอชของดินที่แตกต่างกัน สำหรับความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีค่าเท่ากับ 3.5 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ($cmol_{(c)}kg^{-1}$) ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 60 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (μS/cm) แสดงให้เห็นว่าดินไม่มีความเค็มที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพืช ซึ่งค่ามาตรฐานของดินที่มีความเค็ม และเป็นพิษต่อพืช ต้องมีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 4,000 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (มะลิวัลย์, 2544) ปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่าเท่ากับ 0.64 เปอร์เซนต์ จัดได้ว่าดินมีปริมาณอินทรียวัตถุน้อย เพราะโดยปกติดินที่ดีควรมีค่าอินทรียวัตถุมากกว่า 1.5 เปอร์เซนต์ (ยงยุทธ, 2543) นอกจากนี้ คุณสมบัติของดินทดลองมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 0.032 เปอร์เซนต์ ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ 6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ 48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม และตะกั่วทั้งหมดในดินที่ใช้ในการทดลองพบว่า มีค่าต่ำมากจนไม่สามารถวัดค่าได้

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินทดลอง

คุณสมบัติดิน	หน่วย	ค่าที่วิเคราะห์ได้
- ปริมาณอนุภาคทราย (Sand)	เปอร์เซ็นต์	63.80
- ปริมาณอนุภาคทรายแป้ง (Silt)	เปอร์เซ็นต์	5.40
- ปริมาณอนุภาคดินเหนียว (Clay)	เปอร์เซ็นต์	30.80
- ลักษณะเนื้อดิน (Soil Texture)	-	ดินร่วนเหนียวปนทราย
- ความเป็นกรดด่างของดิน (Soil pH)	-	4.4
- ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity)	เซนติโมลต่อกิโลกรัม	3.5
- ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)	ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร	60
- ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (Organic Matter)	เปอร์เซ็นต์	0.64
- ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)	เปอร์เซ็นต์	0.032
- ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Available Phosphorus)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	6
- ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ (Available Potassium)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	48
- ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน (Total Pb)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ND*
- ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดิน (Total Cr)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ND*

หมายเหตุ ND* หมายถึง มีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ลักษณะทางกายภาพ เคมี ปริมาณการสะสมโครเมียมและตะกั่วในดินทดลอง

งานวิจัยในครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาผลของสาร EDTAและ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วในดินปนเปื้อนโดยใช้สับปะรด ซึ่งประกอบด้วยชุดการทดลอง 7 ชุดการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ชุดการทดลอง 7 ชุดการทดลองที่ทำการศึกษา

	ชุดการทดลอง	รายละเอียด
1	Blank	ชุดการทดลองที่ปลูกพืชไม่ใส่สารโครเมียม ตะกั่ว และสารคีเลต
2	Control Cr	ชุดการทดลองที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต (สาร EDTA และ EDDS)
2	Cr EDTA	ชุดที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมและสาร EDTA
3	Cr EDDS	ชุดที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมและสาร EDDS
4	Control Pb	ชุดการทดลองที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต (สาร EDTA และ EDDS)
5	Pb EDTA	ชุดที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วและสาร EDTA
6	Pb EDDS	ชุดที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วและสาร EDDS

4.2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC)

การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน และค่าการนำไฟฟ้าของดินที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างสับปะรด 30, 60, 90 และ 120 วัน เพื่อให้ทราบถึงสภาพทางเคมีของดิน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วโดยใช้สับปะรด ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างดินไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC) ตามระยะเวลาดังกล่าวข้างต้นเป็นจำนวน 3 ซ้ำ ผลการทดลองสามารถกล่าวได้ดังนี้

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินทดลอง

ความเป็นกรด (Acidity) และความเป็นด่าง (Alkalinity) ของดิน เป็นคุณสมบัติที่สำคัญ และมีอิทธิพลต่อกระบวนการทางเคมี และชีวภาพของดินส่งผลต่อการเจริญเติบโต และให้ผลผลิตของพืช ซึ่งพืชแต่ละชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกัน และเพื่อเป็นการยืนยันถึงคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดลองว่ามีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสับปะรด ดังนั้นสามารถแสดงรายละเอียดค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อพืชชนิดต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการปลูกพืช

ชนิดของพืช	ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสม
ชา	4.0-5.5
สับปะรด	4.0-5.5
ข้าวโพด	5.5-7.5
ข้าวฟ่าง	5.5-7.5
ปอ	5.5-6.5
ถั่วเหลือง	6.0-7.0
ถั่วลิสง	6.0-7.0
ปาล์มน้ำมัน	6.0-7.0
มะพร้าว	6.0-7.0
มันสำปะหลัง	6.0-7.5
อ้อย	6.0-7.5
ยางพารา	4.0-7.5
กาแฟ	4.3-6.0
ข้าว	4.8-7.0

ที่มา: http://kromchol.rid.go.th/research/SS/soilqc.html#s1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.1) ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม

ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของดินหลังทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน (ดังตารางที่ 4.4) พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTAและชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว เนื่องจากสารคีเลตรวมตัวกับแคตไอออนของโครเมียมส่งผลให้พืชดูดดึงโครเมียมในสารละลายดินมากขึ้น และส่งผลให้เกิดไฮดรอกไซด์ (OH^-) ในสารละลายดินเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากไฮดรอกไซด์ในสารละลายดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้นด้วย (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544) นอกจากนี้ยังพบว่า สาร EDDS ในรูปของสารละลายมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 9.2 ซึ่งมีความเป็นด่างจัด จึงส่งผลให้ชุดการทดลองที่ใส่สาร EDDS มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า ชุดควบคุมที่ปลูกพืชและใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต รวมทั้งชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม และสาร EDTA ในทุกระยะเวลาของการทดลอง

1.2) ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่างของดินหลังทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินในชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต อยู่ในช่วง 3.99-4.51 ซึ่งเป็นช่วงกรดจัดมาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ส่วนชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA มีค่าความเป็นกรด-ด่างของดินอยู่ในช่วง 4.34-4.62 และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS มีค่าความเป็นกรด-ด่างของดินอยู่ในช่วง 4.64-5.13 โดยพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินในแต่ละชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายตะกั่วเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.3 จัดได้ว่าเป็นกรดจัดมาก และเมื่อพืชเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นทำให้สับปะรดมีการดูดดึงตะกั่วได้เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายดินเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม

ระยะเวลา	ค่าความเป็นกรด-ด่าง		
(วัน)	Control	Cr EDTA	Cr EDDS
30	$4.85^{a} \pm 0.19$	$5.12^{ab} \pm 0.10$	$5.48^{b} \pm 0.14$
60	$4.89^{a} \pm 0.10$	$5.15^{a} \pm 0.10$	$5.52^{b} \pm 0.12$
90	$4.90^{a} \pm 0.27$	$5.53^{b} \pm 0.27$	$5.50^{b} \pm 0.13$
120	5.16 ± 0.08	5.64 ± 0.13	5.83 ± 0.45

ตารางที่ 4.5 ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว

ระยะเวลา	ค่าความเป็นกรด-ด่าง		
(วัน)	Control	Pb EDTA	Pb EDDS
30	$3.99^{a} \pm 0.17$	$4.34^{ab} \pm 0.23$	$4.64^{b} \pm 0.11$
60	$4.13^{a} \pm 0.08$	$4.47^{ab} \pm 0.18$	$4.70^{b} \pm 0.81$
90	4.49 ± 0.41	4.58 ± 0.74	4.99 ± 0.20
120	$4.51^{a} \pm 0.06$	$4.62^{a} \pm 0.09$	$5.13^{b} \pm 0.11$

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอนบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ในดินทดลอง

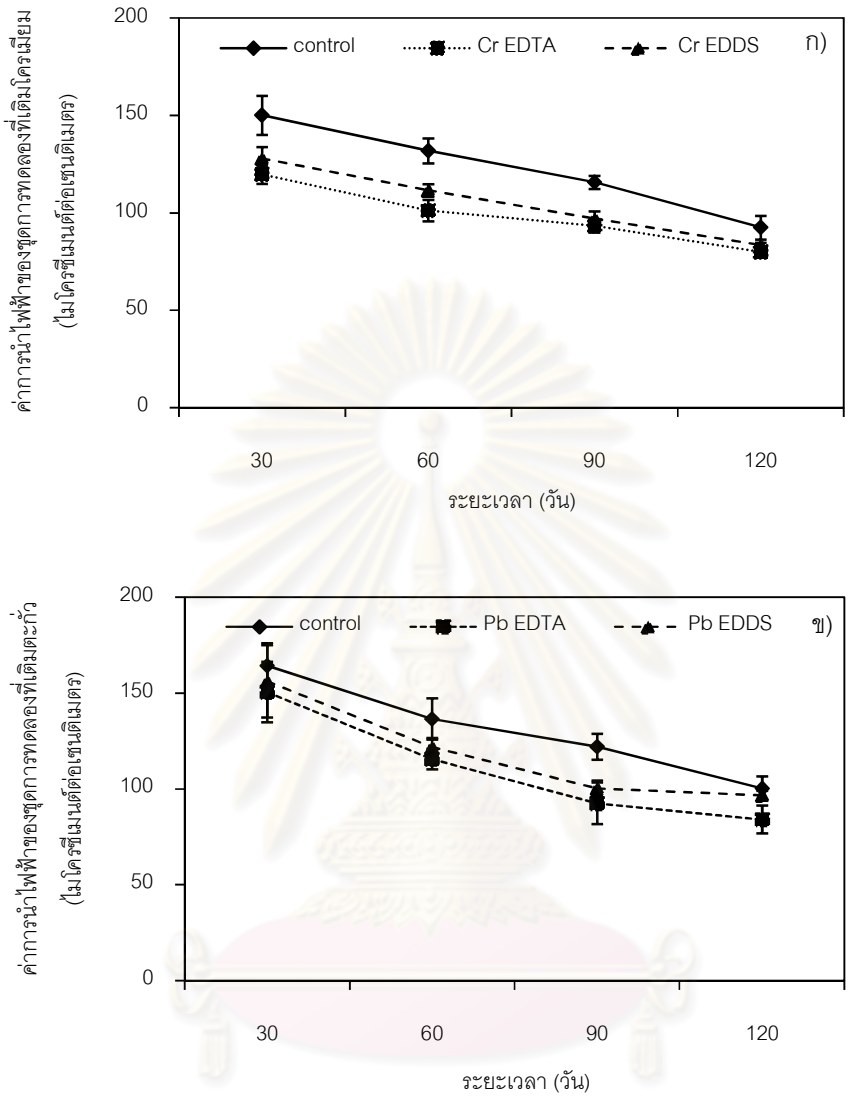
2.1) ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม

ค่าการนำไฟฟ้าของดินหลังทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน (ดังรูปที่ 4.1ก) ในชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของดินชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 30 วันของการทดลอง มีค่าการนำไฟฟ้า มากที่สุดเท่ากับ 150.1, 119.63 และ 127.93 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ในแต่ละ

ชุดการทดลอง และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ระยะเวลา 30 วันของการทดลอง มีปริมาณสารละลายพวกที่มีประจุ (Electrolyte) ต่างๆ อยู่ในสารละลายดินมาก (อนนท์ สุขสวัสดิ์, 2547) ทำให้ความเป็นสื่อของการนำไฟฟ้าของดินทดลองสูง และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นสารละลายพวก Electrolyte ที่ถูกดูดดึงโดยพืชจึงทำให้มีปริมาณลดลง ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินลดลงไปด้วย หรืออาจเกิดจากการที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้สารประกอบโครเมียมบางส่วนถูกดูดยึดกับคอลลอยด์ (Colloid) ของดิน และสุดท้ายส่งผลต่อความเข้มข้นของประจุต่างๆ เช่น แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) โซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K) ในสารละลายดินลดลง และเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นประจุต่างๆ ในสารละลายดิน อาจถูกพืชดูดดึงไปใช้ หรือเกิดการสูญเสียจากปัจจัยอื่นๆ ทางสิ่งแวดล้อม เช่น กระบวนการย่อยของจุลินทรีย์ในดิน เป็นต้น

2.2) ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว

จากผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของดินหลังทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน (ดังรูปที่ 4.1ข) ในชุดการทดลองที่ใส่ตะกั่ว พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของดินชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 30 วันของการทดลอง พบว่า มีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 164.2, 150.47 และ 156.07 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ในแต่ละชุดการทดลอง และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณตะกั่วที่ใส่ลงไปในดินมีความเข้มข้นลดลง โดยอาจเกิดจากตะกั่วบางส่วนที่อยู่ในสารละลายดินเข้าดูดยึดกับคอลลอยด์ (Colloid) ของดินทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วในสาระละลายดินลดลง และอาจเกิดจากไอออนชนิดต่างๆ ที่พืชดูดดึงไปใช้ในการเจริญเติบโต หรือสูญหายจากปัจจัยอื่นๆ โดยไอออนสำคัญที่มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง คือ ตะกั่ว แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม คลอไรด์ หรือซัลเฟต จึงส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินลดลง (สรสิทธิ์ วัชโรทยาน, 2513) เมื่อค่าการนำไฟฟ้าลดลงยังส่งผลให้พืชสามารถสังเคราะห์แสง และสร้างคลอโรฟิลล์ได้มากขึ้น โดยมีผลต่อการเพิ่มอัตราการหายใจและปริมาณไนโตรเจนในพืชได้



รูปที่ 4.1 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินในชุดการทดลอง ก) ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม และ ข) ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วที่ระยะเวลาต่างๆ (n=3)

4.2.2 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการสะสมโครเมียมและตะกั่วในดิน

การศึกษาผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วโดยใช้สับปะรด โดยทำการปลูกสับปะรด ลงในภาชนะปลูกที่มีดินสำหรับปลูก 5 กิโลกรัมต่อภาชนะปลูก ดูแล รักษา จนสับปะรดเจริญเติบโต แข็งแรง มีความทนทานต่อสภาพภูมิอากาศ ประมาณ 30 วัน เพื่อเป็นการยืนยันว่า ต้นสับปะรดที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ มีอัตราการรอดตาย 100 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการใส่สารโครเมียมที่ระดับความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และสารตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และเติมสาร EDTA และ EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดินลงในดินแต่ละชุดการทดลอง มีการรดน้ำ 100 มิลลิลิตรทุกวันตลอดระยะเวลาในการทดลอง จนครบระยะเวลาของการศึกษาที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน (นับจากใส่สารโครเมียม สารตะกั่ว สาร EDTA และ EDDS) ทั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มไปทำการวิเคราะห์ เพื่อหาปริมาณสารโครเมียม และตะกั่วทั้งหมดที่เหลือในดินตามระยะเวลาดังกล่าว

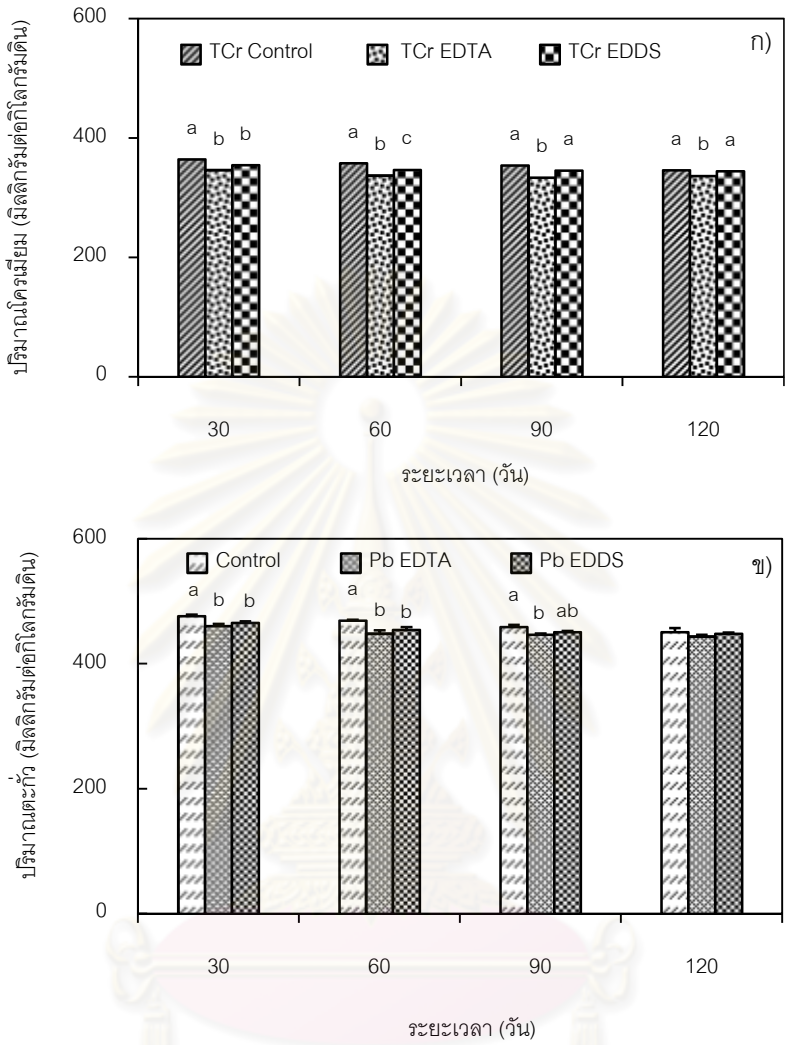
นอกจากนี้ มีการยืนยันผลของการใส่สารประกอบโครเมียม และตะกั่ว ด้วยการทำการประกันและควบคุมคุณภาพ (QA/QC) ของดิน โดยใส่สารประกอบโครเมียม และตะกั่วลงในภาชนะปลูกที่มีขนาด และปริมาณดินเท่ากับที่ใช้ทดลองจริง แต่ไม่มีการปลูกสับปะรดลงในภาชนะปลูก หากแต่มีการรดน้ำลงในดินสำหรับตรวจสอบเช่นเดียวกับสับปะรดในภาชนะปลูกทดลอง หลังจากนั้นเมื่อครบระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง ได้สุ่มเก็บดินเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม และตะกั่วในดิน พบว่า ค่าปริมาณโครเมียม และตะกั่วในภาชนะปลูก ไม่มีความแตกต่างกัน สามารถยืนยันได้ว่าโครเมียม และตะกั่วกระจายอยู่ทั่วไปในภาชนะปลูก โดยผลการศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียม และตะกั่วในดิน แสดงได้ดังรูปที่ 4.2

1) ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการสะสมโครเมียมในดิน

การศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียมในดิน หลังทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน (ดังรูปที่ 4.2ก) พบว่า ที่ระยะเวลา 30 วัน ปริมาณโครเมียมที่สะสมในดินของชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 364.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งแตกต่างกับชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 346.44 และ 354.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ และที่ระยะเวลา 120 วัน พบว่า ปริมาณโครเมียมที่สะสมในดินในชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 346.35, 336.43 และ 344.49 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ โดยปริมาณโครเมียมในแต่ละชุดการทดลองมีปริมาณการสะสมในดินลดลงตามระยะเวลา 30 ถึง 120 วัน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของดินทดลองมีปริมาณอินทรียวัตถุน้อย และเป็นกรดจัดจึงอาจทำให้ปริมาณโครเมียมที่อยู่ในดิน ละลายออกมามากจนทำให้พืชสามารถดูดดึงไปใช้ได้ง่าย และเมื่อพืชมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถดูดดึงโครเมียมได้มากขึ้น และส่งผลให้ปริมาณโครเมียมที่สะสมในดินมีปริมาณลดลง

2) ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ในดิน

โดยธรรมชาติโครเมียมที่ปนเปื้อนในดินส่วนใหญ่จะมีสถานะออกซิเดชั่นเป็น +3 [Cr(III)] และ +6 [Cr(VI)] โดยโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ จะมีอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าเพราะมีความเสถียร และความเป็นพิษมากกว่า โครเมียมไตรวาเลนท์ ในดินเป็นรูปที่ไม่ละลายมีการเคลื่อนที่ได้น้อยมาก จึงได้มีการนำสารคีเลตมาใช้ เพื่อช่วยให้โครเมียมอยู่ในรูปเป็นประโยชน์ต่อพืช



รูปที่ 4.2 การสะสมโลหะหนักในดินที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3) ก) โครเมียม และ ข) ตะกั่ว

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ในดิน (ดังตารางที่ 4.6) ภายหลังการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมและสาร EDDS มีปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่เหลืออยู่ในดินของทุกชุดการทดลองมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการศึกษาที่ 30 จนถึง 120 วัน ทั้งนี้เนื่องจากโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่เติมลงไปในดินเกิดปฏิกิริยารีดักชั่น (Reduction) จึงทำให้เปลี่ยนรูปจากโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์

ตารางที่ 4.6 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ในดิน

ชุดการทดลอง	ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)			
	30 (วัน)	60 (วัน)	90 (วัน)	120 (วัน)
Control	249.06±6.06	209.68±16.24	156.64±1.48	114.22±4.17
Cr EDTA	207.62±17.5	180.14±8.31	142.35±2.43	93.34±2.61
Cr EDDS	216.72±1.8	188.21±10.9	158.51±3.64	107.04±3.47
	ปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)			
	30 (วัน)	60 (วัน)	90 (วัน)	120 (วัน)
Control	115.51± 7.25	148.6±8.2	197.56±4.78	232.13±5.9
Cr EDTA	138.82±16.61	157.19±4.82	191.68±5.42	243.1±2.85
Cr EDDS	137.81±1.6	158.45±5.06	187.21±4.69	237.44±5

3) ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการสะสมตะกั่วในดิน

ปริมาณการสะสมตะกั่วในดิน ภายหลังทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน (แสดงดังรูปที่ 4.2ข) พบว่า ที่ระยะเวลา 30 วัน ปริมาณตะกั่วที่สะสมในดินของชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต มีค่าเท่ากับ 477.71 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งแตกต่างกับชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและ

สาร EDDS อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 460.93 และ 466.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ การศึกษาครั้งนี้ยังพบว่า ที่ระยะเวลา 120 วัน ปริมาณตะกั่วที่สะสมในดินในชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS มีค่าเท่ากับ 451.17, 444.15 และ 448.31 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ โดยปริมาณตะกั่วในแต่ละชุดการทดลองมีปริมาณลดลงตามระยะเวลา 30 ถึง 120 วัน นอกจากนี้ยังพบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA มีปริมาณการสะสมตะกั่วในดินน้อยกว่าชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS ทุกระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว อาจเนื่องจากสับปะรดมีการดูดดึง และสะสมตะกั่วเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ตะกั่วในดินลดลง นอกจากนี้ตะกั่วถูกเคลื่อนย้ายโดยสาร EDTA มากกว่าสาร EDDS (Meer et al., 2005) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Luo et al., (2005) พบว่า เมื่อใส่สาร EDTA และ EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้สาร EDDS ยังมีความสามารถในการเพิ่มปริมาณการสะสมทองแดง และสังกะสีในส่วนยอดของพืช ในขณะที่สาร EDTA มีผลต่อ การดูดดึงตะกั่ว และแคดเมียมในพืช

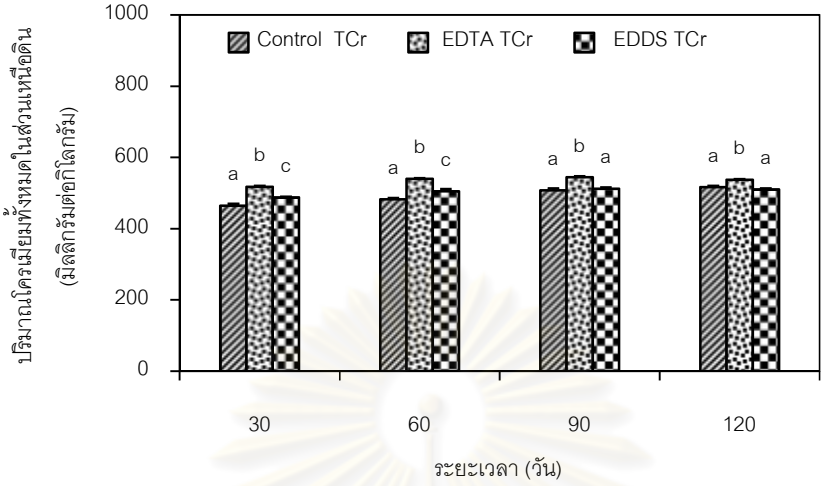
4.3 ผลของการเติมสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วของสับปะรด

การศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียม และตะกั่วทั้งหมดในสับปะรด โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนเหนือดิน (ลำต้นเหนือดิน และใบ) และส่วนใต้ดิน (ลำต้นใต้ดิน และราก) โดยสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดที่นำมาใช้ช่วยในการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน มีผลต่อปริมาณการสะสมโครเมียม และตะกั่วในส่วนต่างๆ ของสับปะรด ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมในดินเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และระดับความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วในดินเท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ทำการเก็บเกี่ยวสับปะรดที่อายุ 30, 60, 90 และ 120 วัน

4.3.1 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมของสับปะรด

1) ปริมาณการดูดดึงโครเมียมทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรด

จากผลการศึกษาปริมาณโครเมียมทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นเหนือดิน และใบ) (ดังรูปที่ 4.3) พบว่า ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS มีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนเหนือดินน้อยที่สุดที่ระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว 30 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 465.46 , 518.50 และ 488.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในแต่ละชุดการทดลอง ทั้งนี้ปริมาณการสะสมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนเหนือดินมากที่สุดในชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS ที่ระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว 90 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 545.72 และ 513.68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้เนื่องจากสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดมีความสามารถในการสลายตัวได้ในธรรมชาติ จึงส่งผลให้ที่ระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว 120 วัน ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS มีปริมาณการสะสมโครเมียมในส่วนเหนือดินลดลงมีค่าเท่ากับ 538.42 และ 511.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ยังพบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA สับปะรดมีความสามารถในการดูดดึงโครเมียมได้มากกว่าชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS และชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลตอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ในทุกระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวพืชทดลอง ซึ่งผลการวิจัยครั้งนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hsiao et al. (2007) ได้ทำการศึกษาการดูดดึงโครเมียม และนิเกิล โดยใช้ผักกาดเขียว ร่วมกับสารคีเลต 4 ชนิด ได้แก่ Oxalic Acid, Citric Acid, EDTA และดีทีพีเอ (DTPA) ที่ระดับความเข้มข้น 0.05 และ 0.10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า อีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถเพิ่มการสะสมโครเมียมได้มากที่สุดในส่วนเหนือดินของพืชดังกล่าว



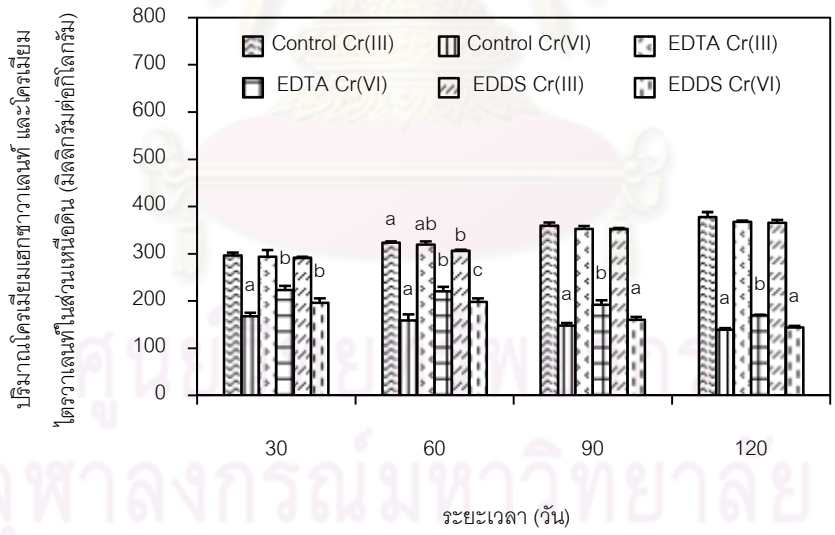
รูปที่ 4.3 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

2) ปริมาณการดูดดึงโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนเหนือดินของสับปะรด

สำหรับผลการศึกษาปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ในส่วนเหนือดิน (ลำต้นเหนือดิน และใบ) แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่า ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA มีปริมาณการดูดดึงโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ได้สูงสุดที่ระยะเวลา 30 วัน มีค่าเท่ากับ 168.39 และ 224.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS พบว่า ปริมาณการดูดดึงโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ได้สูงสุดที่ระยะเวลา 60 วัน มีค่าเท่ากับ 198.88 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนปริมาณการดูดดึงโครเมียมไตรวาเลนท์ของชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS มีปริมาณสูงสุดที่ระยะเวลา120 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 378.54, 368.3 และ 366.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

นอกจากนี้ผลการศึกษา พบว่า โครเมียมเฮกซาวาเลนท์มีปริมาณการสะสมในพืชทดลองในส่วนเหนือดินสูงสุดที่ระยะเวลา 30 วัน และลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลไกในการดูดดึงโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ ในพืชจะเกิดปฏิกริยารีดักชั่น (Reduction) โครเมียมเฮกซาวาเลนท์เป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ (Shanker et al., 2005) ทำให้เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ ในพืชเปลี่ยนเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ได้ ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Turgut et al. (2004) ที่ได้ทำการศึกษาความสามารถของสาร EDTA และ Citric Acid ในการช่วยเพิ่มปริมาณการสะสมและดูดดึงแคดเมียม โครเมียม และนิเกิล โดยใช้ทานตะวัน (*Helianthus annuus*) พบว่า สาร EDTA สามารถเพิ่มการดูดดึงโครเมียมในส่วนของลำต้น (Stem) ได้สูงกว่า Citric Acid สำหรับ Muhammad et al. (2009) ได้ทำการศึกษาความสามารถของสาร EDTA และ Citric Acid ในการดูดดึงแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และโครเมียม โดยใช้ธูปฤาษี (*Typha angustifolai*) ผลการวิจัยพบว่า สาร EDTA สามารถเพิ่มการดูดดึงโครเมียมได้สูงกว่า Citric Acid



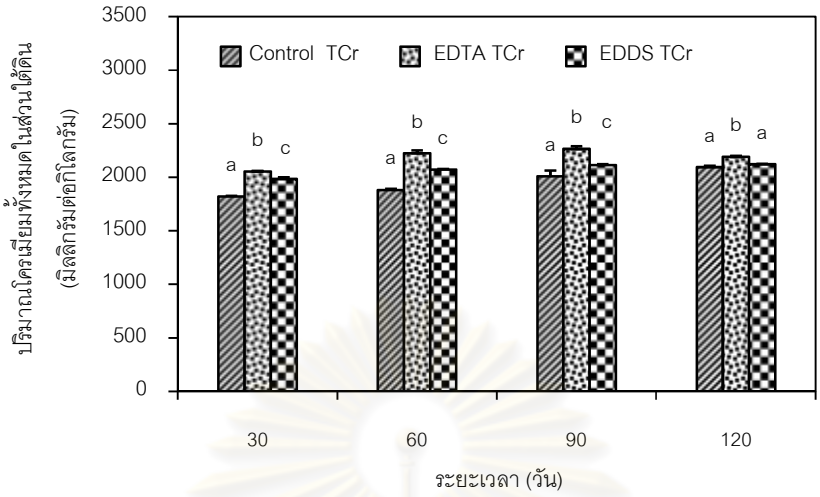
รูปที่ 4.4 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนเหนือดินในสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

3) ปริมาณการดูดดึงโครเมียมทั้งหมดในส่วนใต้ดินของสับปะรด

จากรูปที่ 4.5 แสดงปริมาณโครเมียมทั้งหมดในส่วนใต้ดินของชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS พบว่า ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนใต้ดินน้อยที่สุดที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 30 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 1823.08, 2057.97 และ 1986.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ชุดของการทดลอง ซึ่งปริมาณการสะสมโครเมียมในพืชทดลองส่วนใต้ดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนใต้ดินพบมากที่สุดในชุดการทดลองที่เติมสารโครเมียมและสาร EDTA ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 90 วัน มีค่าเท่ากับ 2267.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 120 วัน มีค่าเท่ากับ 2124.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้เนื่องจากสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดเป็นสารที่มีความสามารถในการช่วยดูดดึงโครเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน จึงส่งผลให้ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS มีปริมาณการสะสมโครเมียมในส่วนใต้ดินได้ดีกว่าชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลตทั้ง 2 ชนิดในทุกระยะเวลาการเก็บเกี่ยว นอกจากนี้ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA พบว่า สับปะรดมีความสามารถในการดูดดึง และสะสมโครเมียมไว้ในส่วนใต้ดินได้มากกว่าชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS และชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต อย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ในทุกระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวสับปะรด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Turgut et al. (2004) ที่ทำการศึกษาการดูดดึงแคดเมียม โครเมียม และนิเกิล โดยใช้ทานตะวันร่วมกับสารคีเลต คือ สาร EDTA และ Citric Acid ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 และ 0.3 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ผลการทดลองพบว่า สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.3 กรัมต่อกิโลกรัมดิน สามารถเพิ่มการสะสมโครเมียมในต้น (Shoot) และราก (Root) ได้สูงกว่า Citric Acid

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



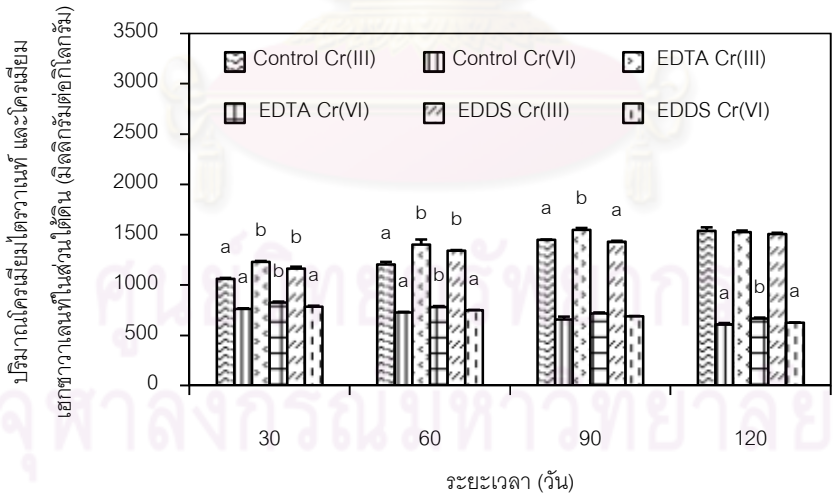
รูปที่ 4.5 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดในส่วนใต้ดินของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

4) ปริมาณการดูดดึงโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนใต้ดินของสับปะรด

จากรูปที่ 4.6 แสดงปริมาณการสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ และโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในส่วนใต้ดิน (ลำต้นใต้ดิน และราก) ของสับปะรด ซึ่งพบว่า ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS มีปริมาณการดูดดึงโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ได้สูงสุดที่ระยะเวลา 30 วัน มีค่าเท่ากับ 762.11, 826.7 และ 784.61 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของแต่ละชุดการทดลอง ส่วนปริมาณการดูดดึงโครเมียมไตรวาเลนท์ของชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS พบว่า สับปะรดมีการดูดดึงได้สูงสุดที่ระยะเวลา 120 วัน มีค่าเท่ากับ 1538.66 และ 1597.31 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA มีการดูดดึงโครเมียมไตรวาเลนท์ได้สูงสุดที่ระยะเวลา 90 วัน เท่ากับ 1549.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

นอกจากนี้ยัง พบว่า สับปะรดส่วนที่อยู่ใต้ดินมีความสามารถในการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ได้สูงสุดที่ระยะเวลา 30 วัน และลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นของการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการดูดดึงโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในพืชสามารถเกิดการรีดักชันโครเมียมเฮกซาวาเลนท์เปลี่ยนเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ได้ และเกิดการตกตะกอนในดินทำให้มีการเคลื่อนย้ายโครเมียมเฮกซาวาเลนท์จากดินสู่พืชได้น้อย โดยการรายงานของ (Skeffington et al., 1976) กล่าวถึงกระบวนการดูดดึงโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ของพืช พบว่า การดูดดึงโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ใช้กระบวนการลำเลียงสารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ โดยใช้พลังงานจากเซลล์ (Active Transport) ในขณะที่การดูดดึงโครเมียมไตรวาเลนท์ใช้กระบวนการลำเลียงสารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ โดยไม่ใช้พลังงานจากเซลล์ (Passive Transport) ทำให้เมื่อระยะเวลาในการศึกษาเพิ่มขึ้นการดูดดึงโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ลดลง แต่ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Ramachadran et al.,1980) กล่าวว่าพืชสามารถดูดดึงโครเมียมในรูปโครเมียมไตรวาเลนท์ได้มากกว่าโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ นอกจากนี้ Zayed et al (1998) ทำการศึกษาพืช 10 ชนิด พบว่า พืช 7 ชนิดจาก 10 ชนิด มีการดูดดึงโครเมียมไตรวาเลนท์ได้สูงกว่าโครเมียมเฮกซาวาเลนท์



รูปที่ 4.6 ปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ และโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนใต้ดินของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

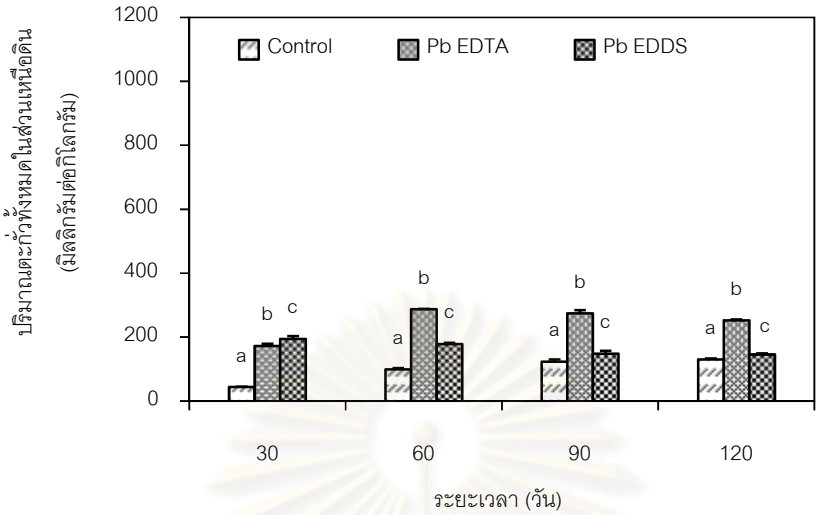
หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

4.3.2 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงตะกั่วของสับปะรด

1) ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรด

ผลการศึกษาความสามารถในการดูดดึงปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นเหนือดิน และใบ) ของสับปะรดแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 โดยพบว่า ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA มีปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดินที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 30 วัน มีค่าเท่ากับ 44.33 และ 172.75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS มีปริมาณการสะสมตะกั่วในส่วนเหนือดินของสับปะรดมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 195.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดินมีการเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สับปะรดมีการดูดดึงปริมาณตะกั่วมากที่สุดในชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 60 วัน มีค่าเท่ากับ 288.14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว และสาร EDTA สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดดึงตะกั่วขึ้นมายังส่วนเหนือดินได้มากกว่า 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA พบว่า พืชทดลองมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วขึ้นมายังส่วนเหนือดินได้ดีกว่าชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS ทั้งนี้ เนื่องจากสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดที่ใส่ลงไปในดินนั้นสามารถรวมตัวกับสารตะกั่ว และอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อสับปะรด จึงมีผลทำให้สับปะรดมีความสามารถในการสะสมตะกั่วไว้ในส่วนเหนือดินได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Nascimento et al., (2006) พบว่า การเติมสาร EDTA, DTPA และ Citric Acid จะทำให้ผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea*) สะสมทองแดงและตะกั่วในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ใส่สารคีเลต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

