การกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินและน้ำโดยใช้บอนเขียว บริเวณห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี

นางสาว ยศวนันท์ หงส์พิริยะกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LEAD REMOVAL BY *Colocasia esculenta* FROM CONTAMINATED SOIL AND WATER AT HUAY KLITY, KANCHANABURI PROVINCE

Miss Yotsavanun Hongpiriyakul

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินและน้ำโดยใช้บอนเขียว บริเวณห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี
โดย	นางสาวยศวนันท์ หงส์พิริยะกุล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา บุญ-หลง)

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ผานิต รัตสุข)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ยศวนันท์ หงส์พิริยะกุล : การกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินและน้ำโดยใช้บอนเขียว บริเวณห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี. (LEAD REMOVAL BY *Colocasia esculata* FROM CONTAMINATED SOIL AND WATER AT HUAY KLITY, KANCHANABURI PROVINCE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 112 หน้า.

การศึกษาการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินและน้ำ โดยทำการปลูกบอนเขียวลงในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 1, 2 และ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำการเก็บตัวอย่างที่ 30, 60, 90, 120 และ 150 วัน ผลการศึกษา พบว่า ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน บอนเขียวสามารถดูดดึงตะกั่วได้ดีที่สุด ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 150 วัน โดยพบในส่วนใต้ดิน เท่ากับ 8,561.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในส่วนเหนือดิน ได้แก่ ก้านใบและใบ เท่ากับ 806.56 และ 611.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนการแสดงความเป็นพิษของบอนเขียว พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน บอนเขียวแสดงอาการเป็นพิษ คือ ใบเหี่ยว ใบหงิก และขอบใบมีสีเหลือง นอกจากนี้ ได้ทำการศึกษา การปลูกบอนเขียวในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 5 มิลลิกรัมต่อลิตร แบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01, 0.02 และ 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างที่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน ผลการศึกษา พบว่า บอนเขียวมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วได้ดี ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งสามารถดูดดึงได้มากที่สุดที่ระยะเวลา 90 วัน ในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 502.84 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ และใบ) เท่ากับ 126.19 และ 91.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับการแสดงความเป็นพิษของบอนเขียว พบว่า บอนเขียวแสดงอาการเป็นพิษที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร โดยบอนเขียวแสดงอาการ ใบไหม้ ใบหงิก เป็นต้น การศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่า บอนเขียวมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินและน้ำเสียสังเคราะห์ได้ เมื่อมีการใช้สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมของดิน และ 0.02 มิลลิโมลต่อลิตรของน้ำ ซึ่งเป็นระดับที่สาร EDTA ไม่แสดงความเป็นพิษต่อบอนเขียว

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต ยศวนันท์ หงส์พิริยะกุล

ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

5187245320 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : SOIL / HYDROPONIC / LEAD / EDTA / *Colocasia esculenta* (L.) Schott

YOTSAVANUN HONGPIRIYAKUL : LEAD REMOVAL BY *Colocasia esculenta* FROM CONTAMINATED SOIL AND WATER AT HUAY KLITY, KANCHANABURI PROVINCE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D. , 112 pp.

This study investigated lead removal using Elephant ear from contaminated soil and water. Elephant ear were grown in soil contaminated with lead concentration of 13,000 mg/kg. The experiment was conducted in 4 stages: with lead but without EDTA and with lead and EDTA at concentrations of 1, 2 and 3 mM/kg soil. Plants were harvested after 30, 60, 90, 120 and 150 days. The result of this study showed that the Elephant ear had the highest lead absorption with EDTA 3 mM/kg soil at 150 days. Those plants absorbed 8,561.26 mg/kg in underground parts and aboveground (petiole and leaves) parts absorbed 806.56 and 611.82 mg/kg respectively. EDTA toxicity was expressed in the Elephant ear by kinking and yellowing of the leaves at concentration 3 mM/kg soil. Lead removal with Elephant ear using hydroponics was also studied using wastewater having lead concentration of 5 mg/L. The experiment was conducted in 4 groups : with lead but without EDTA and with lead and EDTA at 0.01, 0.02 and 0.03 mM/L. Plants were harvested 15, 30, 45, 60, 75 and 90 days after planting. The results of this study showed that the Elephant ear had the highest lead absorption with EDTA of 0.02 mM/Lafter 90 days. The highest absorption levels, with the plants absorbing 502.84 mg/kg in underground and 126.19 and 91.06 mg/kg in aboveground (petiole and leaves), respectively. At EDTA concentration of 0.03 mM/L toxicity was expressed in the Elephant ear by kinking of the leaf. The results indicate Elephant ear is suitable for the remediation of lead contaminated soil and water and adding EDTA in concentrations less than 2 mM/kg soil and 0.02 mM/L.of water did not produce toxic reactions in the Elephant ear.

Field of Study : Environmental Science Student's Signature Yotsavanun Hongpiriyakul

Academic Year : 2010 Advisor's Signature Pantawat Sampanpanish

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณา ความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากบุคคลผู้มีพระคุณหลายๆ ท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลือ รวมทั้งตรวจแก้ไขรายละเอียดต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา บุญ-หลง รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ และ ดร.ผานิต รัตสุข ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่ง เป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะข้อคิดเห็นที่มีส่วนสำคัญในการแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ได้รับทุนจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย และสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนบางส่วนในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณวลีพร คุณอารียา และคุณจันทพร ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ดี นอกจากนี้ ขอขอบคุณ คุณกัลปพฤกษ์ คงเมือง คุณนวพร เทศทศพร ที่ให้ความช่วยเหลือในการออกภาคสนาม ขอขอบคุณ คุณทิพวรรณ พจนาภรณ์ และคุณสุภาพร แป้งทา ที่ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์บางส่วน

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อวีรชัย คุณแม่จันทิมา หงส์พิริยะกุล และบุคคลในครอบครัว ที่ให้ความรัก ความห่วงใย คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา รวมทั้งให้เงินทุนสนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้ ขอขอบคุณ คุณปัถย์ พึ่งเจริญและครอบครัว ที่ให้กำลังใจ และความช่วยเหลือ ตลอดจนบุคคลท่านอื่นๆ ที่มิได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทั้งทางตรงและทางอ้อมแก่ผู้วิจัย จนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฐ

สารบัญรูป..... ฒ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย..... 3

1.4 ขอบเขตของการวิจัย..... 3

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย..... 4

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 ตะกั่ว..... 5

2.1.1 ลักษณะและคุณสมบัติของตะกั่ว..... 5

2.1.2 แหล่งที่พบ..... 5

2.1.2.1 ตะกั่วในหิน..... 5

2.1.2.2 ตะกั่วในอากาศ..... 6

2.1.2.3 ตะกั่วในดิน..... 7

2.1.2.4 ตะกั่วในน้ำ..... 7

2.1.2.5 ตะกั่วในพืช..... 7

2.1.3 ประโยชน์ของตะกั่ว..... 7

2.1.4 ความเป็นพิษของตะกั่ว..... 9

2.1.4.1 ความเป็นพิษต่อพืช..... 9

2.1.4.2 ความเป็นพิษต่อมนุษย์..... 9

บทที่ หน้า

2.1.4.3 ความเป็นพิษต่อสัตว์..... 10
2.2 การบำบัดและฟื้นฟูโดยพืช (Phytoremediation)..... 10
2.2.1 ความหมาย..... 10
2.2.2 ประเภทของ phytoremediation..... 11
2.2.2.1 Phytoextraction..... 11
2.2.2.2 Phytodegradation..... 14
2.2.2.3 Phytostabilization..... 14
2.2.2.4 Rhizofiltation..... 14
2.2.2.5 Phytovolatilization..... 15
2.2.2.6 Rhizodegradation..... 15
2.2.3 หลักการทำงานของ Phytoremediation..... 15
2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักในพืช..... 16
2.2.5 ข้อดีและข้อจำกัดของ Phytoremediation 17
2.2.5.1 ข้อดีของ Phytoremediation..... 17
2.2.5.2 ข้อจำกัดของ Phytoremediation..... 18
2.3 การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Hydroponic)..... 19
2.3.1 ความหมาย..... 19
2.3.2 ประเภทของ Hydroponic..... 19
2.3.3 ข้อดีและข้อจำกัดของ Hydroponic..... 23
2.3.3.1 ข้อดีของ Hydroponic..... 23
2.3.3.2 ข้อจำกัดของ Hydroponic..... 25
2.4 สารคีเลต..... 25
2.4.1 ความหมาย..... 25
2.4.2 ประเภทของสารคีเลต..... 26
2.4.3 ประโยชน์ของสารคีเลต..... 26
2.4.4 สารอีดีทีเอ..... 27
2.5 เหมืองแร่ตะกั่ว..... 27
2.5.1 ลักษณะที่ตั้งของเหมืองแร่ตะกั่ว..... 27
2.5.2 การทำเหมืองแร่และการแต่งแร่..... 28

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

2.6 บอนเขียว (*Colocasia esculenta* (L.) Schott)..... 29
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 29
2.7.1 งานวิจัยด้านการศึกษา Phytoremediation..... 29
2.7.2 งานวิจัยด้านการศึกษาสาร EDTA..... 34
3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 37
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 37
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกบอนเขียว..... 37
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดิน และน้ำ..... 37
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างบอนเขียว..... 38
3.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง..... 38
3.1.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง..... 39
3.2 สถานที่ทำการวิจัย..... 39
3.2.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดินทดลอง..... 39
3.2.2 สถานที่ทำการศึกษา..... 39
3.3 ระยะเวลาการวิจัย..... 40
3.4 การดำเนินการวิจัย..... 42
3.4.1 การใช้พืชในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน..... 43
1) การเตรียมดิน..... 43
2) การเตรียมภาชนะปลูก..... 43
3) การเตรียมพืช..... 43
4) การเตรียมสารประกอบEDTA..... 44
5) การดำเนินการทดลอง..... 44
3.4.2 การใช้พืชในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำ..... 44
1) การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์..... 44
2) การเตรียมภาชนะปลูก..... 45
3) การเตรียมพืช..... 45
4) การเตรียมสารประกอบตะกั่ว..... 45
5) การเตรียมสารประกอบEDTA..... 46
6) การดำเนินการทดลอง..... 46

บทที่ หน้า

3.5 การเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่าง..... 46
3.5.1 การเก็บตัวอย่างดิน..... 46
3.5.2 การเก็บตัวอย่างน้ำ..... 47
3.5.3 การเก็บตัวอย่างพืช..... 47
3.5.4 การสังเกตความเป็นพิษของบอนเขียว..... 47
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ..... 47
4 ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา..... 48
4.1 การทดลองในดินปนเปื้อนตะกั่ว..... 48
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินทดลอง..... 48
4.1.2. ลักษณะทางกายภาพ เคมี และปริมาณการสะสมตะกั่วในดินทดลอง.... 48
1) ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน (pH)..... 48
2) ค่าการนำไฟฟ้า (EC)..... 49
3) ผลของสาร EDTA แต่ละระดับความเข้มข้นต่อการสะสมตะกั่วในดิน.. 50
4.1.3 ผลของการเติมสาร EDTA แต่ละระดับความเข้มข้นต่อการดูดดึงตะกั่ว ของบอนเขียว..... 51
1) ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ใบ และก้านใบ) ของบอนเขียว..... 51
2) ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของบอนเขียว..... 54
4.1.4 ผลของการเติมสาร EDTA แต่ละระดับความเข้มข้นต่อการเจริญเติบโต และความเป็นพิษของบอนเขียว..... 55
1) น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดิน (ใบ และ ก้านใบ) ของบอนเขียว..... 55
2) น้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินของบอนเขียว..... 57
3) ความสูงของบอนเขียว..... 58
4) ความยาวของส่วนใต้ดิน..... 59
5) การแสดงความเป็นพิษในบอนเขียว..... 60
4.1.5 ประสิทธิภาพและสมดุลมวล (mass balance)..... 61
1) ประสิทธิภาพของบอนเขียวในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน..... 61
2) สมดุลมวล (mass balance)..... 62
4.2 การทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนตะกั่ว..... 65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ เคมี และปริมาณการสะสมตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์..... 65
1) ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์ (pH)..... 65
2) ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ (EC)..... 65
3) ผลของสาร EDTA แต่ละระดับความเข้มข้นต่อการสะสมตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์..... 66
4.2.2 ผลของการเติมสาร EDTA แต่ละระดับความเข้มข้นต่อการดูดดึงตะกั่วของบอนเขียว..... 67
1) ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ใบ และก้านใบ) ของบอนเขียว..... 67
2) ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้น้ำของบอนเขียว..... 70
4.2.3 ผลของการเติมสาร EDTA แต่ละระดับความเข้มข้นต่อการเจริญเติบโตและความเป็นพิษของบอนเขียว..... 72
1) น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ใบ และก้านใบ) ของบอนเขียว..... 72
2) น้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำของบอนเขียว..... 74
3) ความสูงของบอนเขียว..... 75
4) ความยาวในส่วนใต้น้ำของบอนเขียว..... 76
5) การแสดงความเป็นพิษในบอนเขียว..... 77
4.2.4 ประสิทธิภาพและสมดุลมวล (mass balance)..... 78
1) ประสิทธิภาพของบอนเขียวในการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์..... 78
2) สมดุลมวล (mass balance)..... 79
4.3 เปรียบเทียบปริมาณการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียวในการทดลองดิน และชุดการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนตะกั่ว..... 82
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ..... 84
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 84
5.1.1 การกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินด้วยบอนเขียว..... 84
1) ปริมาณการสะสมตะกั่วในดินและปริมาณการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียว..... 84
2) ผลของการเติมสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโตและความเป็นพิษของ

หน้า

บอนเขียว..... 84
3) ประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียว..... 85
5.1.2 การกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยบอนเขียว..... 85
1) ปริมาณการสะสมตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์และปริมาณการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียว..... 85
2) ผลของการเติมสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโตและความเป็นพิษของบอนเขียว..... 86
3) ประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียว..... 86
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 86
รายการอ้างอิง..... 88
ภาคผนวก..... 95
ภาคผนวก ก..... 96
ภาคผนวก ข..... 98
ภาคผนวก ค..... 100
ภาคผนวก ง..... 108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 112

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติของตะกั่ว.....	6
2.2	คุณสมบัติของสาร EDTA.....	27
3.1	รายละเอียดกิจกรรมในการศึกษาการกำจัดตะกั่วในดิน.....	40
3.2	รายละเอียดกิจกรรมในการศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์.....	41
3.3	ปริมาณสาร EDTA ที่ใส่ลงในดิน.....	44
3.4	ปริมาณสารประกอบตะกั่วที่ใส่ลงในน้ำเสียสังเคราะห์.....	45
3.5	ปริมาณสารประกอบ EDTA ที่ใส่ลงในน้ำเสียสังเคราะห์.....	46
4.1	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง.....	49
4.2	ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน.....	49
4.3	ปริมาณการสะสมตะกั่วในดิน.....	51
4.4	สมดุลมวล (mass balance) ในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน.....	64
4.5	สมดุลมวล(mass balance) ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์.....	81
4.6	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของบอนเขียวในชุดการทดลองดินและชุดการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนตะกั่ว.....	83

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาคผนวก หน้า

ข1	เปรียบเทียบความสามารถของสาร EDTA ในการดูดดึงโลหะหนักของพืชชนิดต่างๆ.....	98
ข2	อาการแสดงความเป็นพิษของพืชชนิดต่างๆ.....	99
ค1	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน.....	100
ค2	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ใบ) ของบอนเขียว.....	101
ค3	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ) ของบอนเขียว.....	102
ค4	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของบอนเขียว.....	103
ค5	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์.....	104
ค6	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) ของบอนเขียว.....	105
ค7	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) ของบอนเขียว.....	106
ค8	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้น้ำของบอนเขียว.....	107

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการ Phytoremediation……..	11
2.2	ประเภทของ Phytoremediation……...	12
2.3	กลไกการทำงานของ Phytoextraction……	13
2.4	Natural phytoextraction และ Induced phytoextraction……	13
2.5	การปลูกพืชในสารละลายระบบเอ็นเอฟที.....	20
2.6	การปลูกพืชในสารละลายระบบดีเอฟที.....	21
2.7	การปลูกพืชในสารละลายระบบดีอาร์เอฟ.....	21
2.8	การปลูกพืชให้รากลอยอยู่กลางอากาศ.....	23
2.9	สูตรโครงสร้างสาร EDTA…….……	27
2.10	บอนเขียว *Colocasia esculenta* (L.) Schott……..	30
3.1	แผนผังแสดงวิธีการดำเนินการศึกษา.....	42
4.1	ค่าการนำไฟฟ้าของดินที่ระยะเวลาต่างๆ.....	50
4.2	ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ใบ) ของบอนเขียว.....	52
4.3	ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ) ของบอนเขียว.....	53
4.4	ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของบอนเขียว.....	55
4.5	การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนเหนือดิน (ใบ).....	56
4.6	การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ).....	57
4.7	การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนใต้ดิน	58
4.8	การเจริญเติบโตด้านความสูงของบอนเขียว.....	59
4.9	การเจริญเติบโตด้านความยาวของส่วนใต้ดิน.....	60
4.10	การแสดงความเป็นพิษของบอนเขียว.....	61
4.11	ประสิทธิภาพของบอนเขียวในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน.....	62
4.12	ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์.....	65
4.13	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	66
4.14	ปริมาณการสะสมตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์.....	67

รูปที่ หน้า

4.15 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) ของบอนเขียว..... 69

4.16 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) ของบอนเขียว..... 70

4.17 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้น้ำของบอนเขียว..... 71

4.18 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) ของบอนเขียว..... 73

4.19 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) ของบอนเขียว..... 74

4.20 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนใต้น้ำ..... 75

4.21 การเจริญเติบโตด้านความสูงของบอนเขียวในส่วนเหนือน้ำ..... 76

4.22 การเจริญเติบโตด้านความยาวของบอนเขียวในส่วนใต้น้ำ..... 77

4.23 การแสดงความเป็นพิษในบอนเขียว..... 78

4.24 ประสิทธิภาพของบอนเขียวในการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์..... 79

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปประกอบภาคผนวก		หน้า
ง1	ก) กรณีปนเปื้อนตะกั่วในดิน ข) กรณีปนเปื้อนตะกั่วในน้ำบริเวณห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี.....	108
ง2	ก) การเตรียมดิน ข) บอนเขียวสำหรับการปลูกในการทดลองดิน ค) บอนเขียวสำหรับปลูกในการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์.	108
ง3	ก) การเตรียมภาชนะปลูก ข) การปลูกบอนเขียวในภาชนะสำหรับการทดลองในดิน ค) การปลูกบอนเขียวในการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์.....	109
ง4	การทดลองในเรือนเพาะชำ ก) การทดลองในดิน ข) การทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์.....	109
ง5	ก) การวัดส่วนสูงส่วนเหนือดิน ข) การวัดความยาวส่วนใต้ดิน ค) การอบตัวอย่างพืช.....	110
ง6	ก) พืชที่ปั่นละเอียด ข) ดินที่บดละเอียด ค) เครื่องปั่นพืช.....	110
ง7	ก) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่งพิกัด 220 กรัม ข) ตู้อบความร้อน (hot air oven).....	111
ง8	ก) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (microwave digestion) ข) เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption spectrometer; AAs).....	111

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน ปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและน้ำ ทั้งนี้เนื่องจาก ประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา มีการพัฒนาทั้งทางด้านสังคม เศรษฐกิจ อุตสาหกรรมและเหมืองแร่ ซึ่งการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมและเหมืองแร่ มักก่อให้เกิดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เนื่องจากงานด้านอุตสาหกรรมและเหมืองแร่ มีการนำโลหะหนักมาใช้ในกระบวนการผลิต เช่น โครเมียม ตะกั่ว นิกเกิล ปรอท และสารหนู เป็นต้น หลังจากกระบวนการผลิตจะมีการปล่อยกากของเสีย และตะกอน ออกสู่สิ่งแวดล้อม ตัวอย่างพื้นที่ที่ได้รับการปนเปื้อน คือ ห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนตะกั่วในดินและน้ำ ซึ่งทางกรมควบคุมมลพิษได้ลงตรวจพื้นที่ พบว่า มีปริมาณตะกั่วในน้ำ เท่ากับ 0.01-0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และตรวจพบตะกั่วในดินตะกอน เท่ากับ 20,800-39,048 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (ศูนย์ศึกษากะเหรี่ยงและพัฒนา, 2546) ซึ่งค่ามาตรฐานน้ำผิวดิน ที่คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติกำหนดไว้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่ามาตรฐานตะกั่วในดินเพื่อการอยู่อาศัย กำหนดไว้ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ , 2535) รวมทั้งกรมอนามัยที่ได้ลงพื้นที่ตรวจสุขภาพของชาวบ้านคลิตี้ พบว่า ชาวบ้านทุกคนมีค่าตะกั่วในเลือดสูง จนถึงระดับที่อาจเป็นอันตรายต่อร่างกาย และมีชาวบ้านหลายคนเจ็บป่วย โดยมีอาการที่สัมพันธ์กับโรคพิษจากสารตะกั่ว (ศูนย์ศึกษากะเหรี่ยงและพัฒนา, 2546) ตลอดจนได้มีการตรวจพืชผักตัวอย่างจำนวน 28 ชนิด พบว่า มี 12 ชนิด เช่น ข่า คะน้า กะเพรา และตะไคร้ เป็นต้น ที่มีตะกั่วปนเปื้อนสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กระทรวงสาธารณสุขประกาศ ซึ่งทางกรมควบคุมมลพิษได้แจ้งผลให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องและชาวบ้านรับทราบทุก 3 เดือน และตรวจพบว่า สัตว์น้ำในลำห้วย มีปริมาณตะกั่วสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด จากกรณีดังกล่าวแสดงให้เห็นได้ว่า การปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่และบริเวณใกล้เคียง ดังนั้น ปัญหามลพิษที่เกิดจากการปนเปื้อนของโลหะหนัก จึงเป็นประเด็นที่ควรศึกษา เพื่อหาแนวทางในการป้องกัน แก้ไขปัญหาและควรได้รับการฟื้นฟูหรือทำให้พื้นที่ดังกล่าวสะอาดและปลอดภัยขึ้น

ปัจจุบัน กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม มีหลากหลายวิธี เช่น การใช้วิธีทางเคมี (chemical treatment) การใช้วิธีทางกายภาพ (physical treatment)

เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้ สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี แต่เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย จากภาวะทางเศรษฐกิจของประเทศไทยในปัจจุบัน ที่ได้ตระหนักถึงการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมที่ต้องมีค่าใช้จ่ายน้อย ไม่ยุ่งยาก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (environmental friendly) ดังนั้น การบำบัดพื้นที่ที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีการทางชีวภาพ (biological treatment) โดยเฉพาะการบำบัดหรือฟื้นฟูการปนเปื้อนด้วยการใช้พืช (Phytoremediation) ซึ่งเป็นวิธีการบำบัดและฟื้นฟูดินและน้ำที่ปนเปื้อน โดยใช้พืชเป็นตัวช่วยในการดูดดึงโลหะหนักมาสะสมในส่วนต่างๆ ของพืช (Sampanpanish et al., 2006) จึงเป็นวิธีการที่เหมาะกับสถานการณ์ในปัจจุบันของประเทศ

ปัจจุบัน มีการใช้พืชเพื่อบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมร่วมกับการใช้สารคีเลต (chelating agent) เพื่อช่วยให้พืชสามารถดูดดึงโลหะหนักมาสะสมในส่วนต่างๆ ของพืชได้มากขึ้น ตัวอย่างงานวิจัย เช่นมีการใช้สาร EDTA ร่วมกับการปลูกบอนและเผือก ในการดูดดึงสารหนูในดินที่ปนเปื้อน (Tambamroong, 2002) และการปลูกพืช Green Onions ร่วมกับการใช้สาร EDTA ในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน (Cho et al., 2009) อย่างไรก็ตาม บริเวณห้วยคลิตี้ พบว่า มีบอนเขียว (*Colocasia esculenta* (L.) Scott) ขึ้นอยู่ทั่วไปโดยรอบพื้นที่ การศึกษาครั้งนี้จึงได้ใช้บอนเขียวมาบำบัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินและน้ำ ซึ่งบอนเขียวมีลักษณะพิเศษ คือ ก้านใบอวบน้ำ ทนต่อโรคและแมลง ขยายพันธุ์ได้ง่าย และสามารถเจริญเติบโตได้ทั้งบนบกและในน้ำ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสามารถของบอนเขียว (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) ในการดูดดึงตะกั่ว (Pb) ที่ปนเปื้อนในดินและน้ำที่ระยะเวลาที่แตกต่างกัน

2. เพื่อศึกษาระดับความเข้มข้นของอีดีทีเอ (EDTA) ต่อการดูดดึงตะกั่ว (Pb) และการแสดงความเป็นพิษของตะกั่วต่อการเจริญเติบโตของบอนเขียว

3. เพื่อศึกษาปริมาณการดูดดึงตะกั่วไปสะสมในส่วนเหนือดิน (ใบ และก้านใบ) และส่วนใต้ดินของบอนเขียว

4. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของบอนเขียวในการดูดดึงตะกั่วที่ปลูกในดินและน้ำที่ปนเปื้อน

สมมุติฐานของการวิจัย

การปลูกบอนเขียวในดินและน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่ว ร่วมกับการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จะช่วยให้บอนเขียวสามารถดูดดึงตะกั่วได้ดีขึ้น

ขอบเขตของการวิจัย

1. ดินที่ใช้ศึกษา นำมาจากบริเวณพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนตะกั่วจากห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี โดยมีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ppm)

2. พืชทดลอง ได้แก่ บอนเขียว (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) นำมาจากบริเวณพื้นที่ที่ไม่มีการปนเปื้อนสารตะกั่ว

3. สารคีเลตที่ใช้ทำการศึกษาวิจัย คือ EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid) โดยชุดการทดลองในดินร่วมกับ EDTA ที่ระดับความเข้มข้นที่ 1, 2 และ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม (400, 800 และ 1,200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA 0.01, 0.02 และ 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร (4, 8 และ 12 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในชุดน้ำเสียสังเคราะห์

4. การทดลองการกำจัดตะกั่วในดิน และน้ำด้วยบอนเขียว ปฏิบัติในเรือนเพาะชำ

5. สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb) ที่ใช้ในการทดลอง คือ เลดคาร์บอเนต (lead carbonate; $PbCO_3$) ที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

6. ระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษา 5 เดือน สำหรับการทดลองในดินที่ปนเปื้อน และ 3 เดือน สำหรับการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์

7. วิเคราะห์การสะสมตะกั่วในตัวอย่างดิน น้ำ และพืช โดยพืชแยกเป็น 3 ส่วน คือ ใบ ก้านใบ และลำต้นใต้ดิน

ทั้งนี้ การทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การทดลองปลูกบอนเขียวในดินที่ปนเปื้อน ซึ่งแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุด ได้แก่ ชุดที่ 1 ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ชุดที่ 2 ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม (13,000 : 1) ชุดที่ 3 ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม (13,000 : 2) และดินชุดที่ 4 ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม (13,000 : 3)

2. การทดลองปลูกบอนเขียวในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุด ได้แก่ ชุดที่ 1 น้ำที่มีสารละลายตะกั่วผสมอยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ชุดที่ 2 น้ำที่มีสารละลายตะกั่วผสมอยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร (5 : 0.01) ชุดที่ 3 น้ำที่มีสารละลาย

ตะกั่วผสมอยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร (5 : 0.02) และชุดที่ 4 น้ำที่มีสารละลายตะกั่วผสมอยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร (5 : 0.03)

คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

Phytoremediation หมายถึง การนำพืชมาใช้ในการบำบัดดิน โคลน กากตะกอน หรือน้ำที่เกิดการปนเปื้อนโดยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งการบำบัดนี้อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำ และแร่ธาตุอาหารผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืชในการเปลี่ยนสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษหรือมีความเป็นพิษลดลง

Hydroponic หมายถึง การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน นับเป็นวิธีการใหม่ในการปลูกพืชโดยเฉพาะการปลูกผักและพืชที่ใช้เป็นอาหาร เนื่องจากประหยัดพื้นที่ และไม่ปนเปื้อนกับสารเคมีต่างๆ ในดิน ทำให้ได้พืชผักที่สะอาดเป็นอาหาร

Chelating agent หมายถึง สารอินทรีย์เคมี ซึ่งสามารถจะรวมกับจุลธาตุที่มีประจุบวก ได้แก่ เหล็ก สังกะสี ทองแดง แมงกานีส และตะกั่ว เป็นต้น ปฏิกิริยาการรวมนี้เรียกว่า chelation จะได้คีเลต โดยสารคีเลตจะล้อมแคตไอออนของธาตุที่เป็นโลหะไม่ให้ประจุลบจากที่อื่นเข้าทำปฏิกิริยาได้ ทำให้จุลธาตุคีเลตนี้ไม่เกิดการตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ของโลหะ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความสามารถของบอนเขียวในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินและน้ำในระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

2. ผลของระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่วที่มีการปนเปื้อนในดินและน้ำ สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำจัดตะกั่วในพื้นที่จริงได้

3. ทราบลักษณะความไม่เป็นพิษ และอาการความเป็นพิษของบอน ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนตะกั่วบริเวณห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี และในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสารตะกั่ว

4. เป็นการเฝ้าระวังของประชาชนต่อการปนเปื้อนตะกั่วในพื้นที่อื่นๆ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตะกั่ว (Lead)

2.1.1 ลักษณะและคุณสมบัติของตะกั่ว

ตะกั่ว มีสัญลักษณ์ คือ Pb เป็นโลหะสีเงินปนเทา อยู่ในหมู่ที่ IVA ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 82 น้ำหนักอะตอม 207.19 ค่าความถ่วงจำเพาะ 11.34 จุดหลอมเหลว และจุดเดือด 327 และ 1,749 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ตะกั่วบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นของแข็ง สีเทาปนขาว สามารถแปรรูปได้โดยการทุบ รีด หล่อหลอมได้ง่าย สามารถผสมเข้ากับโลหะต่างๆ ได้ดี รวมทั้งการทำปฏิกิริยาเกิดเป็นเกลือของตะกั่วต่างๆ สมบัติของตะกั่วสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2.1

2.1.2 แหล่งที่พบ

สารตะกั่วพบได้ทั่วไปทั้งในหิน อากาศ ดิน น้ำ และพืช

2.1.2.1 ตะกั่วในหิน

ในหินจะมีตะกั่วอยู่ 13 มิลลิกรัมต่อหิน 1 กิโลกรัม เช่น ในหินอัคนีพบประมาณ 10-20 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม ในหินตะกอนพบประมาณ 10-70 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม ตะกั่วในธรรมชาติอยู่ในรูปของแร่กาลีนา คีรูไซต์ และแอนกลีไซต์ โดยแหล่งแร่มี 2 แหล่งดังนี้

1) แหล่งแร่ปฐมภูมิซึ่งให้สินแร่ที่เป็นสารประกอบซัลไฟด์ เช่น แร่ตะกั่ว-กาลีนา แหล่งแร่ปฐมภูมิ ได้แก่

- แหล่งแร่สะสมตัวในชั้นหินอุ้มแร่ (stratabound-massive sulfide deposit)
- แหล่งแร่แบบสการ์น (skarn deposit) ซึ่งเกิดจากกระบวนการแปรสภาพโดยการแทนที่ระหว่างหินอัคนีแทรกซ้อน เช่น หินไดออไรต์พอฟีรี กับหินคาร์บอเนต
- แหล่งแร่แบบสายแร่ (vein-type deposit) ส่วนใหญ่เป็นแร่ตะกั่ว-สังกะสีซัลไฟด์ ซึ่งเกิดในสายแร่ที่น้ำแร่แยกตัวออกจากหินอัคนี

2) แหล่งแร่ทุติยภูมิ เป็นแหล่งแร่ที่เกิดจากกระบวนการแปรสภาพของแร่ปฐมภูมิ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแร่ซัลไฟด์ เป็นแร่ที่มีสารประกอบของออกไซด์ คาร์บอเนต และซิลิเกต

2.1.2.2 ตะกั่วในอากาศ

ในอากาศบริเวณห่างไกลชุมชนมักพบตะกั่วประมาณ 0.0006 ไมโครกรัมต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร แต่บริเวณชุมชนพบมากถึง 0.001 ไมโครกรัมต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยค่ามาตรฐานตะกั่วในอากาศโดยทั่วไปไม่เกิน 1.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2535)

ตารางที่ 2.1 สมบัติของตะกั่ว

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)
ความต้านทานไฟฟ้าที่ 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

ที่มา : http://th.wikipedia.org

2.1.2.3 ตะกั่วในดิน

โดยทั่วไป ในดินมักมีตะกั่วอยู่ประมาณ 5-25 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ซึ่งมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และเกษตรกรรมตะกั่วต้องไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมตะกั่วต้องไม่เกิน 750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2547)

2.1.2.4 ตะกั่วในน้ำ

แหล่งน้ำธรรมชาติโดยเฉพาะน้ำบาดาล พบสารตะกั่วในอนุภาคขนาดเล็กประมาณ 1-60 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม ในทะเลสาบและแม่น้ำ พบประมาณ 1-10 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม แต่ในน้ำทะเลพบปริมาณของตะกั่วน้อยกว่าน้ำจืด โดยพบในปริมาณ 0.08-0.04 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม โดยมาตรฐานน้ำบริโภคกำหนดปริมาณตะกั่วให้มีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2535)

2.1.2.5 ตะกั่วในพืช

ตะกั่วมักพบในพืชขนาดใหญ่ ซึ่งพบประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม (ของเนื้อไม้แห้ง) สำหรับในพืชผักพบประมาณ 0.1-1 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม (ของพืชแห้ง)

2.1.3 ประโยชน์ของตะกั่ว

ตะกั่วที่นำมาใช้ในวงการอุตสากรรม มี 2 ประเภท คือ

2.3.1 สารประกอบตะกั่วชนิดอินทรีย์ ได้แก่ เททระเอทิลเลด (tetraethyl lead) และเททระเมทิลเลด (tetramethyl lead) โดยใช้เป็นสารกันน็อก หรือสารป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์เวลาทำงาน โดยใช้ผสมในน้ำมันเบนซินเพื่อให้เชื้อเพลิงมีค่าออกเทนสูงขึ้น สารนี้มีสีแดง ดังนั้นน้ำมันชนิดพิเศษทั้งหลายจึงมีสีแดง สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วค่อนข้างจะเป็นพิษมากกว่าตะกั่วอนินทรีย์ เนื่องจากสามารถแพร่กระจายในอากาศได้ดี สำหรับตะกั่วที่ออกมาจากท่อไอเสียรถยนต์จะอยู่ในรูปของตะกั่วออกไซด์ชนิดต่างๆ ซึ่งจะเป็นตะกั่วอนินทรีย์ ปัจจุบันไม่ใช้ผสมในน้ำมันเบนซินแล้ว

2.3.2 สารประกอบตะกั่วชนิดอนินทรีย์ เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่

1) โลหะตะกั่ว ใช้ผสมในแท่งโลหะผสมหรือผงเชื่อมบัดกรีโลหะ นำมาทำเป็นแผ่น หรือท่อโลหะใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เพื่อป้องกันการกัดกร่อน แผ่นกรองในอุตสาหกรรมรถยนต์ ทำลูกปืน และฉากกั้นสารกัมมันตรังสี

2) ออกไซด์ของตะกั่ว ได้แก่

- ตะกั่วมอนอกไซด์ (lead monoxide) ใช้ในอุตสาหกรรมสี โดยใช้เป็นสารสีเหลืองผสมสีทาบ้าน

- ตะกั่วไดออกไซด์ (lead dioxide) ใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์ และเครื่องจักร

- ตะกั่วออกไซด์ หรือตะกั่วแดง (leadred oxide) ใช้ในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ สีทาโลหะเพื่อกันสนิม เครื่องแก้ว ยาง และเครื่องเคลือบ

3) สารประกอบของเกลือตะกั่ว คุณสมบัติมีสีต่างๆ กัน จึงนิยมใช้เป็นแม่สี หรือสีผสมในอุตสาหกรรมสี เช่น

- ตะกั่วเหลือง (lead cromate) ตะกั่วขาว (lead carbonate)

- ตะกั่วซัลเฟต (lead sulfate) ใช้ในอุตสาหกรรมสีและหมึกพิมพ์

- ตะกั่วแอซิเตต (lead acetate) ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

- ตะกั่วซิลิเกต (lead silicate) ใช้ในอุตสาหกรรมกระเบื้อง และเครื่องเคลือบเซรามิกเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีผิวเรียบ เงางาม

- ตะกั่วไนเทรต (lead nitrate) ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก และยาง

- ตะกั่วอาร์ซิเนต (lead arsenate) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารป้องกันและกำจัดศัตรูพืช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.4 ความเป็นพิษของตะกั่ว

2.1.4.1 ความเป็นพิษต่อพืช

พืชสามารถได้รับสารตะกั่วจากสิ่งแวดล้อม ได้ 2 ทาง คือ ทางราก โดยมีแหล่งมาจากดินในรูปสารละลายตะกั่วที่อยู่ในดิน และทางใบ ซึ่งมีแหล่งมาจากอนุภาคของตะกั่วที่เจือปนอยู่ในอากาศสู่ใบ ตะกั่วจากดินจะถูกรากพืชดูดซึมเข้าไปสะสมในเนื้อเยื่อต่างๆ ของพืชมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายดินที่พืชเจริญเติบโตอยู่เพิ่มขึ้น ตะกั่วที่ถูกดูดซึมเข้าสู่พืช ส่วนใหญ่จะไปยึดเกาะอยู่กับผนังเซลล์ บางส่วนถูกปล่อยเข้าไปในเซลล์ กระจายอยู่ในไซโตปลาสซึม ตะกั่วบางส่วน สามารถแทรกผ่านเมมเบรนของคลอโรพลาสต์ เข้าไปจับอยู่บนกรานาของคลอโรฟิลล์ โดยผลของตะกั่วที่มีต่อพืช เมื่อมีการสะสมคือ ตะกั่วจะเข้าไปยับยั้งการเจริญเติบโต ทำให้พืชแคระแกร็น ตะกั่วมีผลต่อการสังเคราะห์แสง และการคายน้ำของพืช โดยเมื่อความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่ม ความรุนแรงที่ส่งผลต่อพืชจะเพิ่มมากขึ้น

2.1.4.2 ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ตะกั่วจากสิ่งแวดล้อม สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ

1) ทางระบบทางเดินอาหาร โดยการกินหรือดื่มเข้าไปกับอาหารหรือน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่ว

2) ทางระบบทางเดินหายใจ โดยการหายใจเอาฝุ่น ควัน ไอระเหยของตะกั่วที่หลอมเหลวเข้าไป

3) ทางผิวหนัง โดยการสัมผัสกับตะกั่ว ซึ่งผู้ที่มีโอกาสได้รับตะกั่วทางผิวหนัง ได้แก่ คนงานที่ทำงานในปั๊มน้ำมัน ช่างซ่อมเครื่องยนต์ เป็นต้น

อาการที่เกิดจากการแพ้พิษตะกั่ว มี 2 ชนิด คือ

1) การแพ้พิษตะกั่วแบบเฉียบพลัน เกิดจากการได้รับสารตะกั่วในครั้งแรกปริมาณมาก ๆ ส่วนใหญ่มักพบในเด็กเล็ก คนหลอมตะกั่ว เด็กจะมีอาการปวดท้องรุนแรง อาเจียน ชักเกร็ง และเสียชีวิตได้ง่าย ในผู้ใหญ่มักจะมีอาการคอแห้ง กระหายน้ำ ปวดแสบท้อง คลื่นไส้อาเจียน ปากมีรสเฝื่อน ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ กล้ามเนื้อไม่มีแรง และอาจหมดสติได้

2) การแพ้พิษตะกั่วแบบเรื้อรัง เกิดจากการได้รับสารตะกั่วในปริมาณน้อยๆ เป็นเวลานาน เช่น ผู้ที่ทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารตะกั่ว หรือผู้ที่อาศัยในพื้นที่ที่มี

สารตะกั่วปนเปื้อน เป็นเวลานาน โดยมักมีอาการอ่อนเพลีย ซีด น้ำหนักลด ปวดท้องบ่อยๆ ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ อาจพบเส้นสีม่วงที่เหงือก (lead line) มีอาการทางประสาท เซื่องซึม กระวนกระวาย คลุ้มคลั่ง ความจำเสื่อม กล้ามเนื้ออ่อนแรง ข้อมือข้อเท้าตก เดินไม่ตรงทาง ชัก หมดสติ และอาจเสียชีวิตได้

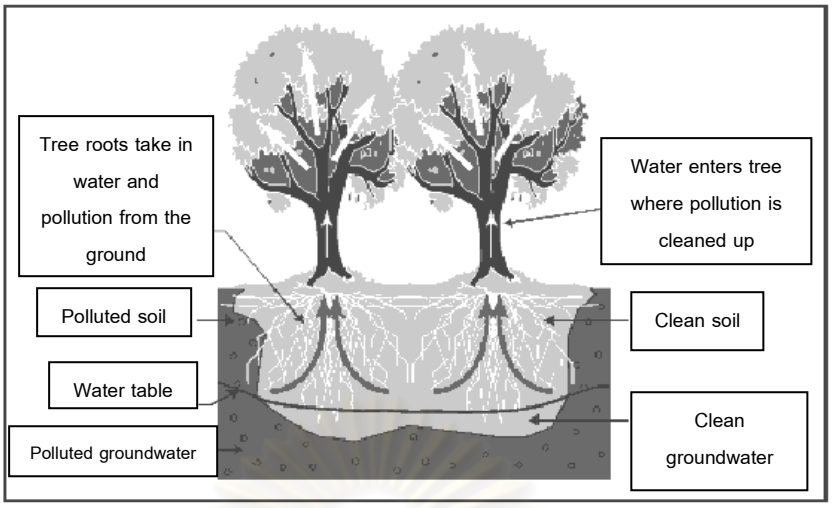
2.1.4.3 **ความเป็นพิษต่อสัตว์**

สัตว์น้ำจะได้รับตะกั่วผ่านทางผิวหนัง เหงือก ทางเดินอาหาร โดยสารประกอบตะกั่วอินทรีย์มีความเป็นพิษสูงกว่าสารประกอบตะกั่วอนินทรีย์ โดยตะกั่วจะมีความเป็นพิษในสัตว์น้ำแตกต่างกันไป ตามชนิดของสัตว์น้ำ Chau et al. (1980) รายงานว่า สัตว์น้ำจะได้รับสารตะกั่วทางผิวหนัง เหงือก ทางเดินอาหาร โดยที่สารประกอบตะกั่วอินทรีย์มีความเป็นพิษมากกว่าสารประกอบตะกั่วอนินทรีย์ Spehar et al. (1978) พบว่า ระดับความเข้มข้นของตะกั่วที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการรอดตายลดลงในสัตว์กลุ่ม Stonefiles , Caddisfiles และ Snails

2.2 **การบำบัดและฟื้นฟูโดยพืช** (Phytoremediation)

2.2.1 **ความหมาย**

Phytoremediation มาจากคำว่า “Phyton” ในภาษากรีก หมายถึง “พืช” รวมกับคำว่า “Remediate” ในภาษาลาติน หมายถึง “การบำบัดหรือการรักษา” ซึ่งเมื่อนำทั้งสองคำมารวมกัน หมายถึง เทคโนโลยีในการนำพืชมาใช้ในการบำบัดดิน โคลน กากตะกอน หรือน้ำ ที่เกิดการปนเปื้อนโดยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งการบำบัดนี้อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำและแร่ธาตุอาหารผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืช ในการเปลี่ยนสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษหรือมีความเป็นพิษลดลง โดยสามารถแสดงกระบวนการ Phytoremediation ได้ดังรูป 2.1 ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปสารประกอบหรือดูดซับและสะสมจุลธาตุที่เป็นพิษ ได้แก่ โลหะหนักต่างๆ อาทิ ตะกั่ว นิกเกิล โครเมียม และสังกะสี ไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช ซึ่งสารประกอบหรืออโลหะหนักเหล่านี้ จะถูกกำจัดออกจากพื้นที่ เมื่อมีการเก็บเกี่ยวพืชออกไป (Sustainable Strategies, 1997)



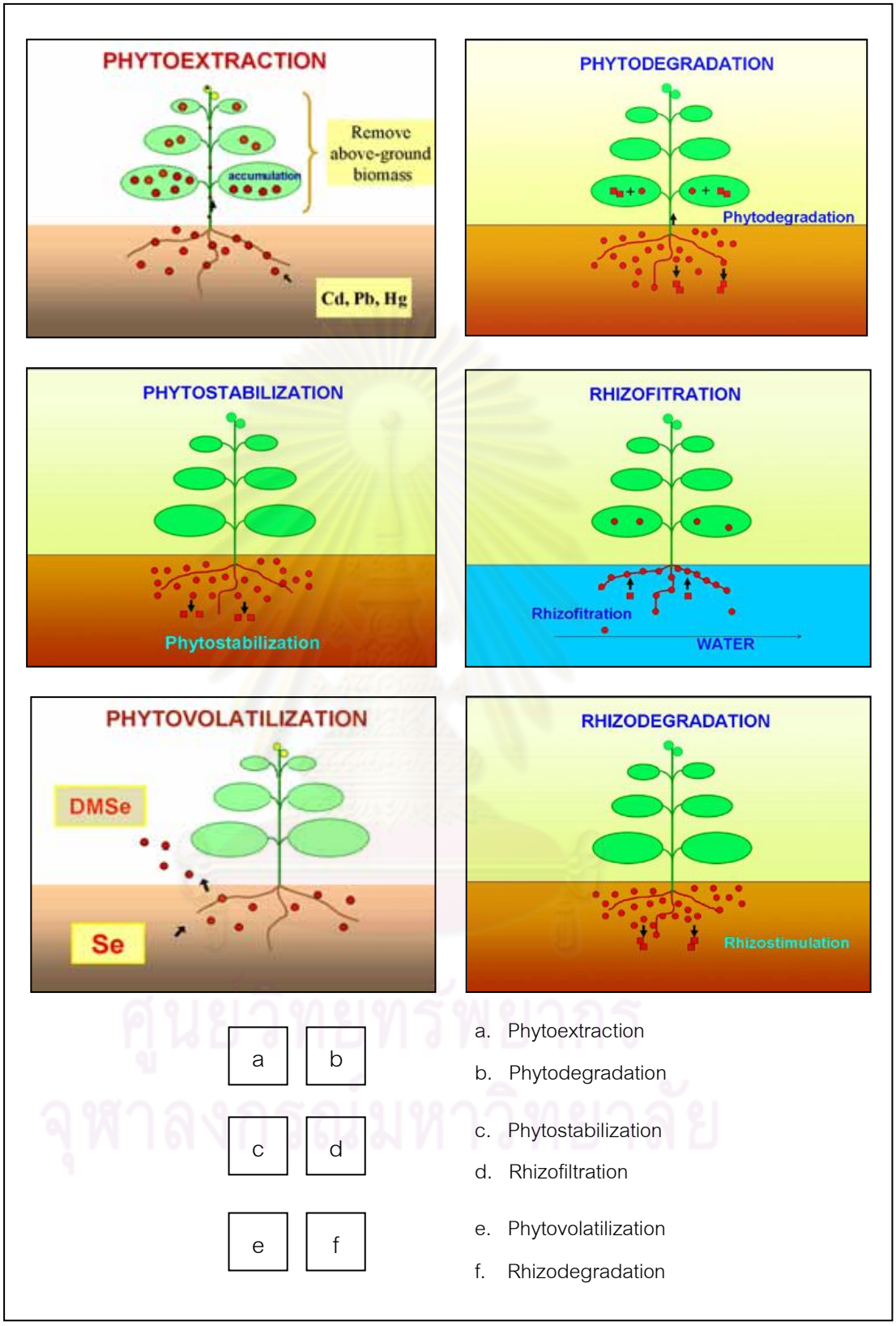
รูปที่ 2.1 กระบวนการ Phytoremediation
ที่มา: http://clu-in.org/download/citizens/citphyto.pdf

2.2.2 ประเภทของ Phytoremediation

Phytoremediation สามารถแบ่งได้เป็น 6 ประเภท (รูปที่ 2.2) ดังนี้

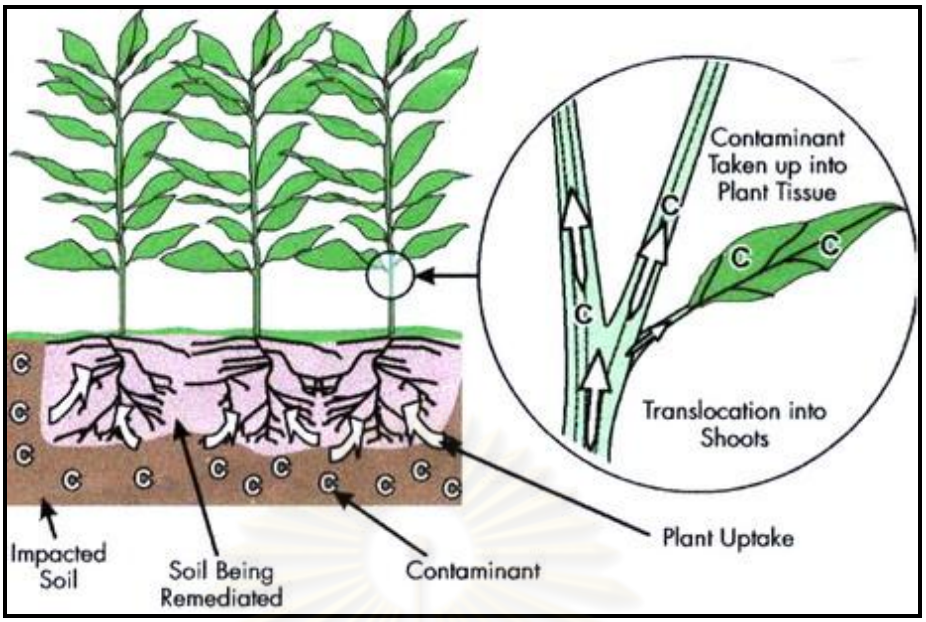
2.2.2.1. Phytoextraction

Phytoextraction หรือเรียกอีกอย่างว่า Phytoaccumulation เป็นการใช้พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนัก โดยสามารถดูดซับและเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากดินนำมารวมไว้ในที่เดียวกันโดยรากพืช และเคลื่อนย้ายไปสะสมยังส่วนยอดของพืชได้ (รูปที่ 2.3) โดยพืชชนิดนั้นต้องเป็น hyperaccumulators คือ สามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพืชทั่วไป 10-500 เท่า หรือสามารถสะสมโลหะหนักไว้ได้มากกว่าปริมาณโลหะหนักในดินที่ปลูกถึง 100-1,000 เท่า หรือเป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้ ดังนั้น พืชที่จะเลือกใช้จึงต้องเป็นพืชที่สามารถพบได้ทั่วไปในบริเวณที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก มีความทนต่อโลหะหนักในระดับความเข้มข้นสูง มีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักในปริมาณมากเข้าไปภายในรากของพืชได้ มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากไปยังส่วนเหนือดินได้ในอัตราที่สูง พืชมีการสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณที่สูง โดยเฉพาะที่เซลล์ของรากพืชและส่วนที่อยู่เหนือดินของพืชชนิดนั้น ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ดูดซับสารพิษต่างๆ ออกจากดินได้ดี (ดังรูปที่ 2.2 a)



รูปที่ 2.2 ประเภทของ Phytoremediation

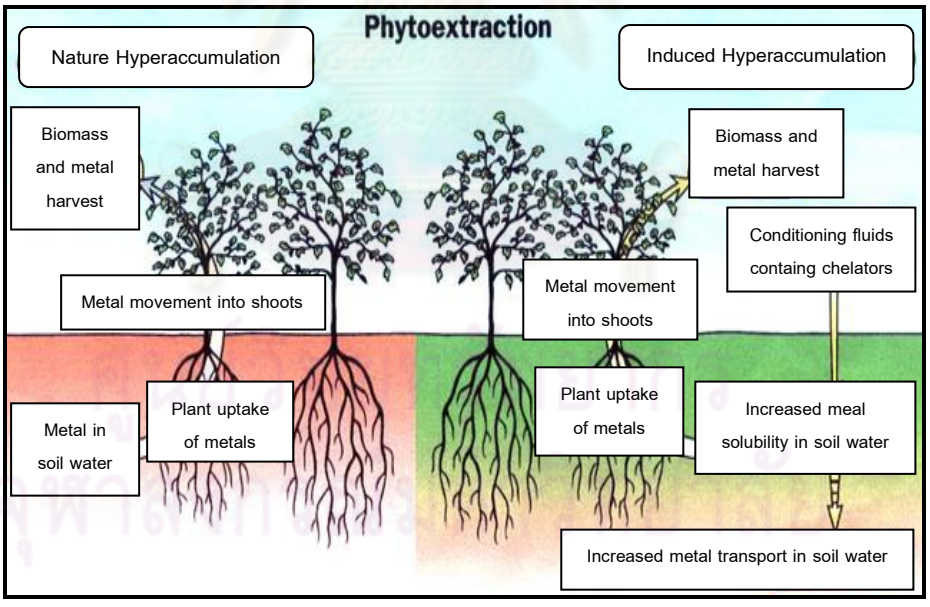
ที่มา : พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2549



รูปที่ 2.3 กลไกการทำงานของ Phytoextraction

ที่มา : http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5104/nkc5104v.html

Phytoextraction แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ natural phytoextraction และ induced phytoextraction ดังรูปที่ 2.4 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.4 Natural phytoextraction และ Induced phytoextraction

ที่มา : http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5104/nkc5104v.html

1) Natural phytoextraction เป็นการบำบัดสารมลพิษโดยวิธีการปลูกพืชในดินที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษ แล้วทำการรดน้ำใส่ปุ๋ยเท่าที่จำเป็น พืชบางชนิดสามารถเจริญเติบโตโดย

ไม่จำเป็นต้องใส่ปุ๋ยหรือรดน้ำ แต่อาศัยน้ำฝนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ส่วนใบและลำต้นพืชที่มีการสะสมสารมลพิษ จะถูกเก็บเกี่ยวและทำการบำบัดโดยวิธีที่เหมาะสมต่อไป พืชที่เลือกใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพืชที่ชอบขึ้นตามธรรมชาติอยู่แล้ว และมีความทนทานต่อความเข้มข้นของโลหะหรือสารมลพิษอื่นๆ โดยทั่วไปแล้ว พืชเหล่านี้จะเป็นพืชที่เจริญเติบโตไม่รวดเร็วนัก และเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้วจะมีขนาดที่ไม่ใหญ่นักและมีรากตื้น

2) Induced phytoextraction เป็นการบำบัดสารมลพิษ โดยการเลือกใช้พืชที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วตลอดอายุการเจริญเติบโต ร่วมกับการเติมสารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ (inducing agent) เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษสู่พืชมากขึ้น และยังส่งผลให้เพิ่มขีดความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ

2.2.2.2. Phytodegradation

Phytodegradation สามารถเรียกอีกอย่างว่า Phytotransformation เป็นการสลายตัวของโลหะหนักที่ปนเปื้อนโดยการดูดซับของพืชด้วยกระบวนการเมตาบอลิค (metabolic) ภายในพืชหรือจากการสร้างสารประกอบต่างๆ ของพืช เช่น เอนไซม์ (enzymes) สารพิษสามารถสร้างความเสียหายแก่พืช โดยการดูดใช้ธาตุอาหารหรือการสะสมธาตุอาหารภายในเนื้อเยื่อของพืช (ดังรูปที่ 2.2 b)

2.2.2.3. Phytostabilization

Phytostabilization เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการควบคุม หรือลดการเคลื่อนย้ายของสารพิษที่ปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินด้วยการตรึงและยึดไว้ที่ราก โดยรากของพืชจะดูดและตรึงสารปนเปื้อนไว้บนรากพืช ทำให้สารปนเปื้อนต่างๆ ภายในดินมีการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียรเกิดการตกตะกอน โดยกระบวนการดังกล่าวนี้จะสามารถลดการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่เป็นพิษต่างๆ ภายในดิน และขัดขวางการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนลงไปสู่น้ำใต้ดินหรือในอากาศให้มีการเคลื่อนย้ายลดลง (ดังรูปที่ 2.2 c)

2.2.2.4. Rhizofiltration

Rhizofiltration เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการกรอง ดูดซับ และรับเอาสารปนเปื้อนต่างๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลายรอบๆ บริเวณรากให้เข้าไปในรากของพืชได้ ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ มีความเหมาะสมในการนำไปใช้กำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ในแหล่งน้ำหรือในดินที่มีความชุ่มของน้ำหรือระบบปลูกแบบไฮโดรโพนิกส์ (hydroponics) (ดังรูปที่ 2.2 d)

2.2.2.5. Phytovolatilization

Phytovolatilization คือ การเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการเป็นสื่อที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในดินหรือในน้ำออกไปสู่อากาศ Phytovolatilization จะเกิดขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืชยืนต้น และพืชชนิดอื่นๆ ที่มีการดูดเอาน้ำที่มีสารอินทรีย์และอนินทรีย์ปนเปื้อนเข้าไป นอกจากนี้ ในบางครั้งการดูดสารปนเปื้อนดังกล่าวด้วยพืชนั้นจะผ่านไปยังใบ และจะมีการระเหยเป็นไอออกไปสู่บรรยากาศที่ความเข้มข้นระดับต่ำ (ดังรูปที่ 2.2 e)

2.2.2.6. Rhizodegradation

Rhizodegradation, Phytostimulation, Rhizosphere Biodegration หรือ Enhanced Rhizosphere Biodegradation เป็นการสลายตัวของสารที่ปนเปื้อนในดินด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน โดยจุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ รา และแบคทีเรีย สามารถใช้หรือย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเป็นอาหารของมันได้ รวมทั้งจุลินทรีย์ยังสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ให้มีความเป็นพิษน้อยลง โดยพืชจะปล่อยน้ำตาล แอลกอฮอล์ และกรด ซึ่งจะไปยับยั้งอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ดิน และกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ Biodegradation ซึ่งเป็นตัวช่วยทำให้ดินมีความร่วนซุยเพิ่มมากขึ้น และมีการเคลื่อนย้ายออกซิเจนกับน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย (ดังรูปที่ 2.2 f)

2.2.3 **หลักการทำงานของ** Phytoremediation

2.2.3.1 การดูดดึงสารปนเปื้อนโดยพืช

การดูดดึงสารปนเปื้อนโดยพืช วิธีที่อาศัยกระบวนการนี้ ได้แก่ Phytoextraction และ Phytovolatilization ซึ่งใน Phytoextraction นั้น จะอาศัยการดูดดึงสารปนเปื้อนจากดินไปเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช ส่วนวิธีการ Phytovolatilization นั้นจะอาศัยวิธีการดูดดึงสารปนเปื้อนจากดินแล้วปล่อยออกไปสู่บรรยากาศแทน

2.2.3.2 การกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพที่เกิดจากจุลินทรีย์ในดิน

การกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพที่เกิดจากจุลินทรีย์ในดิน โดยรากพืชการกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพที่เกิดจากจุลินทรีย์ในดินโดยรากพืชนั้น พืชที่ใช้ในกระบวนการนี้จะมีความสามารถในการทำ Rhizofiltration กล่าวคือ จะอาศัยการทำงานของรากพืชช่วยให้จุลินทรีย์ที่มีความสามารถ ในการกำจัดพิษของสารปนเปื้อนสามารถทำงานได้ดีขึ้น

2.2.3.3 การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดินโดยพืช

การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดินโดยพืช เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการปรับสภาพความเป็นพิษของสารปนเปื้อนที่มีอยู่ภายในดินให้มีความเป็นพิษลดลง ซึ่งพืชที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ พืชที่มีความสามารถในการ Phytostabilization ได้ กล่าวคือ พืชจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปของสารปนเปื้อนไม่ให้สามารถเคลื่อนที่ได้ หรือเกิดการย่อยสลายไปในที่สุด

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักโดยพืช

2.2.4.1 ชนิดของโลหะหนัก มีส่วนสำคัญมากในการที่พืชจะดูดดึงโลหะหนักเหล่านี้ออกจากดิน เนื่องจากพืชนั้นมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักในแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือ พืชจะดูดดึงโลหะหนัก ชนิดที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าโลหะหนักชนิดที่ส่งผลเป็นพิษต่อพืชเพียงอย่างเดียว

2.2.4.2 รูปทางเคมีของโลหะหนัก การดูดดึงโลหะหนักโดยพืชนั้น ส่วนใหญ่แล้วโลหะหนักในรูป inorganic salt ที่ละลายน้ำแล้วนั้น พืชจะสามารถดูดดึงเข้าไปได้มากกว่าโลหะหนัก ในรูป organic compound

2.2.4.3 ชนิดของพืช พืชแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพที่ต่างกัน เป็นผลทำให้ความสามารถของพืชในการดูดดึงโลหะหนักแต่ละชนิดแต่ละรูปแบบแตกต่างกันไปด้วย ตัวอย่าง เช่น ผักคะน้ามีความสามารถในการดูดดึงสังกะสี (Zn) ในรูปของซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ได้ดีที่สุด

2.2.4.4 ลักษณะสมบัติและองค์ประกอบบางอย่างของดิน ได้แก่

1) เนื้อดิน (soil texture) เนื้อดินที่แตกต่างกันสามารถทำให้รากของพืชเข้าถึงและดูดดึงโลหะหนักได้ต่างกัน

2) ความสามารถในการอุ้มน้ำ (drainage status) การที่ดินสามารถอุ้มน้ำไว้ได้มากก็สามารถทำให้โลหะหนักเหล่านั้นสามารถอยู่ได้ในรูปแบบที่ง่ายขึ้น และพืชก็สามารถดูดดึงไปได้มากขึ้นเช่นกัน

3) ความสามารถในการดูดจับโลหะหนัก (sorptive capacity) หากดินดูดจับโลหะหนักไว้อย่างแน่นหนาแล้วโอกาสที่พืชจะดูดดึงไปได้ย่อมลดลงไปด้วย ดังนั้นจึงมักพบว่า พืชที่สามารถดูดดึง และเคลื่อนย้ายโลหะหนักในดินทรายได้ดีกว่าในดินเหนียวอยู่เสมอ

2.2.4.5 สิ่งต่างๆ ที่เติมลงในดินนั้น จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดดึงโลหะหนักในพืชมาก เนื่องจากสิ่งที่เติมเข้าไปนั้น อาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของโลหะหนักและสารอาหารของพืชในดิน ทำให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงโละหนักที่ปนเปื้อนลดลง

2.2.4.6 สภาพแวดล้อมอื่นๆ ได้แก่

1) อุณหภูมิ (temperature) มีผลต่อพืชมาก เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะพบว่าพืชจะดูดดึงแคดเมียม (Cd) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) และเหล็ก (Fe) จากดินสู่พืชมากขึ้น

2) ช่วงวัน (day length) มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักของพืช โดยที่ช่วงวันมากขึ้นพืชจะมีโอกาสในการสังเคราะห์แสงมากขึ้น ทำให้โอกาสที่พืชจะดูดดึงเอาโลหะหนักออกมาจากดินนั้นมีสูงขึ้นด้วย

3) ปริมาณของแสง (intensity) มีส่วนในการดูดดึงโลหะหนักของพืช เนื่องจากแสงที่มีความเข้มที่เหมาะสมกับพืชจะสามารถสังเคราะห์แสงได้ดี ทำให้การดูดดึงโลหะหนักที่อยู่ในดินเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4) ความชื้นของดิน (moisture) มีส่วนที่พืชจะดูดดึงโลหะหนักไปจากดิน โดยจะพิจารณาจากการออสโมซิส (osmosis) ซึ่งต้องมีความเหมาะสมของความชื้นในดินและพืชสามารถดูดซับสารต่างๆ ออกจากดินได้ด้วย

5) ความชื้นในอากาศ (air humidity) มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักในดิน เนื่องจากความชื้นในอากาศนั้น มีผลต่อการคายน้ำของพืช ถ้าพืชคายน้ำออกมาได้น้อย แรงดึงที่รากก็จะต่ำ ทำให้พืชดูดดึงสารต่างๆ ในดินได้น้อยลงเช่นกัน

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

2.2.5.1 ข้อดีของ Phytoremediation

1) เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสม ในการที่จะนำมาใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่บริเวณกว้าง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างมีค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการบำบัดดินโดยวิธีการอื่นๆ สาเหตุที่การทำ Phytoremediation มีค่าใช้จ่ายน้อยก็เนื่องมาจากอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก ไม่ต้องทำการเคลื่อนย้ายดินออกจากพื้นที่ ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ นอกจากนี้ การบำบัดโดยวิธีนี้ยังมีผลกระทบน้อยหรือไม่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเลย มีความปลอดภัยในการใช้มากกว่าการบำบัดโดยวิธีการอื่นๆ อีกด้วย

2) Phytoremediation กับพืชที่เป็น hyperaccumulator species นอกจากจะสามารถบำบัดโลหะหนักออกจากดินได้แล้ว ยังสามารถนำโลหะที่สกัดได้จากมวลชีวภาพไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำเอาโลหะหนักที่ได้ไปขาย ถือเป็นการเพิ่มคุณค่าในการทำ Phytoextraction เนื่องจากการเผามวลชีวภาพที่ได้จะได้พลังงานมา ซึ่งสามารถนำเอาพลังงานที่ได้นี้มาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ กำไรที่ได้จากการขายโลหะหนักเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นต้นทุนในการปลูกพืชในครั้งต่อไปได้อีกด้วย

3) เป็นการปลูกพืชลงในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน ซึ่งพืชที่ปลูกไปนั้นจะช่วยลดการพังทลายของดิน ช่วยป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนัก ช่วยลดการปนเปื้อนของโลหะหนักไปยังพื้นที่อื่นหรือลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งเป็นการช่วยลดความเสี่ยงในการที่โลหะหนักเหล่านี้จะเข้าสู่ตัวคนและสัตว์ได้ นอกจากนี้ พืชที่ปลูกยังสร้างสารอินทรีย์ที่มีส่วนช่วยในการพัฒนาเนื้อดิน และความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน และหากพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดมีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่ทำการบำบัดก็จะทำให้การแทรกซึมของสารอาหาร น้ำ ออกซิเจน และโลหะหนักในดินสู่พืชเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้พื้นที่บำบัดมีสภาพดีขึ้น ร่มรื่น ทำให้เกิดทัศนียภาพที่สวยงามแก่ผู้พบเห็น

4) พืชที่มีการสะสมของโลหะหนักเอาไว้ในปริมาณมากๆ จะช่วยทำให้พืชนั้นรอดพ้นจากการถูกกัดกินของแมลง เช่น หนอนผีเสื้อ ลดการเกิดโรคจากเชื้อรา และแบคทีเรีย เป็นต้น

2.2.5.2 ข้อจำกัดของ Phytoremediation

1) ไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ลึกลงไปกว่าบริเวณรากพืชได้ นอกจากนี้ หากสารปนเปื้อนเหล่านั้นไม่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ก็จะไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารนั้นๆ ได้เช่นกัน

2) Phytoremediation ถูกจำกัดไว้ด้วยสภาพทางธรณีวิทยา สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ ที่ตั้งของแหล่งบำบัด ความสูงจากระดับน้ำใต้ดิน และความสามารถของเครื่องมือทางเกษตรกรรม เป็นต้น

3) ความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนของพืชแต่ละชนิดนั้น มีความแตกต่างกันไป ดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาเพื่อคัดเลือกพืชที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดเป็นกรณีไป นอกจากนี้ในปัจจุบันยังขาดพืชที่มีความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนอีกมาก จึงต้องมีการศึกษาต่อไป

4) เป็นเทคนิคที่ขึ้นอยู่กับความสามารถของพืช และเป็นเทคนิคที่ใช้ระยะเวลานาน ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้แก้ปัญหาการปนเปื้อนที่ต้องการแก้ไขในเวลาอันสั้นได้

2.3 **การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน** (Hydroponic)

2.3.1 **ความหมาย**

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินหรืออาจเรียกว่า การปลูกพืชด้วยสารละลาย (Hydroponics) มาจากคำในภาษากรีกสองคำ คือ คำว่า “hudor” หมายถึง น้ำ และ “ponos” หมายถึง งาน ซึ่งเมื่อรวมคำสองคำเข้าด้วยกันความหมายก็คือ “Water -Working” หรือ “การปฏิบัติงานเกี่ยวกับน้ำ” ซึ่งเป็นสิ่งตรงกันข้ามกับการปลูกพืชในดินให้เจริญเติบโตดังที่เป็นมาแต่ดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม หลักการพื้นฐานในการปลูกพืชตามแบบวิธีนี้ทั้งในการปฏิบัติ และการดูแลก็จะเป็นไปในลักษณะเหมือนกับพืชที่ปลูกในดิน เพียงแต่ปลูกได้โดยไม่ต้องการดิน หรือเป็นการปลูกพืชแบบที่มีรากพืชแช่อยู่ในน้ำหรือในน้ำยาที่เป็นสารละลายธาตุอาหารพืช หรืออาจเรียกว่า การปลูกพืชในน้ำ (water culture) หรือการปลูกพืชไร้ดิน (soilless culture) หรือการปลูกในน้ำยา (solution culture) นอกจากนี้ยังมีการปลูกพืชที่ใช้วัสดุอื่นๆ ที่ไม่ใช่ดิน เช่น การใช้เฉพาะทรายอย่างเดียว (sand culture) หรือถ้าต้องการให้วัสดุปลูกที่มีน้ำหนักเบามากขึ้นก็ใช้ ร็อควูล (rockwool) เวอร์มิคูไลท์ (vermiculite) ขุยมะพร้าว แกลบ หรืออาจจะใช้วัสดุปลูกเหล่านี้ผสมกัน เพื่อให้พืชยืนต้นอยู่ได้และเจริญเติบโตดี ซึ่งถือได้ว่าเป็นการปลูกพืชไร้ดินอีกแบบหนึ่ง

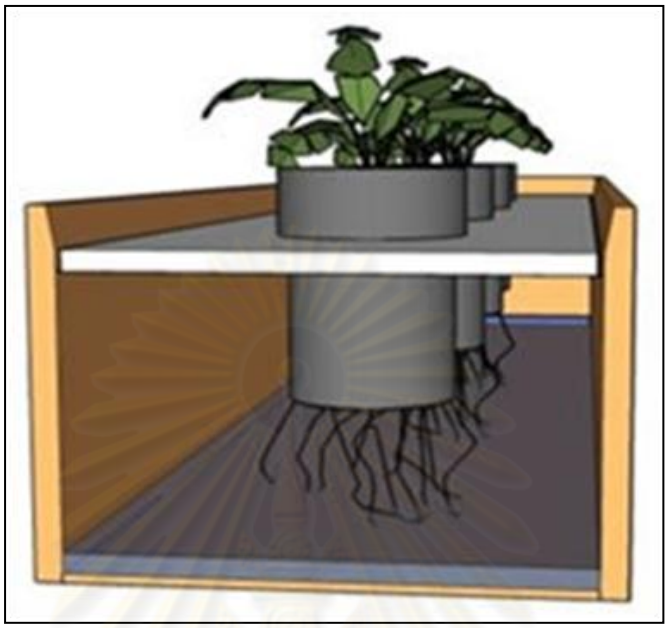
2.3.2 **ประเภทของ** Hydroponics

ระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการให้สารละลายธาตุอาหารแก่บริเวณรอบๆ รากพืช ได้แก่

1) การปลูกพืชในสารละลาย (water culture) จัดได้ว่าเป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากกว่าแบบอื่นๆ มี 3 ระบบ คือ

1.1) ระบบเอ็นเอฟที (nutrient film technique; NFT) คือ การให้สารละลายไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นบางๆ เป็นระบบที่มีการปลูกพืชโดยให้รากแช่อยู่ในสารละลายโดยตรง สารละลายจะไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ (โดยทั่วไปมักกำหนดให้น้ำที่ไหลผ่านมีความลึกประมาณ 1-3 มิลลิเมตร) สารละลายจะไหลหมุนเวียนผ่านรากตลอดเวลาตามความลาดชันของ

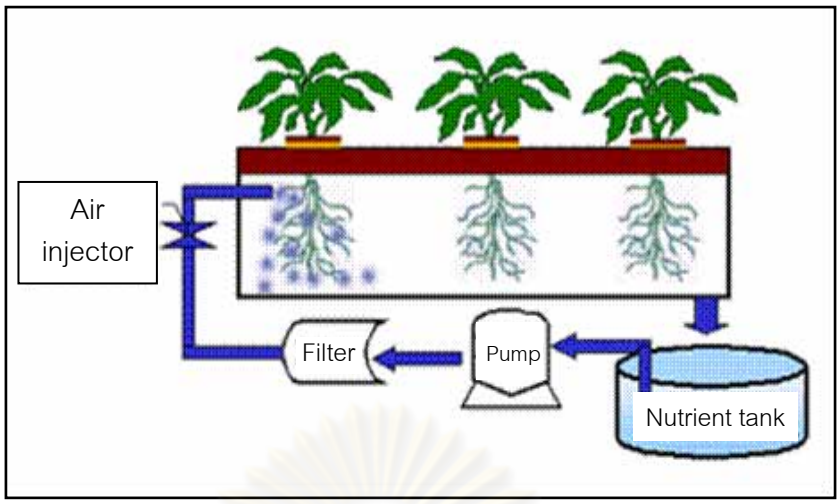
รางปลูก ระบบเอ็นเอฟที มีวิธีการปลูกที่หลากหลาย เช่น การปลูกพืชในราง ปลูกพืชในร่อง และปลูกพืชในท่อ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การปลูกพืชในสารละลายระบบเอ็นเอฟที
ที่มา : http://www.dbcourt.co.uk/hydroponics/System%20_types.html

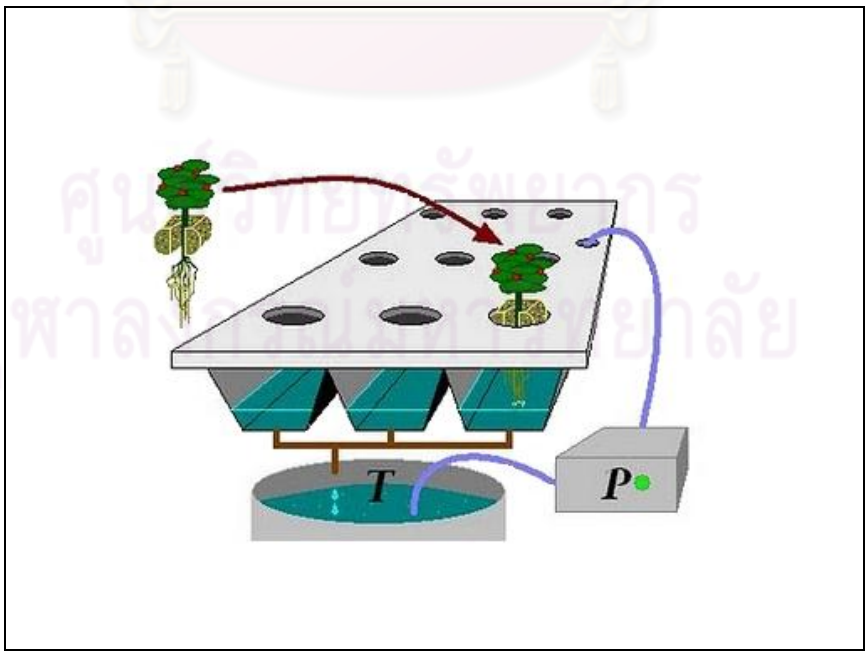
1.2) ระบบดีเอฟที (deep floating technique; DFT) เป็นระบบที่ปลูกพืชโดยให้รากแช่อยู่ในสารละลายลึกประมาณ 15-20 เซนติเมตร ซึ่งจะมีการปลูกพืชบนแผ่นโฟม หรือวัสดุที่ลอยน้ำได้เพื่อยึดลำต้นแต่จะปล่อยให้รากเป็นอิสระในน้ำ ระบบนี้ไม่มีความลาดเอียง เป็นระบบที่มีการหมุนเวียนสารละลาย โดยการใช้ปั้มดูดสารละลายจากถังพักขึ้นมาใช้ใหม่ในระบบ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับระบบน้ำที่ใช้ในการผลิต ซึ่งระบบนี้อาจมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ระบบไฮโดรโพนิกส์ลอยน้ำ (floating hydroponic systems) ดังรูปที่ 2.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 การปลูกพืชในสารละลายระบบดีเอฟที
ที่มา : http://agri.wu.ac.th/msomsak/Soilless/

1.3) ระบบดีอาร์เอฟ (dynamic root floating; DRF เป็นระบบการปลูกพืชที่เน้นการปลูกพืชให้รากพืชแช่อยู่ในน้ำส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งสร้างรากในอากาศ เพื่อช่วยในการหายใจ โดยจะทำให้พืชที่ปลูกในระบบนี้ สามารถเจริญได้ในอุณหภูมิของสารละลายที่สูงมากกว่าระบบอื่นๆ ได้ดี ซึ่งระดับน้ำควรสูงเพียงพอที่จะทำให้รากพืชแช่อยู่ในน้ำได้ คือ ประมาณ 4 เซนติเมตร โดยรากส่วนนี้จะเป็นรากที่ดูดอาหาร (nutrient root) และรากส่วนนอกเหนือจากนี้จะเป็นรากที่หายใจ และดูดออกซิเจนเข้าสู่ราก จึงเรียกรากส่วนนี้ว่า รากอากาศ (aero root) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การปลูกพืชในสารละลายระบบดีอาร์เอฟ
ที่มา : http://aummcl2010.blogspot.com

2) การปลูกพืชในวัสดุปลูก (substrate culture) เป็นวิธีการปลูกพืชโดยใช้วัสดุปลูกชนิดต่างๆ ทั้งที่เป็นอินทรีย์ และอนินทรีย์ต่างๆ ได้แก่ ทราย กรวด ขี้เลื่อย ขุยมะพร้าว ร๊อควูลล์ และพีท เป็นต้น การปลูกพืชระบบนี้นิยมกันอย่างแพร่หลายวิธีหนึ่ง การปลูกพืชในวัสดุปลูกส่วนใหญ่จะแตกต่างกันทางด้านของเทคนิค การให้น้ำ และสารละลายธาตุอาหารพืช (ความถี่และปริมาณสารละลายที่ให้แต่ละครั้งและองค์ประกอบของสารละลาย) ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุปลูกที่ใช้ ซึ่งจะต้องมีการทดลองเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสม โดยรูปแบบของการให้สารละลายกับวัสดุปลูกมี 2 แบบ คือ

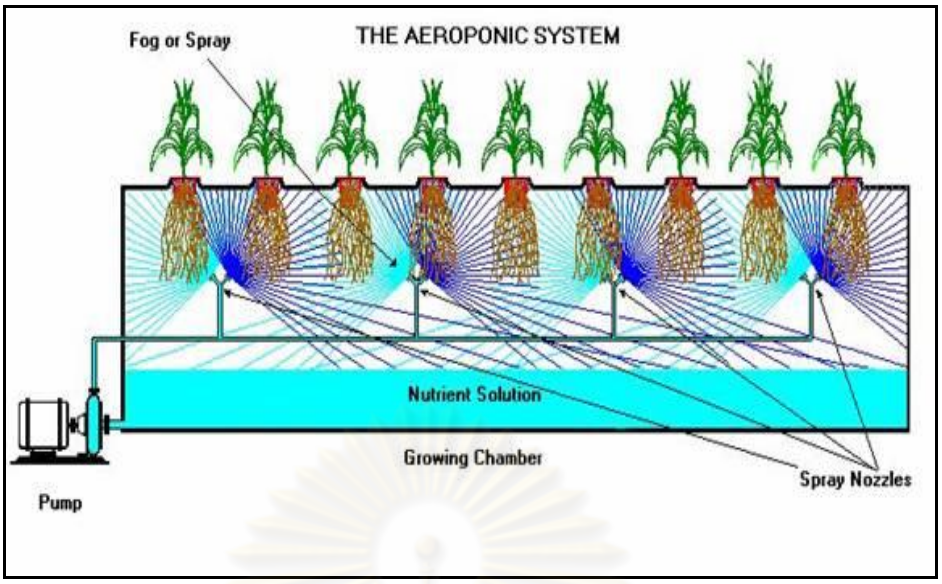
2.1) แบบสารละลายไม่หมุนเวียน (non circulation substrate culture)

2.2) แบบสารละลายหมุนเวียน (circulation substrate culture)

ลักษณะของวัสดุที่ใช้ปลูก จะต้องมีความสามารถในการรักษาความชื้น มีการดูดซับน้ำไว้ได้มาก มีพื้นที่ผิวและรูพรุนมาก

3) ระบบปลูกพืชให้รากลอยอยู่กลางอากาศ (แอโรโพนิกส์ ; aeroponics) เป็นระบบที่ทำให้รากพืชอิ่มตัวอย่างต่อเนื่องด้วยการพ่นสารละลายที่มีธาตุอาหารพืชเป็นระยะ ในรูปคล้ายๆ แปลงพ่นหมอก (รูปที่ 2.8) ระบบนี้รากพืชไม่ได้จุ่มอยู่ในน้ำซึ่งเป็นสารละลายธาตุอาหารพืช แต่จะมีความชื้นอิ่มตัวอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้รากคงความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในระดับ 95-100 เปอร์เซ็นต์ โดยวิธีการนี้พืชได้อาหารครบถ้วนและพอเพียง ระบบนี้รากจะลอยอยู่ในอากาศในระบบปิดที่กันแสง วิธีนี้ใช้น้ำน้อยมาก มีระบบการปลูกที่หลากหลาย เช่น แบบเอเฟรม แบบกล่อง และในอวกาศ เป็นต้น การปลูกพืชในระบบแอโรโพนิกส์นี้ ความชื้นจากการฉีดพ่นสารละลายธาตุอาหาร จะไปกระตุ้นให้รากพืชเจริญเติบโตอย่างสมบูรณ์ภายใน 10 วัน โดยเฉพาะพืชผักสามารถเจริญเติบโตเก็บเกี่ยวได้ภายในระยะเวลาเพียง 30 วันเท่านั้น ซึ่งรูปแบบการปลูกพืชให้รากลอยอยู่ในอากาศนี้จะนิยมสำหรับพืชหัวที่ไม่สามารถแช่อยู่ในน้ำหรืออยู่ในดินที่จะเสี่ยงต่อโรคทางดิน เมื่อมีระยะการปลูกนานเกิน 2 เดือน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.8 การปลูกพืชให้รากลอยอยู่กลางอากาศ
ที่มา : http://alfin2100.blogspot.com/2010/04/no-cropland-no-problem-farming-on-air.html

2.3.3 **ข้อดีและข้อจำกัดของ** Hydroponics

2.3.3.1 ข้อดีของ Hydroponics

1) สามารถปลูกพืชได้ต่อเนื่องตลอดปี เมื่อเก็บผลผลิตแล้วสามารถปลูกพืชรุ่นต่อไปได้ทันที เนื่องจากไม่ได้ปลูกพืชลงดินจึงไม่ต้องทิ้งระยะเวลาเพื่อทำการพักดิน ตากดิน กำจัดวัชพืช และเตรียมแปลงปลูกใหม่ การปลูกพืชในดินต่อเนื่องเป็นเวลานานยังทำให้เกิดปัญหาดินเสื่อมสภาพ แต่การปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโพนิกส์สามารถปลูกพืชต่อเนื่องได้โดยไม่ต้องกลัวปัญหานี้ เนื่องจากแหล่งอาหารของพืชไม่ได้มาจากดิน แต่มาจากธาตุอาหารต่างๆ ที่ให้ทางสารละลายธาตุอาหาร นอกจากนั้นการปลูกพืชด้วยเทคนิคนี้ไม่ขึ้นกับฤดูกาล เพราะมีการควบคุมสภาพแวดล้อม จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ปลูกได้ต่อเนื่องตลอดปี

2) สามารถปลูกพืชได้แม้ในที่ที่ไม่มีพื้นที่สำหรับปลูกพืช การอาศัยอยู่ในชุมชนเมืองซึ่งที่ดินมีราคาแพง ผู้อยู่อาศัยในที่ที่มีพื้นที่จำกัด เช่น ตึกแถว ทาวน์เฮาส์ อาคารชุด และหอพัก ไม่มีพื้นที่สำหรับปลูกพืช สามารถปลูกพืชผักสวนครัว สมุนไพร หรือไม้ดอกไม้ประดับ ได้โดยใช้ระบบไฮโดรโพนิกส์ขนาดเล็กวางบริเวณพื้นที่ว่างที่มีอยู่เล็กน้อย เช่น ริมหน้าต่าง ทางเดิน ดาดฟ้า พื้นที่เล็กๆ หลังบ้าน

3) สามารถปลูกพืชในที่ที่ดินไม่เหมาะสม ในบางพื้นที่มีพื้นที่อยู่มากมาย แต่ใช้ทำการเพาะปลูกพืชไม่ได้ เนื่องจากดินขาดความอุดมสมบูรณ์ ดินทะเลทราย พื้นที่ที่เป็นหิน พื้นที่

ภูเขา ดินเค็ม ดินกรด ดินด่าง พื้นที่อยู่ในเขตแห้งแล้ง หรือขาดแคลนน้ำชลประทาน การแก้ปัญหาเหล่านี้ทำได้ยาก ต้องใช้เวลานาน และใช้งบประมาณมาก สามารถใช้พื้นที่ที่มีอยู่ปลูกพืชได้ด้วยวิธีไฮโดรโพนิกส์ เพราะนอกจากไม่ต้องใช้ดินเป็นแหล่งอาหารสำหรับพืชแล้ว ยังเป็นวิธีที่ใช้น้ำน้อยและใช้อย่างมีประสิทธิภาพ พืชไม่มีปัญหาขาดน้ำ ไม่มีการสูญเสียน้ำจากการซึมลึก การไหลทิ้งหรือการแย่งน้ำจากวัชพืช และไม่มีปัญหาการให้น้ำมากเกินไป

4) พืชเจริญเติบโตได้เร็วและให้ผลผลิตสูง การปลูกพืชด้วยวิธีดั้งเดิม ไม่สามารถกำหนดปริมาณธาตุอาหารให้พอดีกับความต้องการของพืชได้ นอกจากนั้นยังมีการสูญเสียธาตุอาหารจากกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในดินและในอากาศ ตลอดจนการแย่งธาตุอาหารจากวัชพืช แต่การปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโพนิกส์ สามารถควบคุมปริมาณสารอาหารได้ดีกว่าการปลูกในดิน สามารถกำหนดปริมาณธาตุอาหารให้ตรงกับความต้องการของพืช พืชได้รับสารอาหารในรูปอนินทรีย์โดยตรง ทำให้การใช้ปุ๋ยเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังไม่มีปัญหาการแย่งธาตุอาหารโดยวัชพืช จึงทำให้พืชเจริญเติบโตเร็วและได้ผลผลิตสูง ในอีกแง่หนึ่ง ถ้าคำนึงถึงผลผลิตต่อปี ผลผลิตจากการผลิตด้วยวิธีไฮโดรโพนิกส์ก็จะสูงกว่าการปลูกด้วยวิธีดั้งเดิม เนื่องจากการเก็บเกี่ยวได้เร็วขึ้นและปลูกต่อเนื่องได้ตลอดปีไม่ขึ้นกับฤดูกาล ทำให้สามารถปลูกพืชได้มากครั้งกว่าในเวลาเท่ากัน

5) ผลผลิตมีความสม่ำเสมอ สะอาดและคุณภาพดี เนื่องจากมีการควบคุมปริมาณธาตุอาหารตามที่พืชต้องการตลอดจนควบคุมปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมได้ทั่วถึง ทำให้ได้ผลผลิตที่มีความสม่ำเสมอ มีรูปร่าง สี ขนาด ใกล้เคียงกัน ผลผลิตไม่ได้สัมผัสกับดิน จึงสะอาดและดูน่ารับประทาน การปลูกพืชวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่เหมาะที่จะผลิตพืชผักที่ต้องการผลผลิตที่มีคุณภาพและความสม่ำเสมอ เช่น ผักส่งออก ผักทดแทนการนำเข้า และผักส่งขายในซุปเปอร์มาร์เก็ต

6) ใช้แรงงานน้อยลง การปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโพนิกส์จะใช้แรงงานน้อยกว่าการปลูกพืชด้วยวิธีดั้งเดิม เนื่องมาจากไม่ต้องมีการเตรียมดิน ไม่ต้องทำการเขตกรรม เช่น ให้น้ำ ใส่ปุ๋ย กำจัดวัชพืช มีศัตรูพืชน้อยกว่า จึงใช้แรงงานในการกำจัดน้อยกว่า การเพาะเมล็ด การย้ายปลูก การเตรียมแปลงปลูก และการเก็บเกี่ยว ทำได้ง่ายกว่า จึงใช้แรงงานน้อยกว่า

7) ลดการใช้สารเคมี เนื่องจากมีการควบคุมสภาพแวดล้อม ควบคุมศัตรูพืชได้ง่าย เพราะการไม่ใช้ดินในการปลูกพืช ทำให้ไม่มีปัญหาโรคแมลงที่อยู่ในดินตลอดจนไม่มีปัญหาวัชพืช ส่วนโรคแมลงที่ระบาดทางอากาศก็สามารถลดการใช้สารเคมีได้โดยการใช้โรงเรือนตาข่าย

8) ปลูกพืชได้ทุกฤดูกาลและทุกสภาพอากาศ เนื่องจากมีการควบคุมปริมาณธาตุอาหารให้พอดีกับความต้องการของพืชและมีการควบคุมสภาพแวดล้อมอื่นๆ ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช การที่สามารถปลูกพืชได้ตลอดไม่ขึ้นกับฤดูกาล ทำให้สามารถควบคุมราคาได้โดยไม่ขึ้นลงตามฤดูกาล

2.3.3.2 ข้อจำกัดของ Hydroponics

1) ค่าใช้จ่ายในการลงทุนครั้งแรกค่อนข้างสูง ทำให้ผลผลิตที่ได้มีราคาแพง ต้องเลือกปลูกพืชที่มีราคา ค่าใช้จ่ายที่ทำให้ต้นทุนสูงจะเป็นค่าก่อสร้างโรงเรือน ค่าสารเคมี ค่าอุปกรณ์และค่าดูแลรักษา การลงทุนระยะแรกอาจไม่คุ้ม แต่จะให้ผลคุ้มค่าในระยะยาว และต้องดำเนินการในพื้นที่มากจะคุ้มกว่าพื้นที่น้อย

2) ต้องใช้เทคนิคขั้นสูง ผู้ปลูกต้องมีความรู้ความเข้าใจในเทคนิคที่เลือกใช้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังต้องมีความรู้ในเรื่องธาตุอาหารพืช น้ำ สรีรวิทยาของพืช สารละลาย และเครื่องมือควบคุมระบบต่างๆ อีกด้วย

3) มีโอกาสเกิดโรคที่มาจากน้ำได้ง่ายและยากต่อการควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปลูกในสารละลาย ไม่ว่าจะเป็นระบบหมุนเวียนหรือไม่หมุนเวียน ถ้ามีการเกิดโรคเกี่ยวกับระบบราก จะแพร่กระจายอย่างรวดเร็วและยากต่อการป้องกันกำจัด เพราะพืชแต่ละต้นใช้สารละลายในแหล่งเดียวกันเชื้อจะระบาดไปทั่วระบบในเวลาอันสั้นโดยติดไปในสารละลาย

2.4 **สารคีเลต** (clelating agent)

2.4.1 **ความหมาย**

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 โลหะธาตุที่มีโครงสร้างอยู่ใน

สารคีเลตจะตกตะกอนกับไฮดรอกไซด์ของโลหะได้ยากขึ้น ดังนั้นพืชจึงสามารถดูดดึงไปใช้ได้ง่ายขึ้น และเป็นประโยชน์ต่อพืชมากขึ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) Wang et al. (2007) ศึกษาการใช้สาร EDTA ช่วยในการดูดดึงตะกั่วในดินด้วยพืช *Bidens maximowicziana* พบว่าพืช *Bidens maximowicziana* สามารถดูดดึงตะกั่วได้เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมสาร EDTA จาก 24.23-680.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็น 29.07-1,905.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า พืช *Bidens maximowicziana* เหมาะสมสำหรับนำมาช่วยในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินร่วมกับการใช้สาร EDTA

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)) และกรดฟูวิค (fulvic acid; (FA)) เป็นต้น

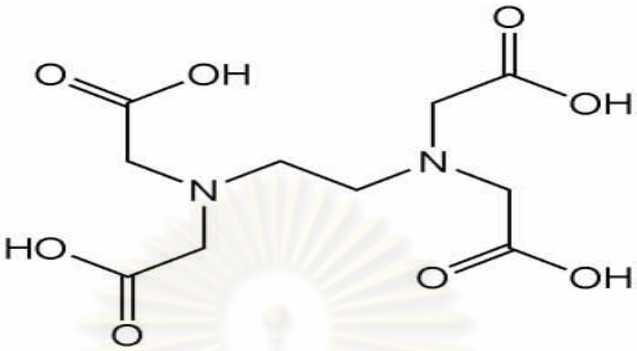
2) สารคีเลตสังเคราะห์ เช่น เอธิลลีนไดเอมีนเทตระเอซิติกเอซิด (ethylene diamine tetraacetic acid; (EDTA)) ไฮดรอกซิลเอธิลลีนเททระเอซิติกเอซิด (hydroxylethylene tetraacetic acid; (HEDTA)) ไดเอธิลลีนไตรอะมิโนเพนทระเอซิติกเอซิด (diethylene triamino pentaacetic acid; (DTPA)) เอธิลลีนไกโคเททระเอซิติกเอซิด (ethylene glycol tetraacetic acid; (EGTA)) เอธิลลีนไดเอมีนไดโอไฮดรอกซิลฟินิลเอซิด (ethylene diamine di-o-hydroxyphenyl acid; (EDDHA)) และไดไฮดรอกซิลฟินิลอิมิโนไดเอซิติกเอซิด (*N*-(2- hydroxyphenyl) Iminodiacetic acid; (HEIDA)) เป็นต้น

2.4.3 ประโยชน์ของสารคีเลต

สารคีเลตมีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางทั้งในครัวเรือน และอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น สารประกอบในน้ำยาทำความสะอาดผิว การทำผงซักฟอก โรงงานชุบโลหะ และโรงงานผลิตกระดาษเพื่อใช้เป็นสารฟอกขาว เป็นต้น และยังมีการนำสารคีเลตมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินและน้ำ

2.4.4 สารอีดีทีเอ

เอธิลลีนไดเอมีนเทตระเอซิติกเอซิด [ethylene diamine tetraacetic acid; (EDTA)] มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.9 และมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างสาร EDTA

ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ethylenediaminetetraacetic.png

ตารางที่ 2.2 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)

2.5 เหมืองแร่ตะกั่ว

2.5.1 ลักษณะที่ตั้งของเหมืองแร่ตะกั่ว

เหมืองแร่ตะกั่วตั้งอยู่อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งอยู่ห่างจากกรุงเทพมหานคร ประมาณ 230 กิโลเมตร แร่ตะกั่วที่พบเป็นแร่ปฐมภูมิหรือแร่ตะกั่วซัลไฟด์ แหล่งแร่ตะกั่วที่สำคัญ

อยู่ในเขตอำเภอทองผาภูมิ-สังขละบุรี มีการทำเหมืองมาเป็นระยะเวลาหลายร้อยปีแล้ว สมัยก่อนกรรมวิธีการทำเหมืองใช้การเจาะงัดตามสายแร่ บางแห่งทำโดยวิธีเหมืองหาบและได้พัฒนาเป็นการทำเหมืองแบบอุโมงค์ ปัจจุบันพื้นที่แหล่งแร่ที่สำคัญมีอยู่ 3 บริเวณ คือ กลุ่มบ่องาม กลุ่มสองท่อ และกลุ่มบ่อใหญ่-บ่อน้อย มีพื้นที่รวมทั้งหมดประมาณ 76 ตารางกิโลเมตร นอกจากนี้ในบริเวณใกล้เคียงยังมีการขออนุญาตทำเหมืองแร่ แต่พื้นที่เกือบทั้งหมดครอบคลุมพื้นที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าทุ่งใหญ่นเรศวร-ห้วยขาแข้ง และพื้นที่เตรียมประกาศเป็นอุทยานแห่งชาติของกรมป่าไม้คาดว่า จะมีปริมาณแร่สำรองที่พิสูจน์แล้วของแร่ตะกั่วปฐมภูมิสูงถึง 6.55 ล้านตัน และแร่ตะกั่วทุติยภูมิหรือแร่ตะกั่วคาร์บอเนตประมาณ 1.18 ล้านตัน ปริมาณแร่สำรองดังกล่าวนี้สามารถประกอบกิจกรรมการทำเหมืองแร่ได้ อีกประมาณ 100 ปี

2.5.2 การทำเหมืองแร่และการแต่งแร่

แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีในอำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี มีการทำเหมือง 2 แบบ คือ แบบเหมืองหาบ และแบบเหมืองอุโมงค์

1) การทำเหมืองหาบ

กระทำในบริเวณที่แร่อยู่ใกล้ผิวดิน คือ เป็นแร่ทุติยภูมิ แหล่งแร่มีอยู่ 2 ลักษณะคือ แร่ที่ผสมอยู่ในดินและหินผุ มีความเข้มข้นของธาตุตะกั่วในดินระหว่างร้อยละ 5-15 และแร่ที่อยู่ในหินแข็ง การทำเหมืองเริ่มจากการเปิดหน้าดินออกจนถึงชั้นแร่ แล้วนำดินและหินผุปนแร่ไปล้าง จากนั้นนำไปผ่านเครื่องคัดแร่แบบเกลียวหมุน (spiral classifier) เพื่อปรับให้แร่มีความเข้มข้นของธาตุตะกั่วร้อยละ 30-35 และนำไปเข้าเครื่องลอยแร่โดยน้ำยาเคมีจนแร่มีความเข้มข้นของธาตุตะกั่วมากกว่าร้อยละ 65 แล้วจึงนำไปถลุงเป็นโลหะตะกั่วจากสินแร่ตะกั่วคาร์บอเนต

2) การทำเหมืองอุโมงค์

การทำเหมืองอุโมงค์จะทำในบริเวณที่มีแร่อยู่ลึกและเป็นแร่ปฐมภูมิ ได้แก่ แร่ตะกั่วซัลไฟด์ การทำเหมืองใช้การขุดเป็นอุโมงค์ลงไปหาสายแร่แล้วใช้ระเบิดแร่ตามสายแร่ นำแร่ที่ได้มาบดจนมีขนาดประมาณ 200 เมช (Mash) จากนั้นนำแร่ไปแต่งด้วยเครื่องลอยแร่โดยน้ำยาเคมี ให้แร่มีความเข้มข้นของธาตุตะกั่วมากกว่าร้อยละ 65 แล้วนำส่งจำหน่ายต่อไป

เหมืองแร่ในบริเวณนี้ จัดเป็นเหมืองอุโมงค์ที่ดำเนินการตามหลักวิชาที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย และจะเป็นต้นแบบของการทำเหมืองใต้ดินในบริเวณนี้ ซึ่งจะเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณใกล้เคียงพื้นที่ทำเหมืองได้เป็นอย่างดี

2.6 บอนเขียว (*Colocasia esculenta* (L.) Schott)

Kingdom : Plant

Class: Angiosperms

Order : Alismatales

Family : Araceae

Genus : Colocasia

Species : C. *esculenta*

Common names: Elephant Ear

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของบอนเขียว

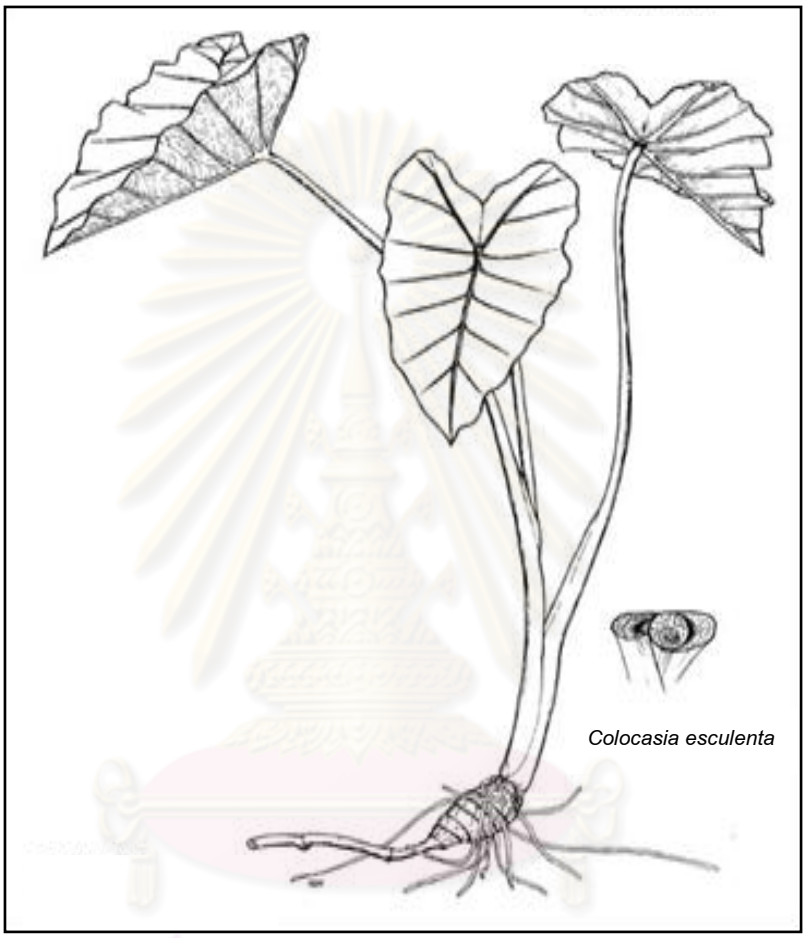
ใบของบอนเขียวเป็นใบเดี่ยว งอกมาจากเหง้าใต้ดินเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ ใบมีรูปร่างคล้ายรูปหัวใจหรือคล้ายโล่ ปลายแหลมฐานใบเว้าแหลม ใบกว้าง 20-35 เซนติเมตร ยาว 35-40 เซนติเมตร หน้าใบเขียวเรียบไม่เปียกน้ำเพราะผิวใบเคลือบด้วยไข (wax) หลังใบสีขาวนวลมีเส้นใบชัดเจน แต่ละกอมี 7-9 ใบ ก้านใบยาวออกจากต้นใต้ดิน มียางใส ๆ ออกดอกเป็นช่อลักษณะเป็นแท่งยาวรี สีขาวอมเขียว ดอกออกจากลำต้นใต้ดินเป็นช่อยาว มีกาบสีเหลืองอ่อนหรือเหลืองนวลหุ้มอยู่ ยาวประมาณ 26 เซนติเมตร มีดอกเป็นกระเปาะสีเขียวเป็นแท่งอยู่ตรงกลาง มีกลิ่นหอม ต่อมาจะกลายเป็นผลเล็กๆ จำนวนมากประกอบไปด้วยหัวกลางและหัวย่อย อยู่รอบๆ หัวใหญ่มีลำต้นเป็นเหง้าอยู่ในดิน บอนเขียวขึ้นทั่วไปตามชายน้ำหรือที่ลุ่มมีน้ำขัง พบทั่วไปทุกภาคของประเทศไทย ดังรูปที่ 2.10

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยด้านการศึกษา Phytoremediation

Jampanil (2000) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของบอน *Colocasia esculenta* (L.) Schott (บอนจีนดำและบอนเขียว) ในการกำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนในดิน ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 0, 50, 75, 100, 125 และ150 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมของดิน เป็นระยะเวลา 90 วัน บันทึกผลทุก 15 วัน พบว่า บอนจีนดำและบอนเขียว สามารถเจริญเติบโตได้ทุกระดับความเข้มข้นของสารหนู และพบว่ามีการสะสมสารหนูในส่วนของรากมากที่สุดรองมาคือ ลำต้นใต้ดิน ใบ และก้านใบ ตามลำดับ นอกจากนี้ บอนจีนดำและบอนเขียวมีประสิทธิภาพในการดูดดึงสารหนูมากที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมดิน คิดเป็น 0.07 เปอร์เซ็นต์

และที่ระดับความเข้มข้น 125 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมดิน คิดเป็น 0.06 เปอร์เซ็นต์ จากผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่า บอนทั้งสองชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนในดินได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้น ควรนำบอนทั้งสองชนิดมาใช้ในการฟื้นฟูและกำจัดสารโลหะหนักในบริเวณพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนได้



รูปที่ 2.10 บอนเขียว *Colocasia esculenta* (L.) Schott
ที่มา : http://keys.lucidcentral.org/keys/aquariumplants

สรวิทย์ งามพร้อมพันธุ์ (2544) ศึกษาประสิทธิภาพของบอน *Colocasia esculenta* (L.) Schott ซึ่งมี 2 ชนิด คือ บอนจีนดำและบอนเขียว ในการกำจัดโครเมียมในพื้นที่ชุ่มน้ำด้วยการจำลองแบบบึงประดิษฐ์ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นี้ มีระดับความลึกแตกต่างกัน คือ 0.15, 0.25 และ 0.35 เมตร ผลการศึกษา พบว่า บริเวณรากของบอนมีการสะสมโครเมียมสูงสุด และพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของบอนจีนดำ เท่ากับ 59.55 เปอร์เซ็นต์ และในบอนเขียว เท่ากับ 67.01 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าบอน *Colocasia esculenta* (L.) Schott มีความสามารถในการกำจัดโครเมียม

ธเรศ ศรีสถิตย์ และ วงศ์พะงา เส็งสาย (2545) ศึกษาประสิทธิภาพของหญ้าแฝก *Vertiveria zizanioides* (Linn.) Nass และหญ้าแฝกดอน *Vertiveria nemoralis* A. Camus ในการกำจัดโครเมียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น เพื่อการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้ายจากโรงฟอกหนัง โดยใช้ความลึกของน้ำเสีย 3 ระดับ คือ 0.10, 0.15 และ 0.20 เมตร พบว่า หญ้าแฝกหอม มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการกำจัดโครเมียม ที่ระดับความลึกของน้ำ 0.10 เมตร เท่ากับ 89.29 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ หญ้าแฝกดอน ที่ระดับความลึก 0.10 เมตร เท่ากับ 86.30 เปอร์เซ็นต์ สำหรับชุดควบคุมไม่ปลูกพืชที่ระดับความลึก 0.10 เมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมต่ำสุด คือ 80.72 เปอร์เซ็นต์

Panich-pat (2003) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้ธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) โดยใช้สารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้น ดังนี้ 4,000, 8,000, 12,000, 16,000 และ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า รากมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้มากถึง 4,943 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ความเข้มข้นของตะกั่วไนเตรท 16,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชาลินี ศักดิ์แสน และ ศศิธร พุทธวงษ์ (2550) ศึกษาการบำบัดโครเมียมและอาร์เซนิกด้วยหญ้าแฝกและธูปฤาษีในบึงประดิษฐ์ ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโครเมียมประมาณ 7.44-11.68 มิลลิกรัมต่อลิตร และอาร์เซนิก ประมาณ 0.98-1.19 มิลลิกรัมต่อลิตร ดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลา 100 วัน พบว่า ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียที่ปลูกหญ้าแฝกและธูปฤาษี มีค่าลดลงมากกว่าร้อยละ 98 ส่วนบ่อที่ไม่ได้ปลูกพืช มีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุดร้อยละ 69.3 เมื่อศึกษาการเจริญเติบโตและอัตราการอยู่รอดของพืชทั้ง 2 ชนิด พบว่า หญ้าแฝกและธูปฤาษี สามารถเจริญเติบโตได้ดีและไม่พบการตายจากน้ำเสียที่ปนเปื้อนโครเมียมและอาร์เซนิก

พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2550) ทำการศึกษา การกำจัดโครเมียมโดยใช้พืชน้ำ โดยใช้โครเมียมที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า สาหร่ายหางกระรอก และผักแว่น มีอัตราการรอดตาย 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียม 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่จอกแหนมีอัตราการรอดตาย 66.67 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การสะสมโครเมียมทั้งหมดในพืชน้ำ ทั้ง 3 ชนิด ที่ระยะเวลา 21 วัน พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียม 15 มิลลิกรัมต่อลิตร จอกแหนสามารถสะสมโครเมียมทั้งหมดดีที่สุด รองลงมาคือ สาหร่ายหางกระรอก และผักแว่น เท่ากับ 5.991, 0.548 และ 1.317 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนปริมาณโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ พบว่า ที่ระยะเวลา 30 วัน จอกแหนสามารถ

สะสมได้มากกว่าผักแว่นและสาหร่ายหางกระรอก ที่ระดับความเข้มข้นโครเมียม 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

สุธินี วดีศิริศักดิ์ (2550) ศึกษาการกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลา โดยวิธีการปลูกพืชในดินและไร้ดิน สำหรับการทดลองในดินใช้สารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ที่ระดับความเข้มข้น 0 และ 100 มิลลิกรัมโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ต้นก้างปลาสามารถสะสมโครเมียมทั้งหมดในราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 390.6, 61.5 และ 58.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ 100 มิลลิกรัมโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ต่อกิโลกรัมดิน และสะสมโครเมียมไตรวาเลนท์ที่ราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 291.4, 3.4 และ 3.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และต้นก้างปลามีการสะสมโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ในราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 99.2, 58 และ 55.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน

Lui et al. (2007) ทำการศึกษาการดูดดึงแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี โดยพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ 19 ชนิด ที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 0.5, 2.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่า พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำมีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี จากน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ โดยพืชทั้ง 19 ชนิด มีการดูดดึงมาไว้ในส่วนเหนือดินได้ 30 - 90 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าพืช *Monuchoria vaginalis* มีความสามารถในการสะสมแคดเมียมและตะกั่วมากที่สุด ส่วนพืช *Isachne globosa* มีความสามารถในการสะสมแคดเมียมและสังกะสี โดยพืช *Digitaria sanguinalis* และ *Fimbristylis miliacea* มีความสามารถในการสะสมสังกะสีมากที่สุด ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่า พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำสามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้

Rotkittikhun (2007) ทำการศึกษาการบำบัดดินที่ปนเปื้อนด้วยสารตะกั่วโดยใช้หญ้าชนิดต่างๆ พบว่า พืช *Microstegium ciliatum*, *Polygala umbonata* และ *Spermacoce mauritiana* มีค่าความเข้มข้นตะกั่วสูงมากทั้งในส่วนรากและส่วนต้น และจากการศึกษาการเจริญเติบโต ความทนทานและการดูดซับสารตะกั่วของหญ้า 2 ชนิด คือ *Thysanolaena maxima* (ตองกง) และ *Vetiveria zizanioides* (หญ้าแฝก) 4 กลุ่มพันธุ์ พบว่า ตองกงและหญ้าแฝกกลุ่มพันธุ์สุราษฎร์ธานีและสงขลามีความทนทานและสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีสารตะกั่วความเข้มข้นสูง

Marques et al. (2008) ศึกษาการสะสมสารหนู ตะกั่ว และนิกเกิล ด้วยพืช *Rubus ulmifolius* ที่ปลูกในบริเวณดินที่มีการปนเปื้อนสารหนู ตะกั่ว และนิกเกิล เท่ากับ 3,078, 1,400 และ 135 มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ โดยพบว่า *Rubus ulmifolius* มี

ความสามารถในการสะสมสารหนูในราก ลำต้น และใบ คือ 277-1,721, 30-133 และ 60-265 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าตะกั่วในราก ลำต้น และใบ มีการสะสมเท่ากับ 248-1,178, 35-133 และ 25-149 มิลลิกรัมของตะกั่วต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ส่วนนิกเกิลมีการสะสมในราก เท่ากับ 48-151 มิลลิกรัมของนิกเกิลต่อกิโลกรัมดิน โดยไม่พบในลำต้นและใบ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า รากมีการสะสมสารหนู ตะกั่ว และนิกเกิลสูงสุด และพืชชนิดนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสารหนู ตะกั่ว และนิกเกิลได้

Homyog (2008) ศึกษาการบำบัดดินที่ปนเปื้อนด้วยสารตะกั่วโดยใช้พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ โดยใช้พืช *Cyperus iria* กับ *Typha angustifolia* พบว่า พืชทั้งสองชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ดีโดยเฉพาะ *Cyperus iria* ที่ออกดอกและแตกต้นใหม่ และมีตะกั่วสะสมมากที่สุดบริเวณราก เท่ากับ 4,550 และ 6,383.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ของ *Cyperus iria* และ *Typha angustifolia* ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้นำ *Cyperus iria* มาศึกษาประสิทธิภาพการสะสมโลหะหนักสามชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี เทียบกับ *Cyperus flavidus* ในสภาวะไร้ดินเป็นระยะเวลา 15 วัน พบว่า พืชทั้งสองชนิดสามารถสะสมตะกั่วได้ดีที่สุด เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น โดยสะสมมากที่สุดบริเวณราก เท่ากับ 38,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใน *Cyperus iria* ส่วนใน *Cyperus flavidus* เท่ากับ 13,666.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

Tang et al. (2008) ศึกษาการสะสมตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม ในพืช *Arabis paniculata* ในบริเวณที่มีการปนเปื้อน ผลการศึกษาพบว่า มีการสะสมตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม ในลำต้นของ *Arabis paniculata* ดังนี้ 2,310, 20,800 และ 434 มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และการศึกษาในระบบไฮโดรโพนิกส์ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 0, 24, 48, 97, 193 และ 386 ไมโครโมลตะกั่ว สำหรับความเข้มข้นที่ 0, 153, 306, 612, 1,223 และ 2,447 ไมโครโมลสังกะสี และที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0, 9, 44, 89, 178 และ 267 ไมโครโมลแคดเมียม โดยพบว่า ตะกั่วมีการสะสมสูงสุดที่ระดับความเข้มข้น 386 ไมโครโมลตะกั่ว โดยมีการสะสมในลำต้น และในราก เท่ากับ 12,800 และ 33,900 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนสังกะสีมีการสะสมได้สูงสุดที่ระดับความเข้มข้น 1,223 ไมโครโมลสังกะสี ซึ่งสะสมในลำต้นและรากมากที่สุด เท่ากับ 17,300 และ 12,400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และแคดเมียมมีการสะสมได้สูงสุดที่ระดับความเข้มข้น 267 ไมโครโมลแคดเมียม โดยสะสมในลำต้น และราก คือ 6,000 และ 8,400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาในครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่า พืช *Arabis paniculata* มีความสามารถในการสะสม และเคลื่อนย้ายตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมจากรากไปสู่ลำต้นได้

2.7.2 งานวิจัยด้านการศึกษาสาร EDTA

Tambamroong (2002) ได้ทำการศึกษาการดูดดึงสารหนูที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้เผือกและบอน ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนูที่ปนเปื้อนในดิน 0, 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมดิน โดยในการศึกษาครั้งนี้ มีการนำ ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) มาใช้ร่วมด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมสารหนูในเผือกและบอน โดยเติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เก็บตัวอย่างทุก 20 วัน จนครบ 80 วัน ผลการศึกษาพบว่า เผือกและบอนมีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 100 และ 200 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมดิน และยังพบว่า มีการสะสมสารหนูในส่วนของรากมากที่สุด รองลงมา คือ หัว ก้านใบ และใบ ตามลำดับ นอกจากนี้การเติม EDTA สามารถเพิ่มการสะสมสารหนูในเผือกและบอนได้ โดยมีค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้นของสารหนู 400 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมดิน โดยพบในเผือก 40.34 กรัม และพบในบอน 46.79 กรัม ผลการทดลองสรุปได้ว่า เผือกและบอนมีความสามารถในการดูดดึงสารหนูได้

Ruley et al. (2005) ทำการศึกษาการดูดดึงตะกั่วด้วยพืช *Sesbania drummondii* ร่วมกับสารคีเลต พบว่า สารคีเลตช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่วในรากได้ดีกว่าลำต้น และพบว่า ชนิดของสารคีเลต มีผลต่อการดูดดึงตะกั่วในพืช *Sesbania drummondii* คือ EDTA > HDTA > DTPA > NTA > citric acid และเมื่อเปรียบเทียบชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตและไม่เติมสารคีเลต พบว่า ชุดการทดลองที่เติมาสารคีเลตสามารถดูดดึงตะกั่วมาสะสมในพืช *Sesbania drummondii* ได้ดีกว่าชุดที่ไม่เติมสารคีเลต ถึง 5 เท่า

Jean et al. (2007) ศึกษาการใช้สาร EDTA ร่วมกับการปลูกพืช *Datura innoxia* เพื่อดูดดึงโครเมียมและนิกเกิล พบว่า พืช *Datura innoxia* สามารถดูดดึงโครเมียมและนิกเกิลไปไว้ในส่วนของราก และเมื่อเติมสาร EDTA พืช *Datura innoxia* สามารถดูดดึงโครเมียมและนิกเกิลได้ดีกว่าชุดการทดลองที่ไม่เติมสาร EDTA

Wang et al. (2007) ศึกษาการใช้สาร EDTA เพื่อช่วยในการดูดดึงตะกั่วในดิน ด้วยพืช *Bidens maximowicziana* พบว่า พืช *Bidens maximowicziana* สามารถดูดดึงตะกั่วได้เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมสาร EDTA จาก 24.23 – 680.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็น 29.07 – 1,905.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งจากการวิจัยครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่า พืช *Bidens maximowicziana* เหมาะสมสำหรับนำมาช่วยในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินร่วมกับการใช้สาร EDTA

Li et al. (2008) ศึกษาผลของ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ต่อการดูดดึงตะกั่วโดยพืช *Typha orientalis* พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 300 มิลลิกรัม และเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลต่อลิตร พืช *Typha orientalis* สามารถดูดดึงตะกั่วได้เพิ่มขึ้น 91 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร พืช *Typha orientalis* สามารถดูดดึงตะกั่วได้เพิ่มมากขึ้น 52.3 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA กับชุดการทดลองที่ไม่เติมสาร EDTA พบว่า ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA สามารถดูดดึงตะกั่วมาสะสมในพืช *Typha orientalis* ได้มากกว่าชุดการทดลองที่ไม่เติมสาร EDTA

Tanhun (2008) ศึกษาการบำบัดตะกั่วด้วยต้นสาบเสือ (*Chromolaena odorata*) โดยทำการทดลองในดินที่ปนเปื้อนตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 200, 5,000 และ 100,000 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกิโลกรัมดิน ทำการศึกษาเป็นระยะเวลา 7 เดือน ผลการทดลอง พบว่า ต้นสาบเสือสามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกระดับความเข้มข้น และในแต่ละระดับความเข้มข้นมีการสะสมตะกั่วมากที่สุดในราก คือ 12.3, 652.4 และ 1,611.5 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ สำหรับการทดลองในน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว ได้แก่ 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ตะกั่วมีการสะสมในรากสูงสุด ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเติม EDTA เพื่อช่วยในการดูดดึง พบว่า รากและลำต้นมีการสะสมตะกั่วเพิ่มขึ้น ดังนั้นสรุปได้ว่า สาบเสือมีความสามารถในการนำไปใช้บำบัดดินและน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วได้ดี

Wongtanet and Parkpain (2008) ศึกษาความสามารถของพืช 3 ชนิด ได้แก่ ผักแว่น (*Hydrocotyle umbellata*) ต้นเฟิร์น (*Pityrogramma calomelanos*) และต้นใบเตย (*Pandanus amaryllifolius* Roxb.) ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และเปรียบเทียบการเติมและไม่เติมสาร EDTA การทดลองใช้ระยะเวลา 4 สัปดาห์ โดยพบว่า ตะกั่วสามารถสะสมในต้นผักแว่นได้มากที่สุด รองลงมาคือ ต้นเฟิร์น และต้นใบเตย มีค่าการสะสมเท่ากับ 10,600, 1,449 และ1,250 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งของพืช ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบการเติมและไม่เติมสาร EDTA พบว่า EDTA สามารถช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่ว และมีผลต่อการเคลื่อนย้ายของตะกั่วจากรากพืชไปสู่ลำต้นและใบได้เช่นกัน โดยผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า การสะสมตะกั่วในลำต้นและใบเพิ่มขึ้น ทั้งในผักแว่น ต้นเฟิร์น และต้นใบเตย คิดเป็น 80, 67 และ 32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้น ผักแว่นจึงเป็นพืชที่มีความสามารถในการนำมาบำบัดน้ำในบริเวณที่ปนเปื้อนตะกั่ว

Cho et al. (2009) ทำการศึกษาการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วโดยพืช green onions (*Allium fistulosum*) โดยมีการเติมสารคีเลต คือ EDTA เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วของต้น green onions ผลการศึกษา พบว่า การดูดดึงตะกั่วด้วย green onions มีปริมาณต่ำหากไม่ใส่ EDTA โดยตะกั่วพบมากในลำต้นที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 225 มิลลิกรัมของตะกั่วต่อกิโลกรัมดิน และพบว่า EDTA มีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในการดูดดึงตะกั่วในรากและใบ

Zhao et al. (2010) ทำการศึกษาผลของสารคีเลต 3 ชนิด ได้แก่ IDSA, EDDS และ EDTA ในการดูดดึงโลหะหนักร่วมกับการปลูกข้าวโพด (*Zea mays*) พบว่า ข้าวโพดมีการดูดดึงโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมสารคีเลต โดยสาร EDTA มีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วได้มากกว่าชุดควบคุมที่ไม่เติมสาร EDTA 2.3 เท่า และยังพบว่า สาร EDTA, EDDS และ IDSA มีประสิทธิภาพในการดูดดึงทองแดงได้มากกว่าชุดควบคุมที่ไม่เติมสารคีเลต 2.1, 1.6 และ 2.2 เท่า ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกบอนเขียว

1) เรือนเพาะชำ

2) บอนเขียว (*Colocasia esculenta* (L.) Schott)

3) ภาชนะปลูกเป็นถุงพลาสติกสีดำขนาด 7 x 14 นิ้ว สำหรับการทดลองในดิน

4) กระถางพลาสติกสีดำไม่มีรู มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 เซนติเมตร ด้านบนของภาชนะวางด้วยตะแกรงสีดำ สำหรับการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์

5) สารคีเลต คือ เอธิลลีนไดเอมีนเทตระเอซิติกเอซิด [ethylenediamine tetraaceticacid; (EDTA)] 6 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 1.0 , 2.0 และ 3.0 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม (400, 800 และ 1,200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในดิน) และ 0.01, 0.02 และ 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร (4, 8 และ 12 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำ)

6) เครื่องชั่งหยาบ 2 ตำแหน่ง

7) ป้ายแสดงระดับความเข้มข้นของสาร EDTA

8) ปากกาเคมี

9) ตะแกรงพยุงต้นพืช

10) กาลักน้ำ

11) ถุงพลาสติกใสอย่างหนา

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดิน และน้ำ

1) ถุงสำหรับเก็บตัวอย่าง

2) ฉลากสำหรับติดข้างถุงเก็บตัวอย่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) น้ำปราศจากไอออน (Deionize, DI)

4) ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำ

5) พลั่วตักดินหรือเสียม

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างบอนเขียว

1) ถุงสำหรับเก็บตัวอย่างพืช

2) มีดหรือกรรไกรตัดกิ่ง

3) ปากกาเคมี

3.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) เครื่องแก้วชนิดต่างๆ เช่น บีกเกอร์ (beaker) กระบอกตวง (cylinder) กรวยกรอง (funnel) แท่งแก้ว (glass rod) ขวดปรับปริมาตร (volumetric flask) ขวดรูปชมพู่ (erlyenmayer flask)

2) ตะแกรงร่อนดินขนาด 2 มิลลิเมตร

3) ขวดพลาสติกสำหรับใส่สารสกัดขนาด 60 มิลลิลิตร

4) ถุงซิป

5) กระดาษฟอย

6) พาราฟิล์ม

7) เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (atomic absorption spectrometer; AAs) รุ่น Analyst 800, Perkin Elmer

8) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (microwave digestion) รุ่น ETHOS SEL, MILESTONE

9) ตู้อบความร้อน (hot air oven) รุ่น ULE 500, MEMMERT

10) เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

11) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC)

12) เครื่องวัดศักยภาพออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP meter)

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

14) เครื่องบดตัวอย่างพืช (blender)

15) ตู้ดูดอากาศ (hood)

3.1.5 **สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง**

1) กรดไนตริกเข้มข้น (65% HNO_3)

2) กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (37% HCl)

3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% H_2O_2)

4) ตะกั่วคาร์บอเนต ($Pb(CO_3)_2$)

3.2 **สถานที่ทำการวิจัย**

3.2.1 **สถานที่เก็บตัวอย่างดินทดลอง**

ดินที่ใช้ในการวิจัย เก็บมาจากบริเวณห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

3.2.2 **สถานที่ทำการศึกษา**

การดำเนินการทดลองได้ปฏิบัติการในโรงเรือน โดยมีการคลุมหลังคาโรงเรือนด้วยพลาสติกใส และแสงสว่างสามารถส่องผ่านได้ ที่ชั้น 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทำการวิจัยในห้องปฏิบัติการชั้น 3 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วทั้งหมด ในตัวอย่างดิน น้ำและพืช

3.3 ระยะเวลาการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเริ่มปฏิบัติการในเดือนมกราคม 2552 ด้วยการค้นคว้าหาข้อมูล การทบทวนเอกสาร การวางแผนการวิจัย การเก็บตัวอย่าง การวิเคราะห์ผล วิจารณ์ และสรุปผลการวิจัย ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดกิจกรรมในการศึกษาการกำจัดตะกั่วในดิน

การศึกษา	วันที่
การเก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น	10 มีนาคม 2552
การเข้าพื้นที่ เพื่อนำดินมาทำการทดลอง	23 เมษายน 2552
การจัดเตรียมโรงเรือน บอนเขียว และดินสำหรับปลูกบอนเขียว	21 กรกฎาคม 2552
การปลูกบอนเขียวลงดิน	25 สิงหาคม 2552
เติมสาร EDTA ลงในดิน	24 กันยายน 2552
เก็บตัวอย่างดินและบอนเขียว ครั้งที่ 1	26 ตุลาคม 2552
เก็บตัวอย่างดินและบอนเขียว ครั้งที่ 2	24 พฤศจิกายน 2552
เก็บตัวอย่างดินและบอนเขียว ครั้งที่ 3	24 ธันวาคม 2552
เก็บตัวอย่างดินและบอนเขียว ครั้งที่ 4	26 มกราคม 2553
เก็บตัวอย่างดินและบอนเขียว ครั้งที่ 5	24 กุมภาพันธ์ 2553
การวิเคราะห์ตัวอย่าง	ตุลาคม 2552 - เมษายน 2553

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

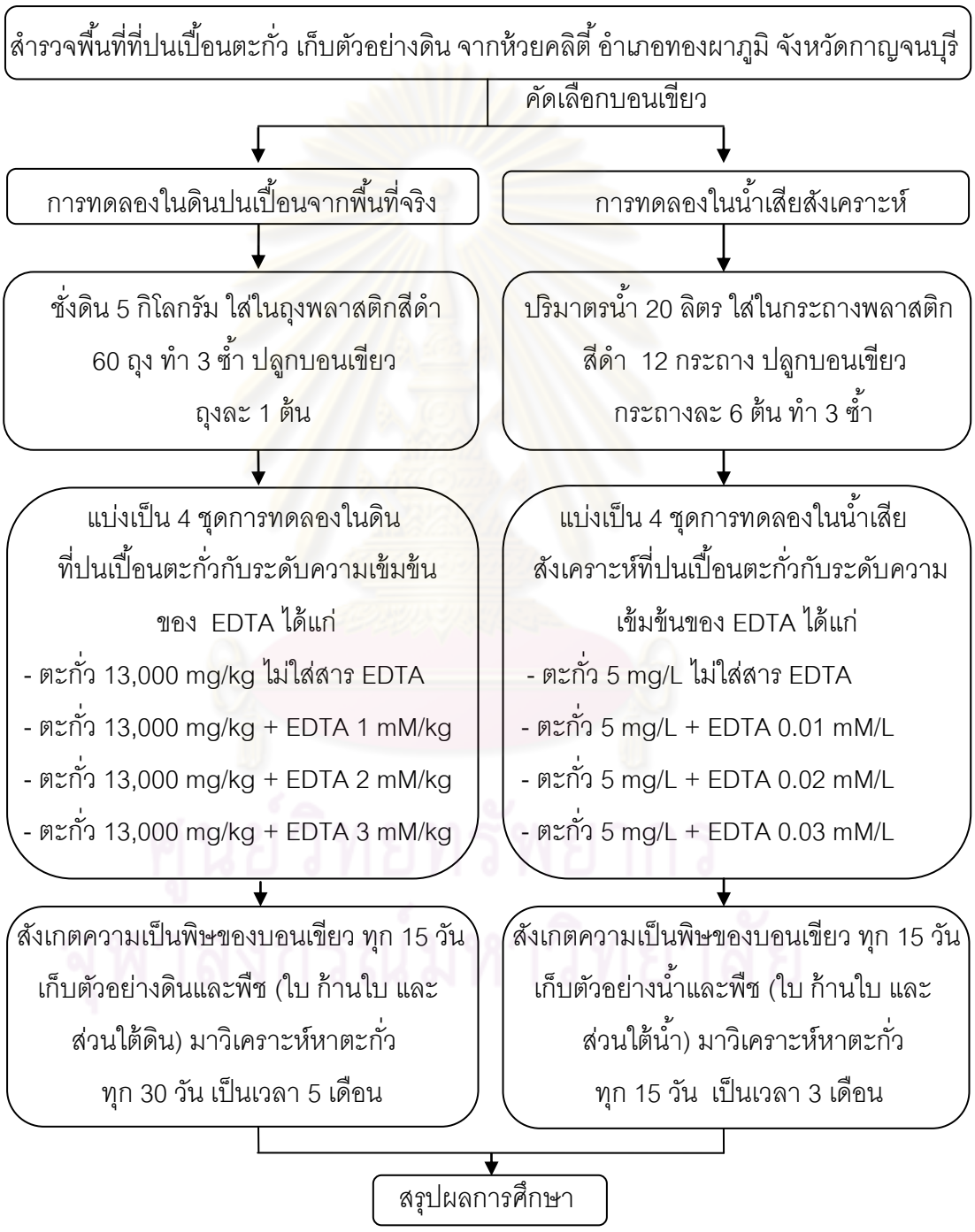
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดกิจกรรมในการศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

การศึกษา	**วันที่**
การจัดเตรียมโรงเรือน บอนเขียว และน้ำสำหรับปลูกบอนเขียว	6 มกราคม 2553
การปลูกบอนเขียวลงในน้ำเสียสังเคราะห์	7 กุมภาพันธ์ 2553
เติมสาร EDTA ลงในน้ำเสียสังเคราะห์	7 มีนาคม 2553
เก็บตัวอย่างน้ำและบอนเขียว ครั้งที่ 1	22 มีนาคม 2553
เก็บตัวอย่างน้ำและบอนเขียว ครั้งที่ 2	5 เมษายน 2553
เก็บตัวอย่างน้ำและบอนเขียว ครั้งที่ 3	19 เมษายน 2553
เก็บตัวอย่างน้ำและบอนเขียว ครั้งที่ 4	4 พฤษภาคม 2553
เก็บตัวอย่างน้ำและบอนเขียว ครั้งที่ 5	19 พฤษภาคม 2553
เก็บตัวอย่างน้ำและบอนเขียว ครั้งที่ 6	3 มิถุนายน 2553
การวิเคราะห์ตัวอย่าง	มีนาคม - กรกฎาคม 2553

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ส่วนที่ทำการทดลองในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว และ 2) ส่วนที่ทำการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการดำเนินการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินการศึกษา

3.4.1 การใช้พืชในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน

1) การเตรียมดิน

ทำการขุดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว จากบริเวณห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี มาทำการวิเคราะห์หาฟอร์มของตะกั่วที่อยู่ในดิน พบว่า ตะกั่วที่อยู่ในดินอยู่ในรูปตะกั่วคาร์บอเนต และนำดินอีกส่วนมาผึ่งให้แห้ง เพื่อนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติของดิน (soil properties) พารามิเตอร์ดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ความชื้น (moisture content) เนื้อดิน (soil texture) อินทรียวัตถุ (organic matter) ค่าประจุการนำไฟฟ้า (CEC) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) และปริมาณตะกั่วทั้งหมด (TPb)

2) การเตรียมภาชนะปลูก

ชั่งดินใส่ถุงพลาสติกสีดำ ขนาด 7 x 14 นิ้ว ถุงละ 5 กิโลกรัม จำนวน 60 ถุง แบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง คือ ชุดที่ 1 ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ชุดที่ 2 ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ชุดที่ 3 ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และ ดินชุดที่ 4 ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3) การเตรียมพืช

นำบอนเขียวจากพื้นที่ที่ปนเปื้อนตะกั่ว มาวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในส่วนต่างๆ ของบอนเขียว พบว่า ส่วนเหนือดิน (ใบ และก้านใบ) และ ส่วนใต้ดิน มีปริมาณตะกั่วสะสม เท่ากับ 28.78, 104.42 และ 1,070.89 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ พืชที่ใช้ในทดลอง คือ บอนเขียว (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) ได้มาจากบริเวณที่ไม่มีการปนเปื้อนตะกั่ว โดยคัดเลือกต้นที่มีขนาด และความสูงใกล้เคียงกันสูงประมาณ 15 - 20 เซนติเมตร จำนวน 60 ต้น ปลูกและดูแลรักษาในเรือนเพาะชำ เป็นเวลา 20 - 30 วัน หลังจากนั้นคัดเลือกต้นที่มีขนาดและความแข็งแรงใกล้เคียงกัน ย้ายลงปลูกในถุงพลาสติกที่ใส่ดินเตรียมไว้ และทำการรดน้ำทุก 2 วัน โดยไม่มีการใส่ปุ๋ยตลอดการทดลอง

4) การเตรียมสารประกอบ EDTA

การเตรียมสารประกอบ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1, 2 และ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยให้ได้ตามสัดส่วนความเข้มข้นในดินเท่ากับสารประกอบ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 400, 800 และ 1,200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสาร EDTA ที่ใส่ลงในดิน

ความเข้มข้นของสาร EDTA	ปริมาณสาร EDTA (กรัมต่อกิโลกรัมดิน)
EDTA 1 มิลลิโมล	0.37
EDTA 2 มิลลิโมล	0.77
EDTA 3 มิลลิโมล	1.12

หมายเหตุ : วิธีคำนวณดังภาคผนวก ก

5) การดำเนินการทดลอง

ชั่งดิน 5 กิโลกรัม ใส่ภาชนะพลาสติกสีดำ จำนวน 60 กระถาง แต่ละกระถางหุ้มถุงพลาสติกอย่างหนา เพื่อรองรับน้ำที่ไหลออกมาหลังจากรดน้ำพืช นำต้นบอนที่ทำการคัดเลือกขนาดที่เท่าๆ กัน จำนวน 60 ต้น ปลูกลงในกระถางที่เตรียมไว้ กระถางละ 1 ต้น ดูแลรดน้ำทุกวัน เมื่อครบระยะเวลา 30 วัน เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0, 1, 2, และ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ลงไปในแต่ละกระถาง ประกอบด้วยชุดการทดลอง ดังนี้ ชุดที่ 1 ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จำนวน 15 กระถาง ชุดที่ 2 ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและ EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม จำนวน 15 กระถาง ชุดที่ 3 ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและ EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม จำนวน 15 กระถาง และดินชุดที่ 4 ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อน 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและ EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม จำนวน 15 กระถาง หลังจากนั้นทำการรดน้ำ และดูแลรักษา ในกรณีที่มีน้ำล้นหรือไหลออกมาอยู่ในถุงพลาสติกชั้นนอก ได้ทำการดึงน้ำกลับมาใส่กระถางใหม่ด้วยกาลักน้ำ และตลอดการทดลองไม่มีการใส่ปุ๋ย

3.4.2 การใช้พืชในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำ

1) การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ปริมาณตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำบริเวณห้วยคลิตี้ อยู่ในรูปสารละลายตะกั่วคาร์บอเนต ($Pb(CO_3)_2$) มีค่าเท่ากับ 0.01 - 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (ศูนย์ศึกษากะเหรี่ยงและ

พัฒนา, 2546) ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วปนเปื้อน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากหากบอนเขียวสามารถเจริญเติบโตขึ้นได้ เมื่อนำไปใช้ในสถานที่จริง บอนเขียวก็จะสามารถเจริญเติบโตได้เช่นกัน ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง ได้จากการเตรียมสารละลายตะกั่วคาร์บอเนต ($Pb(CO_3)_2$)

2) การเตรียมภาชนะปลูก

การทดลองใช้กระถางพลาสติกสีดำไม่มีรู มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 เซนติเมตร ด้านบนของภาชนะวางด้วยตะแกรง มีรูให้พืชขึ้นได้ ภาชนะ 1 ใบ ใช้ปริมาตรน้ำ 20 ลิตร โดยมีจำนวนกระถางพลาสติก 12 กระถาง แบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดที่ 1 น้ำที่มีสารละลายตะกั่วผสมอยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ชุดที่ 2 น้ำที่มีสารละลายตะกั่วผสมอยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร ชุดที่ 3 น้ำที่มีสารละลายตะกั่วผสมอยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดที่ 4 น้ำที่มีสารละลายตะกั่วผสมอยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3) การเตรียมพืช

พืชที่ใช้คือ บอนเขียว (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) คัดเลือกต้นที่มีขนาดและความสูงใกล้เคียงกันสูงประมาณ 15 – 20 เซนติเมตร จำนวน 72 ต้น ปลูกในเรือนเพาะชำ ดูแลรักษาเป็นเวลา 20 - 30 วัน หลังจากนั้นคัดเลือกต้นที่มีขนาดและความแข็งแรงใกล้เคียงกันย้ายลงปลูกในสารละลายตะกั่วที่ใส่ในกระถางพลาสติกที่เตรียมไว้

4) การเตรียมสารประกอบตะกั่ว

การเตรียมสารประกอบตะกั่ว โดยชั่งสารประกอบตะกั่วคาร์บอเนต ($Pb(CO_3)_2$) ให้ได้ตามสัดส่วนความเข้มข้นของตะกั่ว ในน้ำที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) โดยคำนวณจากปริมาตรน้ำ 20 ลิตรต่อภาชนะ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปริมาณสารประกอบตะกั่วที่ใส่ลงในน้ำเสียสังเคราะห์

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณสารประกอบตะกั่วคาร์บอเนต ($Pb(CO_3)_2$) (กรัมต่อภาชนะปลูก)
5	0.12

หมายเหตุ : วิธีคำนวณดังภาคผนวก ก

5) การเตรียมสารประกอบ EDTA

การเตรียมสารประกอบ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.01, 0.02 และ 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร โดยให้ได้ตามสัดส่วนความเข้มข้นในน้ำเท่ากับสารประกอบ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 3.72, 7.44 และ11.16 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ปริมาณสารประกอบ EDTA ที่ใส่ลงในน้ำเสียสังเคราะห์

ความเข้มข้นของสารประกอบ EDTA	ปริมาณสารประกอบ EDTA (กรัมต่อกิโลกรัมดิน)
EDTA 0.01 มิลลิโมล	0.0037
EDTA 0.02 มิลลิโมล	0.0074
EDTA 0.03 มิลลิโมล	0.0111

หมายเหตุ : วิธีคำนวณดังภาคผนวก ก

6) การดำเนินการทดลอง

นำต้นบอนเขียวที่ทำการคัดเลือกขนาดที่เท่าๆ กัน จำนวน 72 ต้น ปลูกลงในดินดูแลรดน้ำทุกวัน เมื่อครบระยะเวลา 30 วัน นำบอนเขียวมาปลูกลงในภาชนะพลาสติกสีดำไม่มีรู มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 เซนติเมตร ด้านบนของภาชนะวางด้วยตะแกรง มีรูให้พืชขึ้นได้ 6 ต้นต่อกระถาง จำนวน 12 กระถาง โดยแต่ละกระถางใส่น้ำ 20 ลิตร เติมสารประกอบตะกั่วคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรทุกกระถาง ดูแลรักษา เมื่อครบระยะเวลา 30 วัน ทำการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0, 0.01, 0.02, และ 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร ลงไปในแต่ละกระถาง ประกอบด้วยชุดการทดลอง ดังนี้ ชุดที่ 1 น้ำที่มีสารละลายตะกั่วผสมอยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 3 กระถาง ชุดที่ 2 น้ำที่มีสารละลายตะกั่วผสมอยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรและ EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร จำนวน 3 กระถาง ชุดที่ 3 น้ำที่มีสารละลายตะกั่วผสมอยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรและ EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร จำนวน 3 กระถาง และชุดที่ 4 น้ำที่มีสารละลายตะกั่วผสมอยู่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรและ EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร จำนวน 3 กระถาง

3.5 การเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.5.1 การเก็บตัวอย่างดิน โดยทำการเก็บตัวอย่างดินทุก 30 วัน เป็นเวลา 5 เดือน นำตัวอย่างดินมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำดินไปย่อยด้วยวิธีการของ USEPA 3052 (USEPA, 1996) โดยการย่อยด้วยกรด (acid digestion) ด้วยเครื่องไมโครเวฟ (microwave

digestion) และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (atomic absorption spectrometer ; AAs)

3.5.2 การเก็บตัวอย่างน้ำ โดยเก็บตัวอย่างน้ำทุก 15 วัน เป็นเวลา 3 เดือน นำน้ำไปย่อยด้วยวิธีการของ USEPA 3051 (USEPA, 1998) โดยการย่อยด้วยกรด (acid digestion) ด้วยเครื่องไมโครเวฟ (microwave digestion) และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (atomic absorption spectrometer ; AAs)

3.5.3 การเก็บตัวอย่างพืช สำหรับการทดลองในดินเก็บทุก 30 วัน เป็นเวลา 5 เดือน ในส่วนของการทดลองในน้ำเก็บทุก 15 วัน เป็นเวลา 3 เดือน นำต้นบอนเขียวมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำ 3 - 4 ครั้ง และล้างด้วยน้ำกลั่นครั้งสุดท้าย แล้วผึ่งในที่ร่มประมาณ 2 - 3 ชั่วโมง แล้วตัดแยกเป็น 3 ส่วน คือ ใบ ก้านใบ และลำต้นใต้ดิน นำมาชั่งน้ำหนักสด จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง โดยแยกส่วน จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดและนำไปย่อยด้วยวิธีการของ USEPA 3052 (USEPA, 1996) โดยการย่อยด้วยกรด (acid digestion) ด้วยเครื่องไมโครเวฟ (microwave digestion) และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (atomic absorption spectrometer ; AAs)

3.5.4 การสังเกตความเป็นพิษของบอนเขียว และการบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่

- การสังเกตอาการ หรือการแสดงความเป็นพิษของบอนเขียว เช่น ใบเหลือง ใบซีด ใบเหี่ยว ใบไหม้ และอื่นๆ เป็นต้น

- การวัดความสูงของก้านใบ ทุกๆ 15 วัน (สำหรับการทดลองในน้ำปนเปื้อนสารตะกั่ว) และทุกๆ 30 วัน (สำหรับการทดลองในดินปนเปื้อน)

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการดูดดึงและสะสมตะกั่ว ได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้ ANOVA และ duncan's new multiple range test (DMRT) โดยการวิเคราะห์ทางสถิติดังกล่าวนั้นได้ปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปคือ statistical package for the social sciences (SPSS)

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

งานวิจัยในครั้งนี้ แบ่งการทดลอง เป็น 2 ชุดการทดลอง คือ 1) ชุดการทดลองในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว และ 2) ชุดการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนตะกั่ว โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

4.1 การทดลองในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินทดลอง

ดินที่ใช้ในการทดลอง พบว่า ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย (ตารางที่ 4.1) โดยดินมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 6.5 ซึ่งถือได้ว่าเป็นดินกรดเล็กน้อย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) ซึ่งพืชแต่ละชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ดีในระดับความเป็นกรด-ด่างของดินที่แตกต่างกัน ค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีค่าเท่ากับ 0.210 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร (dS/m) แสดงให้เห็นว่าดินไม่มีความเค็มที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพืช ซึ่งค่ามาตรฐานของดินที่มีความเค็มและเป็นพิษ ต้องมีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 4 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร (dS/m) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2544) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (OM) มีค่าเท่ากับ 5.84 เปอร์เซ็นต์ จัดได้ว่าดินมีปริมาณอินทรียวัตถุสูงมาก เพราะโดยปกติดินที่ดีควรมีค่าอินทรียวัตถุมากกว่า 1.5 เปอร์เซ็นต์ (ชัยพฤกษ์ สุวรรณรัตน์, 2536)

4.1.2 ลักษณะทางกายภาพ เคมี และปริมาณการสะสมตะกั่วในดินทดลอง

1) ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน (pH)

ผลการศึกษาพบว่า หลังทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120 และ 150 วัน ค่าความเป็นกรด-ด่างของทุกชุดการทดลอง อยู่ในช่วง 6.5 – 7.9 (ตารางที่ 4.2) ซึ่งดินมีค่าเป็นด่าง (ชัยพฤกษ์ สุวรรณรัตน์, 2536) โดยพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินในทุกชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารคีเลตรวมตัวกับแคตไอออนของตะกั่วในดิน ส่งผลให้พืชดูดดึงตะกั่วในสารละลายดินมากขึ้น และส่งผลให้เกิดไฮดรอกไซด์ในสารละลายดินเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เมื่อไฮดรอกไซด์ในดินเพิ่ม ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้นด้วย (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544) โดยสอดคล้องกับ Lee et al. (1998) ที่ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วในดิน พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างในดินเพิ่มขึ้นจาก 8.0 เป็น 8.5

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติของดิน	ค่าที่วิเคราะห์ได้
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	6.5
ดินทราย (%, w/w)	48.8
ดินทรายแป้ง (%, w/w)	26.6
ดินเหนียว (%, w/w)	24.6
เนื้อดิน (Soil Texture)	ดินร่วนเหนียวปนทราย
ค่าการนำไฟฟ้าที่ 25 °C (dS m^{-1})	0.21
อินทรียวัตถุ (%)	5.84
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (c molc kg-1)	22.4
ไนโตรเจนทั้งหมด (%)	0.292
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (ppm)	88
โพแทสเซียมที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ (ppm)	192
ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน (ppm)	13,000

ตารางที่ 4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน

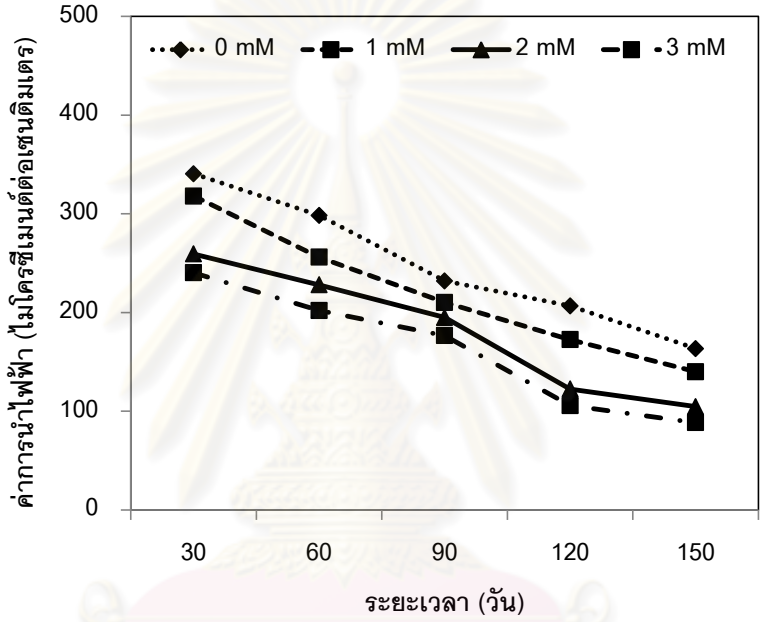
ความเข้มข้นของ EDTA	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (วัน)				
(มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน)	30	60	90	120	150
0	6.8^{a}±0.1	6.8^{a}±0.1	6.9^{a}±0.1	7.5^{b}±0.2	7.7^{b}±0.1
1	6.5^{a}±0.1	7.1^{b}±0.1	7.3^{c}±0.1	7.7^{d}±0.1	7.8^{d}±0.2
2	7.0^{a}±0.2	7.2^{ab}±0.1	7.4^{bc}±0.1	7.5^{c}±0.3	7.9^{d}±0.2
3	7.0^{a}±0.5	7.0^{a}±0.1	7.3^{ab}±0.1	7.6^{bc}±0.1	7.8^{c}±0.1

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอนบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2) ค่าการนำไฟฟ้า (EC)

ค่าการนำไฟฟ้าของดินหลังทำการเก็บตัวอย่างดิน ที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120 และ 150 วัน พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของดิน ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างดิน 30 วัน มีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุด เท่ากับ 340.5, 318, 259.3 และ 240.3 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร

EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ (รูปที่ 4.1) และพบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างดินเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณตะกั่วในดินมีความเข้มข้นลดลง โดยอาจเกิดจากตะกั่วบางส่วนที่อยู่ในสารละลายดินเข้าดูดยึดกับคอลลอยด์ของดิน (ทิพวรรณ พจนาภรณ์, 2552) และอาจเกิดจากพืชเจริญเติบโตและดูดไอออนชนิดต่างๆ ไปใช้ หรือสูญหายจากปัจจัยอื่นๆ ซึ่งไอออนสำคัญที่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง คือ ตะกั่ว แมกนีเซียม โซเดียม คลอไรด์ เป็นต้น (สรสิทธิ์ วัชโรทยาน, 2513)



รูปที่ 4.1 ค่าการนำไฟฟ้าของดินที่ระยะเวลาต่างๆ

3) ผลของสาร EDTA แต่ละระดับความเข้มข้นต่อการสะสมตะกั่วในดิน

ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในดิน (ตารางที่ 4.3) ภายหลังการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120 และ 150 วัน พบว่า ปริมาณการสะสมตะกั่วในดิน ของชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วร่วมกับเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วร่วมกับเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีการสะสมของตะกั่วทั้งหมดในดินลดลง เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นโดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P< 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อใส่สาร EDTA สามารถช่วยทำให้พืชเจริญเติบโตและดูดดึงตะกั่วมาไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tambamroong (2002) ที่ทำการทดลอง EDTA กับเผือกและบอน โดยพบว่า EDTA สามารถช่วยทำให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วได้เพิ่มขึ้น และ Lim et al. (2004) ที่ทำการศึกษาการใช้พืช *Brassica juncea* ใน

การบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วพบว่า พืช *Brassica juncea* สามารถดูดดึงตะกั่วได้เพิ่มขึ้นเมื่อเติมสาร EDTA

ตารางที่ 4.3 ปริมาณการสะสมตะกั่วในดิน

ความเข้มข้นของ EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณการสะสมตะกั่วในดิน (วัน) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)				
	30	60	90	120	150
0	12504±1084	12207±1140	11746±1245	11151±1079	10912±838
1	12448±942	12116±1253	11517±1164	10932±603	10470±1414
2	12125^{c}±1144	11656^{bc}±1031	11174^{abc}±866	10558^{ab}±259	10045^{a}±121
3	12057^{b}±924	11400^{ab}±1054	10812^{ab}±1631	9954^{a}±763	9624^{a}±322

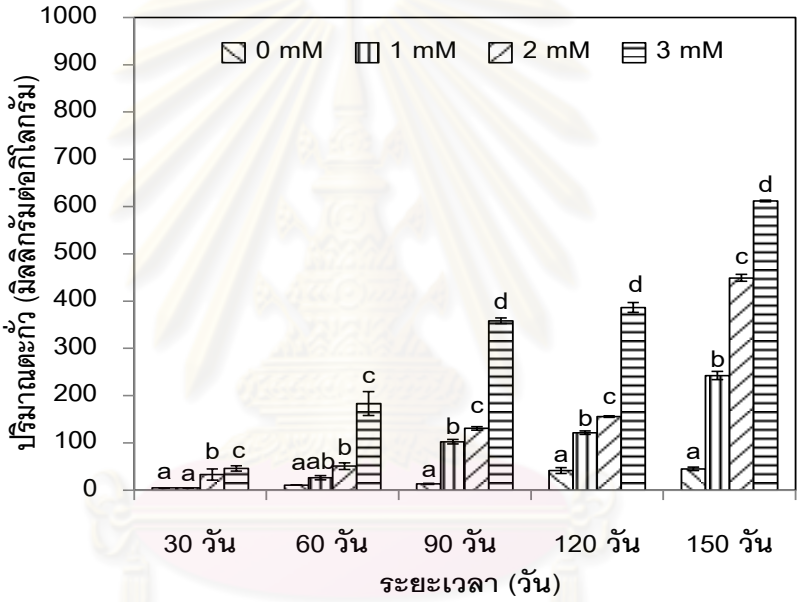
หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอนบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.1.3 ผลของการเติมสาร EDTA แต่ละระดับความเข้มข้นต่อการดูดดึงตะกั่วของบอนเขียว

1) ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ใบ และก้านใบ) ของบอนเขียว

ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ใบ) ของบอนเขียว พบว่า ทุกชุดการทดลองมีปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ใบ) น้อยที่สุด ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน (รูปที่ 4.2) โดยที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ที่ 0, 1, 2 และ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 4.90, 4.89, 32.89 และ 45.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น พบว่า ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ใบ) เพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ใบ) มากที่สุดในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 150 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 611.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อเปรียบเทียบชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วแต่ไม่ใส่สาร EDTA กับชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA พบว่าชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA บอนเขียวมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดมาสะสมในส่วนเหนือดิน (ใบ) ได้ดีกว่าชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วแต่ไม่ใส่สาร EDTA ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เนื่องจากสาร EDTA ที่เติม

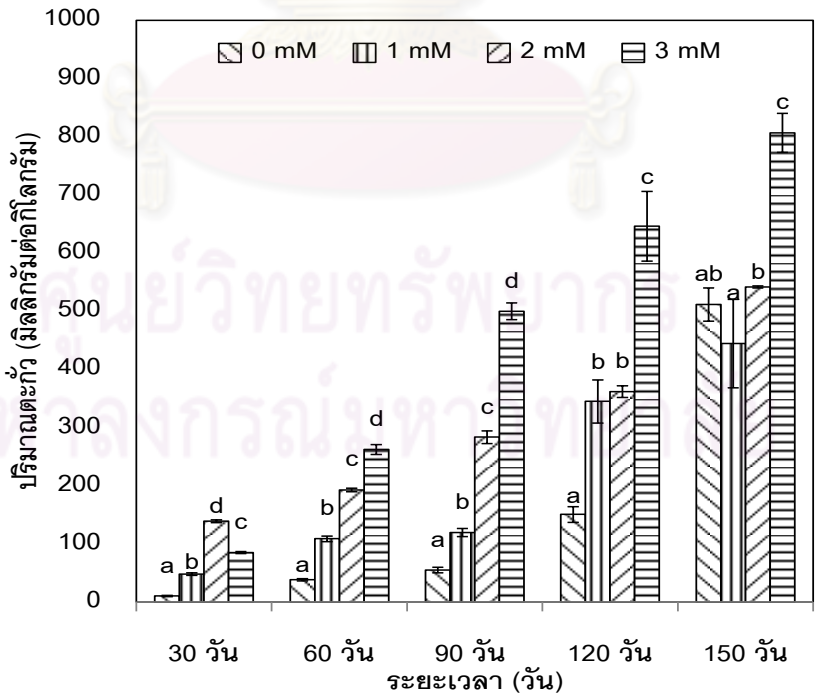
ลงไปในดินสามารถรวมตัวกับสารตะกั่วและอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อบอนเขียว จึงมีผลให้บอนเขียวมีความสามารถในการสะสมตะกั่วทั้งหมดไว้ในใบได้มากขึ้น สอดคล้องกับ Wongtanet and Parkpain (2008) ที่ศึกษาการใช้ ผักแว่น ต้นเฟิร์น และต้นใบเตย ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารตะกั่ว ทั้งกรณีที่มีและไม่มีการใช้สาร EDTA ในระบบ พบว่า การเติมสาร EDTA ทำให้ผักแว่น ต้นเฟิร์น และต้นใบเตย สามารถดูดดึงและเคลื่อนย้ายตะกั่วไปสู่ใบได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ใส่สาร EDTA และจากการศึกษาของ Zaier et al. (2010) ที่ทำการศึกษา การใช้พืช *Brassica napus* ร่วมกับสาร EDTA ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสารตะกั่ว สังกะสี และแมงกานีส พบว่า พืช *Brassica napus* สามารถดูดดึงตะกั่ว สังกะสี และแมงกานีสได้เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเติมสาร EDTA ร่วมด้วย



รูปที่ 4.2 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ใบ) ของบอนเขียว

ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ) ของบอนเขียว จากผลการศึกษาปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ) (รูปที่ 4.3) พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ) น้อยที่สุด เท่ากับ 10.34, 48.10, 139.04 และ 85.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณการสะสมตะกั่วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ) มากที่สุด ในชุดการทดลองที่ดิน

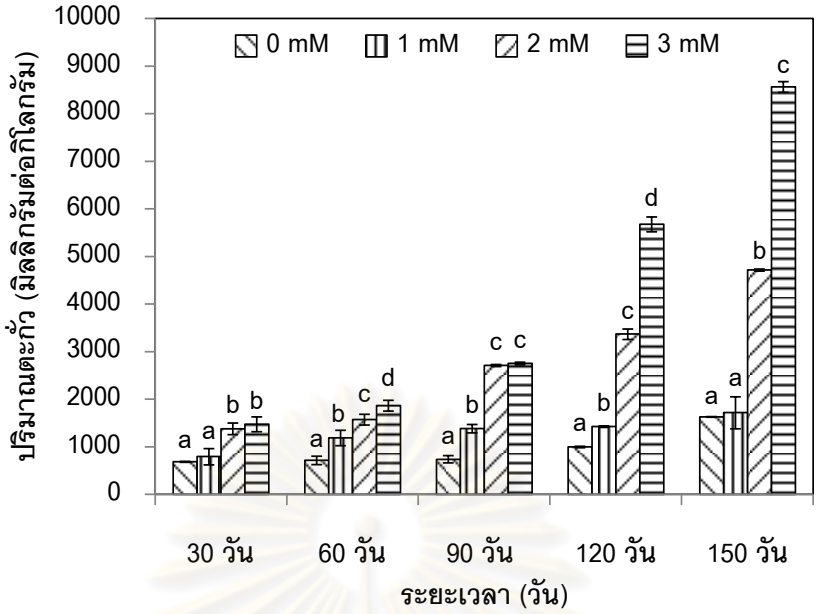
ปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 150 วัน มีค่าเท่ากับ 806.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ยังพบว่า ทุกระดับความเข้มข้นของ สาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วแต่ไม่ใส่สาร EDTA มีปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดไว้ในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ) น้อยกว่าชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง เนื่องจากสาร EDTA ที่ใส่ลงไปในดิน สามารถรวมตัวกับสารตะกั่ว และอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช จึงมีผลทำให้พืชมีความสามารถในการสะสมตะกั่วได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. (2007) ได้ทำการศึกษาการใช้ EDTA ช่วยในการดูดดึงตะกั่วในดินด้วยพืช *Bidens maximowicziana* พบว่า เมื่อใส่ EDTA ลงไปในดิน ทำให้พืชสามารถดูดดึงตะกั่วในดินได้เพิ่มมากขึ้นจาก 24.23 – 680.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไปเป็น 29.07 – 1,905.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสอดคล้องกับการศึกษาของ Lai et al. (2003) พบว่า พืช rainbow pink และ vetiver grass สามารถดูดดึงแคดเมียมและตะกั่วไปสะสมในลำต้นได้เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเติมสาร EDTA เช่นเดียวกับ ทิพวรรณ และพันธวัศ (2552) ศึกษาผลของ EDTA และ EDDS ต่อการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้สับปะรด พบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสารคีเลต สับปะรดมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วมาสะสมในส่วนเหนือดินได้เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต



รูปที่ 4.3 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ) ของบอนเขียว

2) ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของบอนเขียว

การดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของบอนเขียว ผลการศึกษาปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดิน (รูปที่ 4.4) พบว่า ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วแต่ไม่ใส่สาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน มีค่าปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดของบอนไปไว้ในส่วนใต้ดินน้อยที่สุด เท่ากับ 684.68, 793.01, 1,378.61 และ 1,473.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับความเข้มข้นของ EDTA และเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น พบว่า ปริมาณการดูดดึงตะกั่วในส่วนใต้ดินเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับ Jampanil (2000) พบว่าประสิทธิภาพการดูดดึงสารหนูมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยสะสมไว้ในส่วนใต้ดินมากที่สุด การศึกษาครั้งนี้ยังพบว่า ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าการสะสมตะกั่วในส่วนใต้ดินมากที่สุดเท่ากับ 8,561.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 150 วัน แสดงให้เห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถเพิ่มปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดของบอนเขียวไปไว้ในส่วนใต้ดินได้มากกว่า 5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วแต่ไม่ใส่ EDTA โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการเติม EDTA ลงไปในดิน สามารถช่วยทำให้ EDTA จับตัวกับไอออนของตะกั่วด้วยปฏิกิริยาคีเลตชัน (chelation) ซึ่งทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่ว โดยอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช จึงง่ายต่อการดูดดึงของส่วนใต้ดินและนำไปสะสมในส่วนต่างๆ ของบอนเขียวได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jean et al. (2008) ที่ได้ทำการศึกษาการใช้ EDTA ร่วมกับการปลูกพืช *Datura innoxia* เพื่อดูดดึงโครเมียมและนิกเกิล โดยพบว่า พืชสามารถดูดดึงโครเมียมและนิกเกิลไปไว้ในส่วนของราก เมื่อใส่สาร EDTA และสามารถดูดดึงได้มากกว่าชุดการทดลองที่ไม่ใส่สาร EDTA และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ruley et al. (2005) ที่ทำการศึกษาการดูดดึงตะกั่ว ด้วยพืช *Sesbania drummondii* โดยพบว่า พืชสามารถดูดดึงตะกั่วมาสะสมในลำต้นได้เพิ่มขึ้นถึง 5 เท่า เมื่อเทียบกับการปลูกพืชโดยไม่ใส่สารคีเลต

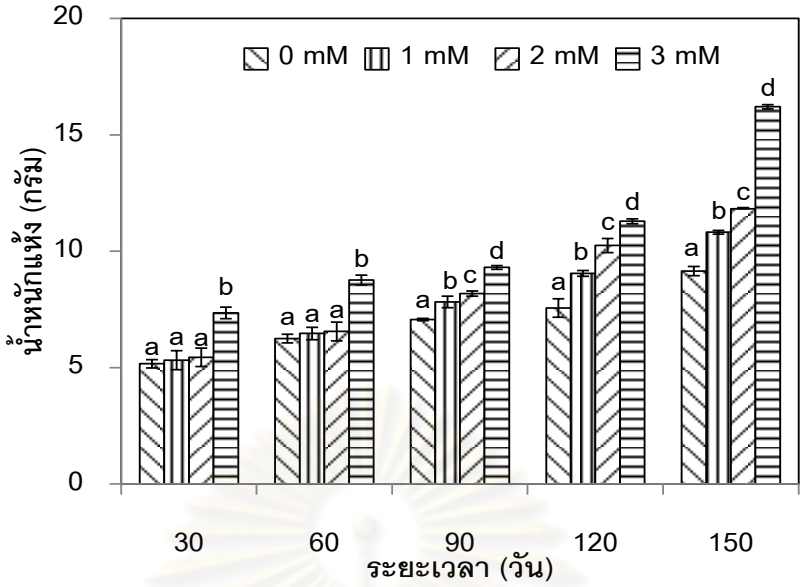


รูปที่ 4.4 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของบอนเขียว

4.1.4 ผลของการเติมสาร EDTA แต่ละระดับความเข้มข้นต่อการเจริญเติบโต และความเป็นพิษของบอนเขียว

1) น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดิน (ใบ และก้านใบ) ของบอนเขียว

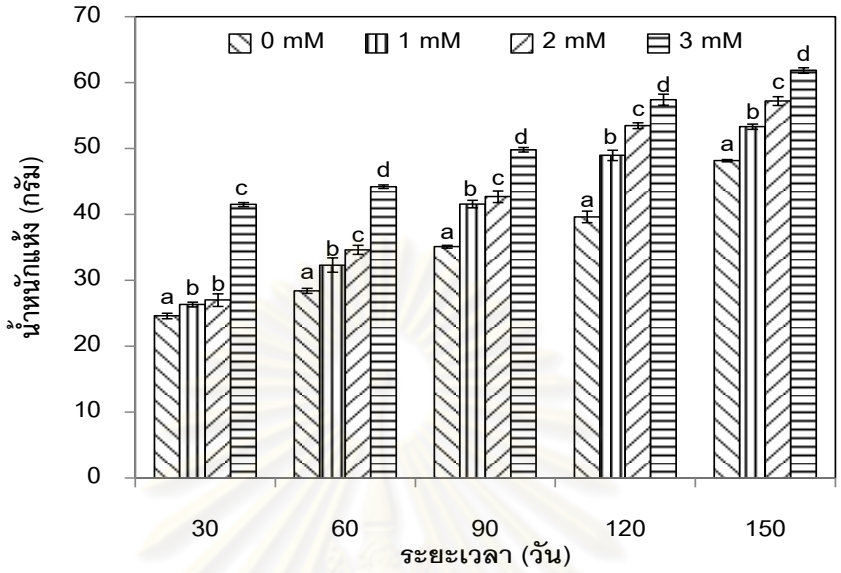
การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนเหนือดิน (ใบ) พบว่า ทุกชุดการทดลอง บอนเขียวมีน้ำหนักแห้งน้อยที่สุดที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน (รูปที่ 4.5) โดยมีค่าเท่ากับ 5.16, 5.32, 5.44 และ 7.35 กรัม ตามลำดับความเข้มข้นของสาร EDTA ที่ 0 ,1, 2 และ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และยังพบว่า บอนเขียวมีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง โดยน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดิน (ใบ) ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 150 วัน มีน้ำหนักแห้งมากที่สุด ในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เท่ากับ 16.20 กรัม ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยมีค่าเท่ากับ 9.15, 10.82 และ 11.82 กรัม ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก สาร EDTA ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของบอนเขียว แต่ส่งผลให้บอนเขียวมีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu et al. (2004) ที่ทำการศึกษา การใช้ผักกาดเขียวปลี ร่วมกับการเติมสาร EDTA พบว่า สาร EDTA ไม่มีความเป็นพิษต่อพืชแต่ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นตามปกติ



รูปที่ 4.5 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนเหนือดิน (ใบ)

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ) ของบอนเขียว พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 30 วัน บอนเขียวมีน้ำหนักแห้งน้อยที่สุด (รูปที่ 4.6) ที่ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เท่ากับ 24.59, 26.32, 26.99 และ 41.51 กรัม ตามลำดับของชุดการทดลองดังกล่าว และเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น พบว่า น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ) ของบอนเขียวเพิ่มขึ้น โดยมีค่ามากที่สุดที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 150 วัน ในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เท่ากับ 61.85 กรัม นอกจากนี้ยังพบว่า ทุกระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA น้ำหนักแห้งของส่วนเหนือดิน (ก้านใบ) มีค่าน้อยกว่าชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA ที่ทุกระดับความเข้มข้น โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Turgut et al. (2004) ที่ศึกษาผลของ EDTA ในการดูดดึงโลหะหนักด้วยพืช *Helianthus annuus* ที่เจริญเติบโตในดินบริเวณ Ohio, New maxico และ Colobia พบว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เพิ่มขึ้น น้ำหนักแห้งในลำต้นของพืช *Helianthus annuus* เพิ่มขึ้น โดยเพิ่มมากที่สุดที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 0.3 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และ Neugschwandther et al. (2007) ศึกษาการดูดดึงตะกั่ว และแคดเมียม ที่ปนเปื้อนในดินพื้นที่การเกษตร โดยใช้ข้าวโพด (*Zea mays*) ร่วมกับการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0, 3,

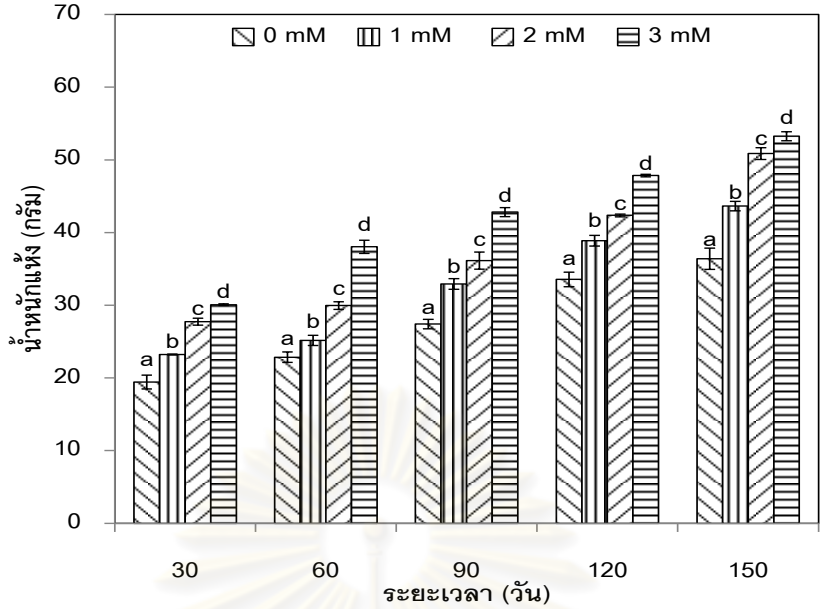
6 และ 9 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า น้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินของข้าวโพดเพิ่มขึ้น เมื่อระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ)

2) น้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินของบอนเขียว

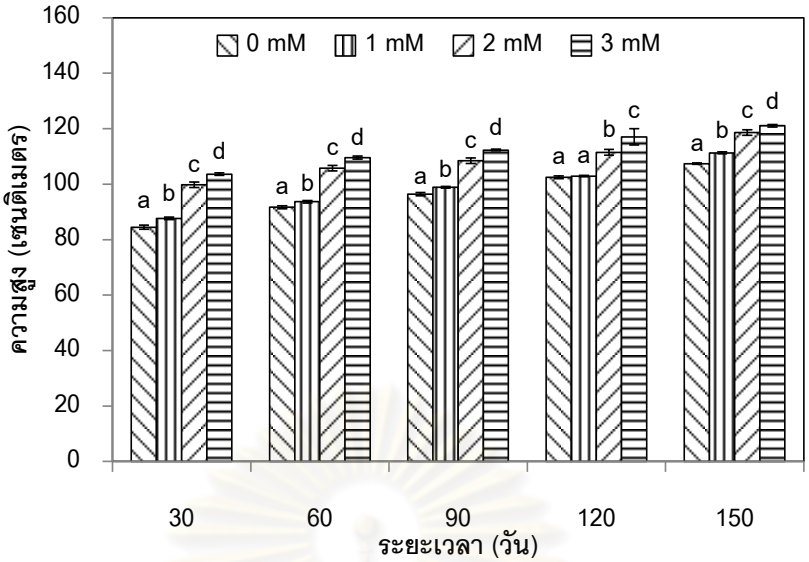
จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนใต้ดิน พบว่า บอนเขียวมีน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 19.43, 23.22, 27.74 และ 30.65 กรัม ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน ตามลำดับ ของชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น น้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย โดยชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA มีน้ำหนักแห้งน้อยที่สุดทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบว่าชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีน้ำหนักแห้งมากที่สุดที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 150 วัน เท่ากับ 53.25 กรัม โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ทั้งนี้เนื่องจาก สาร EDTA ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตในส่วนใต้ดินของบอนเขียว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vassil et al. (1998) ศึกษาการสะสมและเคลื่อนย้ายตะกั่ว โดยพืช Indian mustard ร่วมกับการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 และ 1 มิลลิโมลต่อลิตร พบว่า พืช mustard มีน้ำหนักแห้งในส่วนลำต้นเพิ่มมากขึ้น เมื่อระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เพิ่มขึ้นที่ระดับ 0.5 และ 1 มิลลิโมลต่อลิตร



รูปที่ 4.7 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนใต้ดิน

3) ความสูงของบอนเขียว

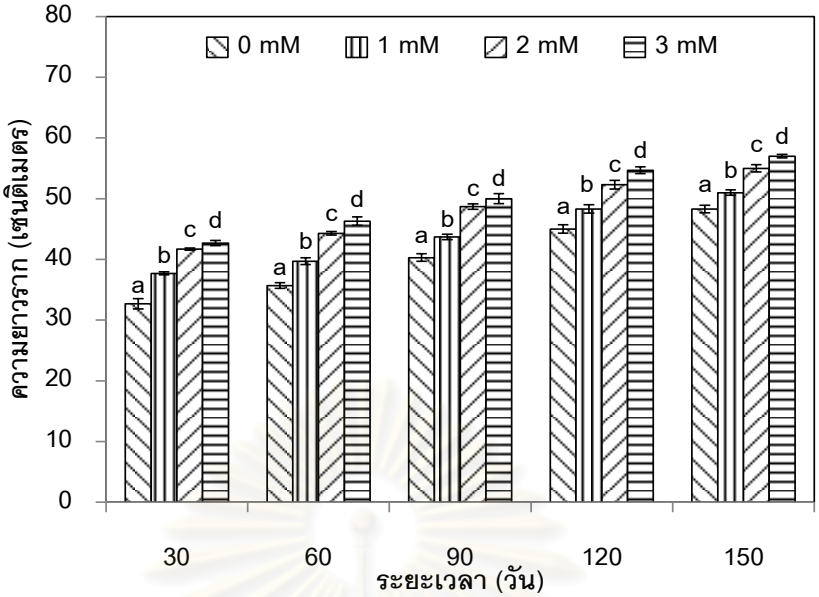
ผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านความสูงของบอนเขียว พบว่า บอนเขียวมีความสูงเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.8) โดยที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA บอนเขียวมีความสูงน้อยที่สุด เท่ากับ 84.5 เซนติเมตร ส่วนชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน บอนเขียวมีการเจริญเติบโตเท่ากับ 87.7, 99.8 และ 103.6 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และบอนเขียวมีความสูงมากที่สุดในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 150 วัน เท่ากับ 121.1 เซนติเมตร และยังพบว่า ทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน บอนเขียวมีความสูงมากกว่าชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน แสดงให้เห็นว่า สาร EDTA ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตด้านความสูง เนื่องจากไม่ทำให้ความสูงของบอนเขียวลดลง โดยสอดคล้องกับการศึกษาของ Xu et al. (2007) ที่ศึกษาการดูดดึงตะกั่ว โดยพืช *Sorghum bicolor* ร่วมกับการเติมสาร EDTA พบว่า พืช *Sorghum bicolor* มีความสูงของลำต้นเพิ่มขึ้น เมื่อระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 การเจริญเติบโตด้านความสูงของบอนเขียว

4) ความยาวของส่วนใต้ดิน

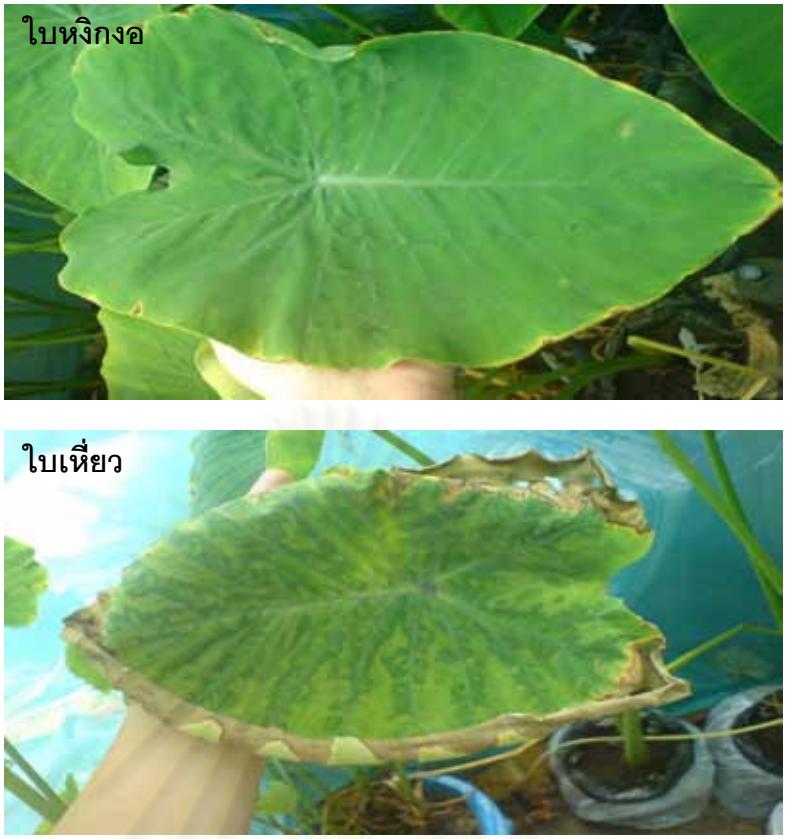
การเจริญเติบโตด้านความยาวของส่วนใต้ดิน (รูปที่ 4.9) พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน ทุกชุดการทดลองมีความยาวของส่วนใต้ดินน้อยที่สุด เท่ากับ 32.7, 37.7, 41.7 และ 42.7 เซนติเมตร ตามลำดับ ของชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ความยาวของส่วนใต้ดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกชุดการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่าในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 150 วัน บอนเขียวมีความยาวของส่วนใต้ดินมากที่สุด เท่ากับ 57 เซนติเมตร โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสาร EDTA ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตด้านความยาวในส่วนใต้ดิน



รูปที่ 4.9 การเจริญเติบโตด้านความยาวของส่วนใต้ดิน

5) การแสดงความเป็นพิษในบอนเขียว

การศึกษาครั้งนี้ พบว่า บอนเขียวไม่แสดงอาการเป็นพิษในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วแต่ไม่ใส่สาร EDTA ส่วนชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า บอนเขียวแสดงอาการเป็นพิษเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น สำหรับชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า บอนเขียวมีการแสดงความเป็นพิษดังรูปที่ 4.10 โดยแสดงอาการใบเหี่ยว ใบหงิกงอ และขอบใบมีสีเหลือง อย่างเห็นได้ชัดเมื่อเติมสาร EDTA ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ตะกั่วไปขัดขวางขบวนการสังเคราะห์แสง และขัดขวางการดูดดึงธาตุอาหารต่างๆ ของบอนเขียวทำให้เกิดความไม่สมดุลกันของธาตุอาหาร (Pangta and Sampanpanish, 2009) ซึ่งสอดคล้องกับ Sampanpanish et al. (2008) ที่ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้สาบเสือ และหญ้าแฝก ที่ปลูกในดินปนเปื้อนและดินสังเคราะห์ พบว่า โลหะหนักส่งผลให้สาบเสือและหญ้าแฝกแสดงอาการเป็นพิษ เช่น ใบซีดขาว ใบหงิก และใบไหม้ เป็นต้น



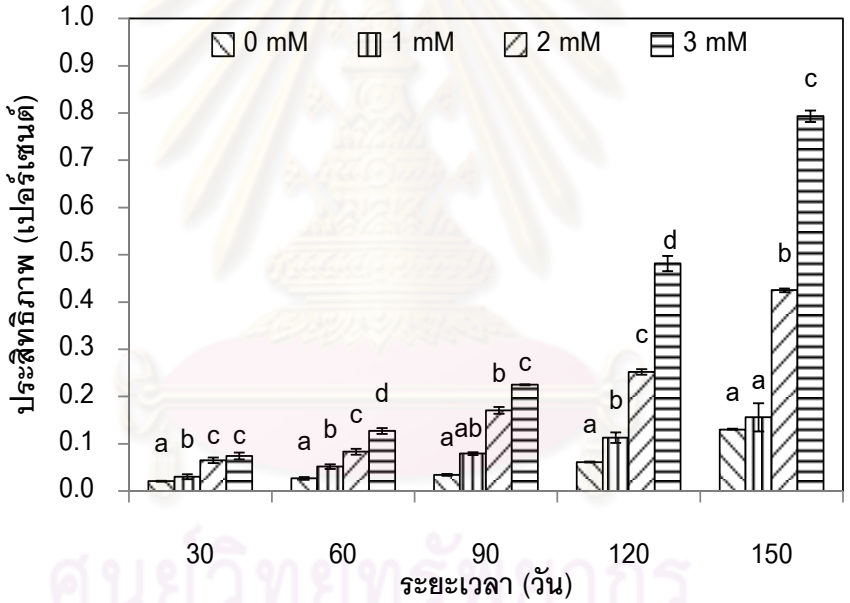
รูปที่ 4.10 การแสดงความเป็นพิษของบอนเขียว

4.1.5 ประสิทธิภาพและสมดุลมวล (mass balance)

1) ประสิทธิภาพของบอนเขียวในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน

ประสิทธิภาพของบอนเขียวในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน บอนเขียวมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วน้อยที่สุด (รูปที่ 4.11) เท่ากับ 0.0209, 0.0302, 0.0649 และ 0.0741 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น บอนเขียวมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วได้เพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพมากที่สุดที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 150 วัน ทุกชุดการทดลอง เท่ากับ 0.1297, 0.1558, 0.4248 และ 0.7933 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ที่ 0, 1, 2 และ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ และยังพบว่า ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 150 วัน บอนเขียวมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วได้มากกว่า 6 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร

EDTA ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เนื่องจาก สาร EDTA ที่เติมลงไปในดิน สามารถรวมตัวกับตะกั่ว และอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช จึงทำให้พืชมีความสามารถในการสะสมตะกั่วได้มากขึ้น สอดคล้องกับ Tanhan (2008) ที่ทำการศึกษาการบำบัดตะกั่วโดยต้นสาปเสือ (*Chromolaena odorata*) ในภาวะไฮโดรโพนิกส์และในดิน พบว่า ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ต้นสาปเสือมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วได้มากกว่าชุดการทดลองที่ไม่เติมสาร EDTA นอกจากนี้ Neugschwandther et al. (2007) รายงานผลการศึกษา โดยพบว่าประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วเพิ่มขึ้น เมื่อระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับ 0.12, 0.13, 0.15 และ 0.30 เปอร์เซ็นต์ ของระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ที่ 0, 3, 6 และ 9 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 0, 3, 6 และ 9 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เท่ากับ 0.27, 0.39, 0.42 และ 0.51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพของบอนเขียวในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน

2) สมดุลมวล (mass balance)

จากการเก็บตัวอย่าง ดิน และพืช สามารถแสดงปริมาณการดูดดึงและกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินได้ ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน ดินมีปริมาณตะกั่วปนเปื้อนเท่ากับ 12,504, 12,448, 12,125 และ 12,057 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ของชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อ

กิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 96.18, 95.75, 93.27 และ 92.75 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณตะกั่วในระบบ (ตารางที่ 4.4) ส่วนปริมาณตะกั่วที่สะสมในพืชที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน ของชุดการทดลองดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 13.59, 19.94, 42.18 และ 48.18 มิลลิกรัม หรือคิดเป็น 0.0209, 0.0302, 0.0649 และ 0.0741 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณตะกั่วในดินมีแนวโน้มลดลง ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 150 วัน เท่ากับ 10,912, 10,470, 10.045 และ 9,624 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือคิดเป็น 83.94, 80.54, 77.27 และ 74.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนปริมาณการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 150 วัน เท่ากับ 84.34, 101.25, 276.09 และ 515.64 มิลลิกรัม หรือคิดเป็น 0.13, 0.156, 0.42 และ 0.79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของตะกั่วทั้งหมดในระบบ มีค่าเท่ากับ 84.07, 80.70, 77.69 และ 74.82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับของชุดการทดลองข้างต้น ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า มีตะกั่วบางส่วนที่สูญหายไป ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตะกั่วบางส่วนอาจติดอยู่กับภาชนะที่ใช้ในการทดลอง และอาจติดอยู่กับพืช เมื่อนำพืชไปล้าง ทำให้ตะกั่วบางส่วนหายไป ซึ่งสอดคล้องกับ ธเรศ ศรีสถิตย์ และ วงศ์พงา เส็งสาย (2545) ศึกษาประสิทธิภาพของหญ้าแฝก *Vertiveria zizanioides* (Linn.) Nass และหญ้าแฝกดอน *Vertiveria nemoralis* A. Camus ในการกำจัดโครเมียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น เพื่อการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้ายจากโรงฟอกหนัง พบว่า มีปริมาณโครเมียมส่วนหนึ่งหายไป จากการทำสมดุลมวลประมาณ 6.86 เปอร์เซ็นต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 สมดุลมวล (mass balance) ในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน

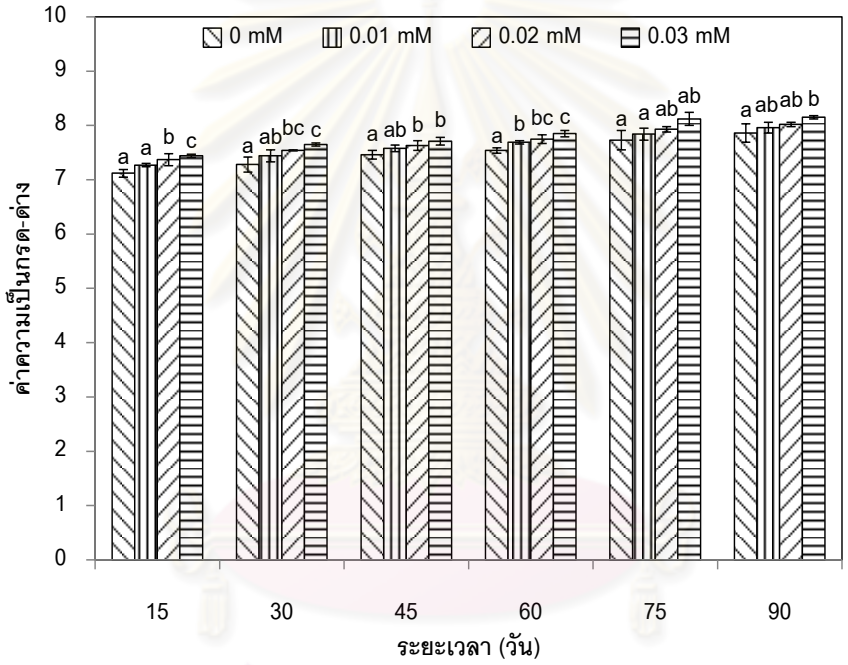
ระยะเวลา (วัน)	ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่ว (มิลลิกรัม)					ปริมาณตะกั่ว (เปอร์เซ็นต์)					รวมเปอร์เซ็นต์ทั้งระบบ
		ดิน	บอน				ดิน	บอน				
			ใบ	ก้านใบ	ใต้ดิน	รวม		ใบ	ก้านใบ	ใต้ดิน	รวม	
30	0 mM	62520	0.0253	0.2543	13.3059	13.5855	96.18	0.0000	0.0004	0.0205	0.0209	96.20
	1 mM	62240	0.2600	1.2659	18.4133	19.9392	95.75	0.0000	0.0019	0.0283	0.0302	95.78
	2 mM	60625	0.1789	3.7532	38.2439	42.1760	93.27	0.0003	0.0058	0.0588	0.0649	93.33
	3 mM	60285	0.3378	3.5321	44.3130	48.1829	92.75	0.0005	0.0054	0.0682	0.0741	92.82
60	0 mM	61035	0.0681	1.0896	16.2757	17.4334	93.90	0.0001	0.0017	0.0250	0.0268	93.93
	1 mM	60580	0.1714	3.5130	29.8000	33.4844	93.20	0.0003	0.0054	0.0458	0.0515	93.25
	2 mM	58280	0.3341	6.6754	46.9852	53.9947	89.66	0.0005	0.0103	0.0723	0.0831	89.74
	3 mM	57000	1.6076	11.5973	70.8877	84.0926	87.69	0.0025	0.0178	0.1091	0.1269	87.82
90	0 mM	58730	0.0950	1.9286	20.1747	22.1983	90.35	0.0001	0.0030	0.0310	0.0341	90.38
	1 mM	57585	0.8023	4.9729	45.4832	51.2584	88.59	0.0012	0.0077	0.0700	0.0789	88.67
	2 mM	55870	1.0697	12.0956	97.8506	13.1653	85.95	0.0016	0.0186	0.1505	0.1707	86.12
	3 mM	54065	3.3346	24.8920	117.7791	146.0057	83.18	0.0051	0.0383	0.1812	0.2246	83.40
120	0 mM	55755	0.3158	5.9679	33.3857	39.6694	85.78	0.0005	0.0092	0.0514	0.0611	85.84
	1 mM	54660	1.0994	16.8861	55.3390	73.3245	84.09	0.0017	0.0260	0.0851	0.1128	84.20
	2 mM	52790	1.5971	19.3426	142.6520	163.5917	81.22	0.0025	0.0298	0.2195	0.2518	81.47
	3 mM	49770	4.3642	37.1038	271.4467	312.9147	76.57	0.0067	0.0571	0.4176	0.4814	77.05
150	0 mM	54560	0.4115	24.6338	59.2965	84.3418	83.94	0.0006	0.0379	0.0912	0.1297	84.07
	1 mM	52350	2.6248	23.6977	74.9241	101.2466	80.54	0.0040	0.0365	0.1153	0.1558	80.70
	2 mM	50225	5.3079	30.9815	239.7998	276.0892	77.27	0.0082	0.0477	0.3689	0.4248	77.69
	3 mM	48120	9.9136	49.8854	455.8458	515.6448	74.03	0.0153	0.0767	0.7013	0.7933	74.82

4.2 การทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนตะกั่ว

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ เคมี และปริมาณการสะสมตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

1) ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์ (pH)

ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสียสังเคราะห์หลังทำการเก็บตัวอย่าง พบว่า ที่ระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน ค่าความเป็นกรด-ด่างของทุกชุดการทดลอง อยู่ในช่วง 7.1-8.1 (รูปที่ 4.12) ซึ่งน้ำมีค่าเป็นด่าง (ชัยพฤกษ์ สุวรรณรัตน์, 2536) โดยพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำในทุกชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น

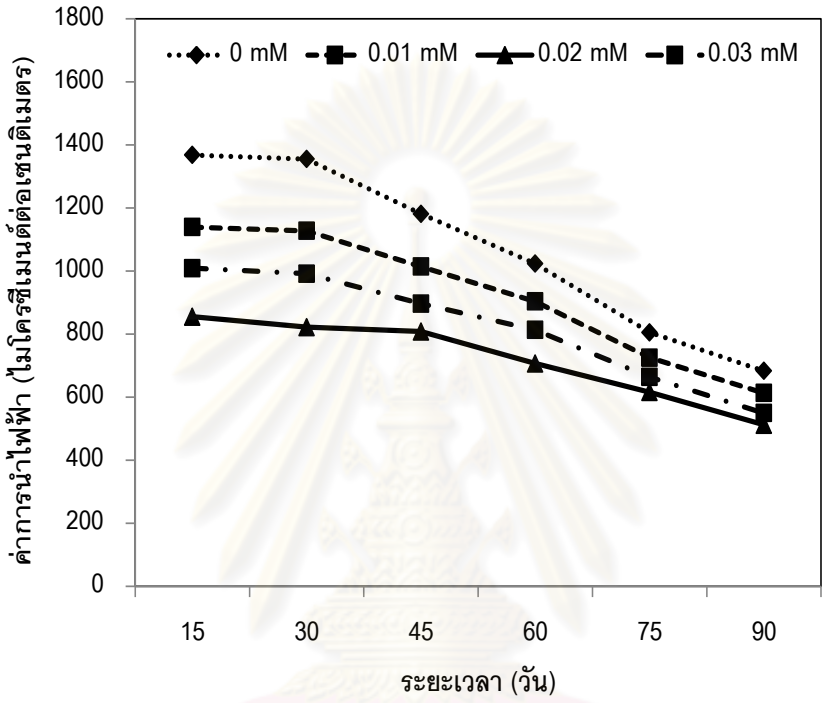


รูปที่ 4.12 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์

2) ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ (EC)

ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ หลังทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน (รูปที่ 4.13) พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมล และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ 30 วัน มีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุด เท่ากับ 1,368, 1,139.3, 855.3 และ 1,009.3 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ โดยแต่ละชุดการทดลองมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น โดยลด

ลงมากที่สุดที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ 90 วัน เท่ากับ 683.3, 613, 512 และ 549.3 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับของชุดการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจาก ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ 30 วัน ปริมาณสารละลายที่มีประจุต่างๆ อยู่ในสารละลายดินมาก (อนนท์ สุขสวัสดิ์, 2547) ทำให้ความเป็นสื่อในการนำไฟฟ้าในน้ำสูง และเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างน้ำเพิ่มขึ้น สารละลายที่มีประจุจะถูกดูดดึงโดยพืช ทำให้มีปริมาณลดลง ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง (ทิพวรรณ พจนาภรณ์, 2552)

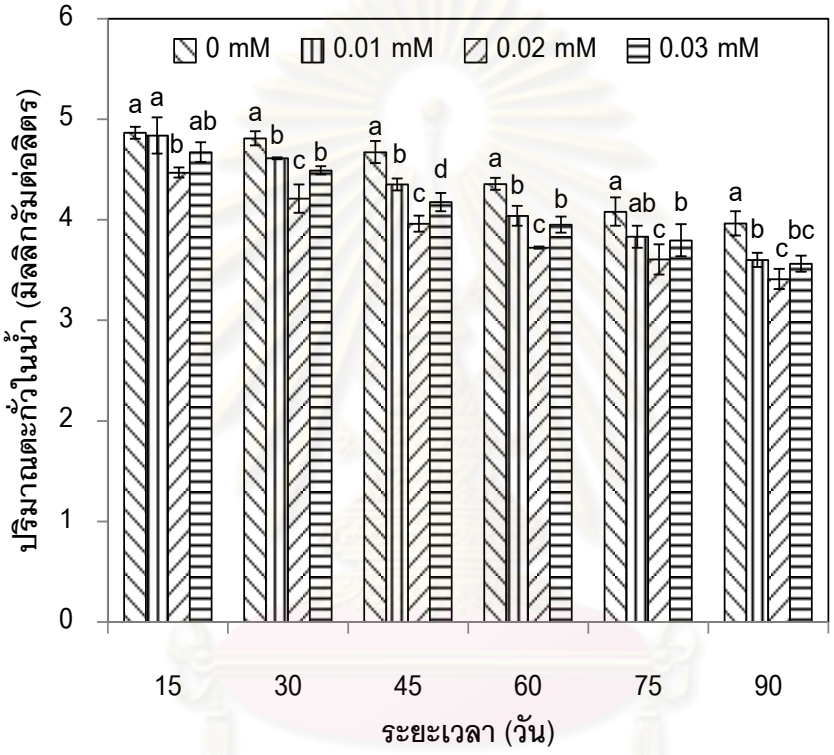


รูปที่ 4.13 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ

3) ผลของสาร EDTA แต่ละระดับความเข้มข้นต่อการสะสมตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

ปริมาณการสะสมตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ภายหลังการเก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน (รูปที่ 4.14) พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 15 วัน ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 4.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแตกต่างกับชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 4.87, 4.84 และ 4.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์มีแนวโน้มลดลง ทุกชุดการทดลอง โดยลดมากที่สุดที่ชุดการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์และ

เติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 90 วัน เท่ากับ 3.41 มิลลิกรัมต่อลิตร สอดคล้องกับ Li et al. (2008) ที่ทำการศึกษาผลของสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ต่อการดูดดึงตะกั่ว โดยพืช *Typha orientalis* พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อมีการเติมสาร EDTA 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร พืชสามารถดูดดึงตะกั่วในน้ำได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตะกั่วในน้ำลดลง แต่ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร พบว่า การดูดดึงตะกั่วในพืชลดลง ส่งผลให้ปริมาณตะกั่วในน้ำสูงกว่าการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลต่อลิตร



รูปที่ 4.14 ปริมาณการสะสมตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

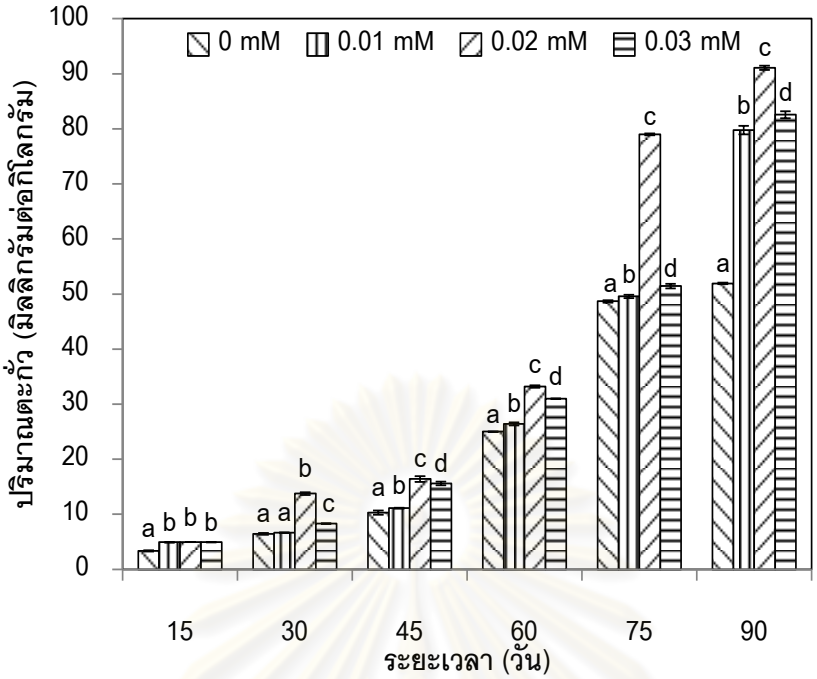
4.2.2 ผลของการเติมสาร EDTA แต่ละระดับความเข้มข้นต่อการดูดดึงตะกั่วของบอนเขียว

1) ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ใบ และก้านใบ) ของบอนเขียว

ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) ของบอนเขียว พบว่า ทุกชุดการทดลองมีปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) น้อยที่สุด ที่ระยะเวลา 15 วัน (รูปที่ 4.15) โดยมีค่า เท่ากับ 3.35, 4.91, 4.94 และ 4.93 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมล และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และ

เติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร และพบว่าเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) เพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) มากที่สุดในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร ที่ระยะเวลา 90 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 91.06 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และพบว่า ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA มีปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) น้อยกว่าชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.01, 0.02 และ 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร ในทุกระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ทั้งนี้เนื่องจาก สาร EDTA มีความสามารถในการช่วยดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ จึงส่งผลให้ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA มีปริมาณการดูดดึงตะกั่วได้ดีกว่าชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liphadzi et al. (2003) ที่ทำการศึกษา การดูดดึงโลหะหนัก โดยต้นทานตะวัน (sunflower) ร่วมกับการใช้สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0, 0.5 , 1 และ 2 กรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ต้นทานตะวัน สามารถดูดดึงโลหะหนักมาสะสมในใบได้มากขึ้นเมื่อมีการเติมสาร EDTA และพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักมาสะสมในใบ และยังพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 0, 0.5 และ 1 กรัมต่อกิโลกรัม ต้นทานตะวันมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักมาสะสมในใบได้เพิ่มขึ้น ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ที่เพิ่มขึ้น หากแต่ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 2 กรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ต้นทานตะวันมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักมาสะสมในใบลดลง นอกจากนี้ Li et al. (2008) พบว่า การเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลต่อลิตร พืช *Typha orientalis* สามารถดูดดึงตะกั่วมาสะสมในใบได้ดีกว่าการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร

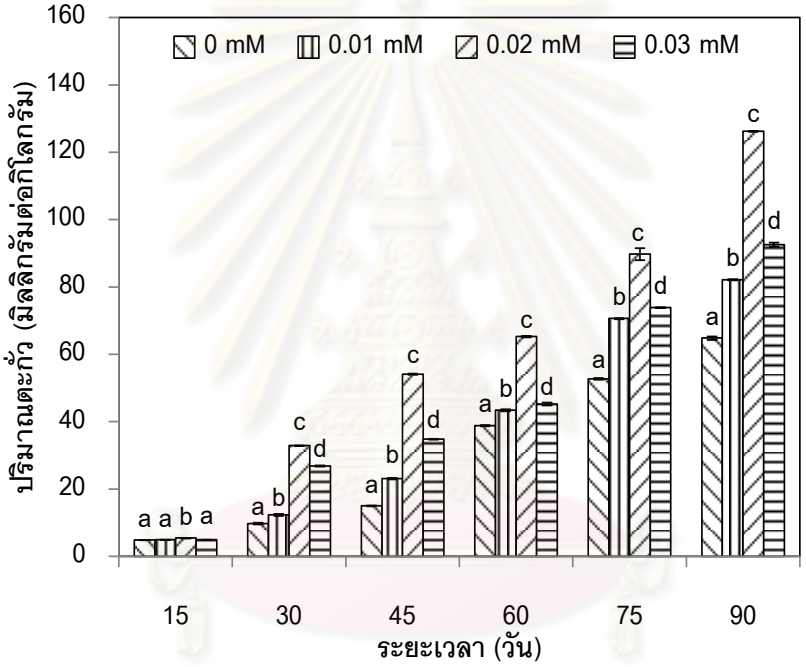
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) ของบอนเขียว

ผลการศึกษาปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) ของบอนเขียว (รูปที่ 4.16) พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 15 วัน ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร มีค่าปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) น้อยที่สุด เท่ากับ 4.84, 4.89, 5.41 และ 4.91 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร มีปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ทั้งนี้ปริมาณการสะสมตะกั่วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) มากที่สุด ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 90 วัน เท่ากับ 126.19 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่า ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA มีปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดไว้ในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) น้อยกว่า ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ในทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบว่า ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร พืชมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) ได้มากกว่า 1.9 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ทั้งนี้เนื่องจากสาร EDTA สามารถรวมตัวกับตะกั่ว และอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อบอนเขียว จึงมีผลให้บอนเขียวมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วได้มากขึ้น สอดคล้องกับ

การศึกษาของ Liphadzi et al. (2003) ที่ทำการวิจัยและพบว่า ต้นทานตะวันมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักมาสะสมในส่วนก้านใบได้เพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการเติมสาร EDTA และยังพบว่า ปริมาณการดูดดึงโลหะหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 0, 0.5 และ 1 กรัมต่อกิโลกรัม และลดลงที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 2 กรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ Epstein et al. (1999) ศึกษาการใช้พืช *Brassica juncea* ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ร่วมกับการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0 , 1 , 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า พืช *Brassica juncea* สามารถดูดดึงตะกั่วมาสะสมในก้านใบได้เพิ่มขึ้น ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 0 , 1 , 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และลดลงที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม

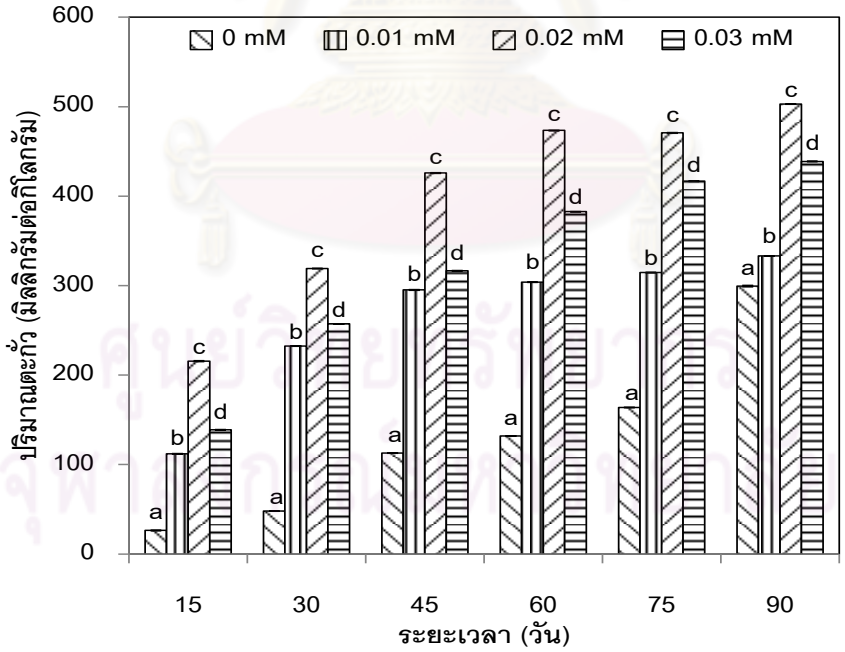


รูปที่ 4.16 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) ของบอนเขียว

2) ปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้น้ำของบอนเขียว

ผลการศึกษาปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้น้ำ พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 15 วัน ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร มีค่าปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดของบอนไปไว้ในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 26.33, 111.96, 215.52 และ 138.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.17) โดยพบว่า ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร สามารถดูดดึงปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้น้ำได้เป็น 8.1, 1.9 และ 1.5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ

ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น พบว่า ปริมาณการดูดดึงตะกั่วในส่วนใต้น้ำเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง โดยพบมากที่สุดในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 90 วัน เท่ากับ 502.84 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Duo et al. (2010) ที่ทำการศึกษาการดูดดึงโลหะหนักโดยต้น turfgrass ร่วมกับการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม พบว่า ต้น turfgrass สามารถดูดดึงโลหะหนักมาสะสมในส่วนใต้ดินได้เพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เพิ่มขึ้น โดยสามารถดูดดึงได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 20 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 25 และ 30 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม พบว่า ความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักมาสะสมในส่วนใต้ดินลดลง นอกจากนี้ Grcman et al. (2001) ได้ทำการศึกษา การดูดดึงโลหะหนักโดยพืช *Brassica rapa* ร่วมกับการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 3, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 3 และ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พืช *Brassica rapa* สามารถดูดดึงตะกั่วมาสะสมในรากได้เพิ่มมากขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA และลดลงที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม



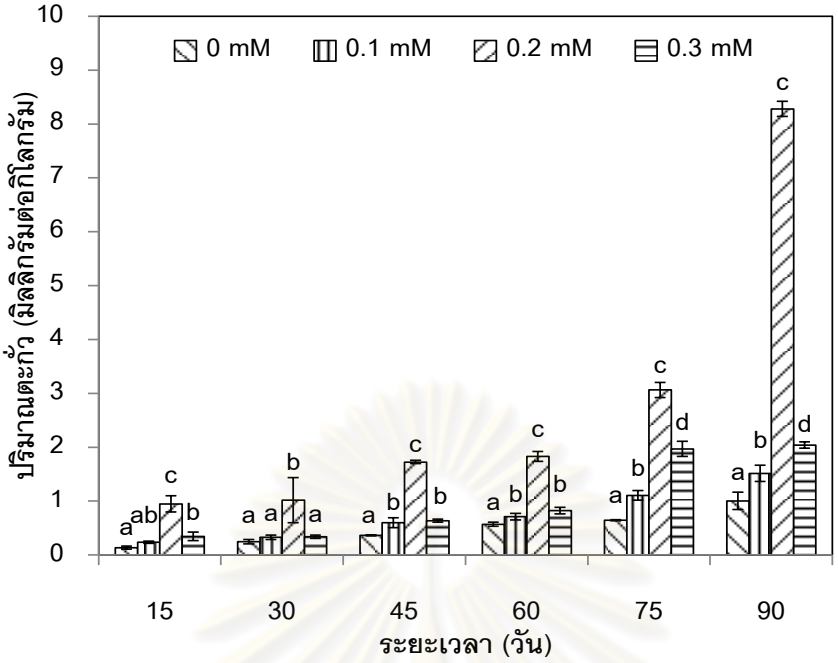
รูปที่ 4.17 ปริมาณการสะสมตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้น้ำของบอนเขียว

4.2.3 ผลของการเติมสาร EDTA แต่ละระดับความเข้มข้นต่อการเจริญเติบโต และความเป็นพิษของบอนเขียว

1) น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ใบ และก้านใบ) ของบอนเขียว

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) ของบอนเขียว พบว่า บอนเขียวมีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) เพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.18) ที่ระยะเวลา 15 วัน บอนเขียวมีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) น้อยที่สุด เท่ากับ 0.14, 0.24 , 0.95 และ 0.34 กรัม ตามลำดับของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร และพบว่า ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร มีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) ของบอนเขียวมากที่สุดที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 90 วัน เท่ากับ 8.28 กรัม นอกจากนี้ยังพบว่า น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร มีมากกว่าชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร ทุกช่วงระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง สอดคล้องกับการศึกษาของ German et al. (2003) ที่ทำการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 3, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เพื่อช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม ด้วยการปลูกพืชผักกาดเขียวปลี พบว่า สาร EDTA ไม่ส่งผลต่อน้ำหนักแห้งที่ระดับความเข้มข้น 3 และ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน แต่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ส่งผลต่อน้ำหนักแห้งของผักกาดเขียวปลีลดลง และ Turgut et al. (2004) ที่ศึกษาผลของ EDTA ในการดูดดึงโลหะหนักด้วยพืช *Helianthus annuus* ที่เจริญเติบโตในดินบริเวณ Ohio, New maxico และ Colobia พบว่าน้ำหนักแห้งในใบของพืช *Helianthus annuus* เพิ่มขึ้น ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 0 และ 0.1 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และลดลงที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เท่ากับ 0.3 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

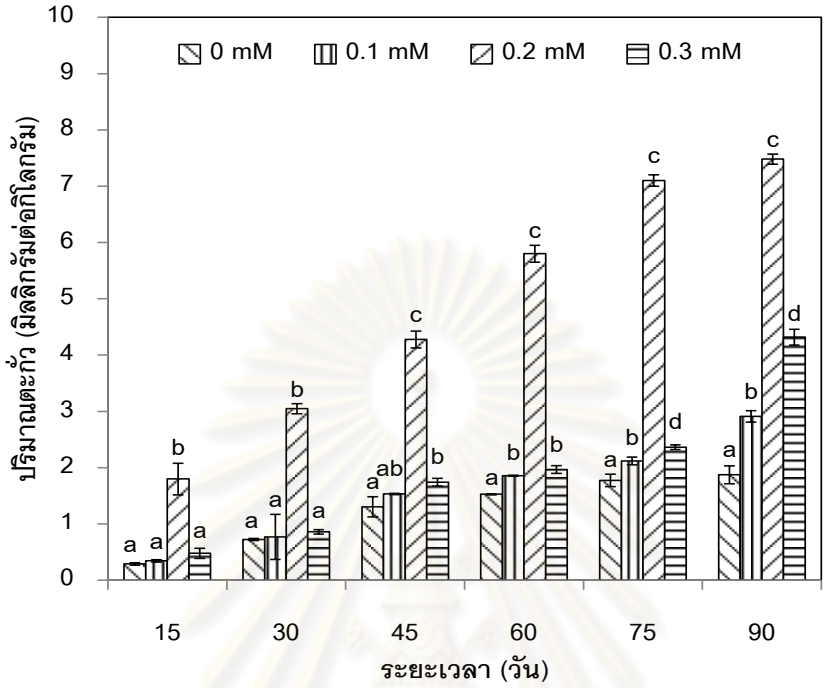
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนเหนือน้ำ (ใบ)

จากรูปที่ 4.19 แสดงผลของการศึกษาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) พบว่า บอนเขียวมีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) เพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 15 ถึง 90 วัน โดยที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 15 วัน ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร มีน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 1.80 กรัม ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) จากชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร โดยมีค่าเท่ากับ 0.29, 0.34 และ 0.48 กรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ จากข้อมูลการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้ง ยังพบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 90 วัน ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร มีน้ำหนักแห้งมากที่สุด เท่ากับ 7.48 กรัม และพบว่าทุกระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง บอนเขียวในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร มีน้ำหนักแห้งน้อยกว่าชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้นมากส่งผลให้พืชชะงักการเจริญเติบโต โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Azhar et al. (2009) ที่ได้ทำการศึกษา การใช้สาร EDTA เป็นตัวชักนำในการเจริญเติบโตของต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) โดยให้ต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) เจริญเติบโตในบริเวณที่มีตะกั่วปนเปื้อน พบว่า ต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) มีน้ำหนักแห้งของลำต้นลดลง เมื่อระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับ Grcman et al. (2001) ที่พบว่า น้ำหนักแห้งในส่วนก้านใบที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 3 และ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

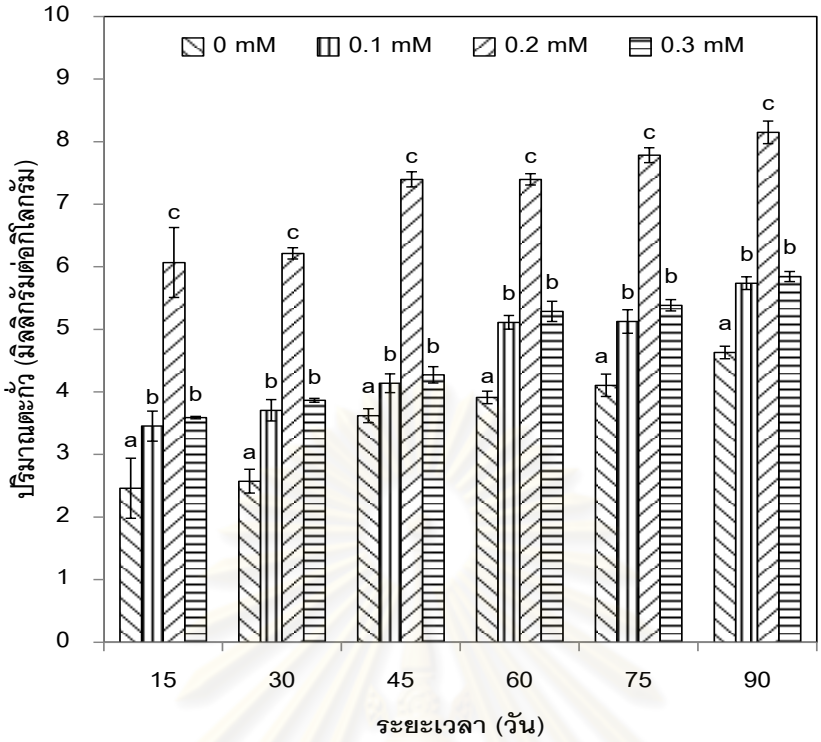
เท่ากับ 11.9 และ 11.2 กรัม ตามลำดับ โดยน้ำหนักแห้งในส่วนก้านใบลดลงเท่ากับ 7.9 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



รูปที่ 4.19 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ)

2) น้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำของบอนเขียว

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำของบอนเขียว พบว่า ที่ระยะเวลา 15 วัน ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร น้ำหนักแห้งมีค่าเท่ากับ 2.46, 3.45, 6.07 และ 3.59 กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.20) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และพบว่า เมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำของบอนเขียวมีมากขึ้น โดยพบมากที่สุดที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 90 วัน ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 8.15 กรัม แสดงให้เห็นว่าสาร EDTA ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตในส่วนใต้น้ำของบอนเขียวที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA น้อยกว่า 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร แต่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตในส่วนใต้น้ำที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร

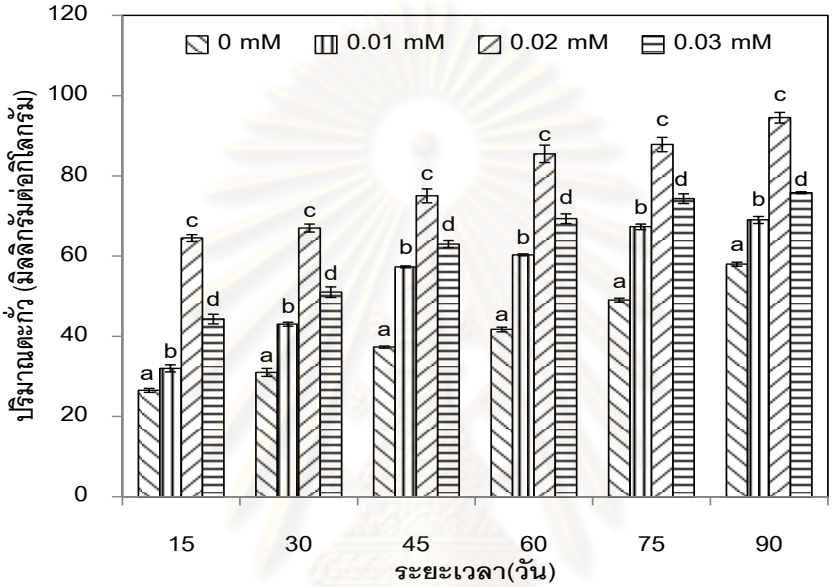


รูปที่ 4.20 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของบอนเขียวในส่วนใต้น้ำ

3) ความสูงของบอนเขียว

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านความสูงของบอนเขียวในส่วนเหนือน้ำ (รูปที่ 4.21) พบว่า บอนเขียวมีความสูงในส่วนเหนือน้ำน้อยที่สุด ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 15 วัน เท่ากับ 26.5 เซนติเมตร ส่วนชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 32, 64.5 และ 44.3 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และพบว่า เมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น การเจริญเติบโตด้านความสูงในส่วนเหนือน้ำของบอนเขียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 90 วัน บอนเขียวมีความสูงในส่วนเหนือน้ำมากที่สุดของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร เท่ากับ 58, 69, 94.5 และ 75.8 เซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้แต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) และยังพบว่า ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร มีการเจริญเติบโตด้านความสูงมากกว่าชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อ

ลิตร ทุกช่วงระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่า สาร EDA มีความเป็นพิษต่อบอนเขียวในระดับความเข้มข้น 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร โดยส่งผลต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงในส่วนเหนือน้ำของบอนเขียว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Cui et al. (2006) ที่ทำการศึกษาการดูดดึงตะกั่ว และความเป็นพิษของพืช *Zinnia elegans* ร่วมกับการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1.2, 2.4 และ 4.8 มิลลิโมลต่อลิตร พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร ความสูงของพืช *Zinnia elegans* เพิ่มขึ้น และลดลงที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 4.8 มิลลิโมลต่อลิตร

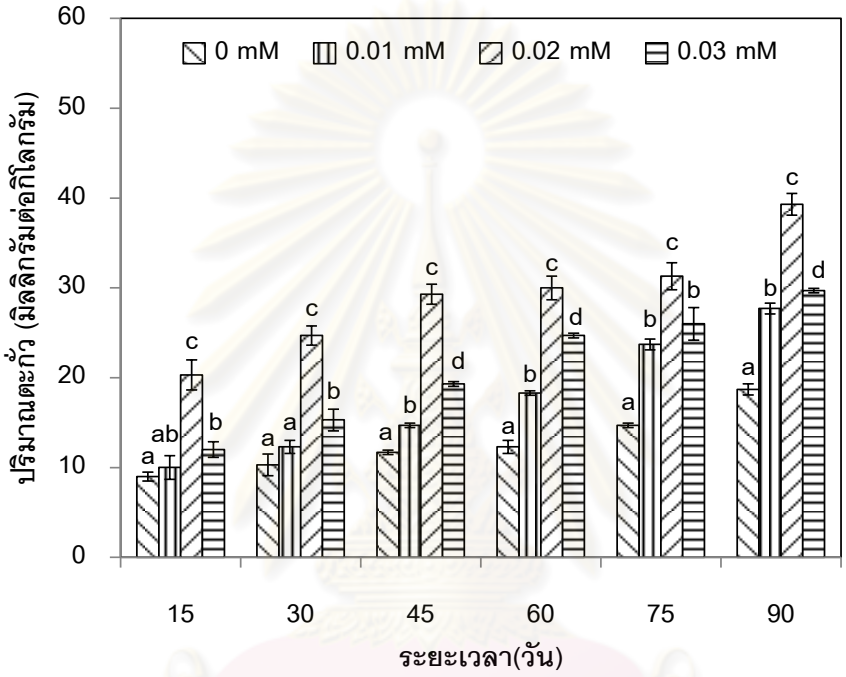


รูปที่ 4.21 การเจริญเติบโตด้านความสูงของบอนเขียวในส่วนเหนือน้ำ

4) ความยาวในส่วนใต้น้ำของบอนเขียว

จากรูปที่ 4.22 แสดงผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านความยาวในส่วนใต้น้ำของบอนเขียว พบว่า บอนเขียวมีความยาวในส่วนใต้น้ำเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 15 ถึง 90 วัน โดยที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 15 วัน ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร บอนเขียวมีความยาวในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 9, 10, 20.3 และ 12 เซนติเมตร ตามลำดับ และพบว่า ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร บอนเขียวมีความยาวในส่วนใต้น้ำสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง นอกจากนี้ ยังพบว่า บอนเขียวมีความยาวในส่วนใต้น้ำมากที่สุดที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 90 วัน ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร เท่ากับ 39.3 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่า สาร EDTA ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตในด้านความยาวในส่วนใต้น้ำของบอน

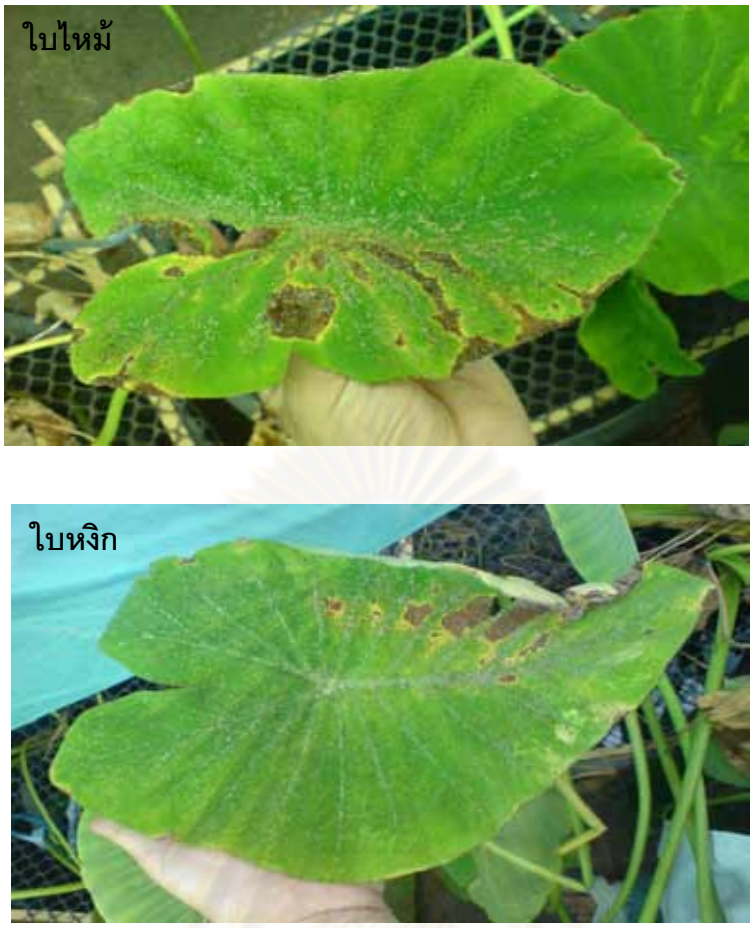
เขียวที่ระดับความเข้มข้นน้อยกว่า 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร แต่มีผลต่อการเจริญเติบโตในด้านความยาวในส่วนใต้น้ำของบอนเขียวที่ระดับความเข้มข้น 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร เนื่องจาก ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ที่มากเกินไป จะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชในส่วนใต้น้ำได้ (Azhar et al., 2006) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cui et al. (2006) พบว่า สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ไม่ส่งผลต่อความยาวของส่วนใต้ดินของพืช แต่ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 4.8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ส่งผลให้ความยาวของส่วนใต้ดินลดลง



รูปที่ 4.22 การเจริญเติบโตด้านความยาวของบอนเขียวในส่วนใต้น้ำ

5) การแสดงความเป็นพิษในบอนเขียว

การศึกษาครั้งนี้ พบว่า บอนเขียวไม่แสดงอาการเป็นพิษในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนตะกั่วและไม่เติมสาร EDTA รวมทั้งชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 และ 0.02 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน แต่บอนเขียวแสดงอาการเป็นพิษในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน (รูปที่ 4.23) โดยแสดงอาการใบเหี่ยว ใบหงิกงอ ขอบใบมีสีเหลือง และพืชตาย อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจาก ตะกั่วไปขัดขวางขบวนการสังเคราะห์แสง และขัดขวางการดูดดึงธาตุอาหารต่างๆ ของบอนเขียวทำให้เกิดความไม่สมดุลกันของธาตุอาหาร



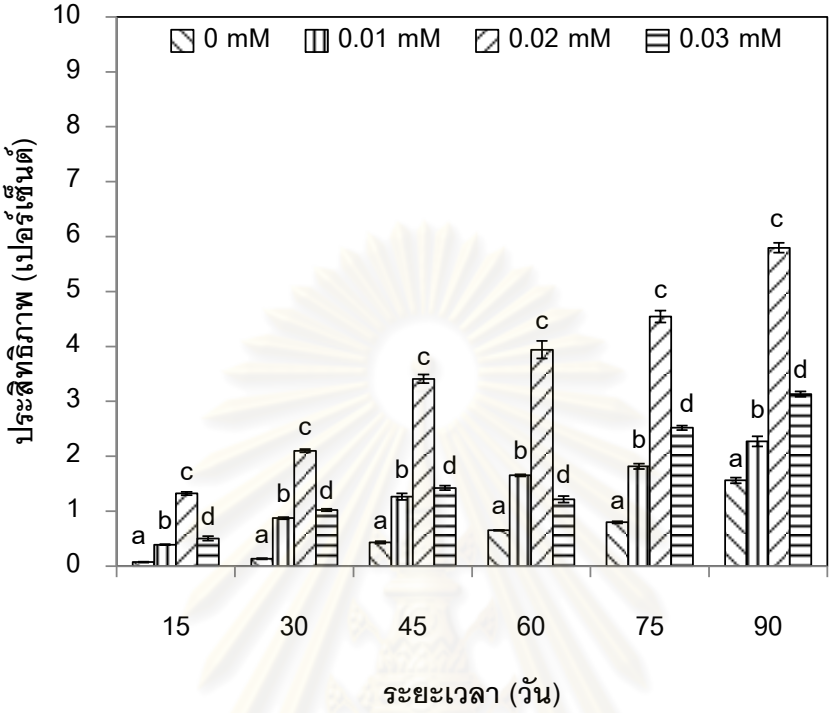
รูปที่ 4.23 การแสดงความเป็นพิษในบอนเขียว

4.2.4 ประสิทธิภาพและสมดุลมวล (mass balance)

1) ประสิทธิภาพของบอนเขียวในการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

การศึกษาประสิทธิภาพของบอนเขียว ในการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ (รูปที่ 4.24) พบว่า ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร บอนเขียวมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้มากกว่าชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร ในทุกระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง โดยแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) และยังพบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น บอนเขียวมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น โดยบอนเขียวมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์มากที่สุดที่ระยะเวลา 90 วัน ของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร คิดเป็น 5.80 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA พบว่า บอนเขียวมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากกว่า 2.2 เท่า ทั้งนี้เนื่องจาก

สาร EDTA สามารถรวมตัวกับตะกั่ว และอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช จึงมีผลทำให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากขึ้น



รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพของบอนเขียวในการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

2) **สมดุลมวล** (mass balance)

สมดุลมวลในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยบอนเขียว ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 15 วัน น้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณตะกั่ว 4.87, 4.84, 4.47 และ 4.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับของชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01 มิลลิโมลต่อลิตร ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร และชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 97.30, 96.74, 89.38 และ 93.44 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณตะกั่วในระบบ (ตารางที่ 4.5) ส่วนปริมาณตะกั่วที่สะสมในพืชที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 15 วัน เท่ากับ 0.07, 0.39, 1.32 และ 0.50 มิลลิกรัม ตามลำดับในชุดการทดลอง หรือคิดเป็น 0.07, 0.39, 1.32 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่า เมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์มีแนวโน้มลดลง ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 90 วัน เท่ากับ 3.97, 3.60, 3.41 และ 3.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็น 79.3, 72, 68.2 และ 71.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนปริมาณการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 90 วัน เท่ากับ 1.56, 2.27, 5.80 และ 3.13 มิลลิกรัม หรือคิดเป็น

1.56, 2.27, 5.80 และ 3.13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ตะกั่วทั้งหมดในระบบ มีค่าเท่ากับ 80.86, 74.27, 73.99 และ 74.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับของชุดการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีตะกั่วบางส่วนสูญหายไป อาจเนื่องมาจากตะกั่วบางส่วนมีการติดอยู่กับภาชนะ และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และบางส่วนติดอยู่กับพืช ซึ่งเมื่อนำพืชมาล้างเพื่อนำไปวิเคราะห์ ส่งผลให้ตะกั่วบางส่วนสูญหายได้เช่นกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 สมดุลมวล (mass balance) ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

ระยะเวลา (วัน)	ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่ว (มิลลิกรัม)					ปริมาณตะกั่ว (เปอร์เซ็นต์)					รวมเปอร์เซ็นต์ทั้งระบบ
		น้ำ	บอน				น้ำ	บอน				
			ใบ	ก้านใบ	ใต้ดิน	รวม		ใบ	ก้านใบ	ใต้ดิน	รวม	
15	0 mM	97.30	0.0005	0.0014	0.0648	0.0712	97.30	0.0005	0.0014	0.0648	0.0712	97.37
	0.01 mM	96.74	0.0012	0.0017	0.3867	0.3896	96.74	0.0012	0.0017	0.3867	0.3896	97.13
	0.02 mM	89.38	0.0047	0.0097	1.3078	1.3222	89.38	0.0047	0.0097	1.3078	1.3222	90.70
	0.03 mM	93.44	0.0017	0.0023	0.4982	0.5022	93.44	0.0017	0.0023	0.4982	0.5022	93.94
30	0 mM	96.20	0.0016	0.0070	0.1232	0.1318	96.20	0.0016	0.0070	0.1232	0.1318	96.33
	0.01 mM	92.22	0.0022	0.0095	0.8615	0.8732	92.22	0.0022	0.0095	0.8615	0.8732	93.09
	0.02 mM	84.20	0.0153	0.1002	1.9827	2.0982	84.20	0.0153	0.1002	1.9827	2.0982	86.30
	0.03 mM	89.82	0.0028	0.0231	0.9940	1.0199	89.82	0.0028	0.0231	0.9940	1.0199	90.84
45	0 mM	93.46	0.0037	0.0195	0.4084	0.4316	93.46	0.0037	0.0195	0.4084	0.4316	93.89
	0.01 mM	87.02	0.0066	0.0353	1.2221	1.2640	87.02	0.0066	0.0353	1.2221	1.2640	88.28
	0.02 mM	79.22	0.0283	0.2314	3.1503	3.4100	79.22	0.0283	0.2314	3.1503	3.4100	82.63
	0.03 mM	83.52	0.0099	0.0605	1.3528	1.4232	83.52	0.0099	0.0605	1.3528	1.4232	84.94
60	0 mM	87.14	0.0752	0.0592	0.5162	0.6506	87.14	0.0752	0.0592	0.5162	0.6506	87.79
	0.01 mM	80.78	0.0188	0.0806	1.5529	1.6523	80.78	0.0188	0.0806	1.5529	1.6523	82.43
	0.02 mM	74.46	0.0607	0.3786	3.5015	3.9408	74.46	0.0607	0.3786	3.5015	3.9408	78.40
	0.03 mM	79.02	0.0255	0.0889	1.1002	1.2146	79.02	0.0255	0.0889	1.1002	1.2146	80.23
75	0 mM	81.62	0.0314	0.0934	0.6726	0.7974	81.62	0.0314	0.0934	0.6726	0.7974	82.42
	0.01 mM	76.62	0.0549	0.1496	1.6128	1.8173	76.62	0.0549	0.1496	1.6128	1.8173	78.44
	0.02 mM	72.12	0.2420	0.6372	3.6644	4.5436	72.12	0.2420	0.6372	3.6644	4.5436	76.66
	0.03 mM	75.92	0.1013	0.1745	2.2431	2.5189	75.92	0.1013	0.1745	2.2431	2.5189	78.44
90	0 mM	79.30	0.0522	0.1214	1.3861	1.5597	79.30	0.0522	0.1214	1.3861	1.5597	80.86
	0.01 mM	72.00	0.1208	0.2390	1.9109	2.2707	72.00	0.1208	0.2390	1.9109	2.2707	74.27
	0.02 mM	68.20	0.7541	0.9439	4.0973	5.7953	68.20	0.7541	0.9439	4.0973	5.7953	74.00
	0.03 mM	71.24	0.1684	0.3995	2.5633	3.1312	71.24	0.1684	0.3995	2.5633	3.1312	74.37

81

4.3 เปรียบเทียบปริมาณการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียวในชุดการทดลองดิน และชุดการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนตะกั่ว

จากตารางที่ 4.6 แสดงถึงประสิทธิภาพและความสามารถของบอนเขียวในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินและในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยพบว่า บอนเขียวมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงกว่าการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน โดยประสิทธิภาพการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าสูงสุด เท่ากับ 5.80 เปอร์เซ็นต์ ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 90 วัน โดยมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วได้มากกว่าการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน ประมาณ 7 เท่า ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน มีค่าสูงสุด เท่ากับ 0.79 เปอร์เซ็นต์ ในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 150 วัน และพบว่า การทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 15 ถึง 90 วัน บอนเขียวมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วสูงกว่าประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วของบอนเขียวในการทดลองดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 ถึง 150 วัน ในทุกชุดการทดลอง ทั้งนี้อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า บอนเขียวที่ทำการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ มีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วได้ดีกว่าบอนเขียวที่ปลูกในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่ว ทั้งนี้เนื่องจาก บอนเขียวที่ปลูกในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์นั้น รากของบอนเขียวสามารถสัมผัสสารละลายตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้โดยตรง ซึ่งต่างกับบอนเขียวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว โดยตะกั่วที่อยู่ในดินจะถูกดูดซับไว้ในอนุภาคของดิน ทำให้บอนเขียวไม่สามารถดูดดึงตะกั่วได้ในปริมาณที่สูงเหมือนกับการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่บอนเขียวใช้ในการดูดดึงตะกั่ว พบว่า บอนเขียวที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ใช้เวลาในการดูดดึงตะกั่วน้อยกว่าบอนเขียวที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว และพบว่า เมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น บอนเขียวสามารถสะสมตะกั่วได้เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่า ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ในชุดการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ มีระดับความเข้มข้นของสาร EDTA น้อยกว่าการทดลองในดินปนเปื้อน แต่ให้ประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วได้ดีกว่า แสดงให้เห็นว่า การนำบอนเขียวไปใช้ประโยชน์ในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัด หรือกำจัดได้ดี และให้ผลประโยชน์อย่างเห็นได้ชัดเจนกว่าการนำบอนเขียวไปบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของบอนเขียวในชุดการทดลองดินและชุดการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนตะกั่ว

ระยะเวลา (วัน)	ชุดการทดลอง	การทดลองในดินปนเปื้อนตะกั่ว (%)	ระยะเวลา (วัน)	ชุดการทดลอง	การทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนตะกั่ว (%)
30	EDTA 0 mM	0.02	15	EDTA 0 mM	0.07
	EDTA 1 mM	0.03		EDTA 0.01 mM	0.39
	EDTA 2 mM	0.06		EDTA 0.02 mM	1.32
	EDTA 3 mM	0.07		EDTA 0.03 mM	0.50
60	EDTA 0 mM	0.03	30	EDTA 0 mM	0.13
	EDTA 1 mM	0.05		EDTA 0.01 mM	0.87
	EDTA 2 mM	0.08		EDTA 0.02 mM	2.10
	EDTA 3 mM	0.13		EDTA 0.03 mM	1.02
90	EDTA 0 mM	0.03	45	EDTA 0 mM	0.43
	EDTA 1 mM	0.08		EDTA 0.01 mM	1.26
	EDTA 2 mM	0.17		EDTA 0.02 mM	3.41
	EDTA 3 mM	0.22		EDTA 0.03 mM	1.42
120	EDTA 0 mM	0.06	60	EDTA 0 mM	0.65
	EDTA 1 mM	0.11		EDTA 0.01 mM	1.65
	EDTA 2 mM	0.25		EDTA 0.02 mM	3.94
	EDTA 3 mM	0.48		EDTA 0.03 mM	1.22
150	EDTA 0 mM	0.13	75	EDTA 0 mM	0.80
	EDTA 1 mM	0.16		EDTA 0.01 mM	1.82
	EDTA 2 mM	0.42		EDTA 0.02 mM	4.54
	EDTA 3 mM	0.79		EDTA 0.03 mM	2.52
			90	EDTA 0 mM	1.56
				EDTA 0.01 mM	2.27
				EDTA 0.02 mM	5.80
				EDTA 0.03 mM	3.13

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินด้วยบอนเขียว

1) ปริมาณการสะสมตะกั่วในดินและปริมาณการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียว

จากการศึกษาปริมาณการสะสมตะกั่วในดิน ที่ระยะเวลา 150 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีปริมาณการสะสมตะกั่วในดินน้อยที่สุด เท่ากับ 10,912, 10,470, 10,045 และ 9.624 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับของชุดการทดลอง โดยพบว่า ในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีปริมาณการสะสมตะกั่วในดินน้อยที่สุดในทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง ส่วนการศึกษาปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในบอนเขียว พบว่า บอนเขียวมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินไปยังส่วนใต้ดินและส่วนเหนือดิน (ใบ และก้านใบ) ได้ โดยในส่วนใต้ดินของบอนเขียวสามารถดูดดึงตะกั่วทั้งหมดได้มากที่สุด รองลงมาคือ ส่วนเหนือดิน ได้แก่ ก้านใบ และใบ ตามลำดับ โดยในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดได้มากที่สุดในทุกส่วนของบอนเขียว และยังพบว่า ในทุกชุดการทดลอง เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดดึงตะกั่วไปไว้ในส่วนต่างๆ ของบอนเขียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยพบมากที่สุดในชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 150 วัน โดยมีปริมาณการดูดดึงตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดิน เท่ากับ 8,561.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนเหนือดิน (ก้านใบ และใบ) เท่ากับ 806.56 และ 611.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

2) ผลของการเติมสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโตและความเป็นพิษของบอนเขียว

การเจริญเติบโตของบอนเขียวในส่วนเหนือดิน (ใบ และก้านใบ) และส่วนใต้ดิน พบว่า ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีการเจริญเติบโตในทุกๆ ด้านดีกว่าชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของบอนเขียว แต่เมื่อศึกษาความเป็นพิษของบอนเขียว พบว่า สาร EDTA แสดงความเป็นพิษต่อบอนเขียว เมื่อระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เพิ่มขึ้น พบว่า ชุดการทดลองที่ดิน

ปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน บอนเขียวแสดงอาการเป็นพิษ คือ ใบเหี่ยว ใบไหม้ และขอบใบมีสีเหลือง เป็นต้น แสดงให้เห็นว่า ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน ดังนั้นชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการกำจัดตะกั่วในดินปนเปื้อน เนื่องจาก เป็นระดับที่สาร EDTA ไม่แสดงความเป็นพิษต่อบอนเขียว

3) ประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียว

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วด้วยบอนเขียว พบว่า บอนเขียวมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพมากที่สุด ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 150 วัน เท่ากับ 0.65, 0.78, 2.12. และ 3.97 เปอร์เซ็นต์ ของชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 1, 2 และ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ นอกจากนี้ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า บอนเขียวมีประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วได้สูงที่สุด แต่จากการศึกษาระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อบอนเขียว อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่า บอนเขียวมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วในดินได้ดี เมื่อมีการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งเป็นระดับที่ไม่แสดงความเป็นพิษต่อบอนเขียว

5.1.2 การกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยบอนเขียว

1) ปริมาณการสะสมตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์และปริมาณการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียว

ปริมาณการสะสมตะกั่วในเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์แต่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01, 0.02 และ 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร พบว่า ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ มีแนวโน้มลดลง ตามระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4.87 – 3.96, 4.82 – 3.60, 4.47 – 2.97 และ 4.67 – 3.32 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ของชุดการทดลอง ส่วนปริมาณการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียว พบว่า ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่บอนเขียวสามารถดูดดึงได้มีปริมาณสูงสุดในส่วนใต้น้ำ รองลงมา คือ ส่วนเหนือน้ำ ได้แก่ ก้านใบและใบ ตามลำดับ และพบว่า ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร มีปริมาณการดูดดึงตะกั่วได้มากที่สุดในทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง โดยมากที่สุดที่ระยะเวลา 90 วัน และมีปริมาณการดูดดึงตะกั่วไปไว้ในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 502.84 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และส่วนเหนือน้ำ ได้แก่ ก้านใบ และใบ เท่ากับ 126.19 และ 91.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

2) ผลของการเติมสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโตและความเป็นพิษของบอนเขียว

การเจริญเติบโตของบอนเขียวในส่วนเหนือน้ำ (ใบ และก้านใบ) และส่วนใต้น้ำ ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร พบว่า บอนเขียวมีการเจริญเติบโตได้ดีในทุกๆ ด้าน สำหรับการแสดงความเป็นพิษของบอนเขียว พบว่า สาร EDTA ไม่มีผลต่อความเป็นพิษต่อบอนเขียวที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 0.01 – 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร แต่แสดงความเป็นพิษต่อบอนเขียวที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร โดยแสดงอาการ ใบเหี่ยว ใบไหม้ ใบหงิก และบางต้นตาย

3) ประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียว

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วในบอนเขียว โดยในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่เติมสาร EDTA ชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.01, 0.02 และ 0.03 มิลลิโมลต่อลิตร พบว่า บอนเขียวมีประสิทธิภาพหรือความสามารถในการดูดดึงตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงสุด ในชุดการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร ที่ระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 8.34, 13.54, 21.51, 27.79, 33.59 และ 38.88 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ การศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า บอนเขียวสามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีเมื่อปลูกบอนเขียวร่วมกับการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาการใช้สารคีเลตชนิดอื่น เพื่อเปรียบเทียบความสามารถ และประสิทธิภาพในการดูดดึงโลหะหนัก

5.2.2 ควรมีการศึกษาการใช้บอนเขียวในพื้นที่จริง เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ เช่น แสงแดด อุณหภูมิ ต่อการเจริญเติบโต การดูดดึงตะกั่วและการแสดงความเป็นพิษของบอนเขียว

5.2.3 ควรศึกษาการแสดงความเป็นพิษของตะกั่ว ต่อการแสดงความเป็นพิษในพืชชนิดอื่นๆ เพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบถึงความแตกต่างในการแสดงความเป็นพิษ

5.2.4 ควรมีการศึกษากับพืชชนิดอื่นๆ หรือพืชกลุ่ม Hyperaccumulator และต้องเป็นพืชที่รับประทานไม่ได้ หรือพืชอื่นๆ ที่ให้ค่าพลังงานทดแทนต่างๆ ได้ เช่น สบู่ดำ กระถินยักษ์ และยูคาลิปตัส เป็นต้น

5.2.5 บอนเขียวที่นำมาใช้ในการบำบัดดินและน้ำที่ปนเปื้อนแล้ว ควรนำไปกำจัดโดยวิธีการที่ถูกต้อง เช่น นำบอนเขียวไปเผาที่อุณหภูมิที่ตะกั่วไม่ระเหย เพื่อลดมวลชีวภาพ หรือนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ หลังจากนั้นนำมาฝังกลบในหลุมอย่างปลอดภัย เป็นต้น

5.2.6 ระดับความเข้มข้นของตะกั่วที่ใช้ในการทดลอง สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2547. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

จันทนี แจ่มแสงทอง. 2550. กลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ. การบำบัดสารมลพิษโดยใช้เทคโนโลยี Phytoremediation. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5104/nkc5104v.html. [6 กรกฎาคม 2552]

ชัยพฤกษ์ สุวรรณรัตน์. 2536. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชาลินี ศักดิ์แสน และศศิธร พุทธวงษ์. 2550. การบำบัดโครเมียมและอาร์เซนิกด้วยหญ้าแฝกและฐปฤาษีในบึงประดิษฐ์. การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1. โรงแรมเดอะทวินทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร วันที่ 31 สิงหาคม 2550.

ทิพวรรณ พจนาภรณ์. 2552. ผลของอีดีทีเอและอีดีดีเอสต่อการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วโดยใช้สับปะรดที่ปลูกในดินปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

ธเรศ ศรีสถิต และ วงศ์พะงา เส็งสาย. 2545. ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกหอม Vertiveria zizanioides (Linn.) Nash และหญ้าแฝกดอน Vertiveria nemoralis A. Camus ในการกำจัดโครเมียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น เพื่อการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้ายจากโรงฟอกหนัง. วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม 24(1) : 1-14.

พัฒนาที่ดิน, กรม. 2544. คู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ดินและกลุ่มเคมีดิน 2. กรุงเทพมหานคร: กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.มุกดา สุขสวัสดิ์. 2544. ธาตุอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2549. เรื่องเก่าที่คุ้นเคย...กับคำใหม่ที่เรียกว่า..Phytoremediation. วารสารสิ่งแวดล้อม 10 (1) : 16-19.

พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2535. กรมควบคุมมลพิษ. มาตรฐานคุณภาพดิน. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_soil01.html [4 สิงหาคม 2552]

พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2535. กรมควบคุมมลพิษ. มาตรฐานคุณภาพน้ำ. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html[4 สิงหาคม 2552]

พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2535. กรมควบคุมมลพิษ. มาตรฐานคุณภาพอากาศ. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd01.html[4 สิงหาคม 2552]

พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2550. การกำจัดโครเมียมโดยพืชน้ำ. วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม 29(1) : 69-80.

มุกดา สุขสวัสดิ์. 2544. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

รุจิลดา เมืองเชลียง. 2553. การปลูกพืชในสารละลายระบบดีอาร์เอฟ. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://aummcl2010.blogspot.com [11 ตุลาคม 2553]

วิกิพีเดีย. 2553. ตะกั่ว. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://th.wikipedia.org [23 มีนาคม 2552]

ศูนย์ศึกษากะเหรี่ยงและพัฒนา. 2546. ผลการตรวจตะกั่วในแหล่งน้ำ. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.karencenter.com/kitty-deadly-river1.htm [16 กันยายน 2552]

สรวิทย์ งามพร้อมพันธ์. 2544. ประสิทธิภาพของบอน *Colocasia esculenta* (L.) Schott ในการกำจัดโครเมียม ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้ายจากโรงฟอกหนัง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

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

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. 2549. การปลูกพืชในสารละลายระบบดีเอฟที. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://agri.wu.ac.th/msomsak/Soilless/ [2 มิถุนายน 2553]

อนนท์ สุขสวัสดิ์. 2547. การประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดินนา. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

ภาษาอังกฤษ

Azhar, N., Asharaf, M.Y., Hussain, M., Ashraf, M. and Ahmed, A. 2009. EDTA – induced improvement in growth and water relation of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants grown in lead contaminated medium. Pakistan Journal of Botany 41(6) : 3065-3074.

Azhar, N., Ashraf, M.Y. Hussain, M. and Hussain, F. 2006. Phytoextraction of lead (Pb) by EDTA application through sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivation : seedling growth studies. Pakistan Journal of Botany 38(5) : 1551-1560.

Chau, Y.K., et al. 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 [21 January 2009]

Cho, Y., Bolick, J.A. and Butcher, D.J. 2009. Phytoremediation of lead with green onions (*Allium fistulosum*) and uptake of arsenic compounds by moonlight ferns (*Pteris cretica* cv Mayii). Microchemical Journal 91: 6-8.

Cui, S., et al. 2006. Effects of exogenous chelators on phytoavailability and toxicity of Pb in *Zinnia elegans* Jacq. Journal of Hazardous Materials 146: 341-346.

Duo, L.A., Lian, F. and Zhao, S.L. 2010. Enhanced uptake of heavy metals in municipal solid waste compost by turfgrass folloeing the application of EDTA. Environ Monit Assess 165 : 377-387.

Epstein, A.L., et al. 1999. EDTA and Pb-EDTA accumulation in *Brassica juncea* grown in Pb-amended soil. Plant and Soil 208 : 87-94.

Evangelou, W.H.M.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.

Fin, A. 2010. Aeroponics. [Online]. Available from : http://alfin2100.blogspot.com/2010/04/no-cropland-no-problem-farming-on-air.html [13 July 2010]

German, H., Vodnik, D., Velikonja-Bolta, S. and Lestan, D. 2003. Ethylenediaminedissuccinate as a new chelate for environmentally safe enhanced lead phytoextraction. Journal of Environmental Quality 32 : 500-506.

Grcman, H., Velikonja-Bolta, S. Vodnik, D., Kos, B. and Lestan, D. 2001. EDTA enhanced heavy metal phytoextraction : metal accumulation, leaching and toxicity. Plant and Soil 235 : 105-114.

Homyog, K. 2008. Treatment of lead contaminated soil by wetland plant : The hydroponic and batch studies. The degree doctor of philosophy (biology) faculty of graduate studies Mahidol University.

Jampanil, J. 2000. Efficiency of arsenic removal from soil by *Colocasia esculenta* (L.) Schott (dark violet and green). Master's Thesis Department of Environmental Science Graduate School. Chulalongkorn University.

Jean, L., et al. 2007. Effect of citric acid and EDTA on chromium and nickel uptake and translocation by *Datura innoxia*. Environmental Pollution 153: 555-563.

Knotts, K. 2007. *Colocasia* Schott. [Online]. Available from : http://keys.lucidcentral.org/keys/aquariumplants [5 August 2010]

Lai, H.Y. and Chen, Z.S. 2003. Effects of EDTA on solubility of cadmium, zinc and lead and theirnuptake by Rainbow pink and Vetiver grass. Chemosphere 55: 421-430.

Lee, S.Z., Chang, L., Yang, H.H., chen,.C.M. and Lui, M.C. 1998. Adsorption characteristics of lead onto soils. Journal Hazard Mater 63: 37-49.

Lehtinen, R. 2010. Types of hydroponic system. [Online]. Available from : http://www.dbcourt.co.uk/hydroponics/System%20_types.html [4 June 2010]

Li, L.Y., Liu, Y.G. and Lui, J.L. 2008. Effects of EDTA on lead uptake by *Typha orientalis* presl : a new lead-accumulating species in Southern China. Bull Environ contam Toxicol 81 : 36-41.

Lim, J.M., Salido, A.L. and Butcher, D.J. 2004. Phytoremediation of lead using Indian mustard (*Brassica juncea*) with EDTA and electrodics. Microchemical Journal 76: 3-9.

Liphadzi, M.S, Kirkham, M.B., Mankin, K.R. and Paulsen, G.M. 2003. EDTA-assisted heavy-metal uptake by poplar and sunflower grown at a long-term sewage-sludge farm. Plant and Soil 257 : 171-182.

Lui, D., Islam, E.,Li,T., Yang, X., Jin, Z. 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.

Marques, A.P.G.C., Moreira, H., Rangel, A.O.S.S. and Castro, P.M.L. 2009. Arsenic, lead and nickel accumulation in *Rubus ulmifolius* growing in contaminated soil in Portugal. Journal of Hazardous Materials 165 : 174-179.

Neugschwandtner, R.W., Tlustos, P.M.K. and Szakova, 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.

Office of solid waste and emergency response. 2001. A Citizen's guide to phytoremediation. [Online]. Available from : http://clu-in.org/download/citizens/citphyto.pdf. [15 September 2009]

Pangta, S. and Sampanpanish, P. Use of *Ananas comosus* (L.) Merr. As indicator for toxicity of chromium and lead in contaminated soil. *In* Proceeding of the 2nd CUTSE International conference 2009 on Science and Engineering for Sustainable Development (CUTSE09), Curtin University of Technology, Sarawak, Malaysia, November 24-25, 2009, 13.

Panich-pat, T. 2003. Phytoextraction and accumulation of lead from contaminated soil by *Typha angustifolla*. The degree doctor of philosophy (biology) faculty of graduate studies Mahidol University.

Rotkittikhun, P. 2007. Phytoremediation of lead contaminated soil using various grass species. The degree doctor of philosophy (biology) faculty of graduate studies Mahidol University.

Ruley, A.T., Sharma, N.C., Sahi, S.V., Singh, S.R. and Sajwan, K.S. 2005. Effects of lead and chelators on grown, photosynthetic activity and Pb uptake in *Sesbania drummondii* grown in soil. Environmental Pollution 144: 11-18.

Shaddack. 2005. Ethylenediaminetetraacetic. [Online]. Available from : http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ethylenediaminetetraacetic.png [21 March 2009]

Sampanpanish P., Chaengcharoen W. and Tong cumpou C. 2008. Heavy metals removal from contaminated soil by Siam weed (*Chromolaena odorata*) and Vetiver grass (*Vertiveria ziza nioides*). Research Journal of Chemistry and Environment 12(3): 23-34.

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.

Spehar, R.L., Anderson, R.L. and Fiandt, J.T. 1978. Toxicity and bioaccumulation of cadmium and lead in aquatic invertebrates. Environmental Pollution 15(3) : 195-208.

Sustainable Strategies. 1997. Phytoremediation. [Online]. Available from : http://www.ecologicalengineering.com/phytorem.html [14 March 2009]

Tambamroong, W. 2002. Phytoextraction of arsenic from contaminated soil by *Colocasia esculenta* (L.) Schott ; Taro and Wild taro. Master's Thesis Department of Environmental Science Graduate School. Chulalongkorn University.

Tang, Y.T., Qiu, R.L., Zeng, X.W. and Ying, R.R. 2008. Lead, zinc, cadmium hyperaccumula tion and growth stimulation in *Arabis paniculata* Franch. Environmental and Experimental Botany 66: 126-134.

Tanhan, P. 2008. Phytoextraction of lead *Chromolaena odorata* : hydroponic and experimaents. The degree doctor of philosophy (biology) faculty of graduate studies Mahidol University.

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*. Environmental Pollution 131 : 147-154.

USEPA. 1996. 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.

Vassil, A.D., Kapulnik, Y., Raskin, I. and Salt, D.E. 1998. The role of EDTA in lead transport and accumulation by Indian mustard. Plant Physiol 117 : 447-453.

Wang Hong-qi, Lu Si-jin, Li hua and Yao Zhi-hua. 2007. EDTA – enhanced phytoremediation of lead contaminated soil by *Bidens maximowic ziana*. Journal of Environmental Sciences 19: 1496-1499.

Wongtanet, J. and Parkpain, P. 2008. Phytoremediation of lead in contaminated water. Journal of Environmental research 30(2): 1-10.

Wu, F.Y., Leung, H.M., Wu, S.C., Ye, Z.H. and Wong, M.H. 2009. Variation in arsenic, lead and zinc tolerance and accumulation in six populations of *Pteris vittata* L. from China. Environmental Pollution : 1-11.

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. Agriculture, Ecosystems & Environment 102 : 307-318.

Xu, Y., Yamaji, N. Shen, R. and Ma, J.F. 2007. Sorghum roots are inefficient in uptake of EDTA-chelated lead. Annals of Botany 99 : 869-875.

Zaier, H., Ghnaya, T., Rejeb, K. B., Lakhdar, A., Rejeb ,S. and Jemal, F. 2010. Effects of EDTA on phytoremediation of heavy metal (Zn, Mn and Pb) from sludge-amended soil with *Brassica napus*. Bioresource Technology 101: 3978-3983.

Zhao, Z., et al. 2010. Effects of IDSA, EDDS and EDTA on heavy metals accumulation in hydroponically grown maize (*Zea mays,* L.). Journal of Hazardous Materials 181 : 455-459.

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
สูตรการคำนวณหาปริมาณสาร

1. การคำนวณสารตะกั่ว

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

เมื่อ A คือ ความเข้มข้นของตะกั่วที่ระดับต่างๆ
(มิลลิกรัมตะกั่วต่อกิโลกรัมดิน)
(มิลลิกรัมตะกั่วต่อลิตร)

S คือ น้ำหนักดิน (กิโลกรัม) , ปริมาตรน้ำ (ลิตร)

MM คือ มวลอะตอมของตะกั่ว (กรัม)

MW คือ มวลโมเลกุลของตะกั่ว (กรัม)

2. การหาปริมาณตะกั่วทั้งหมดในตัวอย่าง

ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในตัวอย่าง $= \frac{A \times B}{C \times 1,000}$

เมื่อ A คือ ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดจากการวัด AAs
(มิลลิกรัมต่อลิตร)

B คือ ปริมาณสารละลายที่นำไปวิเคราะห์ (มิลลิลิตร)

C คือ น้ำหนักแห้งหรือปริมาณของตัวอย่าง (กรัมหรือลิตร)

3. 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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การคำนวณปริมาณตะกั่วในดิน น้ำ และพืช

4.1 การคำนวณหาปริมาณตะกั่วในดิน

ปริมาณตะกั่วในดิน = A x B

เมื่อ A คือ ปริมาณตะกั่วที่วิเคราะห์ได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

B คือ น้ำหนักดินที่ใช้ในการทดลองต่อถุง (กิโลกรัม)

4.2 การคำนวณหาปริมาณตะกั่วในน้ำ

ปริมาณตะกั่วในน้ำ = A x B

เมื่อ A คือ ปริมาณตะกั่วที่วิเคราะห์ได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B คือ ปริมาตรน้ำที่ใช้ต่อหนึ่งภาชนะ (ลิตร)

4.3 การคำนวณหาปริมาณตะกั่วในพืช

ปริมาณตะกั่วในพืช = A x B

เมื่อ A คือ ปริมาณตะกั่วที่วิเคราะห์ได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

B คือ น้ำหนักแห้งของพืช (กิโลกรัม)

4.4 การคำนวณประสิทธิภาพของบอนเขียวในการดูดดึงตะกั่ว

$$\text{ประสิทธิภาพของบอนเขียว} = \left\{\frac{A}{B}\right\} \times 100$$

เมื่อ A คือ ปริมาณตะกั่วในบอนเขียว (มิลลิกรัม)

B คือ ปริมาณตะกั่วที่ใช้ทั้งหมด (มิลลิกรัม)

ภาคผนวก ข
ความสามารถของ EDTA และการแสดงอาการความเป็นพิษของพืช

ตารางที่ ข1 เปรียบเทียบความสามารถของสาร EDTA ในการดูดดึงโลหะหนักของพืชชนิดต่างๆ

ชนิดของพืช	ความเข้มข้นของสาร EDTA	ความเข้มข้นของตะกั่ว	อัตราการกำจัดตะกั่วเปรียบเทียบกับชุดควบคุม	ที่มา
Ananas comosus (L.) Merr.	2 $mmolkg^{-1}$	500 $mgkg^{-1}$	1.89	ทิพวรรณ และพันธวัศ (2552)
Bidens maximowicziana	3.15 $mmolkg^{-1}$	2,000 $mgkg^{-1}$	9.43	Wang et al (2007)
Brassica juncea L.	3 $mmolkg^{-1}$	492 $mgkg^{-1}$	2.8	Wu et al (2004)
Brassica juncea L.	8 $mmolkg^{-1}$	160 $mgkg^{-1}$	2.01	Cui et al (2004)
Brassica rapa	10 $mmolkg^{-1}$	1,100 $mgkg^{-1}$	6.09	Grcman et al (2001)
Chromolaena odorata	0.5 $mmolkg^{-1}$	1,200 $mgkg^{-1}$	5.34	Tanhun (2008)
Dianthus chinensis (L.)	5 $mmolkg^{-1}$	1,000 $mgkg^{-1}$	15	Lai et al (2003)
Zea mays L.	150 $\mu molL^{-1}$	150 $\mu molL^{-1}$	2.3	Zhao et al (2010)
Colocasia esculenta (L.) Schott	0.02 $mmolL^{-1}$	5 mgL^{-1}	2.2	การศึกษาในครั้งนี้ (2010)
Colocasia esculenta (L.) Schott	2 $mmolkg^{-1}$	13,000 $mgkg^{-1}$	3.05	การศึกษาในครั้งนี้ (2010)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข2 อาการแสดงความเป็นพิษของพืชชนิดต่างๆ

ชนิดของพืช	ความเข้มข้นของสาร EDTA	ความเข้มข้นของตะกั่ว	การแสดงอาการเป็นพิษ	ที่มา
Bidens maximowicziana	3.15 $mmolkg^{-1}$	2,000 $mgkg^{-1}$	ที่ปลายยอดและขอบใบ มีสีน้ำตาลเข้ม	Wang et al (2007)
Brassica juncea L.	10 $mmolkg^{-1}$	3 $mmolkg^{-1}$	ใบอ่อนเหี่ยว	Epstein et al (1999)
Brassica rapa	10 $mmolkg^{-1}$	1,100 $mgkg^{-1}$	มีการตายของเนื้อเยื่อในส่วนของใบ	Grcman et al (2001)
Chromolaena odorata	0.5 $mmolkg^{-1}$	1,200 $mgkg^{-1}$	มีการตายของเนื้อเยื่อในส่วนของใบ และมวลชีวภาพลดลง	Tanhun (2008)
Typha orientalis	0.5 $mmolL^{-1}$	500 mgL^{-1}	ยับยั้งการเจริญเติบโตของราก	Li et al (2008)
Colocasia esculenta (L.) Schott	0.03 $mmolL^{-1}$	5 mgL^{-1}	ใบเหี่ยว ใบหงิกงอ ขอบใบมีสีเหลือง และพืชตาย	การศึกษาในครั้งนี้ (2010)
Colocasia esculenta (L.) Schott	3 $mmolkg^{-1}$	13,000 $mgkg^{-1}$	ใบเหี่ยว ใบหงิกงอ และขอบใบมีสีเหลือง	การศึกษาในครั้งนี้ (2010)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
ปริมาณตะกั่วในดิน น้ำ และบอนเขียว

ตารางที่ ค1 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน

ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่วในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)									
	ระยะเวลา (วัน)									
	30	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	90	เฉลี่ย	120	เฉลี่ย	150	เฉลี่ย
0 mM	13654	12504	12702	12207	10407	11746	12362	11151	11593	10912
	11500		13016		12871		10800		9976	
	12358		10903		11960		10291		11167	
1 mM	11664	12448	12929	12116	12836	11517	11364	10932	9060	10470
	12186		12746		11083		11190		11889	
	13494		10673		10632		10242		10461	
2 mM	13422	12125	12628	11656	11518	11174	10513	10558	9986	10045
	11697		11767		10188		10837		9964	
	11256		10573		11816		10324		10185	
3 mM	10998	12057	12610	11400	12661	10813	9074	9954	9331	9624
	12470		10677		10203		10437		9572	
	12703		10913		9573		10351		9969	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค2 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ใบ) ของบอนเขียว

ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่วในพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)									
	ระยะเวลา (วัน)									
	30	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	90	เฉลี่ย	120	เฉลี่ย	150	เฉลี่ย
0 mM	4.85	4.90	11.35	10.90	14.92	13.45	45.79	41.74	41.26	44.98
	4.95		10.88		12.81		34.58		48.54	
	4.9		10.46		12.63		44.87		45.13	
1 mM	4.91	4.89	21.56	26.51	97.18	102.53	124.39	121.45	251.59	242.59
	4.92		27.76		104.02		117.41		242.25	
	4.85		30.21		106.4		122.56		233.93	
2 mM	21.12	32.89	49.16	50.96	131.71	130.79	157.42	155.89	451.95	449.04
	32.69		58.78		133.91		154.14		440.72	
	44.85		44.92		126.73		156.11		454.45	
3 mM	52.18	45.94	182.58	183.42	363.62	258.43	389.41	386.65	613.25	611.82
	41.4		209.23		351.95		374.92		609.74	
	44.25		158.47		359.73		395.62		612.47	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค3 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ก้านใบ) ของบอนเขียว

ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่วในพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)									
	ระยะเวลา (วัน)									
	30	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	90	เฉลี่ย	120	เฉลี่ย	150	เฉลี่ย
0 mM	11.12	10.34	40.60	38.37	53.18	54.95	166.16	150.60	507.58	511.50
	9.14		37.90		60.31		143.73		485.21	
	10.76		36.60		51.36		141.92		541.69	
1 mM	48.89	48.10	104.97	108.78	127.21	119.63	387.78	344.99	377.56	444.47
	49.71		114.24		117.76		323.14		428.71	
	45.71		107.12		113.92		324.03		527.14	
2 mM	136.28	139.04	194.42	192.80	295.23	283.37	372.20	361.77	540.67	541.58
	140.73		189.09		281.05		360.73		543.60	
	140.12		194.89		273.82		352.39		540.46	
3 mM	86.48	85.10	254.31	262.44	483.17	499.75	634.10	646.24	778.42	806.56
	85.48		261.82		508.55		711.23		797.53	
	83.34		271.19		507.52		593.39		843.74	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค4 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้ดินของบอนเขียว

ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่วในพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)									
	ระยะเวลา (วัน)									
	30	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	90	เฉลี่ย	120	เฉลี่ย	150	เฉลี่ย
0 mM	681.96	684.68	744.70	712.40	731.34	736.02	1007.31	995.06	1631.44	1628.89
	693.06		780.75		815.07		975.38		1624.29	
	679.03		611.74		661.64		1002.49		1630.94	
1 mM	596.06	793.01	1018.07	1184.48	1287.94	1381.38	1415.24	1423.88	1402.68	1716.68
	911.34		1190.50		1466.24		1412.52		1676.48	
	871.62		1344.87		1389.95		1443.88		2070.88	
2 mM	1417.54	1378.61	1689.43	1568.68	2723.65	2707.51	3351.93	3367.50	4737.43	4715.10
	1475.48		1553.06		2717.96		3266.32		4703.20	
	1242.83		1463.55		2680.93		3484.25		4704.68	
3 mM	1467.87	1473.91	1873.90	1863.38	2719.17	2751.13	5574.69	5674.81	8536.81	8561.26
	1322.73		1745.85		2757.02		5852.68		8460.54	
	1631.12		1970.39		2777.20		5597.07		8686.42	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค5 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์

ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
	ระยะเวลา (วัน)											
	15	เฉลี่ย	30	เฉลี่ย	45	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	75	เฉลี่ย	90	เฉลี่ย
0 mM	4.91	4.87	4.75	4.81	4.61	4.67	4.30	4.36	4.18	4.08	4.00	3.97
	4.89		4.89		4.61		4.41		4.15		3.83	
	4.79		4.79		4.80		4.37		3.92		4.06	
0.01 mM	4.79	4.81	4.60	4.61	4.29	4.35	4.00	4.04	3.71	3.83	3.59	3.60
	5.04		4.62		4.35		4.16		3.87		3.54	
	4.62		4.62		4.41		3.96		3.91		3.68	
0.02 mM	4.52	4.47	4.20	4.21	3.94	3.86	3.88	3.52	3.02	3.30	2.74	2.97
	4.41		4.08		3.66		3.42		3.36		3.16	
	4.48		4.36		3.99		3.26		3.51		3.01	
0.03 mM	4.61	4.67	4.44	4.49	4.08	4.18	3.88	3.95	3.54	3.56	3.07	3.32
	4.79		4.52		4.23		4.03		3.65		3.45	
	4.63		4.52		4.22		3.95		3.50		3.43	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค6 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ใบ) ของบอนเขียว

ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่วในพืช (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
	ระยะเวลา (วัน)											
	15	เฉลี่ย	30	เฉลี่ย	45	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	75	เฉลี่ย	90	เฉลี่ย
0 mM	3.25	3.35	6.32	6.43	9.91	10.31	24.95	24.99	48.41	48.67	51.83	51.91
	3.47		6.60		10.67		25.03		48.81		51.85	
	3.32		6.37		10.34		24.99		48.78		52.06	
0.01 mM	4.96	4.91	6.71	6.66	11.20	11.10	26.12	26.41	49.29	49.55	80.51	79.77
	4.91		6.64		11.13		26.71		49.87		79.82	
	4.86		6.62		10.98		26.40		49.47		78.99	
0.02 mM	4.96	4.94	13.71	13.77	15.97	16.40	33.33	33.19	79.11	78.99	90.83	91.06
	4.95		14.05		16.24		33.31		79.05		91.50	
	4.92		13.56		16.98		32.94		78.82		90.85	
0.03 mM	4.94	4.93	8.39	8.31	15.80	15.58	30.97	30.99	51.89	51.43	83.18	82.55
	4.96		8.28		15.74		30.93		51.24		82.60	
	4.88		8.27		15.20		31.08		51.14		81.87	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค7 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ) ของบอนเขียว

ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่วในพืช (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
	ระยะเวลา (วัน)											
	15	เฉลี่ย	30	เฉลี่ย	45	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	75	เฉลี่ย	90	เฉลี่ย
0 mM	4.83	4.84	9.42	9.73	14.94	14.98	39.00	38.82	52.58	52.71	65.34	64.79
	4.88		9.75		14.86		38.64		52.53		64.68	
	4.82		10.02		15.15		38.81		53.02		64.35	
0.01 mM	4.95	4.89	12.60	12.32	22.83	23.05	43.43	43.40	70.50	70.62	81.99	82.13
	4.87		12.38		23.28		43.68		70.82		82.35	
	4.85		11.98		22.99		43.09		70.55		82.05	
0.02 mM	5.49	5.41	32.82	32.87	54.30	54.10	65.20	65.27	88.02	89.73	126.24	126.19
	5.31		32.93		53.94		65.49		89.57		126.31	
	5.44		32.85		54.06		65.13		91.60		126.03	
0.03 mM	4.92	4.91	27.02	26.83	34.94	34.79	44.91	45.21	73.72	73.86	93.11	92.55
	4.92		26.80		34.78		45.06		74.01		91.92	
	4.90		26.66		34.66		45.69		73.85		92.63	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค8 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนใต้น้ำของบอนเขียว

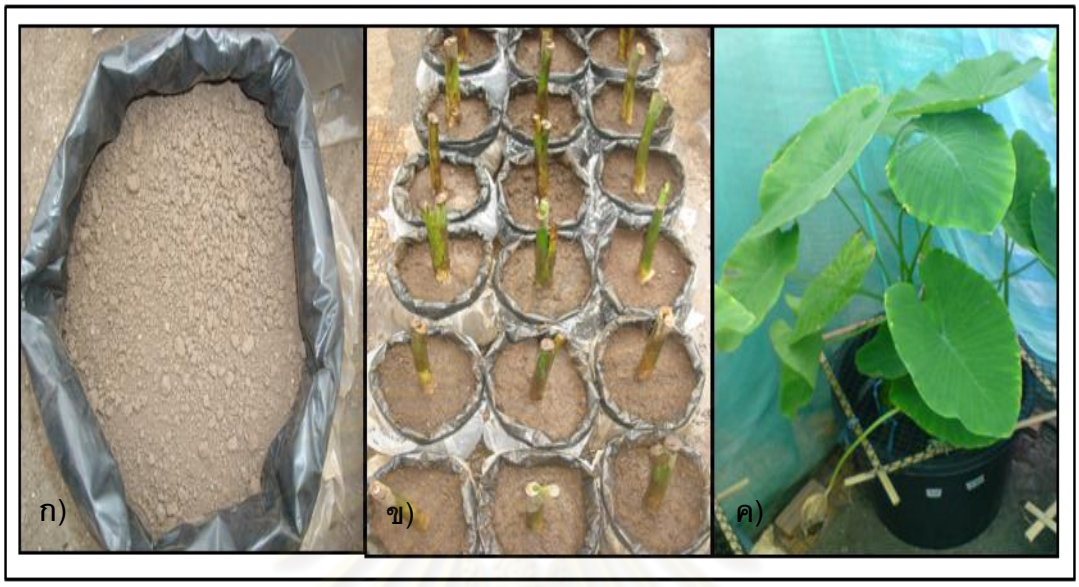
ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกั่วในพืช (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
	ระยะเวลา (วัน)											
	15	เฉลี่ย	30	เฉลี่ย	45	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	75	เฉลี่ย	90	เฉลี่ย
0 mM	26.84	26.33	48.02	47.87	112.60	112.84	132.01	131.98	163.39	163.79	300.11	299.32
	26.00		47.76		112.90		131.91		163.82		299.39	
	26.16		47.84		113.01		132.03		164.15		298.46	
0.01 mM	112.20	111.96	232.40	232.43	294.82	295.18	303.97	303.74	314.59	314.64	332.97	333.02
	111.80		232.17		295.03		303.70		314.25		332.94	
	111.87		232.73		295.68		303.55		315.10		333.16	
0.02 mM	216.11	215.52	319.53	319.03	425.96	425.89	473.60	473.34	471.31	470.75	502.68	502.84
	215.60		319.12		426.12		473.15		469.99		502.82	
	214.86		318.45		425.59		473.28		470.95		503.02	
0.03 mM	138.57	138.77	257.18	257.18	316.19	316.54	382.75	382.68	417.10	416.63	438.55	438.71
	138.69		257.44		316.66		382.47		416.23		439.22	
	139.06		256.94		316.76		382.83		416.57		438.38	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

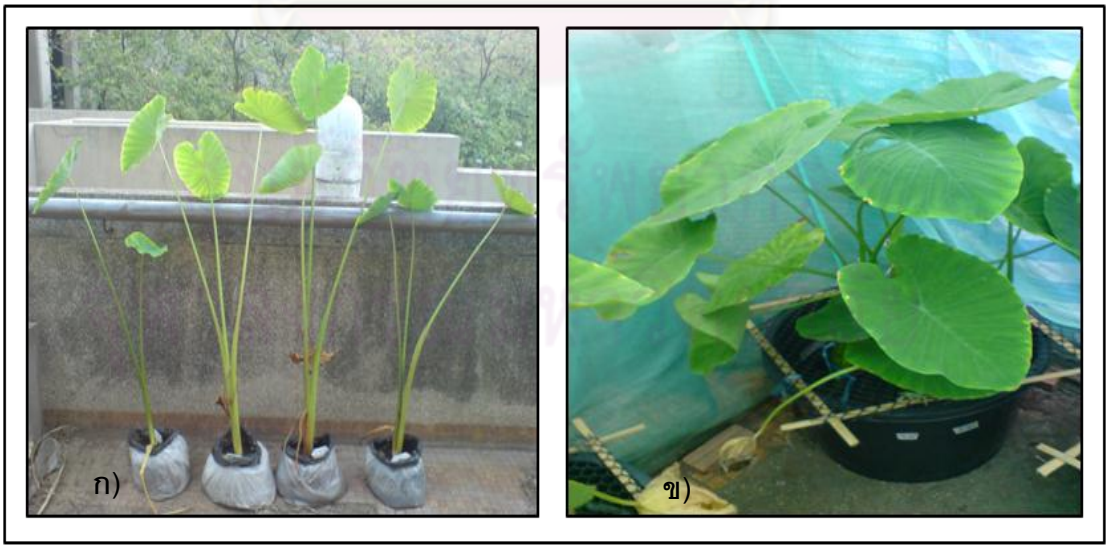
ภาคผนวก ง
รูปภาพประกอบการทดลอง

รูปที่ ง1 ก) กรณีตะกั่วปนเปื้อนในดิน ข) กรณีตะกั่วปนเปื้อนในน้ำ บริเวณห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี

รูปที่ ง2 ก) การเตรียมดิน ข) บอนเขียวสำหรับการปลูกในการทดลองดิน ค) บอนเขียวสำหรับปลูกในการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์



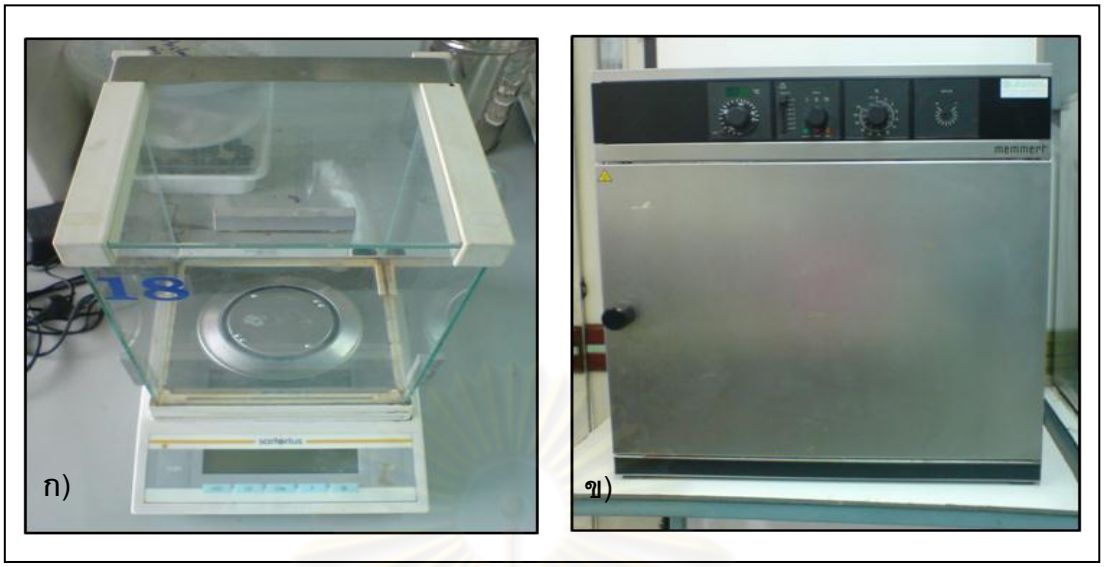
รูปที่ ง3 ก) การเตรียมภาชนะปลูก ข) การปลูกบอนเขียวในภาชนะสำหรับการทดลองในดิน ค) การปลูกบอนเขียวในการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์



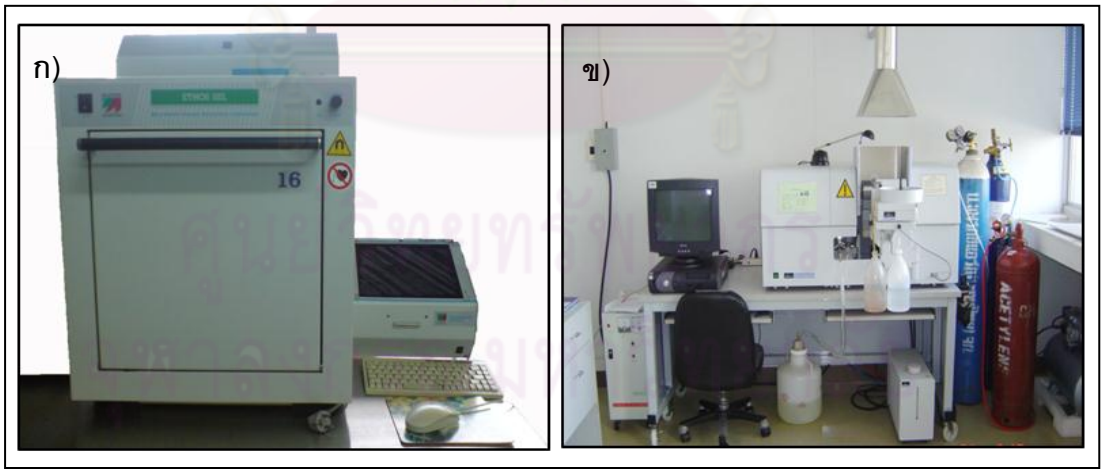
รูปที่ ง4 การทดลองในเรือนเพาะชำ ก) การทดลองในดิน ข) การทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์

รูปที่ ง5 ก) การวัดส่วนสูงส่วนเหนือดิน ข) การวัดความยาวส่วนใต้ดิน ค) การอบตัวอย่างพืช

รูปที่ ง6 ก) พืชที่ปั่นละเอียด ข) ดินที่บดละเอียด ค) เครื่องปั่นพืช



รูปที่ ง7 ก) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่งพิกัด 220 กรัม ข) ตู้อบความร้อน (hot air oven)



รูปที่ ง8 ก) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (microwave digestion) ข) เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption spectrometer; AAs)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวยศวนันท์ หงส์พิริยะกุล เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน 2528 ที่จังหวัดชุมพร สำเร็จการศึกษาระดับ ปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 ในระหว่างการศึกษาได้เข้าร่วมเสนองานวิจัย ในการประชุมวิชาการระดับชาติ โดยได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานดังต่อไปนี้

ยศวนันท์ หงส์พิริยะกุล และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. “การใช้บอนเขียวในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน บริเวณห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี”. หนังสือประมวลผลการประชุมทางวิชาการ (Proceeding) ใน การประชุมเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ครั้งที่ 2 ณ ห้อง ST 2 อาคารบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่, 26 พฤศจิกายน 2553, หน้า 322-330.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย