ผลของสารคีเลตและพีเอชต่อการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวา

นางสาวกัลย์สุดา ปิ่นพา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# EFFECT OF CHELATING AGENT AND PH ON CADMIUM REMOVAL FROM CONTAMINATED SEDIMENT WITH *EICHHORNIA CRASSIPES* (WATER HYACINTH)

Miss Kansuda Pinpa

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ผลของสารคีเลตและพีเอชต่อการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวา |
| โดย | นางสาวกัลย์สุดา ปิ่นพา |
| สาขาวิชา | วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช |

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเนตร ชุตินธรานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทรา ทองคำเภา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ปารมี เพ็งปรีชา)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กัลย์สุดา ปิ่นพา : ผลของสารคีเลตและพีเอชต่อการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวา (EFFECT OF CHELATING AGENT AND PH ON CADMIUM REMOVAL FROM CONTAMINATED SEDIMENT WITH *EICHHORNIA CRASSIPES* (WATER HYACINTH)) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 135 หน้า.

การศึกษาผลของสารคีเลตและพีเอชต่อการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวา โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุมที่มีดินปนเปื้อนและน้ำมีการปรับพีเอชที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 2) ชุดการทดลองที่แบ่งออกเป็น 3 ชุด คือ 1) ชุดการทดลองที่มีดินปนเปื้อนโดยน้ำมีการเติมสารอีดีทีเอ ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9 2) ชุดการทดลองที่มีดินปนเปื้อนโดยน้ำมีการเติมสารดีทีพีเอ ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9 3) ชุดการทดลองที่มีดินปนเปื้อนโดยน้ำมีการเติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารดีทีพีเอ ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9 ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30, 60, 90 และ 120 วัน เพื่อหาปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของผักตบชวา ผลการทดลองพบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ รองลงมา คือ ส่วนเหนือน้ำ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าการเติมสารคีเลตทั้งสองชนิดร่วมกับการปรับพีเอชที่ระดับต่างๆ มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา โดยชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ ที่ระดับพีเอช 5 มีการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 62.55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในส่วนเหนือน้ำ เท่ากับ 10.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และชุดการทดลองที่เติมสารดีทีพีเอ ที่ระดับพีเอช 4 มีการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 61.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในส่วนเหนือน้ำ เท่ากับ 10.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งที่เวลา 30 วัน สำหรับชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอที่ระดับพีเอช 5 มีการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 112.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ในส่วนเหนือน้ำ เท่ากับ 14.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ที่เวลา 90 วัน

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2557 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5487107720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE
KEYWORDS: EDTA / DTPA / PHYTOREMEDIATION / CADMIUM

KANSUDA PINPA: EFFECT OF CHELATING AGENT AND PH ON CADMIUM REMOVAL FROM CONTAMINATED SEDIMENT WITH *EICHHORNIA CRASSIPES* (WATER HYACINTH). ADVISOR: ASST. PROF. PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D., 135 pp.

The effects of chelating agents and pH on cadmium removal from contaminated sediment with *Eichhornia crassipes* (water hyacinth) were studied. The experimental design was separated into two sets: 1) control and 2) treatment set. The control set was contaminated soil with water at pH 4, 5, 7 and 9. The treatment set was separated into three parts: 1) contaminated soil with EDTA at concentrations of 2 mg/L and at pH 4, 5, 7 and 9; 2) contaminated soil with DTPA at concentrations of 2 mg/L at pH 4, 5, 7 and 9, and 3) contaminated soil with both EDTA and DTPA at concentration of 2 mg/L at pH to 4, 5, 7 and 9. Plants were harvested at 30, 60, 90 and 120 days. Cd levels were measured in two parts of the plant: Above ground plant (stem and leaves) and under ground plant (root). The results showed that Cd accumulation in root in all treatment sets were significantly ($P<0.05$) higher than that in shoot. Cd accumulation in plants with added EDTA and DTPA were higher than the control set, which indicates that EDTA and DTPA at pH different levels increased Cd uptake by water hyacinth. The EDTA at pH 5 and DTPA at pH 4 showed higher Cd accumulation in roots than in shoots on follow; 62.55 and 10.23 mg/kg dry weight of plant, and 61.17 and 10.20 mg/kg dry weight of plant at 30 days, respectively. However, EDTA and DTPA mixing at pH 5, the Cd accumulation in root was higher than in shoots and was evaluated at 112.73 and 14.23 mg/kg dry weight of plant at 90 days, respectively.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study: Environmental Science Student's Signature .....

Academic Year: 2014 Advisor's Signature .....

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งข้อคิดเห็นต่างๆ ของการศึกษาด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้ช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ดียิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทรา ทองคำเภา และ ดร. ปารมี เพ็งปรีชา ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมและศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ในการทดลอง ขอขอบคุณ คุณวลีพร ศรีเพ็ญประภา และนักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม ที่ได้อำนวยความสะดวก ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยตลอดจนขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และให้กำลังใจตลอดระยะเวลาทำการศึกษา และขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเชน ปิ่นพา คุณแม่วันเพ็ญ ปิ่นพา และทุกคนในครอบครัวที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษา และเป็นกำลังใจที่สำคัญสำหรับข้าพเจ้าตลอดมา

**สารบัญ**

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย ..... 2
1.3 สมมติฐาน ..... 2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย ..... 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 6
2.1 แคดเมียม ..... 6
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม ..... 6
2.1.2 แหล่งที่มาของแคดเมียม ..... 7
2.1.3 การนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์ ..... 8
2.1.4 ความเป็นพิษของแคดเมียม ..... 9
2.1.5 ค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแคดเมียม ..... 11
2.2 เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation) ..... 12
2.2.1 ความหมายของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช ..... 12
2.2.2 ชนิดของการใช้เทคโนโลยีบำบัดโดยใช้พืช ..... 13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.2.3 การจำแนกชนิดของพืชที่นำมาใช้บำบัด ..... 15
2.2.4 ข้อดี-ข้อเสียของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช ..... 15
2.3 ผักตบชวา (Water hyacinth) ..... 16
2.3.1 ถิ่นกำเนิดของผักตบชวา ..... 16
2.3.2 ลักษณะทางพฤษศาสตร์ของผักตบชวา ..... 17
2.3.3 องค์ประกอบของผักตบชวา ..... 20
2.4 สารคีเลตที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึงโลหะหนัก ..... 22
2.4.1 อีดีทีเอ (EDTA) ..... 23
2.4.2 ดีทีพีเอ (DTPA) ..... 26
2.5 ปัจจัยของค่าพีเอช (pH) ที่มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนัก ..... 28
2.5.1 พีเอชในดิน ..... 28
2.5.2 ค่าพีเอชต่อพืช ..... 29
2.6 แสงซินโครตรอน(Synchrotron ) ..... 29
2.6.1 ความหมายของแสงซินโครตรอน ..... 29
2.6.2 ระบบลำเลียงแสง BL6b: micro-XRF ..... 30
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย ..... 38
3.1 สถานที่การวิจัย ..... 38
3.2 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี ..... 38
3.3 การเตรียมการวิจัย ..... 40
3.4 วิธีการศึกษาผลของอีดีทีเอและดีทีพีเอต่อการดึงดูดแคดเมียมในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวาที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน ..... 41
3.5 การเก็บตัวอย่าง ..... 42

หน้า

3.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ ดินตะกอน และพืช ..... 44
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ..... 45
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย ..... 46
4.1 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีในน้ำทดลอง ..... 46
4.2 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีในดินตะกอนท้องน้ำ ..... 54
4.3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำ ..... 61
4.4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน ..... 63
4.5 ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน ..... 65
4.6 ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา ..... 67
4.7 ผลของอีดีทีเอและดีทีพีเอต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา ..... 78
4.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารอีดีทีเอและดีทีพีเอต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวา ..... 82
4.9 การเคลื่อนที่ของแคดเมียมในผักตบชวาด้วยแสงซินโครตรอน ..... 85
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ..... 87
5.1 สรุปผลการวิจัย ..... 87
5.2 ข้อเสนอแนะ ..... 89
รายการอ้างอิง ..... 90
ภาคผนวก ก ..... 98
ภาคผนวก ข ..... 122
ภาคผนวก ค ..... 131
ภาคผนวก ง ..... 132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 135

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแคดเมียมในอาหาร ..... 11
ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม ..... 12
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา ..... 20
ตารางที่ 2.4 สารคีเลตสังเคราะห์ที่เหมาะสมกับจุลธาตุอาหารต่างๆ ..... 23
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอีดีทีเอ ..... 24
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดีทีพีเอ ..... 27
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินตะกอนท้องน้ำและวิธีการวิเคราะห์ ..... 41
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้นของน้ำทดลอง ..... 46
ตารางที่ 4.2 ค่าพีเอชในน้ำ ..... 47
ตารางที่ 4.3 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำ ..... 49
ตารางที่ 4.4 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำ ..... 51
ตารางที่ 4.5 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ ..... 53
ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้นของดินตะกอนท้องน้ำทดลอง ..... 54
ตารางที่ 4.7 ค่าพีเอชในดิน ..... 56
ตารางที่ 4.8 ค่าการนำไฟฟ้าในดิน ..... 58
ตารางที่ 4.9 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในดิน ..... 60
ตารางที่ 4.10 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำ ..... 62
ตารางที่ 4.11 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน ..... 64
ตารางที่ 4.12 ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน ..... 66
ตารางที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา ..... 84

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตการวิจัย ..... 4
รูปที่ 2.1 ลักษณะผลึกของแคดเมียม ..... 6
รูปที่ 2.2 เทคโนโลยีการบำบัดสารมลพิษโดยใช้พืช (Phytoremediation) ..... 14
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของผักตบชวา ..... 19
รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของสารอีดีทีเอ ..... 24
รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของสารดีทีพีเอ ..... 27
รูปที่ 2.6 การดูดซับของธาตุไฮดรัสเฟอริกออกไซด์ ที่มา: Adriano (2001) ..... 29
รูปที่ 2.7 สถานีทดลอง ระบบลำเลียงแสงที่ 6 micro-XRF ของห้องปฏิบัติแสงสยาม ..... 32
รูปที่ 4.1 ผลของอีดีทีเอ และพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา ..... 69
รูปที่ 4.2 ผลของอีดีทีเอและพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา ..... 69
รูปที่ 4.3 ผลของดีทีพีเอ และพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา ..... 72
รูปที่ 4.4 ผลของดีทีพีเอและพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา ... 72
รูปที่ 4.5 ผลของอีดีทีเอ+ดีทีพีเอและพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา . 74
รูปที่ 4.6 ผลของอีดีทีเอ+ดีทีพีเอและพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา ..... 75
รูปที่ 4.7 ผลของพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา ..... 77
รูปที่ 4.8 ผลของพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา ..... 77
รูปที่ 4.9 ผลของอีดีทีเอต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา ..... 79
รูปที่ 4.10 ผลของดีทีพีเอต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา ..... 80
รูปที่ 4.11 ผลของอีดีทีเอ+ดีทีพีเอ ต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา ..... 81

รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพของอีดีทีเอและดีทีพีเอต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวา ..... 83

รูปที่ 4.13 การเคลื่อนที่ของธาตุอาร์กอน (Ar) แคลเซียม (Ca) คลอรีน (Cl) และโพแทสเซียม (K) ในผักตบชวา ก) ลำต้น ข) ใบ ค) ราก และ ง) การกระจายตัวของแคลเซียมในส่วนของลำต้นผักตบชวา..... 86

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหามลพิษโดยเฉพาะกลุ่มโลหะหนักมีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทั่วไป ทั้งนี้เนื่องมาจากการพัฒนาด้านอุตสาหกรรม และกิจกรรมการทำเหมืองแร่ที่มีการปลดปล่อยของเสียอันตรายและน้ำเสีย รวมทั้งกิจกรรมทางการเกษตรที่มีการเปิดหน้าดินเพื่อการเพาะปลูก ทำให้โลหะหนักเกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและดินตะกอนท้องน้ำ ซึ่งกลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ในจำพวกโลหะหนักนั้น แคดเมียมถือได้ว่าเป็นหนึ่งในชนิดของโลหะหนักที่มีอันตรายเมื่อมีการปนเปื้อน หากไม่ได้รับการบำบัดที่เหมาะสมแล้ว จะมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ความเป็นพิษต่อสัตว์ ความเป็นพิษต่อพืช และความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

สถาบันจัดการคุณภาพน้ำนานาชาติ (International Water Management Institute : IWMI) ร่วมกับกรมวิชาการเกษตรได้ทำการเก็บข้อมูลวิจัยในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยได้ทำการสำรวจสภาพพื้นที่และเก็บตัวอย่างคุณภาพสิ่งแวดล้อมและพบการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม มีสาเหตุมาจากกระบวนการตามธรรมชาติและกิจกรรมจากมนุษย์เป็นสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากมีการตรวจพบปริมาณแคดเมียมปนเปื้อนสูงผิดปกติในชั้นดินและตะกอนท้องน้ำของทั้งลุ่มน้ำแม่ตาวซึ่งรองรับน้ำล้นจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ อีกทั้งพบปริมาณแคดเมียมมีการปนเปื้อนในลุ่มน้ำแม่ตาวตอนล่างสูงถึง 0.3-0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐาน และการเหมืองแร่, 2549) ซึ่งเป็นอันตรายต่อประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณพื้นที่ที่มีการใช้น้ำจากห้วยแม่ตาวไปใช้ในการอุปโภคบริโภค ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อประชาชนและสิ่งมีชีวิต ดังนั้นการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำในห้วยแม่ตาว จึงเป็นสิ่งที่ควรดำเนินการแก้ไข ทางเลือกหนึ่ง คือ การใช้พืชบำบัดสารมลพิษ (Phytoremediation) โดยมีกลไกดูดดึงโลหะหนักโดยใช้หลักการพื้นฐานของการสะสมโลหะหนักซึ่งประกอบไปด้วย 2 กระบวนการ คือ การดูดดึงโลหะหนักโดยรากพืช และการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากสู่ส่วนต่างๆ ของพืช ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความเรียบง่าย สะดวก ประหยัดค่าใช้จ่าย และเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม(Environmental friendly)

งานวิจัยครั้งนี้ได้คัดเลือกพืชที่นำมาใช้ในการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยพืชที่นำมาใช้คือ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) หรือ

Water hyacinth ด้วยคุณสมบัติของผักตบชวา เป็นพืชที่ง่ายต่อการปลูกและดูแลรักษา มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว สามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ หาง่าย สามารถพบได้ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย ซึ่งลักษณะของผักตบชวามีลำต้นอวบน้ำ และมีโครงสร้างท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) และท่อลำเลียงอาหาร (Phloem) ที่มาก จึงคาดการณ์ว่าน่าจะมีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมในดินตะกอนท้องน้ำได้ดี ดังนั้นจึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งของการใช้ผักตบชวาดูดดึงแคดเมียมออกจากดินตะกอนท้องน้ำร่วมกับการใช้สารคีเลต ได้แก่ อีดีทีเอ และดีทีพีเอ ภายใต้การควบคุมพีเอช (pH) ที่แตกต่างกัน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมได้มากขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการฟื้นฟูดินตะกอนท้องน้ำที่ปนเปื้อนแคดเมียมในบริเวณพื้นที่จริงได้

**1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย**

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถของผักตบชวาในการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำ

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอีดีทีเอ และดีทีพีเอ ภายใต้การควบคุมพีเอชที่แตกต่างกันที่มีผลต่อการสะสมแคดเมียมและการแสดงความเป็นพิษของผักตบชวา

**1.3 สมมติฐาน**

1.3.1 ผักตบชวามีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในดินตะกอนท้องน้ำได้ดี และสามารถสะสมในส่วนต่างๆ ของผักตบชวาได้แตกต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.3.2 การเติมอีดีทีเอ และดีทีพีเอ ภายใต้การควบคุมพีเอชที่แตกต่างกันมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียมในผักตบชวาได้มากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และไม่ส่งผลต่อการแสดงความเป็นพิษของผักตบชวา

**1.4 ขอบเขตของการวิจัย**

การศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมจากดินตะกอนท้องน้ำที่มีสารละลายแคดเมียมปนเปื้อน และมีการใช้สารคีเลตภายใต้การควบคุมพีเอชที่แตกต่างกันเพื่อช่วยในการดูดดึงไว้ในส่วนต่างๆ ของผักตบชวา ซึ่งขอบเขตของการวิจัยสามารถแสดงได้ในรูปที่ 1.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.4.1 พืชที่ใช้ในการศึกษา คือ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes* (Hart.) Solms)

1.4.2 ดินที่ใช้ในการศึกษา เป็นดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมจาก อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีความเข้มข้น 64.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งได้นำตัวอย่างดิน 5 กิโลกรัม มาผสมกับน้ำจำนวน 10 ลิตร เพื่อเป็นแบบจำลองดินตะกอนท้องน้ำ

1.4.3 สารคีเลตที่ใช้ คือ เอทิลีนไดแอมีนเทตระแอซิตริกแอซิด (Ethylene diamine tetraacetic acid; EDTA) และไดเอธิลลีนไตรเอมีนเพนทระเอซิติกเอซิด (Diethylenetriamine pentaacetic acid; DTPA) โดยใช้ปริมาณอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร (อ้างอิงจากกัลปพฤกษ์, 2553 และ Akegacha, 2011 ตามลำดับ)

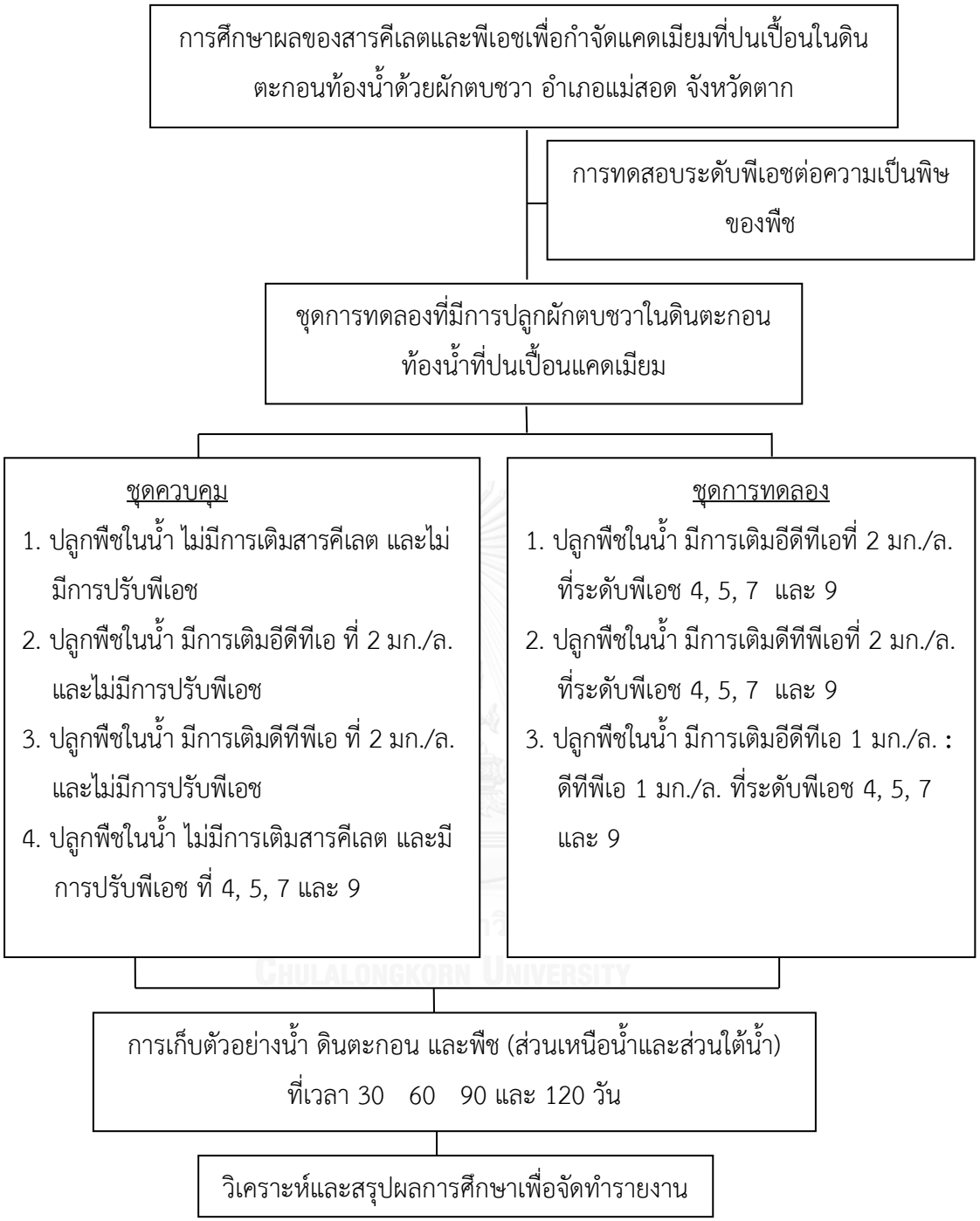
1.4.4 การควบคุมพีเอช 4 ระดับ ได้แก่ 4, 5, 7 และ 9

1.4.5 ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง คือ 120 วัน โดยทำการการเก็บตัวอย่างน้ำ ดินตะกอน และพืชทุกๆ 30 วันตลอดระยะเวลาของการทดลอง คือ วันที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน

1.4.6 ตัวอย่างพืชทดลองได้ทำการแยกส่วนออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) สำหรับตัวอย่างน้ำจะทำการเก็บและวัดปริมาตรน้ำก่อน

1.4.7 การเจริญเติบโตของพืชทดลองได้ทำการบันทึกการเจริญเติบโตด้วยการสังเกต

1.4.8 การดำเนินการทดลองได้ปฏิบัติในเรือนเพาะชำ และทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ




รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตการวิจัย

**1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1.5.1 ทราบถึงความสามารถและประสิทธิภาพของผักตบชวาในการดูดดึงแคดเมียมในดินตะกอนท้องน้ำไปไว้ในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ)

1.5.2 ทราบถึงระดับความเข้มข้นของพีเอช (pH) ที่ใช้ร่วมกับสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารดีทีพีเอ (DTPA) ที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการสะสมแคดเมียม และผลต่อการแสดงความเป็นพิษของผักตบชวา

1.5.3 สามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำในพื้นที่จริงได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 2
# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 แคดเมียม

### 2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม

แคดเมียม (Cadmium, Cd) เป็นธาตุจัดอยู่ในหมู่ IIB ในตารางธาตุ (Periodic table of elements) เป็นโลหะหนักมีผลึกสีน้ำเงินแกมขาว วาว ดังรูปที่ 2.1 มีอะตอมมิคนัมเบอร์ (Atomic number) เท่ากับ 48 มีมวลอะตอมเท่ากับ (Atomic mass) เท่ากับ 112.411 เลขออกซิเดชั่น +2 (ออกไซด์เป็นเบสปานกลาง) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Hexagonal จุดหลอมละลาย 321องศาเซลเซียส จุดเดือด 767 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 8.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรจะมีลักษณะเป็นรูปแท่ง แผ่น เส้นลวด หรือเป็นผงเม็ดเล็กๆ (Traina, 1999) มีคุณสมบัติเบา เนื้ออ่อน ดัดงอได้ง่าย และทนต่อการกัดกร่อน แคดเมียมไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก (Nitric acid) แอมโมเนียมไนเตรท ($NH_4NO_3$) และกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) ที่ร้อน (Adriano, 2001)

รูปที่ 2.1 ลักษณะผลึกของแคดเมียม
ที่มา: International Cadmium Association (2006)

### 2.1.2 แหล่งที่มาของแคดเมียม

แหล่งที่มาของแคดเมียมที่เป็นสาเหตุของการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม สามารถแบ่งแหล่งที่มาของแคดเมียมได้ดังต่อไปนี้ (กรมควบคุมมลพิษ (2541); ดัดแปลงจาก(วราภรณ์ ศรีตัมภวา (2550)))

1) จากอุตสาหกรรม

สาเหตุการปนเปื้อนแคดเมียมจากอุตสาหกรรมสู่สิ่งแวดล้อมมีหลายด้าน ได้แก่ อุตสาหกรรมตะกั่วและสังกะสี อุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า ซึ่งจะมีการปล่อยฝุ่น ไอ น้ำเสีย และกากตะกอน ที่มีแคดเมียมปนอยู่ออกมา อุตสาหกรรมชุบโลหะ

2) จากเหมืองแร่และการถลุงแร่

แคดเมียมเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่สังกะสี จากการหลอมแร่ซัลไฟต์ เนื่องจากแร่แคดเมียมอยู่รวมกับสินแร่สังกะสี (Zn) โดยเหมืองแร่ และการถลุงแร่ จะปล่อยฝุ่น ไอ น้ำเสีย และกากตะกอนออกมา

3) จากการใช้ปุ๋ยในการเกษตรกรรม

การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตในการเกษตรจะเป็นการเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดิน เนื่องจากปุ๋ยฟอสเฟตมาจากหินฟอสเฟต ซึ่งมีระดับแคดเมียมเจือปนอยู่ ในปริมาณ 7-170 ppm ทำให้ไปเพิ่มแคดเมียมในดิน เพราะแคลเซียมฟอสเฟตละลายน้ำได้น้อย ทำให้ส่วนที่ไม่ละลายพืชสามารถดูดซึมได้ ดังนั้นแคดเมียมส่วนนี้จึงสะสมอยู่ในดิน ถ้ามีการใช้ปุ๋ยแอมโมเนียร่วมด้วย แคดเมียมจะละลายได้มากขึ้น เนื่องจากแคดเมียมจะไปรวมตัวกับแอมโมเนียเป็นอิออนอิสระที่ละลายน้ำได้ คือ $Cd(NH_3)_2^{+2}$ และ $Cd(NH_3)_4^{+2}$

4) จากกากตะกอนน้ำทิ้ง

การนำกากตะกอนน้ำทิ้งจากจากโรงงานกำจัดน้ำเสียเพื่อเป็นปุ๋ยในพื้นที่การเกษตรจะเป็นการเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดิน เนื่องจากว่ากากตะกอนจากโรงงานกำจัดน้ำเสียมีปริมาณแคดเมียมค่อนข้างสูง และเป็นการเพิ่มปริมาณแคดเมียมในพืชที่ปลูกในพื้นที่ ทำให้สะสมแคดเมียมใน

เนื้อเยื่อพืชและในห่วงโซ่อาหารไปสู่ผู้ที่บริโภคได้ การนำกากตะกอนมาใช้ควรจะคำนึงถึงค่ามาตรฐานในการกำหนดปริมาณแคดเมียมในกากตะกอนด้วย (Traina และคณะ, 1999)

5) จากยางรถยนต์ที่สึกหรอ

ในส่วนประกอบของยางรถยนต์ที่สึกหรอจะมีแคดเมียมประกอบอยู่ประมาณ 20-90 ppm โดยจะเป็นสิ่งเจือปน (Impurity) ใน Zinc oxide ซึ่งเป็นสารที่รักษาความเร่ง เมื่อทิ้งไว้จะทำให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

**2.1.3 การนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์**

การนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์สามารถนำมาใช้ได้หลายทาง ซึ่งประกอบดังต่อไปนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541; สุรภี โรจน์อารยานนท์, 2532)

1) ทางอุตสาหกรรม

(1.1) อุตสาหกรรมชุบโลหะ ใช้แคดเมียมเคลือบบนแผ่นเหล็ก ทองแดง อะลูมิเนียม โดยการชุบด้วยไฟฟ้า จะได้ผิวโลหะที่เงางาม และทนต่อการกัดกร่อน ไม่เป็นสนิม โลหะที่ได้จากการชุบนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และส่วนประกอบอื่นๆ เป็นต้น (James, 1999)

(1.2) อุตสาหกรรมสีย้อม ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวของพลาสติก โดยใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เช่น แคดเมียมซัลโฟซีลีไนด์ (Cadmium sulphoselenide) และแคดเมียมสเตียเรท (Cadmium stearate) ในรูปของแคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulphide) ใช้เป็นตัวสีในสิ่งต่างๆ เพราะให้สีสวยจะทำให้ได้สีเหลืองสด ส้ม จนถึงสีแดงเข้ม ใช้ในเม็ดพลาสติก การเคลือบแก้วหรือโลหะ แก้วเซรามิค และ ใช้สีทา สีพ่น หมึก ยาง เสื้อผ้า และสีที่จิตรกรใช้เป็นสีในภาพวาด เป็นต้น (International Cadmium Association, 2006)

(1.3) อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ โดยใช้ร่วมกับโลหะนิเกิล เป็น Cadmium-nickel battery ซึ่งจะนำมาใช้ผลิตเป็นแบตเตอรี่ในเครื่องคิดเลข นาฬิกา แฟลชถ่ายรูป และเครื่องโกนหนวด เป็นต้น

(1.4) อุตสาหกรรมอัลลอยด์ โดยใช้ผสมกับโลหะอื่นจะเป็นโลหะอัลลอยด์ เช่น ผสมกับโลหะทองแดงจะช่วยเพิ่มความเหนียว และความทนทานต่อการสึกหรอให้กับทองแดง

ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งยังทนอุณหภูมิสูงด้วยนำไปใช้ผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องทนความร้อน เช่น ทำหม้อน้ำรถยนต์ หรืออุปกรณ์เครื่องเย็นต่างๆ ที่ต้องระบายความร้อนมากๆ

2) ใช้ในด้านอื่นๆ เช่น ผสมในสารฆ่าเชื้อราที่ใช้ในกิจการเกษตร ใช้ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู ใช้ในการผลิตเครื่องประดับอัญมณีต่างๆ ใช้ผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น

### 2.1.4 ความเป็นพิษของแคดเมียม

ความเป็นพิษต่อมนุษย์ และสัตว์นั้นเกิดจากการสะสมแคดเมียมในร่างกาย และจะเพิ่มขึ้นตามอายุ ในการขับแคดเมียมที่ดูดซึมเข้าไปออกจากร่างกายจะเป็นไปค่อนข้างช้ามาก และวงจรครึ่งชีวิตของคนค่อนข้างยาวประมาณ 16 ถึง 33 ปี โดยทั่วไปร่างกายจะรับแคดเมียมผ่านเข้าทางร่างกายด้วยการกิน และการสูดดมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งความเป็นพิษจากการได้รับแคดเมียมเป็นไปได้ 2 ประเภท (กรมควบคุมมลพิษ, 2541; ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) ได้แก่

1) ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

(1.1) เป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจ โดยเกิดจากการหายใจเอาฝุ่นละอองของแคดเมียมที่เกิดจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมหรือกิจการต่างที่ทำให้เกิดฝุ่นของแคดเมียมในอากาศเข้าไป โดยทั่วไปหลังจากได้รับการสูดเอาแคดเมียมเข้าไปประมาณ 2 ถึง 3 ชั่วโมง จะเกิดอาการระคายเคืองในจมูก คอ หลอดลม และปอด มีอาการปวดศีรษะ เวียนศีรษะ หนาวสั่น มีไข้ อ่อนเพลีย เจ็บบริเวณหน้าอก ไอมีเสมหะเป็นเลือด คลื่นไส้ อาเจียน และท้องร่วง เป็นต้น

(1.2) เป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร โดยเกิดจากการได้รับแคดเมียมโดยการกินอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีแคดเมียมปนเปื้อน ซึ่งภาชนะที่บรรจุอาจเคลือบด้วยโลหะแคดเมียม เมื่อได้รับแคดเมียมเข้าไปโดยตรง เริ่มแรกจะเกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียนอย่างรุนแรง ท้องร่วง เป็นตะคริว และน้ำลายฟูมปาก หรือถ้าได้รับปริมาณมากอาจทำให้ช๊อคได้ เนื่องจากสูญเสียน้ำมาก เกิดการทำงานของไตล้มเหลว และเสียชีวิตได้

2) ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

(1.1) เป็นพิษที่กระดูก ผู้ป่วยโรคนี้ส่วนใหญ่จะเป็นผู้หญิงสูงอายุประมาณ 50 ปีขึ้นไป ซึ่งทำให้กระดูกผุ โค้งงอ กระดูกเสียรูปทรง ปวดกล้ามเนื้อเอว และขา และมีการเจ็บกระดูกเนื่องจากแคลเซียมละลายออกจากกระดูก กระดูกจะเกิดการแตกและหักได้ เช่น ในกรณีประเทศญี่ปุ่น เมืองโตยามา เนื่องมาได้มีการบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนแคดเมียมเข้าไป ทำให้เกิดโรคอิไต-อิไต

(1.2) เป็นพิษต่อไต เมื่อได้รับแคดเมียมเข้าไป จะรวมตัวกับโปรตีนของเซลล์ภายในไตที่มีกลุ่มซัลฟ์ไฮดริล ทำให้หลอดไตทำหน้าที่ผิดปกติ ทำให้การกรองสารและดูดซึมสารกลับเข้าสู่ไตเสียหาย และขาดการควบคุม เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียโปรตีน และกลูโคสมากในปัสสาวะ พบว่ามีการสะสมที่หมวกไต และอาจเป็นโรคไตวายได้ นอกจากนี้ ผลที่ตามมาคือ ความดันโลหิตสูง ซึ่งทำให้เกิดอาการกล้ามเนื้อหัวใจขยายใหญ่ขึ้น เส้นเลือดฝอยแข็งตัว และหัวใจวายได้

(1.3) เป็นพิษต่อการสร้างเม็ดโลหิต ผู้ที่สัมผัสกับแคดเมียม จะพบอาการโรคโลหิตจาง เช่น การทดลองในสัตว์ พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 5 ถึง 10 ppm จะไม่มีผลต่อการสร้างเม็ดโลหิตจางในสัตว์

(1.4) เป็นพิษต่อปอด และตับ เนื่องจากแคดเมียมกระจายไปยังเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ โดยเฉพาะการสูดหายใจแคดเมียมเข้าสู่ปอด จะทำให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อปอดอย่างรุนแรง จนทำให้ถุงลมในปอดอุดตันลง ซึ่งจะทำให้เป็นโรคปอดบวม เกิดแผลเรื้อรังในปอด ถุงลมโป่งพอง ผนังถุงลมจะถูกทำลาย ในส่วนของตับจะทำให้การทำงานของเอนไซม์ในตับเปลี่ยนไป ผู้ที่มีความเสี่ยงมาก คือ คนทำงานกับผงแคดเมียมโดยตรง เช่น โรงงานแบตเตอรี่ขนาดเล็ก

(1.5) เป็นพิษต่อเอนไซม์ เกิดจากการที่แคดเมียมไปแทนที่สังกะสีในเอ็นไซม์บางชนิดในร่างกาย หรือแคดเมียมจะรวมตัวกับกับหมู่ซัลฟ์ไฮดริล ในเอ็นไซม์ของเซลต่างๆ ทำให้เอ็นไซม์ทำงานผิดปกติ

### 2.1.5 ค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแคดเมียม

การปนเปื้อนแคดเมียมโดยทั่วไปเป็นปัญหาที่สำคัญต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของแคดเมียมที่ยอมให้มีได้ในอาหาร ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และในสิ่งแวดล้อมดังแสดงในตารางที่ 2.2 ดังนี้

1) มาตรฐานของการปนเปื้อนแคดเมียมในอาหาร

ตารางที่ 2.1 ค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแคดเมียมในอาหาร

| ชนิดอาหาร | ค่ามาตรฐาน (กำหนดโดยสหภาพยุโรป) (หน่วย คือ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักเปียก) |
|---|---|
| - เนื้อสัตว์ | 0.05 |
| - ธัญพืช | 0.10 |
| - ข้าว | 0.20 |
| - ถั่วเหลือง | 0.20 |
| - ผัก และผลไม้ | 0.05 |
| - สมุนไพร | 0.05 |
| - มันฝรั่ง | 0.10 |

ที่มา: Commission Regulation (2006)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) มาตรฐานของการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

| ตัวกลาง | ค่ามาตรฐาน |
|---|---|
| - น้ำผิวดิน | 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| - น้ำบาดาลเพื่อการบริโภค | 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| - น้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท | 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| - น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม | 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| - ดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม | 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม |
| - ดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม | 810 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม |

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมควบคุมมลพิษ (2541); กระทรวงอุตสาหกรรม (2521)

## 2.2 เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

### 2.2.1 ความหมายของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช

เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (phytoremediation) หมายถึง กระบวนการการใช้พืชเพื่อกำจัดความเป็นพิษของสารมลพิษที่ปนเปื้อนและตกค้างในสิ่งแวดล้อม ซึ่งกลไกของพืชในการกำจัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนอาจเกิดโดยวิธีทางตรง ได้แก่ การย่อยสลายสารมลพิษนั้นๆ ในต้นพืช หรือโดยวิธีอ้อม ได้แก่ การดูดซึม การดูดซับ การสะสม การลดความเป็นพิษหรือการตรึงโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ และอากาศ โดยกระบวนการทางกายภาพ ทางเคมี หรือทางชีวภาพ เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช จึงเป็นแนวทางเลือกที่อาศัยความสามารถของพืชที่ทนโลหะหนัก และสามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูง โดยพืชมีวิวัฒนาการ และมีการปรับตัวให้สามารถทนทานต่อดินและน้ำที่มีโลหะหนักได้ (กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553; พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2548; อลิสา วังใน, 2553)

**2.2.2 ชนิดของการใช้เทคโนโลยีบำบัดโดยใช้พืช**

เทคโนโลยีการบำบัดดิน และน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืชมีหลายวิธีและชนิดของการใช้เทคโนโลยีบำบัดโดยใช้พืชสามารถแบ่งได้ตามกลไกของพืชที่ใช้ในการกำจัดสารมลพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 2.2 (USEPA, 2000; ชวนพิศ แดงสวัสดิ์, 2544) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) Phytoextraction คือ การใช้พืชในการดูดซับและสะสมโลหะหนัก โดยมีการลำเลียงโลหะหนักจากดิน และรากไปสู่ส่วนลำต้น และใบ ซึ่งสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูง ส่วนเหนือดิน คือ ลำต้นและใบสามารถตัดออกได้โดยไม่ต้องปลูกต้นใหม่ เมื่อพืชเจริญเต็มที่ก็จะตัดส่วนต้นและใบที่สะสมโลหะหนัก เหลือไว้แต่รากที่สามารถงอกเป็นต้นใหม่ได้ โลหะหนักจะถูกดึงออกจากดินมาสะสมในส่วนต้นและใบของพืช ตัวกลางที่ใช้ในการบำบัดด้วยวิธีนี้ ได้แก่ ดิน ตะกอน และกากตะกอน ตัวอย่างของพืชที่สามารถนำไปใช้ ได้แก่ พืชวงศ์ผักกาด (Brassicaceae) เช่น Brassica, Thlaspi, Alyssum, Pelargonium และ ผักตบชวา เป็นต้น

2) Phytostabilization คือ การใช้พืชโดยเฉพาะส่วนรากในการตรึงหรือรวมกับโลหะหนักในดิน ทำให้มีปริมาณโลหะหนักที่พืชจะดูดได้ (Bioavailability) ลดลงในขณะเดียวกันก็ตรึงโลหะหนักให้อยู่กับที่ไม่ถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ หรือน้ำบาดาล ตัวอย่างพืชที่นำมาใช้ในเทคโนโลยีนี้ ได้แก่ ต้นยูคาลิปตัส ต้นหลิว และ populus เป็นต้น

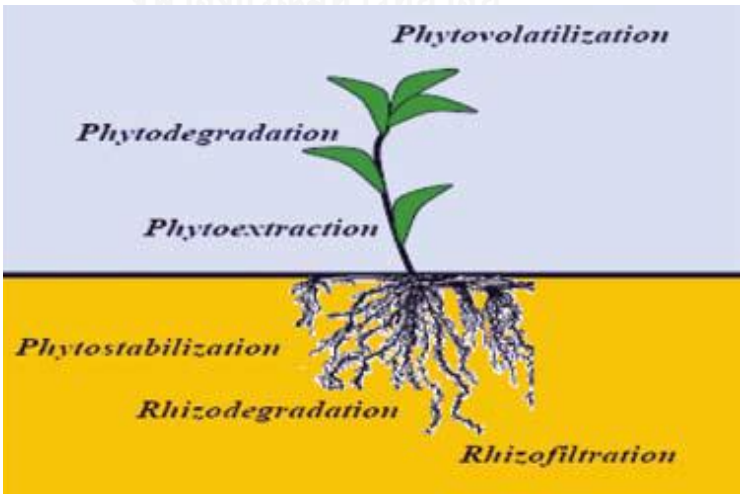
3) Rhizofiltration คือ การใช้รากของพืชหรือมวลชีวภาพของพืชในการดูดซับโลหะหนักจากแหล่งน้ำที่ปนเปื้อน เทคนิคในการใช้มวลชีวภาพที่ตายแล้ว เช่น สาหร่าย หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนัก เรียกว่า Biosorption ตัวกลางที่ใช้ในการบำบัดด้วยวิธีนี้ คือ น้ำใต้ดิน และน้ำผิวดิน สำหรับตัวอย่างพืชที่นำมาใช้ ได้แก่ สาหร่ายหางกระรอก สาหร่ายสีเขียว แกมน้ำเงินต่างๆ สาหร่ายพุงชะโด และแหน เป็นต้น

4) Phytodegradation หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Phytotransformation คือ การใช้พืชและแบคทีเรียที่อยู่บริเวณรากพืช (Rhizosphere) ในการดูดซับโลหะหนักจากดินที่ปนเปื้อนโดยการทำให้สารปนเปื้อนมีการเปลี่ยนรูป โดยเอ็นไซม์ที่พืชปล่อยออกมา หรือผ่านทางกระบวนการ

เมตาบอลิซึม (Metabolism) ของพืช พืชที่ใช้กระบวนการนี้มักจะเป็นพืชตระกูลหญ้า *(Poaceae)* ได้แก่ ข้าวโพด หญ้าชนิดต่างๆ เป็นต้น

5) Rhizodegradation หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Phytostimulation คือ การกำจัด หรือการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์โดยเฉพาะบริเวณรากพืช เพราะจะมีการปล่อยของเหลว ได้แก่ น้ำตาล กรดอะมิโน กรดไขมัน และเอ็นไซม์ ออกมากระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ในบริเวณรากพืช ทำให้สารปนเปื้อนเหล่านั้นถูกย่อยสลาย ตัวกลางที่สามารถใช้วิธีนี้ในการบำบัด ได้แก่ ดิน ตะกอน กากตะกอน และน้ำใต้ดิน สำหรับสารปนเปื้อนที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่ละลายน้ำได้น้อย เช่น ปิโตรเลียม พีเอเอช พีซีบี สารกำจัดแมลง และศัตรูพืชบางชนิด เป็นต้น

6) Phytovolatilization คือ เป็นการใช้พืชในการดูดซับ และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของโลหะหนักในดินให้เป็นไอระเหยออกมาสู่ภายบรรยากาศได้ โดยผ่านกระบวนการดูดซับสารปนเปื้อน การเปลี่ยนสภาพทางเคมีด้วยกลไกทางกระบวนการเมตาบอลิซึม และการหายใจของพืช โลหะหนักที่บำบัดได้ด้วยวิธีนี้ ได้แก่ ปรอท เซลีเนียม โดยใช้ต้นยาสูบ ต้นผักกาดที่เปลี่ยนแปลงพันธุกรรมโดยใส่ยีนของแบคทีเรียเข้าไป




รูปที่ 2.2 เทคโนโลยีการบำบัดสารมลพิษโดยใช้พืช (Phytoremediation)
ที่มา: Pulford และWatson (2003)

**2.2.3 การจำแนกชนิดของพืชที่นำมาใช้บำบัด**

การจำแนกพืช แบ่งออกเป็น 3 ชนิด โดยขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก (Baker, 1981) ได้แก่

1) เอกซ์คลูเดอร์ (Excluder) คือ พืชที่มีการสะสมโลหะหนักในปริมาณน้อย หรือสะสมได้แต่ในส่วนรากเท่านั้น แม้ว่าปริมาณโลหะหนักในสารละลายจะสูงก็ตาม พืชเหล่านี้จะมีกลไกหลีกเลี่ยงการดูดซับโลหะหนัก แต่เมื่อปริมาณของโลหะหนักมากขึ้นก็จะสูญเสียกลไกนี้ และจะดูดซับโลหะหนักเข้าไปจึงเกิดความเป็นพิษ

2) แอกคิวมิวเลเตอร์ (Accumulator) คือ พืชที่มีการสะสมโลหะหนักในปริมาณมากแม้ว่าปริมาณโลหะหนักในสารละลายจะมีน้อย พืชเหล่านี้จะมีกลไกการทำลายพิษของโลหะหนักในเนื้อเยื่อราก ลำต้น และใบ เมื่อปริมาณโลหะหนักในสารละลายเพิ่มขึ้น พืชก็จะสะสมมากขึ้นจนถึงความเข้มข้นหนึ่งปริมาณสะสมจะคงที่

3) ไฮเปอร์แอกคิวมิวเลเตอร์ (Hyperaccumulator) คือ พืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูงมาก ได้แก่ พืชที่สามารถลำเลียงโลหะหนักจากรากขึ้นไปสะสมในส่วนต้น (ลำต้นและใบ) ได้ในปริมาณสูง พืชไฮเปอร์แอกคิวมิวเลเตอร์ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กเพราะจะต้องใช้พลังงานในกลไกการลดความเป็นพิษของโลหะหนักในเนื้อเยื่อ พืชเหล่านี้พบเจริญเติบโตในดินที่มีโลหะหนักสูง เช่น บริเวณเหมืองแร่

**2.2.4 ข้อดี-ข้อเสียของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช**

เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืชมีข้อดี-ข้อเสียดังต่อไปนี้ (ดวงรัตน์ อินทร, 2553)

1) ข้อดีของการบำบัดโดยใช้พืช

- สามารถนำไปใช้บำบัดสารพิษในพื้นที่มีการปนเปื้อนในบริเวณกว้างได้
- เป็นวิธีที่มีค่าใช่จ่ายน้อย เพราะไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ใดๆ มาใช้ในขั้นตอนการบำบัด เนื่องจากอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก

- เป็นเทคโนโลยีที่สะอาดปลอดภัย เป็นการบำบัดที่มีความเสี่ยงต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

- เป็นการปลูกพืชเพื่อใช้บำบัดสารพิษ ซึ่งจะทำให้บริเวณที่ปนเปื้อนมีทัศนียภาพที่มีความสวยงามมากขึ้น

- จะช่วยฟื้นฟูสภาพดิน และช่วยลดการชะล้างหรือพังทลายของดินอีกด้วย

2) ข้อเสียของการบำบัดโดยใช้พืช

- ใช้เวลานานในการกำจัดโลหะหนัก ต้องปลูกพืชหลายๆ ครั้ง เพื่อลดปริมาณโลหะหนักในดิน เพื่อให้เหลือเท่ากับมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ไม่เป็นพิษต่อคนหรือสัตว์

- ชนิดและปริมาณของโลหะหนักที่ปนเปื้อน อัตราการเติบโตของพืช และวงจรชีวิตของพืช มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของพืช และอาจใช้เวลา 1-20 ปี

- การบำบัดหรือกำจัดสารพิษไม่สามารถทำได้ในที่อยู่ลึกลงไปกว่าบริเวณรากพืชได้ ซึ่งจะบำบัดได้เฉพาะส่วนที่รากไปถึงเท่านั้น

- ชนิดของพืชมีผลต่อการบำบัด และปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นสูงหรือไม่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้

## 2.3 ผักตบชวา (Water hyacinth)

### 2.3.1 ถิ่นกำเนิดของผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นพืชน้ำล้มลุกอายุหลายฤดู สามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งในน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เป็นพืชพื้นเมืองของทวีปอเมริกาใต้ มีการกำเนิดอยู่ในประเทศ บราซิล โดยในปี พ.ศ.2367 นักพฤกษศาสตร์และนายแพทย์ชาวเยอรมันชื่อ Karl von Martius ได้พบขึ้นในขณะที่ทำการสำรวจพันธุ์พืชในบราซิล ในประเทศต่างๆ ในทวีปอเมริกาใต้ และในปี 1881 ชาวดัทช์ที่ปกครองประเทศอินโดนีเซียได้นำผักตบชวา เข้ามายังประเทศอินโดนีเซียเพราะผักตบชวามีดอกสีฟ้า เป็นช่อตั้งสวยงามคล้ายคลึงกับดอก Hyacinth ซึ่งเป็นไม้ประดับของประเทศในเขตอบอุ่น ซึ่งใช้เป็นชื่อสามัญภาษาอังกฤษของผักตบชวา เมื่อแรกนำเข้าก็ได้ปลูกเลี้ยงไว้อย่างดีในสวนพฤกษชาติที่เมืองโบกอร์ แต่ต่อจากนั้นไม่นาน ก็แพร่กระจายไปตามลำน้ำต่างๆ อย่างรวดเร็ว และในปี 1901 ได้มีการนำผักตบชวาจากเกาะชวา ประเทศอินโดนีเซียเข้ามาลูกในวังสระประทุมเพราะเห็นว่าดอกผักตบชวาสวยงามสามารถใช้ประดับสระน้ำได้ดี แต่ภายหลังเกิดน้ำท่วมวังสระปทุมผักตบชวาหลุดลอยออกไปสู่

ลำคลองภายนอก แล้วเริ่มแพร่กระจายไปตามที่ต่างๆ อย่างรวดเร็ว จนถึงปัจจุบัน (กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2545; สมชาติ หาญวงษา, 2548)

**2.3.2 ลักษณะทางพฤษศาสตร์ของผักตบชวา**

ผักตบชวา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Eichlornia crassipes* (Mart.) Solms และมีชื่อสามัญว่า Water Hyacinth (Center และThai, 1989) มีชื่อเรียกในแต่ละท้องถิ่นที่แตกต่างกัน เช่น ผักปอด สวะ ผักโรค ผักตบชวา ผักยะวา ผักอีโยก และผักป่อง เป็นต้น โดยผักตบชวาสามารถจัดจำแนกชั้นทางวิทยาศาสตร์ได้ดังนี้ (ก่องกานดา ชยามฤต และนันท์นภัส ภัทรหิรัญไตรสิน, 2552) อ้างถึงใน (กัลปพฤกษ์ คงเมือง, 2553)

Kingdom : Plantae
Class : Liliopsida
Sub class : Monocotyledonae
Superorder : Commelinanae
Order : Pontederiales
Family : Pontederiaceae
Genus : Eichhornia

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผักตบชวาเป็นพืชน้ำประเภทใบเลี้ยงเดี่ยว ลอยน้ำได้ โดยไม่ต้องมีที่ยึดเกาะ ทำให้กระแสลมหรือน้ำพัดพาไปได้ไกล แต่ถ้าบริเวณน้ำตื้น จะสามารถทำให้รากหยั่งยึดติดลงไปในพื้นดินได้ (ดวงพร สุวรรณกุล และรังสิต สุวรรณเขตนิคม, 2544; สุชาดา ศรีเพ็ญ, 2530) โดยสามารถจำแนกส่วนประกอบของผักตบชวา ดังรูปที่ 2.3 ดังนี้

1) ราก จะเป็นแบบรากฝอย (Fibrous root รากที่แทงออกจะมีลักษณะเป็นสีขาวอวบ เมื่อมีอายุมาขึ้นจะมีรากขนอ่อน (Root hair) ) มีรากย่อยๆ เป็นกระจุก ซึ่งจะมีสีน้ำตาลอ่อนและรากขนอ่อนนี้จะเป็นสีน้ำตาลแก่จนถึงสีดำ เมื่ออายุของผักตบชวา ความยาวของรากจะแตกต่างกันไป รากบางเส้นก็ยาวถึง 60-90 เซนติเมตร

2) ลำต้น เป็นลำต้นสั้น มีผิวเรียบ ซึ่งจะเชื่อมติดต่อกันโดยมีไหล (Stolon) สามารถแตกไหลจากลำต้นกลายเป็นลำต้นใหม่ได้อย่างรวดเร็ว ต้นหนึ่งๆ ของผักตบชวาจะมีไหลแตกออกไปได้หลายอัน เมื่อไหลแตกออกไปแล้ว ก็จะเจริญขึ้นเป็นต้นใหม่ แต่ยังติดกับต้นเดิมอยู่ และเกิดเป็นกอขึ้น ลำต้นภายในมีรูพรุนช่วยพยุงลำต้น จึงสามารถลอยอยู่บนผิวน้ำได้ หรือบางต้นขึ้นอยู่ตามโคลนในที่น้ำตื้นๆ (กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

3) ใบ เป็นแบบใบเดี่ยว (Simple leaf) มีใบกว้าง ใบแตกเป็นกอ ประกอบด้วย แผ่นใบ (Blade) และก้านใบ (Petiole) ดังนี้

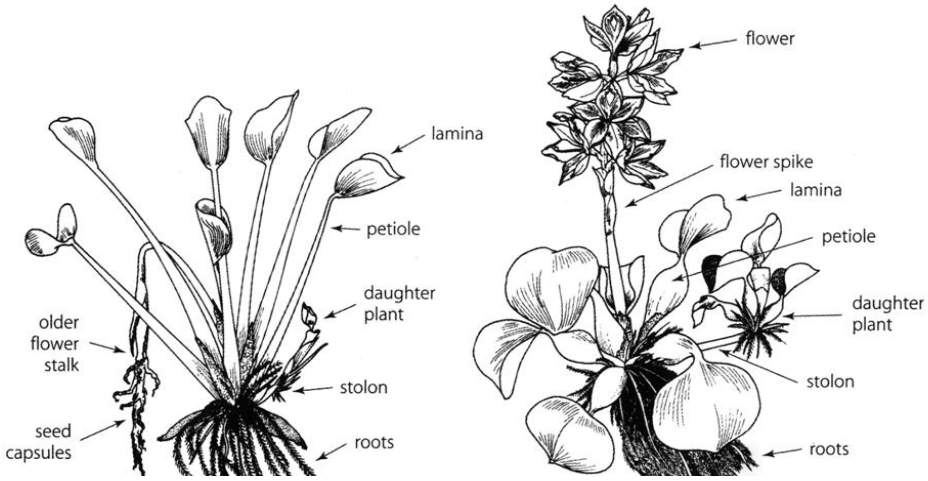
- แผ่นใบ (Blade) ส่วนของแผ่นใบจะมีความกว้างมากกว่ายาว หรือเกือบเท่าๆ กัน มีลักษณะคล้ายรูปไต (Reniform) หรือคล้ายรูปหัวใจ (Cordate) เมื่อต้นยังเล็กๆ ปลายใบมักจะมน แต่เมื่อต้นใหญ่หรือมีอายุมากขึ้น ปลายใบจะแหลมและมีสีเข้มขึ้น ขอบใบเรียบ มีระบบส้นใบ (Venation) ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและอาหาร เป็นแบบเส้นใบขนาน

- ก้านใบ (Petiole) จะพองออกเพื่อช่วยให้ลอยน้ำได้ เนื่องจากมีลักษณะเรียบ กลม อวบน้ำ เมื่อต้นผักตบชวาเจริญอยู่ห่างๆ กัน ลำต้นจะเล็ก และก้านใบมักจะพองออกเป็นทุ่นลอยน้ำ เรียกว่า Buoyancy leaf แต่ถ้าผักตบชวาอยู่ในบริเวณที่มีการเจริญเติบโตที่หนาแน่นกันมาก โดยเฉพาะในน้ำนิ่ง ก้านใบจะไม่พอง และก้านใบยังยาวมาก ซึ่งบางแห่งอาจพบว่า ยาวถึงหนึ่งเมตร การเกิดใบอ่อนของผักตบชวา จะเกิดตรงกลางกอ โดยใบอ่อนจะม้วนหุ้มรอบโคนก้านใบที่อยู่ใกล้ๆ และมีกาบใบบางหุ้มรอบอีกทีหนึ่ง ในส่วนของปลายกาบใบ จะมีขอบหยักเล็กน้อย เป็นเยื่อบางๆ มีลักษณะคอดแล้วบาน เมื่อใบอ่อนโตขึ้น ก้านใบก็จะขยายขึ้นดันกาบใบ (Sheath) ที่ห่อหุ้มไว้ออก ซึ่งกาบใบมีลักษณะเป็นเยื่อบางๆ สีขาวแกมเขียวอ่อนๆ แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นก็จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแกมม่วง แผ่นใบก็จะค่อยคลี่ออกจากโคนก้านใบเดิม โดยในระยะแรกใบจะมีสีเขียวอ่อน ต่อไปจะมีสีเขียวเข้มขึ้น

4) ดอก จะออกเป็นช่อที่ปลายยอด มีดอกสีฟ้า สีม่วงหรือสีขาว ไม่มีก้านดอก (spike) ในแต่ละช่อจะมีจำนวนดอกแตกต่างกันไป ถ้าช่อดอกเล็ก ก็จะมีดอกประมาณ 4-5 ดอก ถ้าช่อดอกใหญ่ จะมีจำนวนดอกเพิ่มขึ้นจนถึง 60 ดอก การเกิดของช่อดอกจะเจริญมาจากโคนที่มีก้านใบเล็กๆ คือ ที่โคนก้านจะมีกาบใบบางๆ หุ้มไว้และที่ปลายก้านมีแผ่นใบเล็กๆ เกิดขึ้นด้วย โดยที่ใบครึ่งแรกจะมีกาบใบบางๆ หุ้มช่อดอกเอาไว้ และมีกาบใบอีกอันหุ้มโคนก้านใบไว้ เมื่อช่อดอกเจริญขึ้น ก้านช่อดอกจะค่อยๆ ยาว พองใหญ่ขึ้น ทำให้ภายในที่หุ้มก้านช่อดอกกับก้านใบขาดออก และเมื่อก้านช่อดอกเจริญมากขึ้น ก็จะดันกาบใบด้านในขาด ก้านช่อดอก (Peduncle) ก็แทงชูช่อดอกเจริญโผล่ขึ้นมาก โดยมีใบเล็กๆ ที่ปลายก้านใบ และภายในทำหน้าที่เป็นใบประดับ (Bract) รองรับช่อดอกอีกที

หนึ่ง เมื่อเจริญเต็มที่แล้วดอกมักจะบานพร้อมกันหมดทั้งช่อ และดอกจะบานเพียง 1 วัน หลังจากนั้นกลีบดอกก็จะหุบเหี่ยวขดเป็นเกลียว แล้วก้านช่อดอกก็จะโค้งงอลงสู่พื้นน้ำ ผักตบชวาต้นหนึ่งๆ จะมีดอกได้หลายช่อ โดยจะทยอยกันออกดอก ดอกแต่ละดอก ประกอบด้วย กลีบดอก (Perianth) 6 กลีบ กลีบบนขนาดใหญ่ และมีแต้มสีเหลืองกลางกลีบ ปลายกลีบแยกเป็นแฉก ออกดอกปลายฤดูหนาวถึงต้นฤดูร้อน ช่อดอกคล้ายกับดอกไฮยาซินธ์ จึงเรียกว่า Water Hyacinth

5) การสืบพันธุ์ จะมีการแตกไหลแล้วกลายเป็นลำต้นติดอยู่กับต้นแม่เป็นจำนวนมากจนเกิดเป็นกอใหญ่ หลังจากที่ต้นอ่อนเกิดต้นและใบของตนเองได้ภายในเวลาเพียงไม่กี่วัน ต้นอ่อนเหล่านี้ก็จะเริ่มสร้างต้นอ่อนต่อไปเป็นช่วงที่สาม ในกรณีที่มีการผสมของดอกผักตบชวา พบว่าหลังจากที่ดอกบานได้ 48 ชั่วโมง และไม่มีแมลงมาช่วยผสมเกสร จะเกิดการผสมตัวเอง หลังจากนั้น 3 สัปดาห์ เมล็ดเล็กๆ สีดำจะแก่ และก้านช่อดอกจะโค้งงอลงด้านล่าง เมื่อกระเปาะผลแตก เมล็ดก็จะร่วงลงสู่พื้นท้องน้ำ โดยในเนื้อที่ 1 ไร่ จะมีเมล็ดตกในโคลนตมใต้พื้นน้ำถึง 18 ล้านเมล็ด และสามารถรักษาความงอกอยู่ได้นานถึง 15 ปี (กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2545) ดังนั้นภายใต้พื้นน้ำที่เคยมีผักตบชวาขึ้นอยู่ อาจจะมีเมล็ดผักตบชวาสะสมอยู่นับเป็นพันล้านเมล็ด รอที่จะงอกจากเมล็ดเป็นต้นอ่อนเมื่อจำเป็น แต่ตามปกติแล้วในสภาพแวดล้อมในประเทศไทยมักจะไม่ค่อยพบว่า มีการผสมของดอกผักตบชวาจึงไม่ค่อยพบเมล็ด




รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของผักตบชวา

ที่มา: Primary Industries Agriculture (1999)

### 2.3.3 องค์ประกอบของผักตบชวา

ในองค์ประกอบของผักตบชวา ระบบรากที่มีจำนวนมาก รากผักตบชวาจะดูดสารอาหารที่อยู่ในน้ำ ลำเลียงไปยังใบเพื่อสังเคราะห์แสง และช่วยกรองสารอินทรีย์ที่ละเอียด และจุลินทรีย์ที่อาศัยเกาะอยู่ที่ราก ช่วยดูดสารอินทรีย์ไว้ด้วยอีกทางหนึ่ง ผักตบชวาเปรียบได้กับการบรรจุวัสดุพรุน ซึ่งกรองน้ำที่ไหลผ่านกอผักตบชวาอย่างช้าๆ จึงทำให้ของแข็งแขวนลอยต่างๆ ที่ปนอยู่ในน้ำถูกสกัดกั้น โดยในองค์ประกอบทั่วไปในผักตบชวามีดังนี้

1) ต้นผักตบชวาจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณ 90- 95 เปอร์เซนต์ โดยประกอบด้วยน้ำในใบร้อยละ 89 เปอร์เซ็นต์ และในก้านใบ 96.7 เปอร์เซนต์ (Mishra และTripathi, 2009)

2) เจริญเติบโตได้ดีที่ pH 4-10

3) สามารถเจริญอยู่ได้ในอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34 องศาเซลเซียส ในผักตบชวาสามารถบ่งบอกองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา

| องค์ประกอบทางเคมี | ราก (เปอร์เซนต์) | ลำต้น และใบ (เปอร์เซนต์) |
|---|---|---|
| แคลเซียม (Ca) | 2.8 | 2.1 |
| ไนโตรเจน (N) | 25.8 | 16.8 |
| ฟอสฟอรัส (P) | 6.8 | 4.3 |
| โพแทสเซียม (K) | 4.9 | 3.8 |
| แมกนีเซียม (Mg) | 1.6 | 0.9 |
| ทองแดง (Cu) | 0.44 | 0.05 |
| เหล็ก (Fe) | 0.57 | 0.2 |
| นิกเกิล (Ni) | 0.16 | 0.07 |
| สังกะสี (Zn) | 0.27 | 0.2 |
| โปรตีน | 15.2 | 11.1 |

ที่มา : Mishra และTripathi (2009)

### 2.3.4 การกำจัดผักตบชวาโดยการนำมาใช้ประโยชน์

การนำผักตบชวาไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เพราะมีจำนวนมาก และเกิดทดแทนส่วนที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างรวดเร็ว โดยสามารถนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์ได้หลายวิธี (กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2545) ดังต่อไปนี้

1) ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

โดยการใช้กำจัดสารอินทรีย์และสารเคมี เช่น สารประกอบไนโตรเจน สารประกอบฟอสฟอรัส โลหะหนัก และสารเคมีกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น

2) ใช้เป็นอาหารสัตว์

โดยในใบของผักตบชวาจะมีโปรตีนสูง (Wolverton และMcDonald, 1975) ซึ่งเหมาะสำหรับเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ เช่น โค กระบือ แพะ แกะ หมู และปลา เป็นต้น หรือมีการแปรรูปโดยการบดเอาน้ำออก อบให้แห้งแล้วอัดเป็นเม็ดเพื่อทำเป็นอาหารสัตว์

3) ใช้ทำปุ๋ย

ในส่วนของผักตบชวามีโพแทสซียม ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสสะสมอยู่บ้าง จึงสามารถนำไปทำปุ๋ยได้ 3 วิธี ได้แก่

- ทำให้แห้ง แล้วเผาเพื่อนำเอาขี้เถ้าไปใส่กับพืชที่ปลูก
- ทำเป็นปุ๋ยหมักโดยกองสลับชั้นระหว่างดิน ปุ๋ยคอก และขยะ
- ทำวัสดุคลุมดิน โดยการนำเอาผักตบชวาไปคลุมพืชปลูกเพื่อรักษาความชุ่มชื้นไว้ในดิน

4) ใช้เพาะเห็ด

เมื่อนำผักตบชวาไปตากแดดจนแห้งแล้วสามารถใช้เพาะเห็ดได้ดี โดยเฉพาะการทำเห็ดฟาง

5) ใช้ทำก๊าซหุงต้ม

ผักตบชวามีพลังงานที่สะสมไว้จากพลังงานดวงอาทิตย์ จึงสามารถนำผักตบชวาที่มีพลังงานสะสมอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบไปผลิตเป็นก๊าซหุงต้มได้

(6) ใช้ทำเครื่องจักสาน

โดยก้านของใบผักตบชวา สามารถนำไปทำเครื่องจักสานได้ดี เช่น กระเป๋าถือ แปลญวน ตะกร้า เข่ง กระบุง และหมวก เป็นต้น

## 2.4 สารคีเลตที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึงโลหะหนัก

สารคีเลต (Chelating agents) คือ สารอินทรีย์ที่สามารถจับและรวมไม่ให้เกิดการตกตะกอนของแร่ธาตุประจุบวก เช่น เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) และ แคดเมียม (Cd) โดยสารคีเลตจะล้อมแคตไอออนหรือประจุบวกของธาตุที่เป็นโลหะไว้ (Metallic cation) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน พร้อมทั้งไม่ให้ไอออนบวกเหล่านี้ทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ ปฏิกิริยาการรวมกันนี้ เรียกว่า คีเลชั่น (Chelation) ซึ่งจะทำให้โลหะที่อยู่ในรูปโลหะคีเลตคงสภาพไม่เกิดการตกตะกอนเมื่อพีเอช (pH) สูงขึ้น สามารถคงอยู่ในสภาพแวดล้อมได้นาน และยังเป็นรูปที่เป็นประโยชน์กับพืช (Available form) สามารถทำให้พืชดูดดึงนำไปใช้ได้ง่าย สารคีเลตมี 2 ประเภท คือ 1) สารอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น ไนทริโลไตรแอซีติก (Nitrilotriacetic acid; NTA, เอธิลลีนไดเอมินดิสซัคสิเนส (Ethylene diamine disuccinate; EDDS) และ 2) สารคีเลตสังเคราะห์ เช่น เอธิลลีนไดเอมีนเททระเอซิติกเอซิด (Ethylene diamine tetraacetic acid; EDTA), ไดเอธิลลีนไตรอะมิโนเพนทระเอซิติกเอซิด (Diethylene triamino pentaacetic acid; DTPA), ไฮดรอกซิลเอธิลลีนเททระเอซิติกเอซิด (Hydroxylethylene tetraacetic acid; HEDTA) และเอธิลลีนไกลคอลเททระเอซิติกเอซิด (Ethylene glycol tetraacetic acid; EGTA) เป็นต้น ซึ่งชนิดของสารดีเลตสังเคราะห์ที่เหมาะสมกับจุลธาตุต่างๆ หรือจับกับจุลธาตุอาหารต่างๆ อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สารคีเลตสังเคราะห์ที่เหมาะสมกับจุลธาตุอาหารต่างๆ

| จุลธาตุอาหาร | สารคีเลต | |
|---|---|---|
| | ชื่อสารคีเลต | ชื่อย่อ |
| เหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี | Ethylenediamine tetraacetic acid | EDTA |
| เหล็ก | Ethylenediamine di-O-hydrixy-phenylacetic acid | EDDHA |
| เหล็ก | Diethylenetriamine pentaacetic acid | DTPA |
| สังกะสี | Nitrilotriacetic acid | NTA |
| เหล็ก สังกะสี | Hydroxyethyl ethylenediamine tetraacetic acid | HEDTA |

ที่มา: Buckman และBrady (1969)

**2.4.1 อีดีทีเอ (EDTA)**

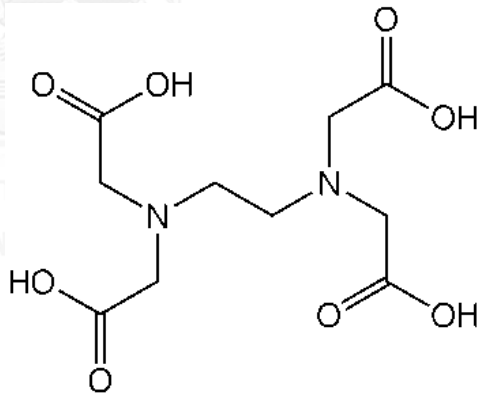
1) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอีดีทีเอ

อีดีทีเอ หรือมีชื่อเรียกว่า เอธิลลีนไดเอมีนเททระเอซิติกเอซิด ชื่อภาษาอังกฤษ คือ (Ethylene diamine tetraacetic acid; EDTA) สารอีดีทีเอ เป็นสารคีเลตสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นผงสีขาวใส ละลายในน้ำได้ดี เมื่อใส่ลงไปในสารละลายที่มีน้ำผสมอยู่แล้ว จะทำหน้าที่ดักจับไอออนที่เป็นโลหะ (Metal ion) เช่น $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$และ $Fe^{3+}$ มีผลให้สามารถแยกสารละลายที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดความกระด้างของน้ำ ซึ่งทำให้สารชะล้าง (Surfactant) ทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงมักจะใช้เป็นส่วนผสมในสบู่ น้ำยาซักผ้า และน้ำยาล้างจาน เป็นต้น นอกจากนั้นยังใช้เป็นสารเติมแต่งในอาหารเป็นวัตถุเจือปนอาหารเพื่อป้องกันการเหม็นหืน จับกับโลหะและป้องกันการเปลี่ยนสีของอาหาร อีกทั้งยังเติมลงในน้ำเสียเพื่อป้องกันน้ำกระด้าง โดยจะเข้าไปจับกับไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมในน้ำเสีย เพื่อลดกากตะกอนของเสีย และมีการนำไปใช้ในทางการแพทย์ใช้ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด และอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ (Oviedo และRodriguez, 2003) โดยอีดีทีเอ มีสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และมีสูตรโครงสร้างดังรูป ที่ 2.4

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอีดีทีเอ

| คุณสมบัติ | รายละเอียด |
|---|---|
| สูตรทางเคมี | $C_{10}H_{16}N_2O_8$ |
| มวลโมเลกุล | 292.25 g/mol |
| ความเป็นกรด-ด่าง (pH) | 2.5-3.0 |
| จุดหลอมเหลว | 240 $^0$C |
| ความหนาแน่นที่ 20 $^0$C | 0.86 g/cm$^3$ |
| ความสามารถในการละลายน้ำ ที่ 20 $^0$C | 0.4 g/l (0.05 g/100 ml) |
| ค่า Chelation | 3.39 mmol/g |

ที่มา: Chemicals (2003); Maryadele และคณะ (2001)



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของสารอีดีทีเอ

ที่มา: Maryadele และคณะ (2001)

2) ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยาเคมี

- ความคงตัวทางเคมี : สารนี้มีความเสถียร
- สารที่เข้ากันไม่ได้ : สารออกซิไดส์ ความร้อน

- สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว : คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์

3) การย่อยสลายของอีดีทีเอ

ในการศึกษาการย่อยสลายของสารอีดีทีเอ ในน้ำ โดยได้เก็บตัวอย่างน้ำจากแม่น้ำและใส่สาร $Na_2EDTA$ ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองในขวดเป็นแบบระบบปิด และมีค่าพีเอชเท่ากับ 6.5 และ 8.0 ผลการศึกษา พบว่า อีดีทีเอที่ระดับของพีเอช 6.5 ในระยะเวลา 28 วัน ไม่พบการย่อยสลายของสารอีดีทีเอ หรือพบการย่อยสลายประมาณ 2-12% จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 49 วัน พบว่า อีดีทีเอมีการย่อยสลายเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 60-83% และสารอีดีทีเอ ที่ระดับของพีเอช 8.0 ในระยะเวลา 28 วัน สารอีดีทีเอ มีค่าการย่อยสลาย เท่ากับ 53-72% และเมื่อเวลาผ่านไป 35 วัน การย่อยสลายของสารอีดีทีเอ สูงถึง 75-89% (Ginkel และคณะ, 1999)

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพของสารอีดีดีเอส และอีดีทีเอ โดยใช้สารอีดีทีเอ ที่ความเข้มข้น 0.8 1.6 และ 4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำการศึกษาเป็นระยะเวลา 40 วัน ผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความเข้มข้น 0.8 มิลลิโมล / กิโลกรัมดิน ค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการใช้อีดีทีเอในการบำบัด และผลการศึกษา พบว่า การเติมสารอีดีทีเอ ที่ระยะเวลา 40 วัน ไม่พบการลดลงของสารอีดีทีเอ อย่างมีนัยสำคัญ จากผลการศึกษา ดังกล่าวทำให้พบว่า ค่าครึ่งชีวิตของสารอีดีทีเอ ได้เท่ากับ 36 วัน (Meers และคณะ, 2005)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4) ความเป็นพิษของอีดีทีเอ

คณะกรรมการวิทยาศาสตร์ด้านสารพิษต่อระบบนิเวศน์และสิ่งแวดล้อมหรือ (CSTEE, 2003) ได้รายงานว่า อีดีทีเอ และเททระไดโซเดียมอีดีทีเอ มีผลต่อการละคายเคืองบริเวณผิวที่บอบบาง และทำให้ตาเกิดการระคายเคือง เนื่องจากสารอีดีทีเอบางชนิดสามารถทำให้เกิดสารประกอบของอัลคาไลน์ที่เป็นอันตรายต่อดวงตา

การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากอีดีทีเอ ต่อร่างกายของมนุษย์เมื่อได้รับโลหะเชิงซ้อนที่เกิดจากการการจับตัวของอีดีทีเอ (Schardein และคณะ, 1981) จากการศึกษาโดยใช้หนูทดลองในหลายสัปดาห์ พบว่า อีดีทีเอ ปริมาณความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลกระทบต่อหนู มีเพียงอาการท้องร่วง และเบื่ออาหาร ในการทดลองของไดโซเดียมอีดีทีเอ ที่มีความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามความผิดปกติของหนูเพศผู้ และเพศเมียที่พบคือ การขาดธาตุอาหารแคลเซียม 0.54 เปอร์เซ็นต์

และ เหล็ก 0.013 เปอร์เซ็นต์ หรือ 1 เปอร์เซ็นต์ ของไดโซเดียมอีดีทีเอ ที่ 205 วัน อีดีทีเอ มีผลต่อการยับยั้งการสังเคราะห์ของดีเอ็นเอในธรรมชาติของเซลล์สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าความสำคัญของการผลิตเอนไซม์ในดีเอ็นเอ และอีดีทีเอ ยังส่งผลต่อการกลายพันธุ์ที่ทำให้เกิดความผิดปกติของแมลงหวี่ Melanogaster, Reinhardi, Chlamydomonas, Neurospora crassa และ Zea mays โดยรบกวนกระบวนการซ่อมแซมดีเอ็นเอที่เกิดขึ้นภายหลังจากที่สัตว์ได้รับการสัมผัสสารอีดีทีเอ แล้ว (Heindorff และAllaway, 1973)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาความเป็นพิษของอีดีทีเอ พบว่า หนูที่เลี้ยงใน ไดโซเดียมอีดีทีเอที่มีความเข้มข้นต่ำ ในระยะเวลาการทดลองที่สั้นและมีธาตุอาหารเพียงพอ ไม่เป็นพิษต่อหนู โดยพบว่าการเลี้ยงหนูในสารละลายที่มีความเข้มข้น ไดโซเดียมอีดีทีเอ 0.5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 44-52 สัปดาห์ ไม่มีผลกระทบต่อน้ำหนักตัว และการเบื่ออาหารของหนู ส่วนหนูที่เลี้ยงในความเข้มข้น ไดโซเดียมอีดีทีเอ 1 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 220 วัน ไม่พบการผุของฟัน ซึ่งสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (USEPA, 1979) รายงานว่า หนูเพศเมียจะได้รับไดโซเดียมอีดีทีเอ จาก 2% ถึง 3% หรือ 1000 ppm ของสังกะสีในระหว่างตั้งครรภ์

**2.4.2 ดีทีพีเอ (DTPA)**

1) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดีทีพีเอ

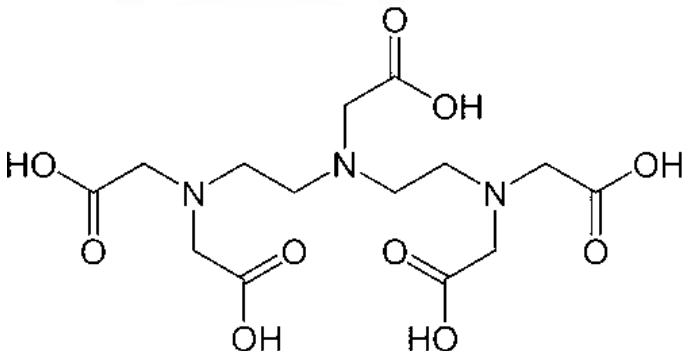
ดีทีพีเอ หรือมีชื่อเรียกว่า ไดเอธิลลีนไตรเอมีนเพนทระเอซิติกเอซิด ชื่อภาษาอังกฤษคือ (Diethylenetriamine pentaacetic acid; DTPA) สารดีทีพีเอ เป็นสารคีเลตสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นของแข็งมีผงสีขาว มีการนำดีทีพีเอ มาใช้ และมีประโยชน์ในด้านการสกัดจุลธาตุที่มีอยู่ในดิน ซึ่งเป็นรูปที่พืชนำไปใช้ได้ เช่น เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และแมงกานีส (Mn) ที่มีค่าพีเอชประมาณ 7.3 โดยใช้ดีทีพีเอร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์ และไตรเอทาโนลามีน (Trietanoamine) (Wikipedia, 2007) นอกจากนี้ ในปี ค.ศ. 1960 แพทย์ได้นำดีทีพีเอ มาใช้เพื่อรักษาผู้ป่วยที่ได้รับสารกัมมันตภาพรังสี เช่น พลูโตเนียม (Plutonium) อเมอร์ริซียม (Americium) คาลิฟลอเนียม (Californium) เบอเคลเลียม (Berkelium) คูเลียม (Curium) และโลหะหนัก โดยสารดีทีพีเอ จะห้อมล้อมไอออนของสารพิษดังกล่าวได้ดี จึงทำให้สารพิษเมื่อมีการได้รับผ่านเข้าไปในระบบย่อยอาหารของมนุษย์จะไม่ถูกดูดซึม และสามารถช่วยเร่งการขับออกของสารพิษเหล่านี้ออกมาทางการปัสสาวะ ในทางการแพทย์จะมีการใช้ดีทีพีเอ ในการรักษาในรูปของเกลือแคลเซียมหรือ

สังกะสี โดยดีทีพีเอ มีสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดีทีพีเอ

| คุณสมบัติ | รายละเอียด |
|---|---|
| สูตรทางเคมี | $C_{14}H_{23}N_3O_{10}$ |
| มวลโมเลกุล | 393.349 g/mol |
| ความเป็นกรด-ด่าง (pH) | 2.1-2.5 |
| จุดหลอมเหลว | 220 $^0$C |
| ความหนาแน่น | 1300 g/cm$^3$ |
| ความสามารถในการละลายน้ำ ที่ 25 $^0$C | 4.8 g/l |
| ค่า Chelation | 225 mmol/g |

ที่มา: http://www.avachemicals.net/dtpa.html (2007)




รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของสารดีทีพีเอ

ที่มา: http://chemistry.about.com/od/factsstructures/ig/Chemical-Structures---P/Penetic-Acid---DTPA.htm

2) การย่อยสลายของดีทีพีเอ

Mika และMarja (2000) ได้ศึกษาการสลายตัวทางเคมีของ β-alaninediacetic (ADA) และดีทีพีเอในสิ่งแวดล้อม โดยทดลองในแบบจำลองของพืชที่มีระบบไหลผ่านของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เป็นด่างระหว่างพีเอช 10-11 จากผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่าปริมาณการสลายตัวไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และได้มีการคำนวณการกระจายตัวของ β-alaninediacetic (ADA) ได้ภายใต้การควบคุมความเข้มข้น พบว่า มีการย่อยสลายมากกว่าดีทีพีเอ โดย ADA เหลือเท่ากับ 71% และ ดีทีพีเอ เหลือเท่ากับ 94% ส่วนการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับสารคีเลตซึ่งเหลืออยู่ 40 เปอร์เซ็นต์ของทั้ง ADA และดีทีพีเอ

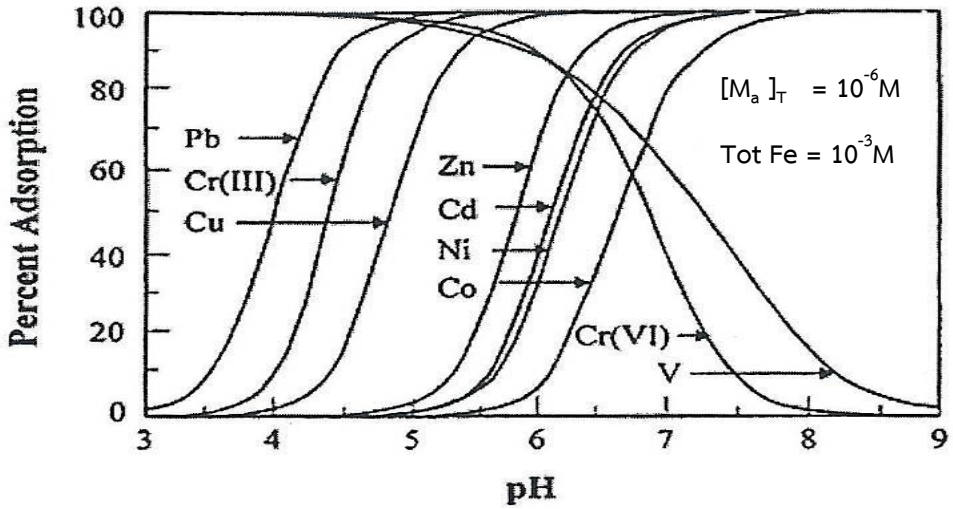
3) ความเป็นพิษของดีทีพีเอ

ในด้านสุขภาพของมนุษย์ เมื่อได้รับสารดีทีพีเอ เข้าไปจะไม่มีผลกระทบในระยะยาว แต่หากร่างกายได้รับสารดีทีพีเอ ในระยะสั้น อาจส่งผลต่อสุขภาพให้มีอาการ คลื่นไส้ อาเจียน มีการคันบริเวณที่สัมผัสกับสาร ท้องเสีย หนาวสั่น มีไข้ และเป็นตะคริวที่กล้ามเนื้อ ในด้านของผลกระทบข้างเคียง อาจเกิดอาการเจ็บหน้าอก ปวดศีรษะ และรู้สึกขมในปาก เป็นต้น

## 2.5 ปัจจัยของค่าพีเอช (pH) ที่มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนัก

### 2.5.1 พีเอชในดิน

ค่าพีเอช (pH) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลในการควบคุมการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน เมื่อดินอยู่ในสภาพที่เป็นกรด ไฮโดรเจนไอออน ($H^+$) ในดิน จะมีการแข่งขันกับโลหะหนักในดิน ส่งผลให้ดินดูดซับแคตไอออน (ธาตุอาหารหรือโลหะหนัก) ต่ำลง และเป็นการเพิ่มการละลายได้ของปริมาณโลหะหนักในดิน และนำไปสะสมไว้ในพืชได้เพิ่มขึ้น แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าความเป็นพีเอชในช่วง 4.5 ถึง 5.5 (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) และในสภาพที่เป็นด่างแคดเมียมจะละลายได้ไม่ดี ยกเว้น As, Mo, Se, V and Cr ที่มีการเคลื่อนที่ในความเข้มข้นที่เป็นด่าง ดังนั้นการดูดดึง B, Co, Cu, Mn and Zn ในพืชจะลดลงเมื่อค่าพีเอช เท่ากับ 5-8 (Hodgson และValsami, 1963) ดังรูปที่ 2.6




รูปที่ 2.6 การดูดซับของธาตุไฮดรัสเฟอริกออกไซด์
ที่มา: Adriano (2001)

### 2.5.2 ค่าพีเอชต่อพืช

พืชสามารถเจริญเติบโตในค่าพีเอชที่แตกต่างกัน และส่วนมากเจริญได้ดีในค่าพีเอชที่เป็นกรดอ่อน ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับพืชโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 6 ถึง 7 แต่พบว่า ในพืชบางชนิดชอบดินที่มีค่าพีเอชเป็นกลาง (Neutral soil) คือ พีเอชเท่ากับ 7 เช่น พืชตระกูลถั่ว (Kohnke และFranzmeir, 1995) ส่วนพืชบางชนิดอาจทนต่อพีเอชในดินต่ำกว่า 5.5 เช่น มันฝรั่ง และพืชสวน เช่น กุหลาบพันปี และบลูเบอร์รี่ และค่าพีเอชที่สูงกว่า 7 ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารในพืช เช่น Fe, Zn, Mn และ B เป็นต้น

## 2.6 แสงซินโครตรอน(Synchrotron )

### 2.6.1 ความหมายของแสงซินโครตรอน

แสงซินโครตรอน (Synchrotron light) คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องเร่งอนุภาคที่เร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าใกล้ความเร็วแสงในท่อสุญญากาศ และถูกบังคับให้เลี้ยวโค้งด้วยสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนที่เลี้ยวโค้งจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่

เรียกว่า แสงซินโครตรอน โดยครอบคลุมช่วงคลื่นตั้งแต่ อินฟราเรด แสงขาว อัลตราไวโอเลต และรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ จึงทำให้แหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนนี้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพียงชนิดเดียวที่สามารถเลือกช่วงความยาวคลื่น หรือพลังงานที่ติดตั้งอยู่ภายในระบบลำเลียงแสง (Beamline) เพื่อให้เหลือเฉพาะช่วงที่ต้องการใช้งาน และนำไปอาบลงบนวัสดุที่ต้องการทดสอบและศึกษา มีประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีหลายสาขา เช่น ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยาเภสัชวิทยา แพทยศาสตร์ สิ่งแวดล้อม และธรณีวิทยา เป็นต้น (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2555)

**2.6.2 ระบบลำเลียงแสง BL6b: micro-XRF**

ระบบลำเลียงแสง BL6b: micro-XRF ประกอบด้วยส่วนประกอบของระบบลำเลียงแสง ส่วนประกอบสถานีทดลอง และ เทคนิคที่ใช้ในระบบลำเลียงแสง BL6 ดังนี้ (Tancharakorn และคณะ, 2012; สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2555)

1) ส่วนประกอบของระบบลำเลียงแสงและสถานีทดลอง

(1) ระบบลำเลียงแสง BL6 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ ได้แก่

- Absorpber และ Beam shutter คือ ส่วนที่ทำหน้าที่เปิดปิดเพื่อให้แสงซินโครตรอนผ่านไปยังสถานีทดลอง -

- Shielding wall คือ กำแพงกั้นรังสี จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้รังสีแกมมาจากวงกักเก็บอิเล็กตรอนหลุดลอดออกมายังภายนอก

- Beryllium window คือ ส่วนที่ใช้เป็นตัวกรองแสซินโคตรอน โดยจะยอมให้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ผ่านได้เท่านั้น

โดยที่อุปกรณ์สองตัวแรกดังรูปที่ 2.7ก จะทำหน้าที่เปิด-ปิด เพื่อให้แสงซินโครตรอนผ่านไปยังสถานีทดลอง กำแพงกันรังสี (Shielding wall) โดยจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้รังสีแกมมาจากวงกักเก็บอิเล็กตรอนหลุดลอดออกมายังภายนอก ส่วน Beryllium window จะถูกใช้เป็นตัวกรองแสงซินโครตรอน โดยจะยอมให้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ผ่านเท่านั้น

ระบบลำเลียงแสงนี้จะใช้แสงซินโครตรอนจากแม่เหล็กสองขั้ว หรือ Bending magnet (BM) ซึ่งจะให้แสงซินโครตรอน โดยแสงซินโครตรอนนี้จะครอบคลุมพลังงานตั้งแต่รังสีอินฟราเรดไปจนถึงรังสีเอกซ์ เมื่อผ่าน Beryllium window แสงซินโครตรอนจะถูกกรองให้เหลือเฉพาะย่านรังสีเอกซ์เท่านั้น

(2) สถานีทดลองของ Micro-XRF ประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญ ดังรูปที่ 2.7 ข ได้แก่

- เลนส์รังสีเอกซ์ (Polycapillary lens) โดยจะติดตั้งอยู่บนระบบ Alignment เนื่องจากต้องการความแม่นยำสูง

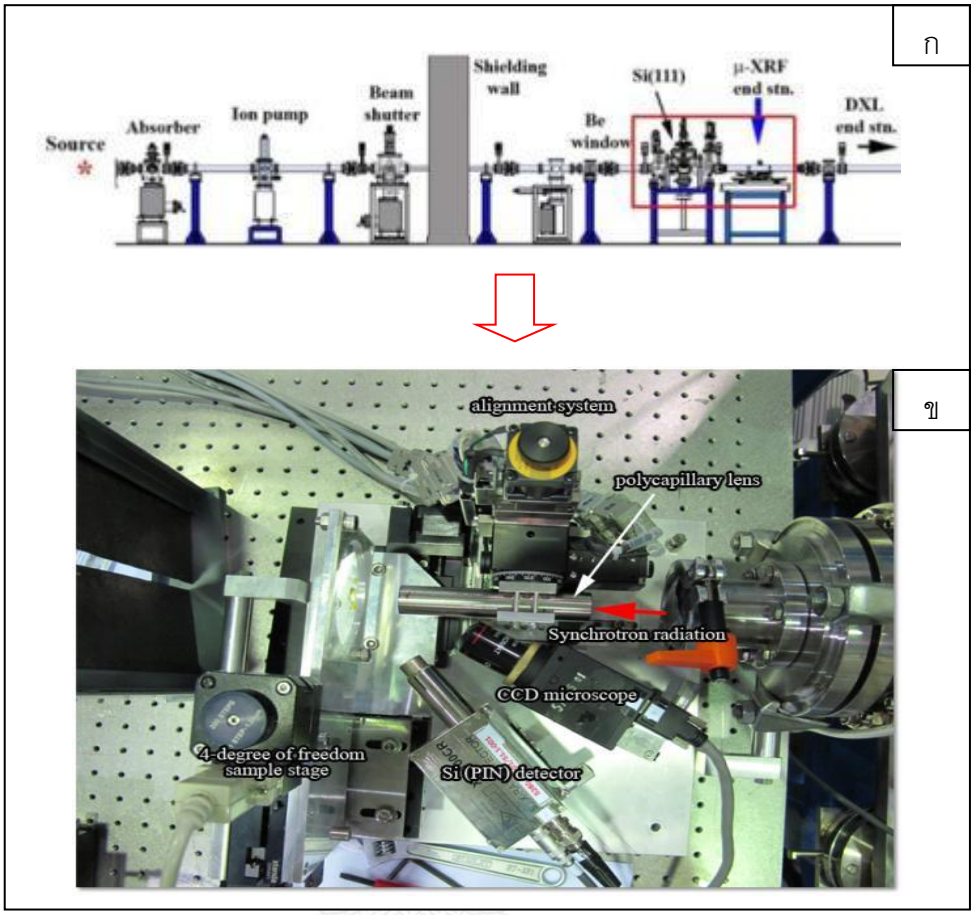
- กล้องไมโครสโคป (CCD microscope) ใช้ตรวจสอบและบันทึกภาพตัวอย่างก่อนและขณะทำการทดลอง

- ระบบจับยึดตัวอย่าง (Sample stage) โดยตัวอย่างจะสามารถเลื่อนซ้ายขวาตั้งฉากกับแสง เพื่อทำการศึกษาการกระจายตัวของธาตุในตัวอย่าง

- ระบบวัดรังสี ณ สถานีทดลอง คือ Si(PIN) detector ซึ่งมีค่า Energy resolution ที่ 160 eV ณ ตำแหน่ง Mn-K$\alpha$ line

2) เทคนิคที่ใช้ในระบบลำเลียงแสง BL6

ใช้เทคนิค micro-XRF/XRD ใช้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ครอบคลุมตั้งแต่พลังงาน 2–10 keV จากแม่เหล็กสองขั้วหมายเลข 6 ของวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาด 1.2 GeV ขนาดของลำแสงซินโครตรอน ณ ตำแหน่งตัวอย่าง (22 mm จากทางออกของเลนส์รังสีเอกซ์) จะถูกวัดด้วยวิธี Wire-scan โดยใช้ลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ไมโครเมตร วางตำแหน่งของตัวอย่างและทำการเคลื่อนที่ตัดผ่านลำรังสีเอกซ์ เมื่อลวดทองแดงตัดผ่านลำรังสีเอกซ์ อะตอมของทองแดงจะถูกกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ของแสงซินโครตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น หลังจากนั้นก็จะตกกลับมายังสถานะพื้นพร้อมกับคายรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยว (Cu-K$\alpha$, 8keV) ออกมา โดยที่รังสีเอกซ์ที่คลายออกมานั้นจะเป็นคุณลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุ และถูกบันทึกด้วยหัววัดรังสี หลังจากนั้นจะได้ข้อมูลของสเปกตรัมของทองแดง ณ ตำแหน่งลวดต่างๆ เทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ในการหาองค์ประกอบทางอะตอมของสารตัวอย่างที่สนใจได้ และเทคนิค Micro-XRF ยังสามารถที่จะระบุตำแหน่งหรือการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวอย่างได้ (Tancharakorn และคณะ, 2012)




รูปที่ 2.7 สถานีทดลอง ระบบลำเลียงแสงที่ 6 micro-XRF ของห้องปฏิบัติแสงสยาม
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2555)

Chulalongkorn University

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pepper และคณะ (1983) ได้ทำการศึกษาการดูดดึงสังกะสี และแคดเมียมในกากตะกอนโดยใช้ข้าวโพดหมัก (Silage corn) ร่วมกับการใช้ปูนซึ่งเป็นตัวควบคุม ผลการศึกษา พบว่า ข้าวโพดหมักมีการดูดดึงแคดเมียมได้ลดลงเมื่อมีการเติมปูนจากพีเอช 4.5 ถึง 6.5 ดังนั้นการใช้ประโยชน์ได้ของแคดเมียมในพืชทดลองจะลดลง เมื่อดินมีความเป็นด่าง (Alkaline) หรือมีค่าพีเอชในดิน (Soil pH) เพิ่มขึ้น (Bell และMclaughlin, 2001)

David และJame (1984) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมในสารละลายด้วยผักตบชวา โดยมีการทดลองช่วงความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 0.0001-1000 พีพีเอ็ม ที่เวลา 4 ถึง 6 ชั่วโมง และปัจจัยของพีเอชในสารละลายที่ระดับ 2 ถึง 10 ที่มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวา ผลการศึกษา พบว่า ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมที่สูงกว่า 100 พีพีเอ็ม ผักตบชวาแสดงอาการเป็นพิษ และมีอัตราการดูดดึงแคดเมียมที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรกที่ 4 ชั่วโมง ส่วนพีเอชที่มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียม พบว่า การเพิ่มพีเอช ตั้งแต่ 2 ถึง 5 สามารถช่วยเพิ่มการดูดดึงแคดเมียมในสารละลายได้มาก แต่ผักตบชวาตาย ส่วนค่าพีเอชในสารละลายที่มากกว่า 5 ขึ้นไป สามารถช่วยให้พืชดูดดึงได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งจะเห็นได้ว่าผักตบชวาไม่สามารถอยู่รอดได้ในช่วงพีเอชต่ำกว่า 2 และสูงกว่