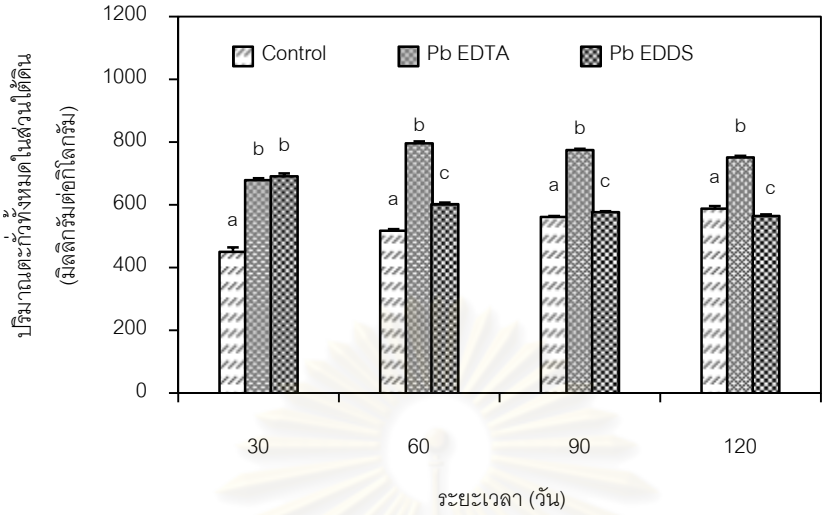
หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

2) ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของสับปะรด

การศึกษาปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดิน (ดังรูปที่ 4.8) พบว่า สับปะรดที่ปลูกในชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS มีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วได้สูงสุดในส่วนใต้ดินที่ระยะเวลา 30 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 691.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว และสาร EDTA พบว่า สับปะรดมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วในส่วนใต้ดินได้สูงที่สุดที่ระยะเวลา 60 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 796.66 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสารEDTA ที่ระยะเวลา 60, 90 และ 120 วัน พบว่า มีความแตกต่างกับชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS อย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่าตะกั่วสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่เป็นกรด (Acid Soil) และสารคีเลตที่ใส่ลงไปในดินสามารถจับตัวกับไอออนของตะกั่วด้วยปฏิกิริยาคีเลตชัน (Chelation) ซึ่งการเชื่อมโยงในลักษณะเช่นนี้สามารถทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่ว (Pb-EDTA Complex) โดยอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Available Form) จึงง่ายต่อการดูดดึงของราก และนำไปสะสมในส่วนต่างๆ ของสับปะรด (คณาจารย์ภาควิชา

ปฐพีวิทยา, 2548) นอกจากนี้ยังพบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS สับปะรดมีความสามารถในการสะสมสารตะกั่วในส่วนใต้ดินลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยสามารถกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพของสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดลดลงเมื่อระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารคีเลตทั้งสองชนิด มีความสามารถในการสลายตัวได้ในธรรมชาติ โดยสาร EDTA มีความสามารถในการสลายตัวได้ช้ากว่าสาร EDDS (Meer et al, 2005) นอกจากนี้ Meer et al. (2005) ได้ทำการศึกษาสารคีเลตสองชนิดคือ สาร EDTA และ EDDS โดยศึกษาเป็นระยะเวลา 40 วัน และพบว่า การสะสมโลหะหนักในพืชลดลง ที่ระยะเวลาของการศึกษาที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Cao et al. (2007) ได้ทำการศึกษาการใช้สาร EDDS และสารเอ็มจีดีเอ (Methylglycin diacetic; MGDA) ที่ระยะเวลา 60 วัน พบว่า เมื่อระยะเวลาของการศึกษาที่เพิ่มขึ้นทำให้การสะสมตะกั่ว และสังกะสีในพืชทดลองมีปริมาณลดลง อย่างไรก็ตาม การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถของสับปะรดในการสะสมตะกั่ว โดยการใช้สารคีเลตทั้ง 2 ชนิดช่วยในการดูดดึง พบว่า สาร EDTA มีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วไว้ในสับปะรดได้สูงกว่าสาร EDDS ทั้งนี้เนื่องจากสาร EDTA มีความสามารถในการจับกับสารละลายตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang et al. (1997) ที่รายงานว่า สาร EDTA เป็นสารช่วยให้มีการเพิ่มความสามารถในการดูดดึงปริมาณตะกั่วที่อยู่ในดิน อีกทั้งสาร EDTA ยังช่วยเพิ่มการดูดดึง และสะสมตะกั่วในส่วนใต้ดินของต้นถั่ว และการสลายตัวของสาร EDTA ที่ช้ากว่าสาร EDDS จึงทำให้สาร EDTA มีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วได้สูงกว่าสาร EDDS อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในครั้งนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Luo et al. (2005) ที่ได้ทำการศึกษาความสามารถของสาร EDTA และ EDDS ในการช่วยเพิ่มปริมาณการดูดดึงโลหะหนักที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน โดยพบว่า สาร EDTA สามารถดูดดึงตะกั่วได้มากกว่าสาร EDDS สำหรับ Greman et al. (2003) ได้ทำการศึกษาการดูดดึงตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม โดยใช้ผักกาดเขียวปลี (*Brassia rapa* L.) และเติมสารคีเลต 2 ชนิด ได้แก่ สาร EDTA และ EDDS ผลการทดลองพบว่า สาร EDTA ช่วยในการดูดดึงตะกั่วได้ดีกว่าสาร EDDS เช่นกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

4.4 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการเจริญเติบโตของสับปะรด

การศึกษาครั้งนี้นอกจากได้ทำการศึกษาผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วแล้ว ยังมีการศึกษาเรื่องการเจริญเติบโตของสับปะรด โดยพิจารณาจากน้ำหนักแห้งของพืช ความสูงของพืชทั้งในส่วนเหนือดิน (ลำต้นเหนือดิน และใบ) และส่วนใต้ดิน (ลำต้นใต้ดิน และราก) และการสังเกตความเป็นพิษจากการแสดงอาการออกมาให้เห็นของสับปะรด ที่ระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว 30, 60, 90 และ 120 วัน ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

4.4.1 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนต่าง ๆ ของสับปะรด

หลังทำการใส่สารประกอบโครเมียม ตะกั่ว สาร EDTA และ EDDS ภายหลังสับปะรดมีอายุได้ประมาณ 30 วัน แล้วทำการเก็บตัวอย่างพืชที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน โดยนำตัวอย่างมาทำการล้างด้วยน้ำ 2-3 ครั้ง และน้ำกลั่น 1 ครั้ง จากนั้นนำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และนำพืชไปอบที่อุณหภูมิ

105 องศาเซลเซียส ทำการชั่งน้ำหนักแห้งของพืช โดยแบ่งพืชออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเหนือดิน (ลำต้นเหนือดิน และใบ) และส่วนใต้ดิน (ลำต้นใต้ดิน และราก) โดยผลของสารคีเลตทั้ง 2 ชนิด มีผลต่อการเจริญเติบโตของสับปะรด ดังนี้

1) ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม

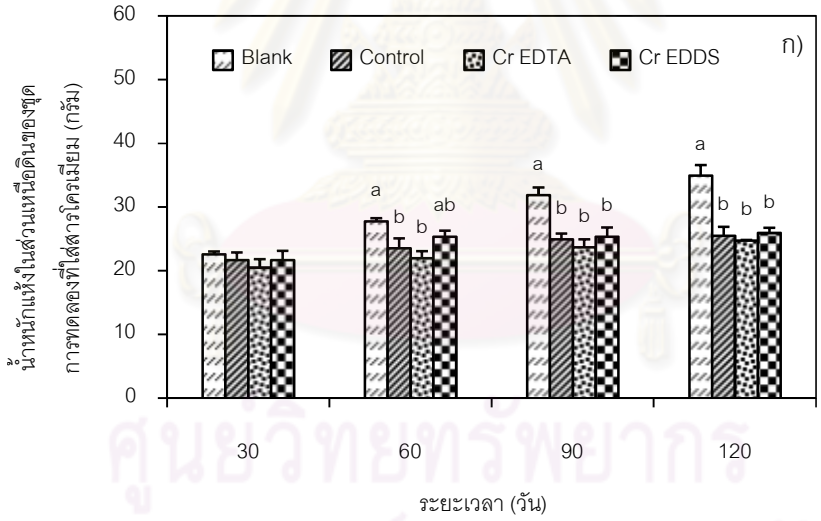
1.1) น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดินของชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม

การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของสับปะรดในส่วนเหนือดิน (ดังรูปที่ 4.9ก) พบว่า สับปะรดมีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 30 ถึง 120 วัน โดยน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดินของสับปะรด ที่ระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว 60 ถึง 120 วัน น้ำหนักแห้งของแต่ละชุดการทดลองลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารโครเมียมและสารคีเลตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จากข้อมูลการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้ง แสดงให้เห็นว่าสับปะรดมีการเจริญเติบโตลดลงในชุดที่ปลูกพืช และมีการใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การที่พืชดูดดึงโครเมียมเข้าสู่ต้น ส่งผลให้พืชชะงักการเจริญเติบโต โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Hara and Sonoda 1979) พบว่า เมื่อเติมสารโครเมียมที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน น้ำหนักแห้งของกะหล่ำปลี (Cabbage) ลดลงจาก 88.4 กรัมในชุดควบคุม เหลือเพียง 28.4 กรัม และ Hanus and Tomas, 1993 ทำการศึกษาน้ำหนักแห้งในดอกของ *Sinapsis alba* เมื่อเติมสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ระดับความเข้มข้น 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า น้ำหนักแห้งในดอกของพืชลดลง เช่นกัน

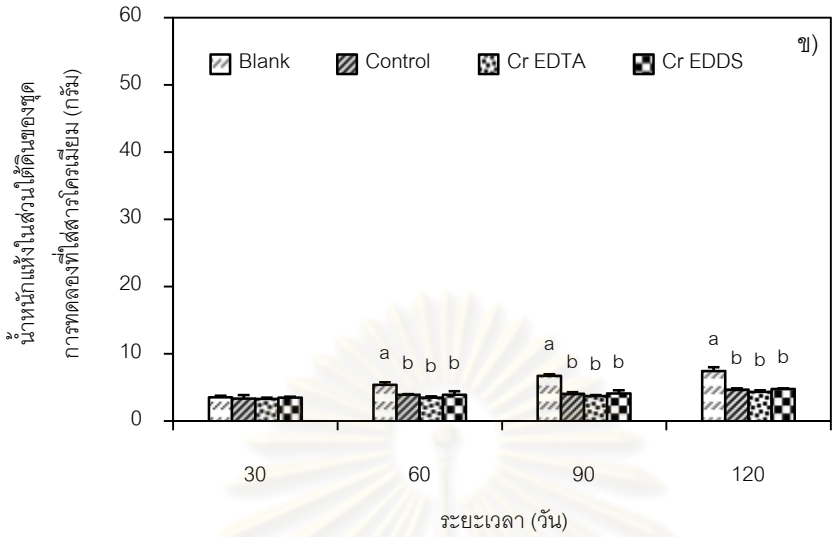
1.2) น้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินของชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม

จากรูปที่ 4.9ข แสดงผลของการศึกษาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของสับปะรดในส่วนใต้ดิน พบว่า สับปะรดมีน้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 30 ถึง 120 วัน โดยน้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินของสับปะรด ที่ระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว 60 ถึง 120 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารโครเมียมและสารคีเลต มีน้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินมากกว่า

ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS อย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากพืชดูดดึงโครเมียมเข้าสู่ต้น ส่งผลให้พืชชะงักการเจริญเติบโต อีกทั้งส่งผลต่อปริมาณน้ำหนักแห้งของพืชเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารโครเมียมและสารคีเลต โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kocik and Ilavsky, 1994 ทำการศึกษาปริมาณ และคุณภาพน้ำหนักแห้งของทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.), ข้าวโพด (*Zea may* L.) และ ถั่วปากอ้า (*Vicaia faba*) หลังจากเติมสารประกอบโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ระดับความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่าโครเมียมส่งผลต่อน้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินของพืชลดลง และ Arduini et al., 2005 ทำการศึกษาในหญ้ายักษ์ (*Miscanthus giganteus*) โดยใช้โครเมียมที่ระดับ 50, 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียม 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลทำให้น้ำหนักแห้งในส่วนรากของพืชลดลง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 น้ำหนักแห้งของสับปะรดในแต่ละชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3) ก) ส่วนเหนือดิน และ ข) ส่วนใต้ดิน

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

2) ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว

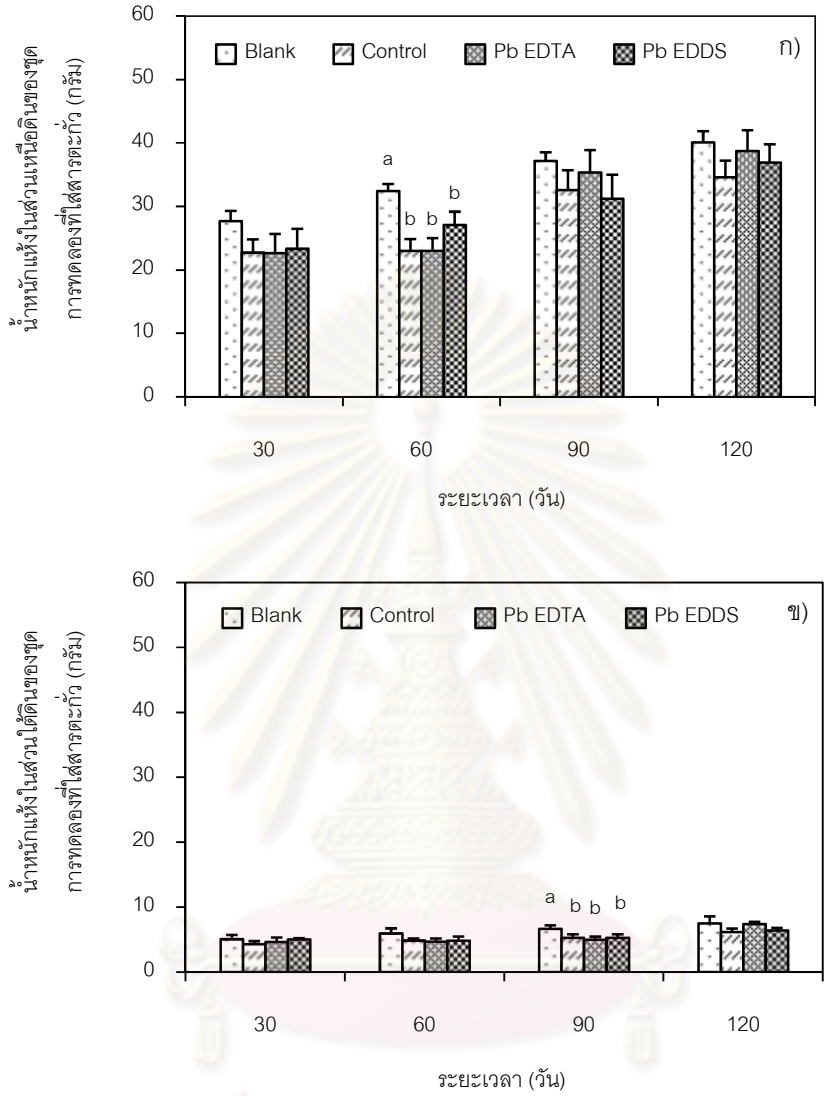
2.1) น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดินของชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว

จากผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดิน (ดังรูปที่ 4.10ก) พบว่า สับปะรดมีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 30 ถึง 120 วัน โดยน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดินของสับปะรดที่ระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว 120 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารตะกั่วและสารคีเลตมีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดินเท่ากับ 40.13 กรัม ซึ่งไม่แตกต่างกันกับชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต รวมทั้งชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS อย่างมีนัยสำคัญ ($P \geq 0.05$) โดยมีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดินเท่ากับ 34.67, 38.66 และ 36.97 กรัม ตามลำดับ ของแต่ละชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าสับปะรดมีความสามารถในการเจริญเติบโตในส่วนเหนือดินได้ดีในชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลอง

ที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS โดยตะกั่ว และสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสับปะรด ซึ่งพืชไม่แสดงอาการใดๆ และน้ำหนักแห้งโดยรวมของสับปะรดไม่มีความแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ปลูกพืชไม่ใส่สารตะกั่วและสารคีเลต โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu et al. (2004) ที่ทำการศึกษาการใช้ผักกาดเขียวปลี และเติมสารคีเลต คือ สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า สาร EDTA ไม่มีความเป็นพิษต่อพืช ในขณะที่ Meer et al. (2005) ใช้ทานตะวันเป็นพืชศึกษา และมีการเติมสารคีเลต คือ สาร EDDS ที่ความเข้มข้น 1.6 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า สาร EDDS ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของพืชเช่นกัน

2.2) น้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินของชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินของสับปะรด พบว่าสับปะรดมีน้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 30 ถึง 120 วัน โดยน้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินของสับปะรด ที่ระยะเวลาของการเก็บ 120 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารตะกั่วและสารคีเลต มีน้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินเท่ากับ 7.50 กรัม สำหรับชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS มีน้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินเท่ากับ 6.17, 7.40 และ 6.43 กรัม ตามลำดับ ของแต่ละชุดการทดลอง (ดังรูปที่ 4.10ข) นอกจากนี้ยังพบว่า สับปะรดในชุดควบคุมที่ใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS มีการเจริญเติบโตในด้านน้ำหนักแห้งของส่วนใต้ดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ในทุกระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว โดยตะกั่วและสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตในส่วนใต้ดินของสับปะรด ซึ่งผลการทดลองในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ German et al. (2003) ที่ทำการศึกษาการเติมสารคีเลต 2 ชนิด คือ สาร EDTA และสาร EDDS ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 3, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เพื่อช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม ด้วยการปลูกผักกาดเขียวปลี โดยผลการทดลองพบว่า สาร EDTA ไม่ส่งผลต่อน้ำหนักแห้งผักกาดขาวปลี ที่ระดับความเข้มข้น 3 และ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน หากแต่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักกาดเขียวปลี สำหรับการทดลองที่เติมสาร EDDS พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 3, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ไม่ส่งผลต่อน้ำหนักแห้งของผักกาดขาวปลี



รูปที่ 4.10 น้ำหนักแห้งของสับปะรดในแต่ละชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3) ก) ส่วนเหนือดิน และข) ส่วนใต้ดิน

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.2 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของสับปะรด

นอกจากทำการศึกษาด้านน้ำหนักแห้งของพืชแล้ว ยังได้มีการศึกษาการเจริญเติบโตในด้านความสูงของสับปะรดโดยได้ทำการวัดความสูงของพืชหลังจากการเก็บเกี่ยวตัวอย่างพืชตามระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน โดยแบ่งพืชออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนเหนือดิน (ลำต้นเหนือดิน และใบ) และส่วนใต้ดิน (ลำต้นใต้ดิน และราก) ซึ่งผลการเจริญเติบโตด้านความสูงของสับปะรด สามารถกล่าวรายละเอียดได้ดังนี้

1) ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม

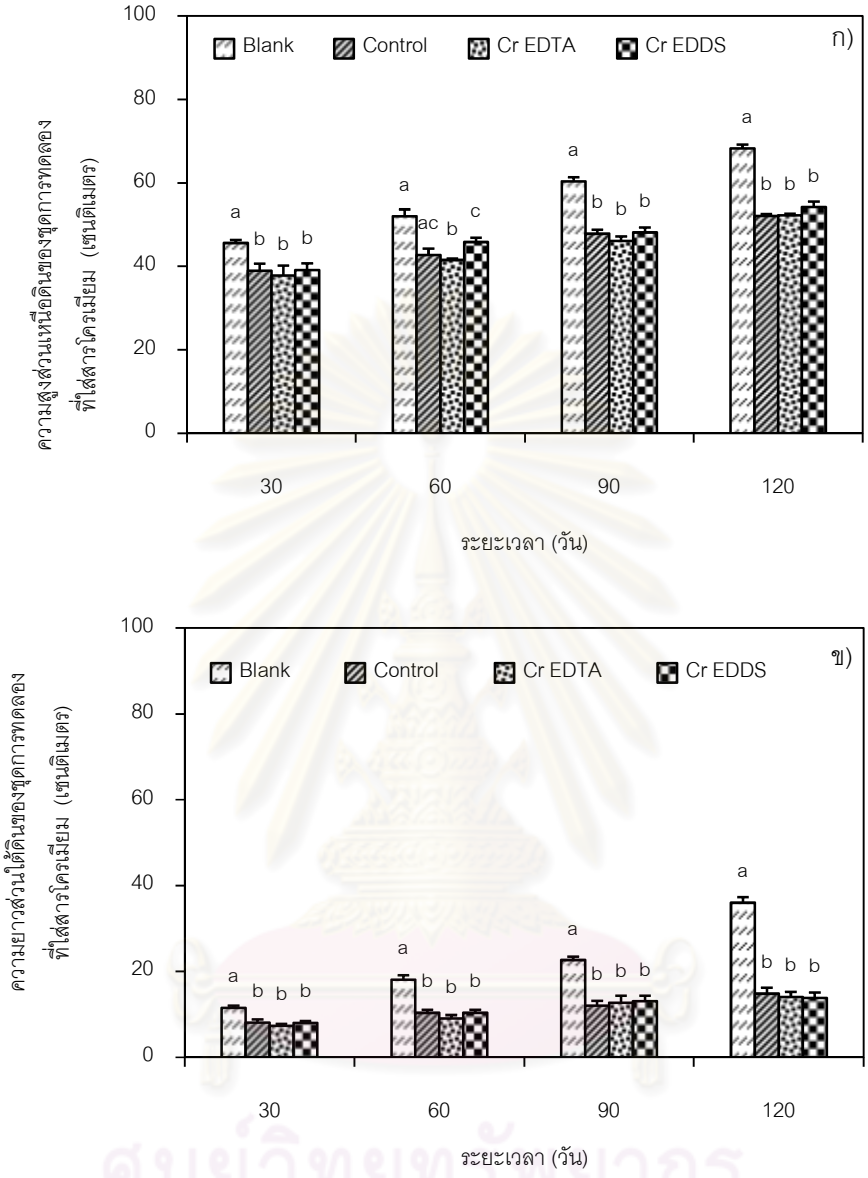
1.1) ความสูงส่วนเหนือดินของชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านความสูงของสับปะรดในส่วนเหนือดิน แสดงได้ดังรูปที่ 4.11ก พบว่า สับปะรดมีความสูงในส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 30 ถึง 120 วัน โดยที่ระยะเวลา 30 วันของการเก็บเกี่ยว สับปะรดมีความสูงในส่วนเหนือดินน้อยที่สุดของชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารโครเมียมและสารคีเลต ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS มีค่าเท่ากับ 45.7, 39.07, 37.93 และ 39.23 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีแน้วโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระยะเวลา 120 วันของการเก็บเกี่ยว สับปะรดมีความสูงในส่วนเหนือดินมากที่สุดของชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารโครเมียมและสารคีเลต ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS มีค่าเท่ากับ 68.37, 52.17, 52.36 และ 54.3 เซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ ชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารโครเมียมและสารคีเลต มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS ในด้านความสูงของส่วนเหนือดินทุกระยะเวลาการเก็บเกี่ยว แสดงให้เห็นว่าสารโครเมียมส่งผลต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของสับปะรดในทุกระยะเวลาของการศึกษา โดยสอดคล้องกับการศึกษาของ Anderson et al. (1972) พบว่า เมื่อใส่สารโครเมียมที่ระดับความเข้มข้น

2, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ด้วยการปลูกข้าวโอ๊ตส่งผลให้ความสูงของข้าวโอ๊ตลดลง 11%, 22% และ 41% ตามลำดับ ของระดับความเข้มข้น และ Hanus and Tomas. (1993) พบว่า การเติมโครเมียมที่ระดับความเข้มข้น 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ส่งผลให้ความสูงของ *Sinapsis alba* ลดลง

1.2) ความยาวส่วนใต้ดินของชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม

สำหรับการเจริญเติบโตด้านความยาวของสับปะรดในส่วนใต้ดิน (ดังรูปที่ 4.11ข) พบว่า สับปะรดมีความยาวในส่วนใต้ดินเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 30 ถึง 120 วัน โดยที่ระยะเวลา 30 วันของการเก็บเกี่ยว สับปะรดมีความยาวในส่วนใต้ดินน้อยที่สุดของชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารโครเมียมและสารคีเลต ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS มีค่าเท่ากับ 11.57, 8.13, 7.43 และ 8.1 เซนติเมตร ตามลำดับ ของชุดการทดลอง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระยะเวลา 120 วันของการเก็บเกี่ยว สับปะรดมีความยาวในส่วนใต้ดินมากที่สุดของชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารโครเมียมและสารคีเลต ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม และสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS มีค่าเท่ากับ 36.07, 14.9, 14.1 และ 13.9 เซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ ชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารโครเมียมและสารคีเลต มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS ในด้านความสูงของส่วนใต้ดินทุกระยะเวลาการเก็บเกี่ยว แสดงให้เห็นว่า สารโครเมียมที่ใส่ลงในดินส่งผลต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงส่วนใต้ดินของสับปะรด Iqbal et al., (2001) รายงานว่าการเติมโครเมียมที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ส่งผลให้ความยาวรากและน้ำหนักแห้งของพืช *Caesalpinia pulcherrima* ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม และ Chen et al. (2001) พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ต่อกิโลกรัมดิน ส่งผลต่อการเจริญเติบโตด้านความยาวรากของข้าวสาลีลดลง



รูปที่ 4.11 ความสูงของสับปะรดในชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3) ก) ส่วนเหนือดิน และข) ส่วนใต้ดิน

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

2) ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว

2.1) ความสูงส่วนเหนือดินของชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว

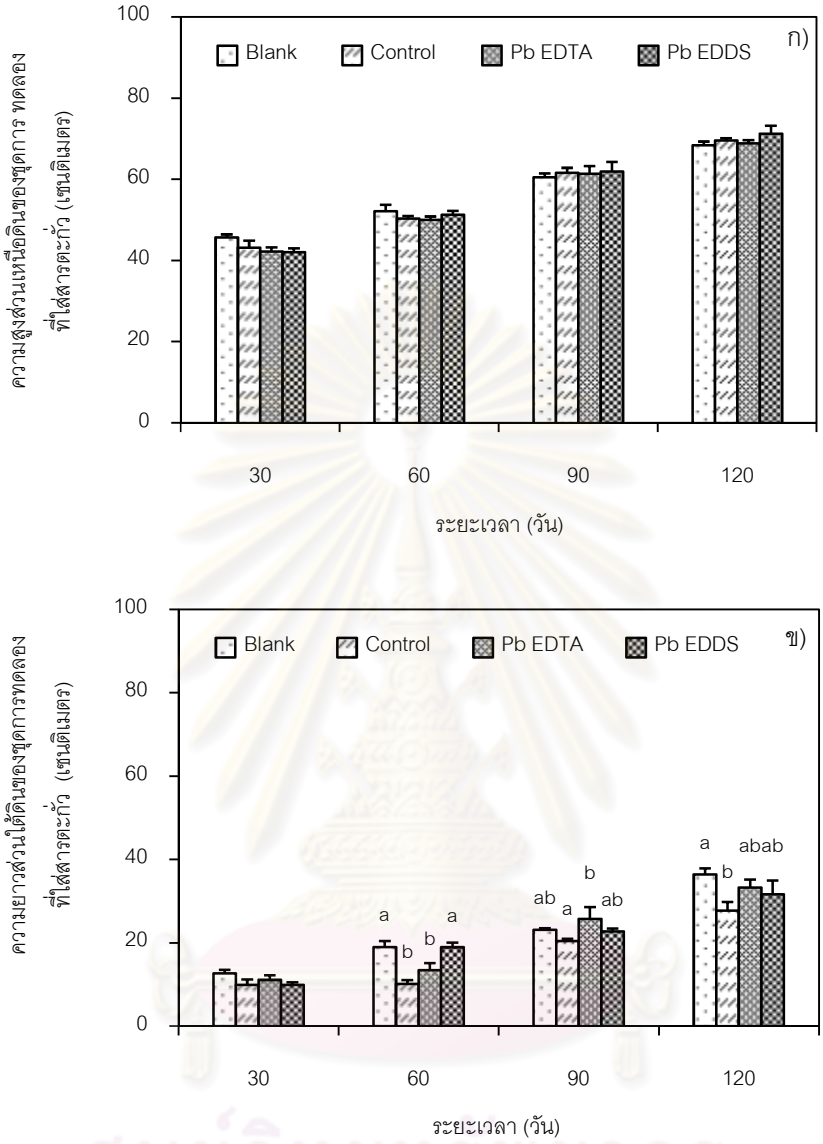
การเจริญเติบโตด้านความสูงของสับปะรดในส่วนเหนือดิน (ดังรูปที่ 4.12ก) พบว่า สับปะรดมีความสูงในส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 30 ถึง 120 วัน โดยที่ระยะเวลา 30 วันของการเก็บเกี่ยว สับปะรดมีความสูงในส่วนเหนือดินน้อยที่สุดของชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารตะกั่วและสารคีเลต รวมทั้งชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS มีค่าเท่ากับ 45.7, 43.2, 42.26 และ 42.07 เซนติเมตร ตามลำดับ ของแต่ละชุดการทดลอง และมีแน้วโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระยะเวลา 120 วันของการเก็บเกี่ยว สับปะรดมีความสูงในส่วนเหนือดินมากที่สุดของชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารตะกั่วและสารคีเลต ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS ซึ่งมีค่าเท่ากับ 68.37, 69.57, 68.9 และ 71.27 เซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \geq 0.05$) ในด้านความสูงของส่วนเหนือดินทุกระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว แสดงให้เห็นว่า สารคีเลตทั้ง 2 ชนิดไม่มีผลต่อความสูงของส่วนเหนือดินของสับปะรด ประกอบกับสับปะรดเป็นพืชที่มีความทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ จึงทำให้สับปะรดสามารถเจริญเติบโตได้ตามปกติ ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cui et al., (2006) ที่ทำการศึกษาสารคีเลต 4 ชนิด คือ โซเดียมอีดีทีเอ (Na_2EDTA) ทาทาริกแอซิต (Tartaric Acid) ออกซาลิตแอซิต (Oxalic Acid) และ ซิตริกแอซิต (Citric Acid) ที่ระดับความเข้มข้น 1.2, 2.4 และ 4.8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เพื่อช่วยดูดดึงตะกั่ว ด้วยการใช้บานชื่น (*Zinnia elegans* Jacq.) และการศึกษาความเป็นพิษของสารคีเลตแต่ละชนิดต่อความยาวของลำต้น และราก พบว่า สาร EDTA ที่ทุกระดับความเข้มข้นไม่ส่งผลต่อความยาวในส่วนเหนือดิน (Shoot Length) ของพืช และพฤฒิภา (2550) ศึกษาการใช้หญ้า 2 ชนิด คือ หญ้าตองกง (*Thysanolaena maxima*) และหญ้าแฝก 4 ชนิด (*Vetiveria zizanioides*) ในการดูดซับสารตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นของสารตะกั่วเท่ากับ 100, 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ผลการศึกษา

การเจริญเติบโตด้านความยาวในส่วนเหนือดินของแฝกพบว่า ที่ทุกระดับความเข้มของสารตะกั่วไม่ส่งผลต่อความยาวในส่วนลำต้น และรากของแฝกเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

2.2) ความยาวส่วนใต้ดินของชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่ว

จากรูปที่ 4.12ข แสดงผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านความยาวในส่วนใต้ดินของสับปะรด โดยพบว่า สับปะรดมีความยาวในส่วนใต้ดินเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 30 ถึง 120 วัน โดยที่ระยะเวลา 30 วันของการเก็บเกี่ยว สับปะรดมีความยาวในส่วนใต้ดินน้อยที่สุดของชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารตะกั่วและสารคีเลต ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS มีค่าเท่ากับ 11.57, 9.9, 11.66 และ 9.87 เซนติเมตร ตามลำดับ ของแต่ละชุดการทดลอง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระยะเวลา 120 วันของการเก็บเกี่ยว สับปะรดมีความยาวในส่วนใต้ดินมากที่สุดของชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารตะกั่วและสารคีเลต ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS มีค่าเท่ากับ 36.07, 27.73, 33.23 และ 31.6 เซนติเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า สารคีเลตทั้ง 2 ชนิดไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงในส่วนใต้ดินของสับปะรด เนื่องจากไม่ทำให้ความสูงในส่วนใต้ดินของพืชลดลง ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cui et al. (2006) ที่กล่าวข้างต้น โดยพบว่า สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ไม่ส่งผลต่อความยาวราก (Root Length) ของพืช ในขณะที่ระดับความเข้มข้นของ สาร EDTA เท่ากับ 4.8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ส่งผลต่อความยาวรากของพืชลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 ความสูงของสับปะรดในชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3) ก) ส่วนเหนือดิน และข) ส่วนใต้ดิน

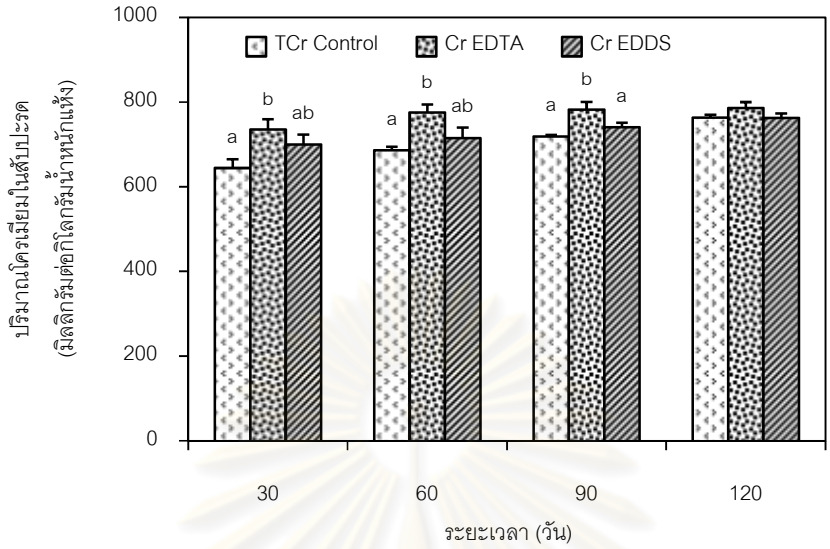
หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

4.5 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อความสามารถในการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วโดยสับปะรด

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วโดยสับปะรด ตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา โดยสามารถแสดงผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

4.5.1 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อความสามารถในการดูดดึงโครเมียมโดยสับปะรด

ภายหลังจากที่ได้ทำการศึกษาครบทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง ผลจากการศึกษาความสามารถของสาร EDTA และ EDDS ในการดูดดึงโครเมียมที่ปนเปื้อนในดิน พบว่า โครเมียมในดินมีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาของการศึกษาเพิ่มขึ้น หรือเมื่ออายุของสับปะรดที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.13 โดยชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA พบว่า สับปะรดมีความสามารถในการดูดดึงโครเมียมทั้งต้นได้มากกว่าชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS และชุดการทดลองที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ตลอดระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว โดยที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน สำหรับชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA พบว่า สับปะรดสามารถเพิ่มการดูดดึงโครเมียมได้มีค่าเท่ากับ 735.86, 776.24, 782.96 และ 786.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสาร EDTA มีความสามารถในการช่วยดูดดึงโครเมียมในสับปะรดได้ดีกว่าสาร EDDS เนื่องจากสาร EDTA สามารถจับกับโครเมียม ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนัก (Complex Metal Ion) ให้อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการดูดดึงของพืชได้มากกว่าสาร EDDS ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ January et al. (2007) ที่ทำการศึกษาการดูดดึงแคดเมียม โครเมียม นิเกิล โดยใช้ทานตะวัน (*Helianthus annuus)* และเติมสาร EDTA เพื่อเพิ่มความสามารถในการช่วยดูดดึง พบว่า สาร EDTA สามารถช่วยเพิ่มการดูดดึงโครเมียมในส่วนของรากและลำต้นของพืชได้ดีกว่าสารแคดเมียม และนิเกิล



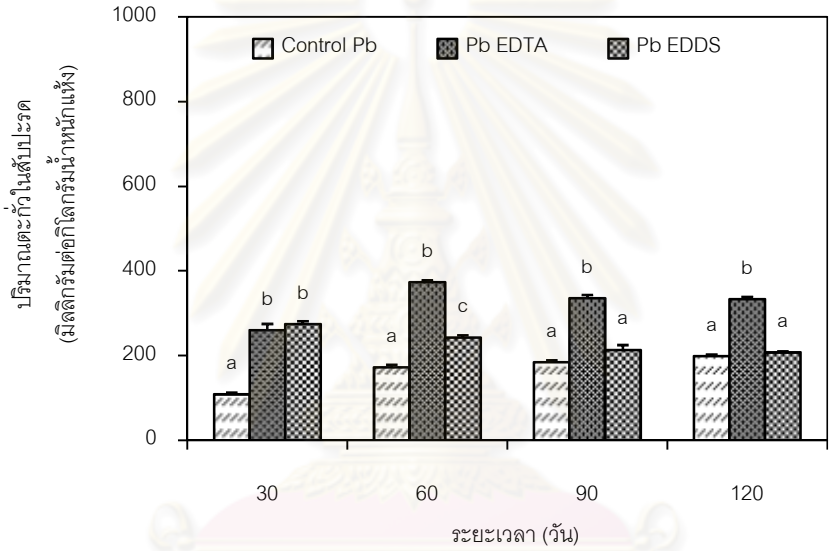
รูปที่ 4.13 ปริมาณการสะสมโครเมียมทั้งหมดของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

4.5.2 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อความสามารถในการดูดดึงตะกั่วโดยสับปะรด

สำหรับความสามารถของสาร EDTA และ EDDS ในการช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน สามารถแสดงดังรูปที่ 4.14 ซึ่งจากผลการศึกษาที่ระยะเวลา 30 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS มีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 261.01 และ 275.41 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA พบว่าที่ระยะเวลาของการศึกษาที่ 60, 90 และ 120 วัน สาร EDTA สามารถช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่วได้สูงกว่าชุดการทดลองใส่สารตะกั่วและสาร EDDS และชุดการทดลองที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้เมื่อระยะเวลาของการศึกษาที่เพิ่มขึ้น ยังสามารถพบว่าชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS ความสามารถในการดูดดึงตะกั่วลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสาร EDDS เป็นสารที่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้สารธรรมชาติเป็นส่วนประกอบ (Nishikiori et al., 1984; Goodfellow et al., 1997) จึงเกิดการสลายตัว และทำให้ความสามารถในการช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่วลดลงตามระยะเวลาของการศึกษาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Luo et al. (2005)

ที่ทำการศึกษาการดูดดึงทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมโดยใช้ข้าวโพด (*Zea may* L.) พบว่า สาร EDTA มีความสามารถในการช่วยดูดดึงตะกั่วทั้งในส่วนลำต้น และรากได้สูงกว่าสาร EDDS เช่นเดียวกับการศึกษาของ Epelde et al. (2008) ศึกษาความสามารถของสารคีเลต 2 ชนิด คือ สาร EDTA และ EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน โดยใช้ (*Cynara cardunculus* L.) ในการดูดดึงตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 2,500 และ 5,000 มิลลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า สาร EDTA มีความสามารถในการช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่วได้สูงกว่าสาร EDDS ในทุกระดับความเข้มข้นของตะกั่ว



รูปที่ 4.14 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดของสับปะรดที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

4.6 การคำนวณค่าใช้จ่าย

การคำนวณค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักร่วมกับการใช้สาร EDTA และ EDDS ในการช่วยดูดดึงสารปนเปื้อนเข้าสู่พืชศึกษานั้น จากการศึกษาผลของการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วดังกล่าวข้างต้น พบว่าสาร EDDS มีความสามารถ และประสิทธิภาพต่ำกว่าสาร EDTA เพราะฉะนั้นในการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า สาร EDDS ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโครเมียม และตะกั่วในดินด้วยการใช้สับปะรด เพราะเนื่องจากสาร EDDS มีราคา

แพง ดังนั้นเมื่อพิจารณาแล้ว สามารถกล่าวได้ว่าสาร EDTA มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน ด้วยการปลูกสับปะรด ซึ่งสามารถทำให้เกิดประสิทธิภาพในการบำบัด และฟื้นฟูได้อย่างสูงสุด ดังนั้นจึงทำการคิดคำนวณสาร EDTA โดยคิดเป็นต้นทุนในการบำบัดเป็นบาทต่อไร่กรณีที่จะนำสาร EDTA ไปใช้ในการบำบัดในพื้นที่จริง ทั้งนี้ได้ใช้ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองในเรือนทดลอง (ดังตารางที่ 4.7) พบว่า ค่าการลงทุนในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโครเมียม และตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และมีการเติมสาร EDTA พบว่า มีค่าใช้จ่ายต่อไร่เท่ากับ 28,080 บาทต่อไร่ ซึ่งมีราคาที่เป็นต้นทุนในการบำบัดที่สูง เนื่องจากสาร EDTA ที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นสารเคมีในเกรด Analytical Reagent โดยมีประสิทธิภาพ 99 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้จึงได้ทำการคำนวณการใช้สาร EDTA ในเกรด Commercial ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีราคาในการบำบัดต่อไร่เท่ากับ 2,700 บาท

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าใช้จ่ายในการลงทุน (บาทต่อไร่)

สารคีเลต	ราคา (บาท/ไร่)
EDTA (Analytical Reagent; (A.R.))	28,080
EDTA (Commercial Grade)	2,700

หมายเหตุ วิธีคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก

จากค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนในการบำบัดต่อไร่ข้างต้นพบว่า การใช้สาร EDTA ในเกรด Analytical Reagent สามารถเพิ่มการดูดดึงโครเมียมได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 786.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (จากผลการศึกษาดังรูปที่ 4.13) และเพิ่มการดูดดึงตะกั่วได้สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 374 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (จากผลการศึกษาดังรูปที่ 4.14) ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของสาร EDTA ในเกรด Commercial มาคิดกรณีที่ใช้ในการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วโดยใช้สับปะรด พบว่า สาร EDTA ในเกรด Commercial ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถดูดดึงโครเมียมได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 714.95 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสามารถดูดดึงตะกั่วได้สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 340 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงได้นำสารเคมีทั้ง 2 เกรดมาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดดึง และราคาที่ใช้ในการบำบัดพบว่า การใช้สาร EDTA ในเกรด Commercial กับสาร EDTA ในเกรด Analytical Reagent ที่ระดับความสามารถในการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วที่ระดับเดียวกัน พบว่า การใช้สาร EDTA ในเกรด Commercial มีราคาในการบำบัดต่อไร่เท่ากับ 2,970 บาท (วิธี

คำนวณดังภาคผนวก ก) ดังนั้นจากราคาในการบำบัดข้างต้น พบว่า ในกรณีที่จะนำสาร EDTA ไปใช้ในการบำบัดในพื้นที่จริง เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการบำบัด อาจนำสาร EDTA ในเกรด Commercial ไปประยุกต์ใช้ได้ เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าสาร EDTA ในเกรด Analytical reagent ประมาณ 10 เท่า (ดังตารางที่ 4.7) และมีความสามารถในการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน

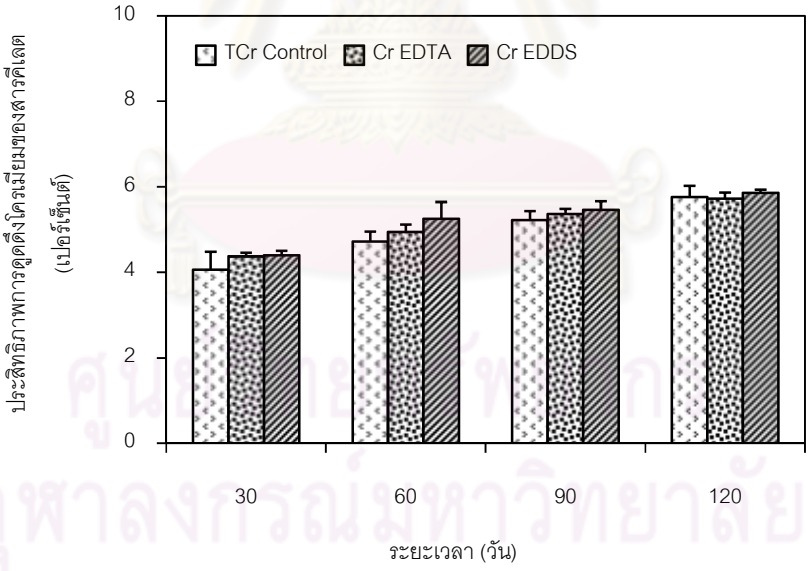
4.7 ประสิทธิภาพและสมดุลมวล (Mass Balance) ของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วด้วยสับปะรด

การทำสมดุลมวล เพื่อศึกษาปริมาณโครเมียม และตะกั่วที่มีอยู่ในระบบ โดยการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม และตะกั่วในดินทั้งหมด และปริมาณโครเมียม และตะกั่วที่อยู่ในสับปะรด โดยแยกความสามารถ และประสิทธิภาพในดูดดึงและสะสมโครเมียม และตะกั่วของสับปะรด ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดินของสับปะรด เพื่อให้เห็นเปอร์เซ็นต์การสะสมที่ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยผลการศึกษาดังกล่าวได้ทำทุกระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน จากผลการเก็บตัวอย่างดิน และพืช (แสดงดังตารางที่ 4.8 และ 4.9) พบว่า ปริมาณโครเมียม และตะกั่วในระบบที่หายไปนั้น อาจติดกับภาชนะปลูกหรือพลาสติกหุ้มถุง และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง หรืออาจเกิดจากปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณภูมิ ความร้อน จุลินทรีย์ดิน เป็นต้น ทำให้ปริมาณโครเมียม และตะกั่วบางส่วนหายไปจากระบบ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของโครเมียม และตะกั่วที่หายไป เท่ากับ 8.05 และ 7.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับประสิทธภาพของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วของสับปะรด สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.7.1 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อประสิทธิภาพในการดูดดึงโครเมียมของสับปะรด

การทดลองครั้งนี้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของสาร EDTA และ EDDS ในการสะสมโครเมียมของสับปะรด แสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.15 โดยทำการเปรียบเทียบระหว่าง ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS พบว่า สับปะรดมีประสิทธิภาพในการดูดดึง และสะสมโครเมียมที่ระยะเวลาต่างๆ ของการเก็บเกี่ยวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) ในทุกชุดการทดลอง ทั้งนี้อาจเกิดจากดินที่ใช้ในการทดลองมีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 4.4 ซึ่งเป็นกรดจัด ทำให้

โครเมียมละลายอยู่ในสารละลายดินได้ดี โดยโลหะหนักสามารถละลายได้ดีที่ความเป็นกรด-ด่าง น้อยกว่า 6.5 (Orawan et al, 1985) นอกจากนี้ ยังพบว่าดินทดลองเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายทำให้โครเมียมยึดเกาะกับอนุภาคดินได้น้อย จึงทำให้สับปะรดมีประสิทธิภาพในการดูดดึงโครเมียมได้ง่าย สำหรับผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อประสิทธิภาพในการดูดดึง และสะสมโครเมียม พบว่าสาร EDTA และ EDDS ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดดึง และสะสมโครเมียม ในขณะที่มีงานวิจัยในพืชชนิดอื่นที่นำสารคีเลตมาเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึงโครเมียมได้ เช่น กะหล่ำปลี และ *Alyssum serpyllifolium* (Kidd and Monterroso, 2005) ผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea)* (Hsiao, 2007) เมื่อพิจารณาผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียม ชุดการทดลองที่ใส่หรือไม่ใส่สารคีเลต พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า สารคีเลตทั้งสองชนิดไม่สามารถชักนำให้สารโครเมียมเข้าสู่พืชได้ อาจเนื่องจากโครเมียมที่ใส่ลงไปในดินอยู่ในรูปโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ โดยสารคีเลตทั้งสองชนิดไม่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ได้ มีเพียงบางส่วนที่เกิดการรีดักชันจากโครเมียมเฮกซาวาเลนท์เป็นโครเมียมไตรวาเลนท์เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารคีเลตและถูกดูดดึงโดยพืช



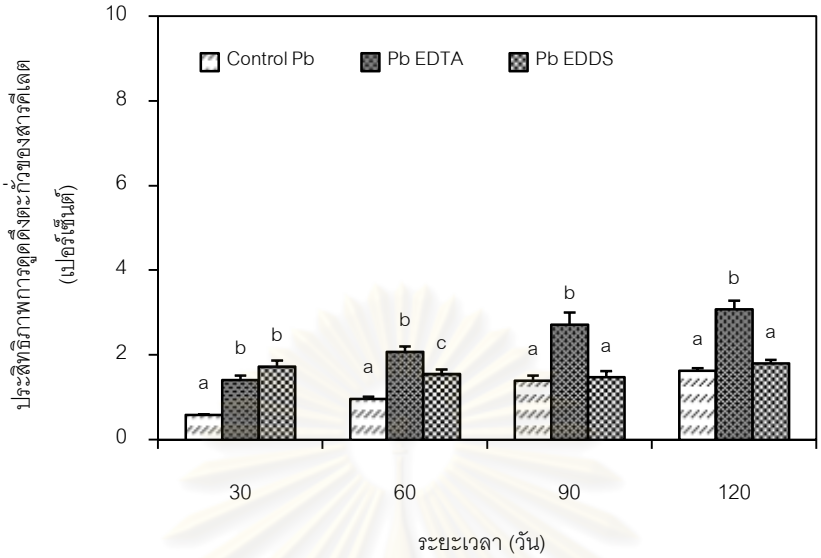
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

4.7.2 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วของสับปะรด

การศึกษาผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อประสิทธิภาพในการดูดดึง และสะสมตะกั่วของสับปะรด ดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.16 พบว่า ที่ระยะเวลาต่างๆ ของการเก็บเกี่ยว สับปะรดที่ปลูกในดินชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA มีความสามารถในการดูดดึง และสะสมตะกั่วได้มากกว่าชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ทุกระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยที่ระยะเวลา 120 วัน ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA มีการสะสมตะกั่วมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 3.08 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS มีประสิทธิภาพในการดูดดึง และสะสมตะกั่วมากกว่าชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต และมีประสิทธิภาพในการดูดดึง และสะสมตะกั่วค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาในการทดลอง อย่างไรก็ตามสาร EDTA ส่งผลให้สับปะรดมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากดินทดลองมีสภาพเป็นกรดจัด จึงทำให้ตะกั่วละลายออกมาในสารละลายดินมาก ทำให้สาร EDTA เข้าจับยึดกับตะกั่วไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วกับสาร EDTA (Pb-EDTA Complax) ในรูปที่ง่ายต่อการดูดดึงของพืช อย่างไรก็ตามสาร EDTA สามารถดูดซับตะกั่วจากอนุภาคดิน (Means et al., 1978) โดยเพิ่มการเคลื่อนย้ายตะกั่วเข้าสู่ราก และช่วยเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากขึ้นสู่ส่วนยอดของพืช (Nascimento et al., 2006) จึงทำให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องการศึกษาของ German et al. (2003) ที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสาร EDTA และ EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ในการดูดดึงตะกั่ว โดยใช้ผักกาดเขียว และพบว่าสาร EDTA มีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วได้ดีกว่าสาร EDDS

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงตะกั่วที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากดินปนเปื้อน จึงได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดดึง และสะสมโครเมียม และตะกั่วของสับปะรดกับพืชชนิดต่างๆ โดยใช้สาร EDTA เพิ่มความสามารถในการดูดดึง และสะสมโลหะหนัก ซึ่ง Kos et al (2003) ได้ศึกษาการใช้ต้นมัสตาร์ดขาว (*Sinapis alba* Linn.) ในการดูดดึง และสะสมตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิโมล พบว่า สาร EDTA ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดดึง และสะสมตะกั่วได้ถึง 48 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ดังตารางที่ 4.10) ขณะที่สับปะรดมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วเท่ากับ 1.89 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าสาร EDTA ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดดึงตะกั่วเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ความสามารถในการดูดดึงจะมาก-น้อยขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ความเข้มข้นของโลหะหนัก และความเข้มข้นของสารคีเลต นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น ปัจจัยทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ

สำหรับความสามารถในการดูดดึง และสะสมโครเมียมของพืช 3 ชนิด (ดังตารางที่ 4.10) คือ สับปะรด ทานตะวัน และธูปฤาษี พบว่า พืชทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการดูดดึง และสะสมโครเมียมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.47-3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 สมดุลมวลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียมของสับปะรด

ระยะเวลา (วัน)	ชุดการทดลอง	ปริมาณโครเมียม (มิลลิกรัม)				ปริมาณโครเมียม (เปอร์เซ็นต์)				ผลรวมปริมาณโครเมียมทั้งหมดในระบบ (เปอร์เซ็นต์)
		ดิน	สับปะรด			ดิน	สับปะรด			
			ส่วนเหนือดิน	ส่วนใต้ดิน	รวม		ส่วนเหนือดิน	ส่วนใต้ดิน	รวม	
30	Control Cr	364.57	10.13	6.14	16.27	91.14	2.53	1.54	4.07	95.21
	Cr EDTA	346.44	10.65	6.86	17.51	86.61	2.66	1.72	4.38	90.99
	Cr EDDS	354.53	10.60	7.02	17.62	88.63	2.65	1.76	4.41	93.04
60	Control Cr	357.85	11.42	7.49	18.91	89.46	2.85	1.87	4.72	94.18
	Cr EDTA	337.33	11.92	7.89	19.81	84.33	2.98	1.97	4.95	89.28
	Cr EDDS	346.66	12.84	8.20	21.04	86.67	3.21	2.05	5.26	91.93
90	Control Cr	354.20	12.71	8.19	20.9	88.55	3.18	2.05	5.23	93.78
	Cr EDTA	334.03	12.93	8.54	21.47	83.51	3.24	2.13	5.37	88.88
	Cr EDDS	345.72	13.05	8.83	21.88	86.43	3.26	2.21	5.47	91.9
120	Control Cr	346.35	13.22	9.85	23.07	86.59	3.30	2.46	5.76	92.35
	Cr EDTA	336.43	13.33	9.58	22.91	84.11	3.33	2.40	5.73	89.84
	Cr EDDS	344.49	13.27	10.20	23.47	86.12	3.32	2.55	5.87	91.99

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 สมดุลมวลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงตะกั่วของสับปะรด

ระยะเวลา (วัน)	ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่ว (มิลลิกรัม)				ปริมาณตะกั่ว (เปอร์เซ็นต์)				ผลรวมปริมาณตะกั่วทั้งหมดในระบบ (เปอร์เซ็นต์)
		ดิน	สับปะรด			ดิน	สับปะรด			
			ส่วนเหนือดิน	ส่วนใต้ดิน	รวม		ส่วนเหนือดิน	ส่วนใต้ดิน	รวม	
30	Control Pb	476.71	1.01	1.95	2.96	95.34	0.20	0.39	0.59	95.93
	Pb EDTA	460.93	3.92	3.18	7.1	92.19	0.70	0.71	1.41	93.6
	Pb EDDS	466.00	4.86	3.77	8.63	93.20	0.79	0.94	1.73	94.93
60	Control Pb	469.64	2.31	2.53	4.84	93.93	0.46	0.51	0.97	94.9
	Pb EDTA	448.78	6.64	3.75	10.39	89.76	1.33	0.75	2.08	91.84
	Pb EDDS	454.50	4.85	2.93	7.78	90.90	0.88	0.67	1.55	92.45
90	Control Pb	459.07	4.05	2.96	7.01	91.81	0.89	0.51	1.4	93.21
	Pb EDTA	447.13	9.73	3.85	13.58	89.43	1.95	0.77	2.72	92.15
	Pb EDDS	451.02	4.64	3.06	7.7	90.20	0.89	0.59	1.48	91.68
120	Control Pb	451.17	4.53	3.63	8.16	90.23	0.91	0.72	1.63	91.86
	Pb EDTA	444.15	9.82	5.57	15.39	88.83	2.18	0.9	3.08	91.91
	Pb EDDS	448.31	5.41	3.63	9.04	89.66	1.02	0.79	1.81	91.47

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบความสามารถของสาร EDTA ในการดูดดึงโลหะหนักของพืชชนิดต่างๆ

ชนิดของโลหะหนัก	ชนิดของพืช	ความเข้มข้นของสาร EDTA	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	อัตราการกำจัดโลหะหนักเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (เท่า)	ที่มา
Pb	*Cynara cardunculus*	1000 $mgkg^{-1}$	2,500	20.95	Epelde et al (2008)
	ข้าวโพด *(Zea may* L.*)*	5 $mmolkg^{-1}$	575	3.57	Luo et al (2006)
	ข้าวโพด *(Zea may* L.*)*	9 $mmolkg^{-1}$	544	5.97	Neugschwandtner et al (2008)
	ผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea* L.)	3 $mmolkg^{-1}$	492	2.8	Wu et al (2004)
	ต้นผีเสื้อ (*Dianthus chinensis* L.)	5 $mmolkg^{-1}$	1,000	15	Lai and Chen (2005)
	มัสตาร์ดขาว *(Sinapis alba* Linn.*)*	5 $mmolkg^{-1}$	1,100	48	Kos et al (2003)
	สับปะรด (*Ananas comosus* (L.) Merr.)	2 $mmolkg^{-1}$	500	1.89	ผลการศึกษาครั้งนี้ (2009)
Cr	ทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.)	0.3 gkg^{-1}	30	1.8	Munn et al (2008)
	ทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.)	0.3 gkg^{-1}	30	1.5	Turgut et al (2004)
	ทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.)	1 gkg^{-1}	50	0.47	Chen and Cutright (2001)
	ธูปฤาษี (*Typha angustifolia* L.)	10 $mmolkg^{-1}$	10	3	Muhammad et al (2009)
	สับปะรด (*Anana comosus* (L.) Merr.)	2 $mmolkg^{-1}$	400	1.03	ผลการศึกษาครั้งนี้ (2009)

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงโครเมียม และตะกั่วโดยใช้สับปะรดที่ปลูกในดินปนเปื้อนได้ทำการศึกษาในเรือนทดลองที่ชั้น 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้สารประกอบโครเมียม และตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ใส่สาร EDTA และ EDDS ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ในแต่ละชุดการทดลอง หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ซึ่งผลการศึกษาสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อความสามารถในการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วโดยสับปะรด

ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อความสามารถในการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วโดยสับปะรด พบว่า ที่ระยะเวลาของการศึกษาที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA มีความสามารถในการดูดดึงโครเมียมได้ดีกว่าชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมไม่ใส่สารคีเลต และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS โดยชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA มีการดูดดึง และสะสมโครเมียมสูงสุดที่ระยะเวลา 120 วัน มีค่าเท่ากับ 786.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA พบว่า สับปะรดมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วมีค่าเท่ากับ 374 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลา 60 ซึ่งสูงกว่าชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS แสดงให้เห็นว่าสาร EDTA มีความสามารถในการช่วยดูดดึงโครเมียม และตะกั่วออกจากดินปนเปื้อน ได้สูงกว่าสาร EDDS

5.1.2 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อการเจริญเติบโตของสับปะรด

1) น้ำหนักแห้งของสับปะรดในส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดินของชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียม พบว่า ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS ไม่มีความแตกต่างกัน

อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของสับปะรดในส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดิน สำหรับความสูงของสับปะรดในส่วนเหนือดิน และความยาวในส่วนใต้ดิน พบว่า ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS ส่งผลให้การเจริญเติบโตด้านความสูงของสับปะรดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสารคีเลตทั้ง 2 ชนิด จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตในด้านความสูงในส่วนเหนือดิน และความยาวในส่วนใต้ดินของสับปะรด เช่นเดียวกัน

2) น้ำหนักแห้งของสับปะรดในส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดินของชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วในทุกชุดการทดลอง พบว่า การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของสับปะรดในทุกชุดการทดลองในส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ปลูกพืชแต่ไม่ใส่สารตะกั่วและสารคีเลต ในขณะที่การเจริญเติบโตด้านความสูงของสับปะรดในส่วนเหนือดิน และความยาวในส่วนใต้ดิน พบว่า ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS ไม่มีความแตกต่างกันในด้านความสูงของสับปะรดในส่วนเหนือดิน ขณะที่ความยาวในส่วนใต้ดินของสับปะรด พบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS เฉพาะที่ระยะเวลา 60 วัน มีความแตกต่างกับชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต จึงสามารถกล่าวได้ว่าสารคีเลตทั้ง 2 ชนิด ไม่ส่งผลกระทบต่อความสูงในส่วนเหนือดิน และความยาวในส่วนใต้ดินของสับปะรด

5.1.3 ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อประสิทธิภาพในการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วโดยสับปะรด

ผลของสาร EDTA และ EDDS ต่อประสิทธิภาพในการดูดดึงโครเมียมโดยสับปะรด พบว่า ชุดควบคุมที่ปลูกพืชใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต ชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS ในทุกระยะเวลาของการทดลองมีประสิทธิภาพในการดูดดึงโครเมียมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หรือกล่าวได้ว่าสาร EDTA และ EDDS สามารถช่วยในการดูดดึงโครเมียมได้น้อยคิดเป็นร้อยละ 5.11 และ 5.25 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม สำหรับชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA พบว่า มีประสิทธิภาพในการเพิ่ม

การดูดดึงตะกั่วได้สูงกว่าชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS โดยสามารถสรุปได้ว่าสาร EDTA และ EDDS มีความสามารถในการช่วยดูดดึงตะกั่วไปสะสมในส่วนต่างๆ ของสับปะรดมีค่าคิดเป็นร้อยละ 2.32 และ 1.64 ตามลำดับ ทั้งนี้ความสามารถของสารคีเลตทั้ง 2 ชนิด สามารถช่วยดูดดึงโครเมียม และตะกั่วไว้ในส่วนต่างๆ ของสับปะรดที่ระยะเวลา 120 วัน สูงสุดคิดเป็น 5.73 และ 3.08 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษากับพืชชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะพืช Hyperaccumulator และพืชที่นำมาใช้ในการศึกษาจะต้องเป็นพืชที่รับประทานไม่ได้

5.2.2 ควรมีการศึกษาการใช้สารคีเลตชนิดอื่น เช่น กรดซิตริกเอซิด (Citric ACid) ออกซาลิกเอซิต (Oxalic Acid) และมาลิคเอซิต (Malic Acid) เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบความสามารถ และประสิทธิภาพในการดูดดึงโลหะหนัก ของสารคีเลตชนิดต่างๆ

5.2.3 การเติมสารคีเลตในดินเป็นการช่วยให้โลหะหนักที่ต้องการบำบัดอยู่ในรูปที่พืชสามารถดึงไปใช้ประโยชน์ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในการนำสารคีเลตไปใช้ในพื้นที่จริง ควรมีการศึกษาผลของสารคีเลตต่อน้ำใต้ดิน เนื่องจากถ้าพื้นที่ที่ต้องการบำบัดมีระดับน้ำใต้ดินสูง อาจส่งผลกระทบต่อการปนเปื้อนของโลหะหนักหรือสารคีเลตไหลลงสู่น้ำใต้ดิน และอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักไปสู่พื้นที่ใกล้เคียงได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2547. สำนักงาน. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535. เรื่องกำหนดมาตราฐานคุณภาพดิน. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพี. 2544. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

ข่าวภูมิภาคสำนักประชาสัมพันธ์เขต 7 จังหวัดระยอง. 2551. การลักลอบทิ้งกากของเสียอันตราย ต. มาบข่า อ. นิคมพัฒนา จ. ระยอง. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: http://region7.prd.go.th/asp/view_news.asp?GID=11739. [2, ตุลาคม 2552]

จันทนี แจ่มแสงทอง. 2550. กลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ. การบำบัดสารมลพิษโดยใช้เทคโนโลยี PHYTOREMEDIATION. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5104/nkc5104v.html. [6 สิงหาคม 2551]

จารุพันธ์ ทองแถม. 2526. ขนาดและคุณภาพของผลสับปะรดโดยทั่วไป. อุตสาหกรรมสับปะรดในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จินดารัฐ วีระวุฒิ. 2541. สับปะรดและสรีระวิทยาการเจริญเติบโตของสับปะรด. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จุรีพร สมพงษ์ และแจ่มจันทร์ บำรุงเกาะ. 2545. การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารตะกั่วในดินโดยใช้พืช. ปัญหาพิเศษ ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

จงจิตร แสงประจักษ์ และปาวีณา นิวรณุสิต. 2546. การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารตะกั่วในดินโดยใช้ไม้ประดับ. ปัญหาพิเศษ ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

ทินพันธุ์ เนตรแพ. 2545. การดูดซับแคดเมียมและตะกั่วทางชีวภาพโดย *Aspergillus orzea*. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแลดล้อม คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยนเรศวร.

นัยนนทน์ อริยกานนท์ กุลภา โสรัตน์ และธิดาวิสุทธิ์ จันทน์เครือ. 2546. การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสะสมสังกะสีในผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea* Coss.) และผักกาดเขียวกวางตุ้ง (*Brassica chinensis* Linn.). วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 28 (Special Issue I).

ประยงค์ ศรีไพสนท์. 2548. การบำบัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินโดยพืช. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ผู้จัดการออนไลน์. 2552. การลักลอบ ต.มาบข่า อ. นิคมพัฒนา จ. ระยอง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.measwatch.org/autopage/show_page.php?t=27&s_id=3098&d_id=3095. [5, ตุลาคม 2552]

พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2535. กรมควบคุมมลพิษ. กฎหมายเกี่ยวกับคุณภาพดิน. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/download/regulation.cfmtask=s9. [22 เมษายน 2552].

พฤฒิภา โรจน์กิตติคุณ. 2550. การบำบัดดินที่ปนเปื้อนด้วยสารตะกั่ว โดยใช้หญ้าชนิดต่างๆ. ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา. มหาวิทยาลัยมหิดล.

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2548. วิวัฒนาการของเทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ที่ปนเปื้อนของเสียอันตราย. วารสารสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ฉบับที่ 1 ปีที่ 9. ม.ค.–มี.ค. 2548: 29-32.

ไพบูลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา. 2546. เคมีดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1.เชียงใหม่: ห้างหุ้นส่วนจำกัดเชียงใหม่พิมพ์สวย.

มะลิวัลย์ เทพพูลผล. 2544. การวัดสภาพการนำไฟฟ้าของดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. คู่มือการวิเคราะห์ดิน และพืช. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์กรมวิชาการเกษตร.

มุกดา สุขสวัสดิ์. 2544. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

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

ยุพดี วัยคุณา. 2540. เอกสารคำสอนรายวิชา เคมีสภาวะแวดล้อม. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สถาบันราชภัฏสวนสุนันทา.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2540. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์บริการข้อมูลสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม. 2551. ปริมาณของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www2.diw.go.th/PIC/map.html. [9 มีนาคม 2552].

ศิริพร แสงจันทร์. 2549. การสะสมตะกั่วและแคดเมียมในพืชผักและไม้ดอก ที่ปลูกด้วยปุ๋ยหมักจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรร่วมกับปุ๋ยเคมี. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.

สรสิทธิ์ วัชโรทยาน. 2513. เคมีและความอุดมสมบูรณ์ของดินนา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สรัตนา เสนาะ. 2548. การดูดดึงธาตุโลหะหนักของหญ้าแฝก ทานตะวัน และข้าว ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุธินี วดีศิริศักดิ์. 2550. การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดินและไร้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุภาพร พงศ์ธรพฤกษ์ .2545. การสะสมตะกั่วและแคดเมียมในพืชผัก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.

โสภาพรรณ จิรนิรัติศัย. 2534. ปริมาณตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม สังกะสีในน้ำและดิน ตะกอนจากชั้นคุณภาพลุ่มน้ำต่าง ๆ ของลุ่มน้ำแม่กลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. 2522. ธาตุอาหารไม้ผลบางชนิด. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์คุรุสภา.

สำนักโรงงานอุตสาหกรรมรายสาขา 6 กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2550. สถานการณ์ปัญหาขยะมูลฝอยและกากของเสียอันตรา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.pcd.go.th/info_serv/pol_maptapoot_waste.html. [12 มีนาคม 2551].

อนนท์ สุขสวัสดิ์. 2547. การประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดินนา. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ โอเดียนสโตร์.

อรรณพ หอมจันทร์. 2544. ความเป็นพิษของโลหะหนักบางชนิดจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชนต่อผักคะน้า และผักกาดหอมในสภาพโรงเรือนทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Akatsuka and Fairhal. 1934. Adsorption of Biochemically Resistant Meterial from Plating wastes. J.Industril Hygiene. 16 (1): 31-32.

Anderson, D., Conway, R. G., Davis, R. J., Peckham, R. J., Richards, P. J., Spencer, R.E. and Wilkinson, P. N. 1972, Nature Phys. Sci. 239: 117.

Arduini, I., and Masoni, A. 2005. Effects of high chromium applications on miscanthus during the period of maximum growth. Environmental and Experimental Botany. 58: 234-243.

Arillo, A., and Melodia, F. 1990. Protective effect of fish mucus against Cr(VI) pollution. Chemosphere. 20: 397–402.

Barceloux, D.G. 1999. Chromium. Clin Toxical. 37(2): 173-194

Baron, D., Palmer, C.D., and Stanley, J.T. 1996. Identification of two are not known it is not possible to compare the reported iron-chromate precipitates in a Cr(VI)-contaminated soil. Environ. biotransformation rates from the soil studies with re- Sci. Technol. 30: 964–968.

BASF, A.G. 1973. Toxicologie. In Arbeitsschutz, BJ., and Chemikaliengesetz. Risk Assessment Ethylene Diamine Tetraacetic Acid (EDTA). [Online]. Available from: http//ecb.jrc.it/documents/ExistingChemicals/RISK_ASSESSMENT/DRAFT/RO061_0302_env_hh.pdf [2008, july 16]

Bloomfield, C., and Pruden, G. 1980. The behavior of Cr(VI) in soil under aerobic and anaerobic conditions. Environ. Pollut. Ser. 23: 103–114.

Bodek, I., Lyman, W.J., Reehl, W.F., and Rosenblatt, D.H. 1988. Environmental Inorganic chemistry. Pergamon Press. New York, NY.

Bower, A.R., and Huang. C.P. 1981. Activated carbon processes for the treatment of Cr(VI)-containing industrial wastewaters. Water Science Technology. 13: 629-650.

Buhler, D.R., Stokes, R.M., and Caldwell, R.S. 1977. Tissue accumulation and enzymatic effects of hexavalent chromium in Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*). J Fish Res Board Can. 34: 9–18.

Cao, A., Carucci, A., Lai, T., La, C. P., and Tamburini, E. 2007. Effect of biodegradable chelating agents on heavy metals phytoextraction with *Mirabilis jalapa* and on its associated bacteria. European Journal of Soil Biology. 43: 200–206.

Cary, E.E. 1982. Chromium in air, soil and natural waters. In: Langard, S. Editor.1982. Biological and Environmental Aspects of Chromium, Topics in Environmental Health Elsevier Biomedical Press, Amsterdam. 49–64.

Chau, Y.K., Wong, P.T.S., Kramer, O., Bengert, G..A., Cruz, R.B., Kinrade, J.O., Lye, J., and Van Loon, J.C. 1980. Occurrence of tetraalkyllead compounds in the aquatic environment. Bull Environ Contam. Toxicol. 24: 265-275.

Chemical. 2003. Chelating agents. [Online]. Available from: http://www.chemicalland21.com/specialtychem/perchem/CHELATING%20AGENTS.htm [2007, March 22]

Chen, H., and Cutright, T. 2001. EDTA and HEDTA effects on Cd, Cr, and Ni uptake by Helianthus annuus. Chemosphere. 45: 21–28.

Committee on Biological Effects of Amospheric Pollutant. 1972. Lead: Airborne Lead in Perspective. National Academy of Science, Washington, D.C. 330 .

Cui, S., Zhou, Q.X., Wei, S.H., Zhang, W., Cao, L., and Ren, L.P. 2006. Effects of exogenous chelators on phytoavailability and toxicity of Pb in *Zinnia elegans* Jacq. Journal of Hazardous Materials. 146: 341–346.

Culter, J.M., and Rains, D.W. 1974. Characterization of cadmium uptake by plant tissues. Plant Physical. 54: 67-71.

Cunningham, S.D., and Ow, D.W. 1996. Promises and prospects of phytoremediation. Plant Physiology. 110: 715–719.

David, P. 1985 . Trace Element Contamination of the Environmental. Elsevier Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo. 13 p.

Diaz, M..A., and Polo, A. 1988. " Effect of two sewage sludge in the rye-grass yield and nutrient content" In A.A. Orio (ed). Environmental contamination. Edinburgh: CEP Consultants. 428-430.

Dufková, V. 1984. EDTA in algal culture media. In Abeitsschutz, B.J., and Chemikaliengesetz, A.A. 2003. Risk Assessment Edetic acid (EDTA). [Online]. Avaiable from http://ecb.jrc.it/document/Existingchemical/Risk _ASSESSMENT /DRAFT/R061_0302_env_hh.pdf [2007, june 18]

Elwood, J.W., Beauchamp, J.J., and Allen, C.P. 1980. Chromium levels in fish from a lake chronically contaminated with chromates from cooling towers. Inter.J.Environ. 14: 289-298.

Ensley, M.D., Carland, J.W., and Carland, J.C. 2000. "Investigating the existence of the lead entrepreneur", Journal of Sma ll Business Management. 38 (4): 59-77.

Environmental Protection Agency. 2000. Introduction to Phytoremediation. New York: National Risk.

Epelde, L., Hernandez-Allica, J., Becerril, J.M., Blanco, F., and Garbisu, C. 2008. Effect of chelates on plants and soil microbial community Comparison of EDTA and EDDS for lead phytoextraction. Science of the total environment. 401: 21-28.

Evangelou, W.H.M., Ebel, M. and Schaeffer, A. 2007. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. Chemosphere. 68: 989–1003.

Gillies, J..A., Kushwaha, R.L., Hwang, C.P., and Ford. R.J. 1989. Heavy metal residues in soil and crops from applications of anaerobically digested sludge. J.WPCF. 61: 1673-1677.

Ginkel, V.C.G., Kester, H., Stroo, C. A., and Haperen, V..A.M. 1999. Biodegradation of EDTA in Pulp and Paper Mill Effluents by Activated Sludge. Water Science and Technology. 40: 259-266.

Goodbold, D.L., and Huttermann, A. 1986. The uptake and toxicity of mercury and lead to spruce (*Piceaabies karst*) seedling. Water, Air and Soil Pollution. 31: 509-515.

Goodfellow, M., Brown, A.B., Cai, J.P., Chun, J.S., and Collins, M.D. 1997. Amycolatopsis japonicum sp. nov, an actinomycete producing (S,S)-N,N 0 –ethylenediamine disuccinic acid. Syst. Appl. Microbiol. 20: 78–84.

Greman, H., Vodnik, D., Velikonja-Bolta, S., and Lestan, D. 2003. Ethylenediamine dissuccinate as a new chelate for environmentally safe enhanced lead phytoextraction. J. Environ. Qual. 32: 500-506.

Grohse, P.M., Gutknecht, W.F., Hodson, L., and Wilson, B. M. 1988. The Fate of Hexavalent Chromium in the Atmosphere. Prepared for California Air Resources Board, CARB Contract No. A6-096-32, by Research Triangle Institute.

Hanus, J., and Tomas, J. 1993. An investigation of chromium content and its uptake from soil in white mustard. Acta Phytotech Zootech. 48: 39–47.

Hara, T., and Sonoda, Y. 1979. Comparison of the toxicity of heavy metals to cabbage growth. Plant Soil. 51: 127 – 33.

Hauser, L., Tandy, S., Schulin, R., and Nowack, B. 2005. Column extraction of heavy metals from soils using the biodegradable chelating agent EDDS. Environ. Sci. Technol. 39: 6819–6824.

Hawley, G.G. 1977. The condensed chemical dictionary. 9th ed., Van Nostrand Reinnhold. Co., London.

Hsiao, K.H., Kao, P.H., and Hseu, Z.Y. 2007. Effects of chelators on chromium and nickel uptake by *Brassica juncea* on serpentine-mine tailings for Phytoextraction. J. Hazard. Mat. 148: 366-376.

Huang, J.W., Chen, J., Berti, W.B., and Cunningham, S.D. 1997. Phytoremediationof lead-contaminated soils: role of synthetic chelates inlead phytoextraction. Environ. Sci. Technol. 31: 800–805.

Hutchinson, T.C., and Meema, K.M. 1987. Effects of Atmospheric Pollutants on Forests, Wetlands and Agricultural Ecosystems. Springer-Verlag. Berlin.

International Environmental Technology Centre. 2000. Phytoremediation: An environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation an introduction guide to decision-makers [Online]. USA: United Nations Environment Programme[UNEP], Division of Technology, Industry and Economic. Available from: http//www.unep.or.jp/ietc/Publications/Freshwater/FMS2/index.asp[2009, January 24]

Iqbal, M.Z., Saeeda, S., Shafiq, and Muhammad, D. 2001. Effects of chromium on an important arid tree (Caesalpinia pulcherrima) of Karachi city, Pakistan. Ekol Bratislava. 20: 414–422.

Irrigation Training and Research Center. 1999. Water Level Sensor and Datalogger Testing and Demonstration. ITRC, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California, USA.

January, M.C., Cutright, T.J., Keulen, H.V., and Wei, R. 2007. Hydroponic phytoremediation of Cd, Cr, Ni, As and Fe: Can *Helianthus annuus* hyperaccumulate multiple heavy metal?.Chemosphere. 70: 531-537.

Jean, L., Bordas, F., Gautier-Moussard, C., Vernay, P., Hitmi, Adnane, and Bollinger, J.C. 2007. Effect of citric acid and EDTA on chromium and nickel uptake and translocation by *Datura innoxia*. Environmental pollution. 153: 555-563.

John, M.K., and Laerhoven, C.V. 1972. Lead Uptake by lettuce and Qota as Aftected by lime, Nitrogen and Sources of Lead. J. of Environ. Qual. 1: 118-119.

Kaczynski, S.E. and Kieber, R.J. 1994. Hydrophobic C_{18} bound organic complexes of chromium and their potential impact on the geochemisty of chromium in natural waters. Environ. Sci. Technol. 28: 799–804.

Kidd, P.S., and Monterroso, C. 2005. Metal extraction by Alyssum serpyllifolium ssp. lusitanicum on mine-spoil soils from Spain. Sci Total Environ. 1-3: 1-11.

Knoll, J., and Fromm, P.O. 1960. Accumulation and elimination of hexavalent chromium in rainbow trout. , Physiol. Zool. 33: 1-8.

Kochian, L.V. 1991. Mechanisms of micronutrient uptake and translocation in plants. In: J.J. Mortvedt, F.R. Cox, L.M. Shuman and R.M. Welch, Editors, Micronutrient in agriculture, Soil Science Society of America, Madison (WI) . 229–296.

Kocik, K., and Ilavsky, J. 1994. Effect of Sr and Cr on the quantity and quality of the biomass of field crops. Production and utilization of agricultural and forest biomass for energy: Proceedings of a seminar held at Zvolen, Slovakia. 168 – 178.

Kos, B., Greman, H., and Lestan, D. 2003. Phytoextraction of lead, zinc and cadmium from soil by selected plants. Plant Soil Environ. 49: 548–553.

Krenkel, P. A. 1973. Heavy metals in the environment. Proceedings of the International .Conference on heavy metals in the aquatic environment, Nashville, Tenn. Pergamon Press, New York. 272p.

Lai, H.Y., and Chen, Z.S. 2005. The EDTA effect on phytoextraction of single and combined metals-contaminated soils using rainbow pink (Dianthus chinensis). Chemosphere. 80: 1062–1071.

Liu, D., Islam, E., Li, T., Yang, X., Jin, X., and Mahmood, Q. 2007. Comparison of synthetic chelators and low molecular weight organic acids in enhancing phytoextraction of heavy metals by two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance. Journal of Hazardous Materials.153: 114-122.

Lofroth, A.G., Ames, B.N. 1978. Mutagenicity of inorganic compounds in *Salmonella typhimurium:* arsenic, chromium and selenium. Mutat Res 53: 65–66.

Luo, C., Shen, Z., and Li, X. 2004. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb,Zn and Cd with EDTA and EDDS. Chemospher. 59: 1-11.

Luo, C., Shen, Z., and Li, X., 2005. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. Chemosphere. 59, 1–11.

Luo, C.L., Shen, Z.G., Li, X.D., and Baker, A.J.M. 2006. Enhanced phytoextraction of Pb and other metals from artificially contaminated soils through the combined application of EDTA and EDDS. Chemosphere. in press.

Maryadele, J., Smith, A., Heckelman, P.E., Obenchain, J.R., Gallipeau, J. A. R., Arecca, M..A.D., and Budavari, S. 2001. The Merck Index An Encyclopedia of chemicals,drugs, andbiolgical. New Jersey: Merck & Co.

Means, J.L., Crerar, D..A., and Duguid, J.O. 1978. Migration of radioactive wastes: radionuclide mobilization by complexing agents. Science 200. 1477–1481.

Meers, E., Ruttens, A., Hopgood, M.J., Samson, D., and Tack, F.M.G. 2005. Comparison of EDTA and EDDS as potential soil amendments for enhanced phytoextraction of heavy metals. Chemosphere. 58: 1011-1022.

Meers, E., Tack, F.M.G., Verloo, M.G. 2007. Degradability of ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) in metal contaminated soil: Implication for its use soil remediation. Chemosphere. 70: 358-363.

Merian, E. 1984. Introduction on Environmental chemistry and global cycle of arsenic, cadmium, chromium, cobalt, nickel, selenium and their their derivatives. Toxicol. Env. Chem. 8: 9-38.

Mohr, H.D. 1979. Effect of garbage sewage-sludge compost on the heavy metal content of vineyard soils, grapevies organs and must. Weinberg Keller. 26: 333-344.

Muhammad, D., Chen, F., Zhao, J., Zang, G., and Wu, F. 2009. Comparison of EDTA and Citric acid enhanced phytoextraction of heavy metals in artificially metal contaminated soil by *Typha angustifolia*. Internationmal journal of Phytoremediation. 11: 558-574.

Munn, J., January, M., and Cutright., T.J. 2008. Greenhouse evaluation of EDTA effectiveness at enhancing Cd, Cr, and Ni uptake in *Helianthus annuus* and *Thlaspi caerulescens*. J Soils Sediments. 2: 116-122.

National Academy of Sciences. 1972. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 69: 3069-3092.

National Institute for Occupational Safety and Health. 2002. Encyclopedia of Public Health. [Online]. USA: Available from: http://gotoknow.org/file/sansanee1194.gif. [2008, January 10]

Nascimento, D., Amarasiriwardena, and Xing, B. 2006. Comparison of natural organic acids and synthetic chelates at enhancing phytoextraction of metals from a multi-metal contaminated soil, Environ. Pollut. 140: 114–123.

Neugschwandtner, R.W., Tlustoš, P.M.K., and Száková, J. 2007. Phytoextraction of Pb and Cd from a contaminated agricultural soil using different EDTA application regimes: Laboratory versus field scale measures of efficiency. Geoderma. 144: 446– 454.

Nishikiori, T., Okuyama, A., Naganawa, H., Takita, T., Hamada, H., Takeuchi, T., Aoyagi, T., and Umezawa, H. 1984. Production by actinomycetes of (S,S)-N,N 0 -Ethylenediamine–disuccinic acid, aninhibitor of phospholipase. C. J. Antibiot. 37: 426–427.

Orawan Siriratpiriya. E., Vigerust, and A.R. Selmer-Oisen.1985. Effects of temperature and heavy metal application on metal content in lettuce. Scientific Report of the Agricultural University of Norway, 64:29.

Oviedo, C., and Rodríguez, J. 2003. EDTA: the chelating agent under environmental scrutiny, Quim. Nova. 26 (6): 901–905.

Peters, R. W., and Shem, L. 1992. Use of Chelating Agents for Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil ", in Vandegrift, G. F, Reed, D. T. and Tasker, I. R., (eds.), *Environmental Remediation: Removing Organic and Metal Ion Pollutants* ACS Symposium Series. 509: 70–84.

Pickering, Q.H., and Henderson, C. 1966. The Acute Toxicity of some Heavy Metals to Different Species of Warm Water Fishes. Air and Water Pollution International Journal. 10: 453-463.

Quartacci, M.F., Irtelli, B., Baker, A.J.M., and Navari-Izzo, F. 2007. The use of NTA and EDTA for Enhanced phytoextraction of metal from a multiply contaminated soil by *Brassica carinata*. Chemosphere. 68: 1920-1928.

Ramachandran, V., D'Souza, T.J., and Mistry, K.B. 1980. Uptake and transport of chromium in plants. J Nucl Agric Biol. 9: 126 – 129.

Rehwoldt, R., Lasko, L. Shaw, C., and Wirhowski, E. 1973. The Acute Toxicity of some Heavy Metal Ions toward Benthic Organism. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicity. 10: 291-294

Reilly.1980. Metal Contamination of food. Applied Science Publ.Ltd., London. 235p.

Saleh, F. Y., Parkerton, T. F., Lewis, R. V., Huang, J. H., and Dickson, K. L. 1989. Kinetics of chromium transformations in the environment. Sci. Total Environ. 86: 25–41.

Sampanpanish, P., Pongsapich, W., Khaodhair, S., and Khan, E. 2004. Chromium removal from Soil by Phytoremediation with Weed Plant Species in Thailand. In Proceeding 36th Mid-Atlantic Industrial and Hazardous Waste Conference,October 8-10,University of Connecticut, Storrs, CT, 34-43.

Sampanpanish, P., Pongsapich, W., Khaodhair, S., and Khan, E. 2005. "Alternative of Chromium Removal by Phytoremediation and Biosorption with Weed Plant Species in Thailand." In Proceeding at the symposia of International Congress of Chemistry and Environment (ICCE-2005), December 23-26, 2005. Indore, INDIA. 371-374.

Sampanpanish, P., Pongsapich, W., Khaodhair, S., and Khan, E. 2006. Chromium removal from Soil by Phytoremediation with Weed Plant Species in Thailand. In Water, Air and Soil Focus. Springer Netherlands. 6(1-2): 191-206.

Santos, F.S., Hernandez-Allica, J., Becerril, J.M., Amaral-Sobrinho, N., Mazur, N., and Garbisu, C. 2006. Chelate-induced phytoextraction of metal polluted soils with Brachiaria decumbens, Chemosphere. 65: 43–50.

Schowanek, D., Mcavoy, D., Versteegb, D., and Hanstveitc, A.1996. Effect of nutrient trace metal speciation on algal growth in the presence of the chelator [S,S]-EDDS. Aquatic Toxicology. 36: 253-375.

Schowanek, D., Feijtel, T.C.J., Perkins, C.M., Hartman, F..A., Federle, T.W., and Larson, R.J. 1997. Biodegradation of [S,S], [R,R] and mixed stereoisomers of Ethylene Diamine Disuccinic acid (EDDS), a transition metal chelator, Chemosphere. 34: 2375–2391.

Seigneur, C., and Constantinou, E. 1995. Chemical kinetics mechanism for atmospheric chromium. Environmental Science and Technology. 29: 222-231.

Shanker, A.K., Cerv, C., Loza-Tavera, H., and Avudainayagam, S. 2005. Chomium toxicity in plants. Environ. Int. 31: 739-753.

Sheldon, R.P., Warner, M..A. Thompson, M.E., and Peirce, H.W. 1953. Stratigarhic sections of the Phosphoria formation in Idaho Servey. Cric. 304:1.

Skeffington, R..A., Shewry, P.R., and Petersen, P.J. 1976. Chromium uptake and transport in barley seedlings Hordeum vulgare. Planta. 132: 209 – 214.

Smith, T.M., Miller, J.R., and Russell, G.L. 1989. Seasonal oceanic heat transports computed from an atmospheric model and ocean temperature climatology. Dynam. Atmos. Oceans. 14: 77-92.

Tandy, K., Bossart, R., Mueller, J., Ritschel, L., Hauser, R., S., and Nowack, B. 2004. Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents, Environ. Sci. Technol. 38 (3): 937–944.

Turgut, C., Pepe, M.K., and Cutright, T.J. 2004. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr and Ni from soil using *Helianthus annuus*. Environ. Pollut. 131: 147-154.

United States Environmental Protection Agency. 2005. [S,S]-Ethylene diamine disuccinic acid; Notice of Filing a pesticide Petition to Establish a Tolerance for a Certain Pesticide Chemical in 0r on food. [Online]. Available from: http//www.epa.gov/EPA-PEST/2005/January/Day-19/p284.htm [2008, January 22].

USEPA. 1984. Reproduction and ninety-day oral toxicity study in rats. Office of Pesticides and Toxic Substances. Fiche No. OTS0509954.

USEPA. 1996a. Alkaline Digestion for Hexavalent Cromium. Method 3060, Washington D.C., USA.

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

USEPA. 1998. Integrated Risk Information System (IRIS). Online, National Center for

Environmental Assessment, Cincinnati, OH.

USEPA. 2000. Introduction to Phytoremediation. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Cincinnati, OH.

Van der Putte , I., Brinkhorst, M. A., and Koeman, J. H. 1981. Effect of pH on the acute toxicity of hexavalent chromium to rainbow trout (*Salmo gairdneri*). Aquat. Toxicol. 1: 129–142.

Vanginkel, G., Virtapohja, J., Steyaert, J..A., and Alen, R.J. 1999. Treatment of EDTA containing in pulp and paper mill wastewaters in activated sludge plants. Tappi Journal. 82(2): 138-142.

Wang, C., Van Briesen, J.M., Brown, W.E., and Minkley, E.G.J. 2004. "Microbial communities in two river sediments demonstrate distinct anaerobic PCB dechlorination patterns," American Chemical Society Annual Meeting, Fall Extended abstract published by the Environmental Division.

Wood, C.W., and Holliday, A.K. 1967. Inorganic Chemistry. 3rd ed. U.S.A: Butter Worth.

World Health Organization. 1977. Environmental health criteria 3 lead. Geneva.

World Heaith Organizatio (WHO). 1988. Environmentaln Health Criteria 61 Chromium The International Programme on Chemical Safety (IPCS). Geneva.

Wu, L. H., Luo, Y. M., and Huang, H. 2001. Chelate-induced phytoextraction of copper contaminated upland red soil. The journal of applied ecology. 12(3): 435-8.

Wu, L.H., Luo, Y.M., Xing, X.R., and Christie, P. 2004. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indianmustard and associated potential leaching risk. Agr. Ecosyst. Environ. 102: 307–318.

Yu, X.Z., and Gu, J.D. 2007. The role of EDTA in phytoextraction of hexavalent and trivalent chromium by two willow trees. Ecotoxicology.17: 143-152.

Zayed, A., Lytle, C.M., Jin-Hong, Q., Terry, N., and Qian, J.H. 1998. Chromium accumulation, translocation and chemical speciation in vegetable crops. Planta. 206: 293–299.

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
สูตรการคำนวณหาปริมาณสาร

1. การคำนวณสารประกอบโครเมียมและตะกั่ว

จากสูตร $$\frac{A \times S \times MW}{MM \times 1{,}000}$$

เมื่อ A คือ ความเข้มข้นของสารประกอบโครเมียม และตะกั่ว ที่ระดับต่าง ๆ (มิลลิกรัม โครเมียมต่อกิโลกรัมดิน) (มิลลิกรัม ตะกั่วต่อกิโลกรัมดิน)

S คือ น้ำหนักดิน (กิโลกรัม)

MM คือ มวลอะตอมของโครเมียม และตะกั่ว (กรัม)

MW คือ มวลโมเลกุลของสารประกอบโครเมียม และตะกั่ว (กรัม)

2. การหาปริมาณโครเมียม และตะกั่วทั้งหมดในตัวอย่าง

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

A คือ ความเข้มข้นของโครเมียม และตะกั่วทั้งหมดจากการวัด AAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)

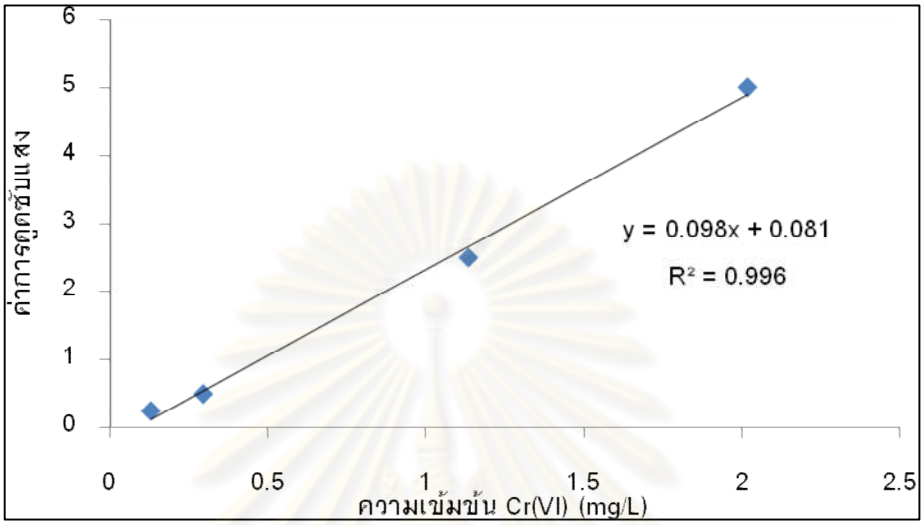
B คือ ปริมาณสารละลายที่นำไปวิเคราะห์ (มิลลิลิตร)

C คือ น้ำหนักแห้งหรือปริมาณของตัวอย่าง (กรัมหรือลิตร)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. การหาปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในตัวอย่าง

กราฟมาตรฐานการดูดกลืนแสงของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ (Chromium Hexavalent)



ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในสารละลายจากการวัดค่าดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากกราฟมาตรฐานของค่าการดูดกลืนแสงของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ จะได้สมการ $Y = 0.098X + 0.081$

Y คือ ค่าการดูดกลืนแสง

X คือ ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ฉะนั้น ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในสารละลาย $= \frac{(Y - 0.081)}{0.098}$

ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์ในตัวอย่าง $= \frac{A \times B}{C \times 1000}$

A คือ ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในสารละลายจากการวัดค่าดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B คือ ปริมาณสารละลายที่นำไปวิเคราะห์ (มิลลิลิตร)

C คือ น้ำหนักแห้งหรือปริมาณของตัวอย่าง (กรัมหรือลิตร)

4. การหาปริมาณโครเมียมไตรวาเลนซ์ในตัวอย่าง

ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนซ์ คือ ปริมาณโครเมียมทั้งหมด – ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนซ์

5. การคำนวณสารคีเลต

จากสูตร $N_1V_1 = N_2V_2$

เมื่อ N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น

V_1 คือ ปริมาตรสารละลายเข้มข้นตั้งต้น

N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายในดิน

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการเตรียม

6. การคำนวณค่าใช้จ่าย

กำหนดให้ ความลึกของดินบน (Top Soil) อยู่ระหว่าง 0-30 เซนติเมตร

(คำนวณความลึกของดินบนที่ 17 เซนติเมตร)

แหล่งที่มา: http://vdo.kku.ac.th/mediacenter/mediacenter-uploads/libs/html/1291/index.html

ความหนาแน่นของดิน เท่ากับ 1.13 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

1 ไร่ = 1,600 ตารางเมตร

ดิน 1 ไร่ = $1{,}600\ m^2 \times 1.13 \times 100^3\ g/m^3 \times 0.17m$

= 30,730 กก.

สาร EDTA ที่ใส่ลงในดินมีความเข้มข้น เท่ากับ 2 มิลลิโมลต่อ 1 กิโลกรัมดิน

2 มิลลิโมลต่อ 1 กิโลกรัมดิน เท่ากับ 584.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

ดังนั้น ดิน 1 ไร่ จะต้องใช้สาร EDTA = 30,730 กก.x 584.48 มก./กก.

= 18 กก.

6.1 สาร EDTA ในเกรด Analytical Reagent; (A.R.) ประสิทธิภาพ 99 %

สาร EDTA 0.5 กิโลกรัม ราคา = 780 บาท

สาร EDTA 18 กิโลกรัม ราคา = $\frac{18 \times 780}{0.5}$ บาท

เพราะฉะนั้นสาร EDTA เกรด AR มีต้นทุนในการบำบัดต่อไร่ = 28,080 บาท

6.2 สาร EDTA ในเกรด Commercial ประสิทธิภาพประมาณ 90%

สาร EDTA 1 กิโลกรัม ราคา = 150 บาท

สาร EDTA 18 กิโลกรัม ราคา = $\frac{18 \times 150}{1}$ บาท

เพราะฉะนั้นสาร EDTA เกรด Commercial มีต้นทุนในการบำบัดต่อไร่ = 2,700 บาท

6.3 การเปรียบเทียบการใช้สาร EDTA ระดับ Commercial Grade ให้มีประสิทธิภาพในการดูดดึงเท่าสาร EDTA ในระดับ Analytical Reagent

สาร EDTA ในเกรด Commercial ประสิทธิภาพ 90% มีราคากิโลกรัมละ = 150 บาท

สาร EDTA ในเกรด A.R. ประสิทธิภาพ 99 % = $\frac{150 \times 99}{90}$ บาท

= 165 บาท

เปรียบเทียบให้สาร EDTA ในเกรด Commercial ประสิทธิภาพ 99 % มีราคา = 165 บาท

ดังนั้น 1 ไร่ใช้สาร EDTA ในเกรด Commercial 18 กิโลกรัม = 165 x 18 บาท

= 2,970 บาท

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
ปริมาณโครเมียม และตะกั่วในดินและสับปะรด

ตารางที่ ข1 ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดิน

ชุดการทดลอง	ปริมาณโครเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	30 วัน	เฉลี่ย	60 วัน	เฉลี่ย	90 วัน	เฉลี่ย	120 วัน	เฉลี่ย
Blank	2.28		1.11		1.09		1.19	
	1.91	1.62	1.29	1.32	1.10	1.15	1.10	1.39
	1.38		1.58		1.29		1.88	
Control	365.64		364.97		366.14		361.74	
	355.02	364.57	358.13	357.85	346.02	354.20	329.34	346.35
	373.06		350.44		350.42		347.96	
Cr+ EDTA	353.33		348.10		338.19		356.18	
	340.05	346.44	325.43	337.32	343.78	334.03	337.70	336.43
	345.95		338.47		320.13		315.39	
Cr+ EDDS	353.89		359.90		369.32		367.18	
	341.14	354.52	330.47	346.66	343.29	345.72	341.73	344.49
	368.57		349.60		324.55		324.55	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข2 ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในดิน

ชุดการทดลอง	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	30 วัน	เฉลี่ย	60 วัน	เฉลี่ย	90 วัน	เฉลี่ย	120 วัน	เฉลี่ย
Blank	0.00		0.00		0.00		0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00		0.00		0.00		0.00	
Control	211.15		238.07		129.00		110.72	
	242.15	249.06	203.65	209.68	157.02	156.64	95.4	114.21
	293.89		187.32		183.90		136.52	
Cr+ EDTA	173.30		198.22		147.16		98.54	
	251.57	207.62	161.63	180.58	160.57	139.02	70.42	93.34
	198.00		180.58		109.33		111.05	
Cr+ EDDS	198.91		185.15		124.34		82.27	
	213.15	216.72	169.17	188.21	155.43	158.51	133.79	107.04
	238.08		210.31		195.77		105.08	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข3 ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ในดิน

ชุดการทดลอง	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	30 วัน	เฉลี่ย	60 วัน	เฉลี่ย	90 วัน	เฉลี่ย	120 วัน	เฉลี่ย
Blank	2.28		1.11		1.09		1.19	
	1.91	1.62	1.29	1.32	1.10	1.15	1.10	1.39
	1.38		1.58		1.29		1.88	
Control	154.48		126.89		237.14		251.02	
	112.86	115.51	154.48	148.16	189.00	197.56	233.94	232.13
	79.17		163.12		166.52		211.44	
Cr+ EDTA	180.03		149.87		191.03		257.64	
	88.47	138.82	163.80	157.19	183.21	195.01	267.28	243.09
	147.95		157.89		210.80		204.34	
Cr+ EDDS	154.97		174.75		244.98		284.91	
	127.98	137.81	161.31	158.45	187.86	187.21	207.94	237.44
	130.48		139.29		128.78		219.47	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข4 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน

ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่วในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	30 วัน	เฉลี่ย	60 วัน	เฉลี่ย	90 วัน	เฉลี่ย	120 วัน	เฉลี่ย
Blank	1.99		1.29		0.69		1.29	
	2.19	1.89	1.59	1.45	0.99	0.92	2.18	1.29
	1.48		1.48		1.09		0.40	
Control	469.66		469.74		458.22		464.98	
	482.96	476.71	478.22	469.64	475.99	459.07	437.91	451.17
	477.52		460.95		443.01		450.63	
Pb+ EDTA	460.80		468.43		445.83		428.63	
	471.38	460.93	430.65	448.78	460.38	447.13	457.95	444.15
	450.60		447.26		435.17		445.86	
Pb+ EDDS	451.94		456.98		453.82		434.11	
	467.85	466.30	440.37	454.50	472.12	451.02	451.64	449.62
	479.12		466.16		427.12		463.10	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข5 ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรด

ชุดการทดลอง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	30 วัน	เฉลี่ย	60 วัน	เฉลี่ย	90 วัน	เฉลี่ย	120 วัน	เฉลี่ย
Blank	0.70		0.60		1.20		1.50	
	0.40	0.63	0.30	0.48	1.49	1.40	1.00	0.86
	0.79		0.50		1.50		0.10	
Control	446.80		498.48		480.71		512.60	
	486.00	465.46	465.95	483.70	514.78	508.97	507.84	518.27
	463.59		486.66		531.43		534.38	
Cr+ EDTA	517.52		519.18		534.04		520.07	
	533.07	518.50	539.82	541.31	560.36	545.72	518.42	538.42
	504.92		564.93		542.77		576.78	
Cr+ EDDS	483.68		525.50		513.79		536.76	
	511.04	488.58	507.52	505.81	497.87	513.68	507.87	511.05
	471.04		484.43		529.39		488.51	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข6 ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในส่วนเหนือดินของสับปะรด

ชุดการทดลอง	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในส่วนเหนือดินของสับปะรด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	30 วัน	เฉลี่ย	60 วัน	เฉลี่ย	90 วัน	เฉลี่ย	120 วัน	เฉลี่ย
Blank	0.00		0.00		0.00		0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00		0.00		0.00		0.00	
Control	148.86		131.57		147.61		140.07	
	168.79	168.35	156.72	159.57	120.92	148.87	169.05	139.73
	187.41		190.42		178.08		110.07	
Cr+ EDTA	251.32		250.04		178.04		142.04	
	208.66	224.12	222.41	221.30	201.79	192.47	165.86	170.13
	212.39		191.45		197.58		202.48	
Cr+ EDDS	179.65		234.66		162.66		161.68	
	213.27	196.55	171.15	198.88	138.03	160.60	150.79	144.48
	196.71		190.83		181.10		120.96	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข7 ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนเหนือดินของสับปะรด

ชุดการทดลอง	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนเหนือดินของสับปะรด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	30 วัน	เฉลี่ย	60 วัน	เฉลี่ย	90 วัน	เฉลี่ย	120 วัน	เฉลี่ย
Blank	0.70		0.60		1.20		1.50	
	0.40	0.63	0.30	0.48	1.49	1.40	1.00	0.86
	0.79		0.50		1.50		0.10	
Control	297.94		366.91		333.10		372.52	
	317.21	297.11	309.24	324.13	393.86	360.10	338.78	378.54
	276.18		296.25		353.35		424.30	
Cr+ EDTA	266.20		269.13		356.00		378.03	
	324.41	294.38	317.40	320.01	358.57	353.25	352.56	368.30
	292.53		373.48		345.19		374.30	
Cr+ EDDS	304.03		290.83		351.12		375.08	
	297.76	292.04	336.37	306.93	359.84	353.08	357.07	366.57
	274.32		293.60		348.29		367.55	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข8 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดินของสับปะรด

ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่วในส่วนเหนือดินของสับปะรด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	30 วัน	เฉลี่ย	60 วัน	เฉลี่ย	90 วัน	เฉลี่ย	120 วัน	เฉลี่ย
Blank	0.10		0.20		2.40		1.40	
	1.49	1.29	0.20	0.22	1.29	1.73	2.00	1.63
	1.39		0.25		1.50		1.50	
Control	56.57		117.03		146.37		110.43	
	32.64	44.33	84.00	100.02	104.06	124.27	124.89	130.59
	43.77		99.02		122.39		156.43	
Pb+ EDTA	171.18		307.89		277.00		248.11	
	195.96	172.75	289.32	288.15	290.61	274.87	285.77	253.30
	151.10		267.21		257.00		225.01	
Pb+ EDDS	192.31		176.80		175.64		143.23	
	171.90	195.12	207.48	178.59	147.38	148.53	172.36	146.35
	221.16		151.51		122.57		123.45	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข9 ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในส่วนใต้ของสับปะรด

ชุดการทดลอง	ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในส่วนใต้ดินของสับปะรด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	30 วัน	เฉลี่ย	60 วัน	เฉลี่ย	90 วัน	เฉลี่ย	120 วัน	เฉลี่ย
Blank	0.40		0.13		0.30		0.89	
	0.60	0.96	1.29	0.77	0.50	0.63	1.19	0.96
	1.89		0.90		1.09		0.79	
Control	1613.66		2007.79		1802.50		2600.67	
	2024.31	1819.77	1863.54	1883.69	2152.76	2011.48	1572.59	2097.41
	1821.35		1779.74		2079.19		2118.98	
Cr+EDTA	1965.95		2479.09		2589.01		1885.52	
	2158.06	2057.98	2219.79	2228.85	2297.14	2267.99	2182.54	2193.84
	2049.91		1987.69		1917.83		2513.45	
Cr+EDDS	1856.61		1623.99		2733.23		2433.23	
	1998.41	1986.93	2071.57	2067.22	1616.71	2117.84	1916.71	2124.48
	2105.77		2533.10		2003.59		2023.51	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข10 ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในส่วนใต้ดินของสับปะรด

ชุดการทดลอง	ปริมาณโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในส่วนใต้ดินของสับปะรด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	30 วัน	เฉลี่ย	60 วัน	เฉลี่ย	90 วัน	เฉลี่ย	120 วัน	เฉลี่ย
Blank	0.00		0.00		0.00		0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00		0.00		0.00		0.00	
Control	668.30		636.86		444.93		500.33	
	756.82	762.11	623.14	727.26	753.14	658.25	621.94	608.32
	861.23		921.80		776.70		702.68	
Cr+ EDTA	820.26		580.83		728.10		876.35	
	746.06	826.77	868.28	783.00	620.79	718.22	668.10	666.50
	913.77		899.90		805.16		455.05	
Cr+ EDDS	989.58		851.65		590.66		528.65	
	580.59	784.61	649.23	750.53	780.37	688.13	631.05	627.13
	783.65		750.72		693.38		721.69	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข11 ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนใต้ดินของสับปะรด

ชุดการทดลอง	ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนท์ในส่วนใต้ดินของสับปะรด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	30 วัน	เฉลี่ย	60 วัน	เฉลี่ย	90 วัน	เฉลี่ย	120 วัน	เฉลี่ย
Blank	0.40		0.13		0.30		0.89	
	0.60	0.96	1.29	0.77	0.50	0.63	1.19	0.96
	1.89		0.90		1.09		0.79	
Control	945.36		1370.93		1357.56		2100.35	
	1267.50	1057.66	1240.40	1156.42	1399.62	1353.23	950.65	1489.10
	960.12		857.94		1302.49		1416.30	
Cr+EDTA	1145.69		1898.26		1860.31		1009.17	
	1412.01	1231.28	1351.51	1445.85	1676.35	1549.78	1514.44	1527.47
	1136.14		1087.78		1112.67		2058.79	
Cr+EDDS	876.03		772.34		2142.57		1904.58	
	1417.82	1202.32	1422.34	1325.73	836.35	1429.71	1285.67	1497.35
	1322.12		1782.50		1310.21		1301.81	

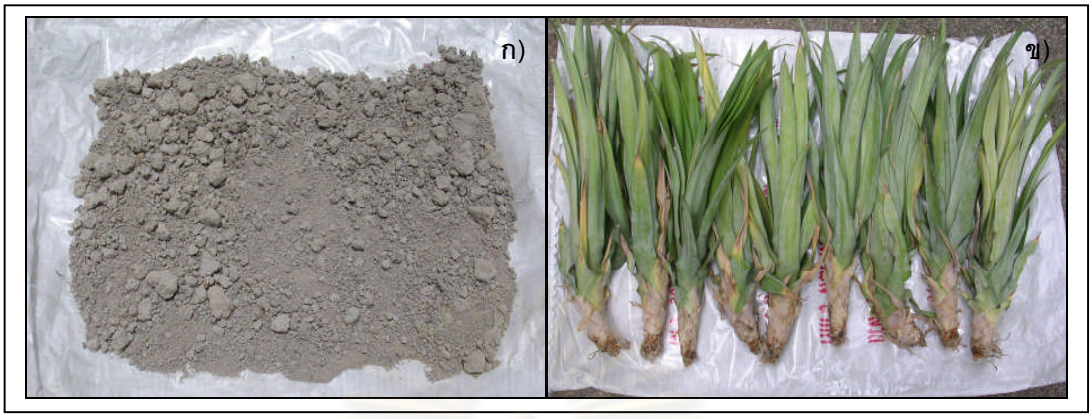
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข12 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของสับปะรด

ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่วในส่วนใต้ดินของสับปะรด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	30 วัน	เฉลี่ย	60 วัน	เฉลี่ย	90 วัน	เฉลี่ย	120 วัน	เฉลี่ย
Blank	1.09		1.29		1.19		1.39	
	1.59	1.29	2.09	1.49	0.89	1.29	0.89	1.09
	1.19		1.10		1.78		0.98	
Control	441.97		545.83		537.87		587.59	
	432.28	451.08	509.76	518.71	566.24	562.56	556.16	589.04
	478.99		500.54		583.57		623.36	
Pb+ EDTA	710.31		829.68		746.67		709.41	
	679.06	679.27	790.36	796.66	812.22	774.98	801.90	752.14
	648.45		769.94		766.06		745.12	
Pb+ EDDS	648.69		626.03		553.95		605.93	
	676.08	691.44	609.30	602.51	575.67	577.76	526.87	564.85
	749.54		572.21		603.67		561.75	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

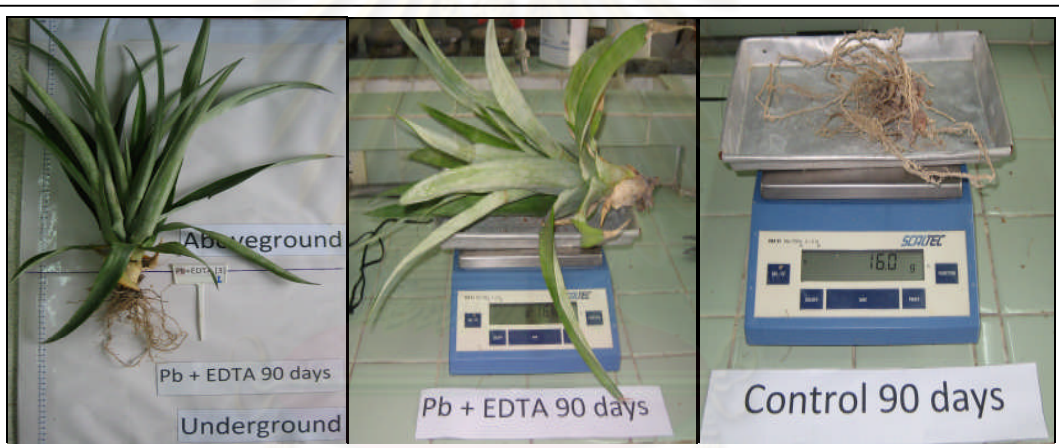


รูปที่ ค1 ก) การเตรียมดิน และข) การเตรียมพืชทดลอง

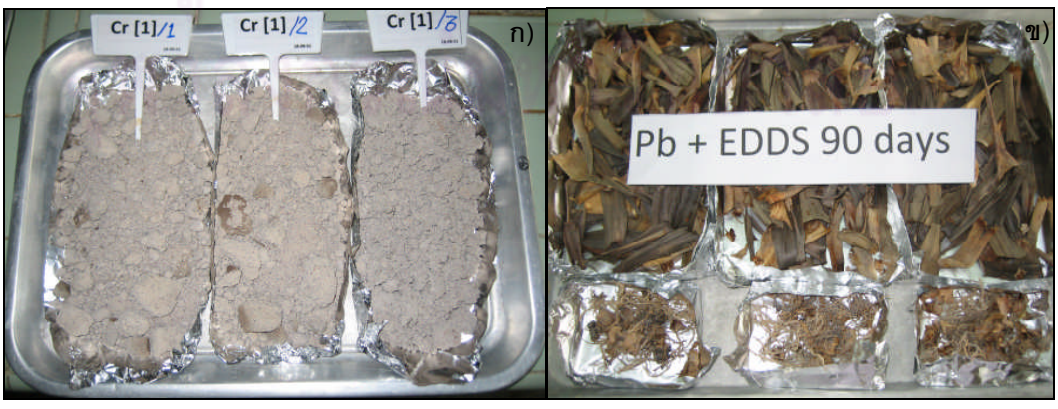
รูปที่ ค2 การเตรียมภาชนะปลูก และการปลูกพืชลงในภาชนะปลูก

รูปที่ ค3 การทดลองในโรงเรือนเพาะชำ

รูปที่ ค4 การเก็บตัวอย่างพืช

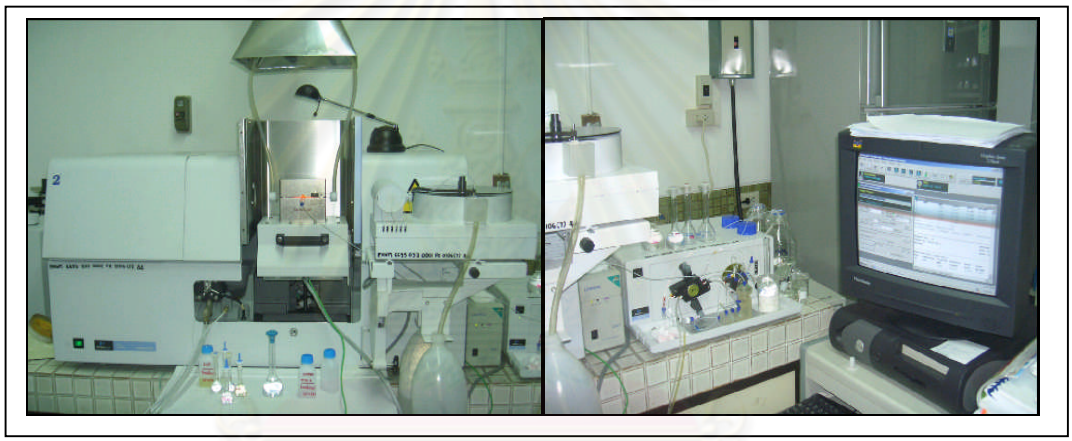


รูปที่ ค5 การวัดความสูง และชั่งน้ำหนักพืช



รูปที่ ค6 ก) การอบตัวอย่างดิน และข) การอบตัวอย่างพืช

รูปที่ ค7 เครื่องย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion)



รูปที่ ค8 เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)

รูปที่ ค9 เครื่องยูวี-สเปกโตรโฟโตรมิเตอร์ (UV-Spectrophotometer)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวทิพวรรณ พจนาภรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 21 เมษายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดอุทัยธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาศึกษาศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับสอง สาขาเกษตรและสิ่งแวดล้อมศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2550 ในระหว่างการศึกษาได้เข้าร่วมเสนอผลงานวิจัย ในการประชุมวิชาการระดับชาติ โดยได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานดังต่อไปนี้

ทิพวรรณ พจนาภรณ์ และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. “ผลของอีดีทีเอและอีดีดีเอสต่อการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้สับปะรด.” หนังสือประมวลผลการประชุมทางวิชาการ (Proceeding) ในการประชุมทางวิชาการ ม.อบ. วิจัย ครั้งที่ 3 “การพัฒนาวิถีชีวิตที่ยั่งยืนด้วยการวิจัยสหวิทยาการ” จัดโดย กองส่งเสริมการวิจัยบริการวิชาการและศิลปวัฒนธรรม สำนักงานอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ณ โรงแรมสุนีย์ แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี วันที่ 28-29 กรกฎาคม 2552. 23-24.

โดยได้รับการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ ม.อบ. (มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)

ทิพวรรณ พจนาภรณ์ และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช “ผลของอีดีทีเอและอีดีดีเอสต่อการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้สับปะรด.” วารสารวิชาการ ม.อบ. (มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี) 11, 4 (ก.ค. 2552): 11-17.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย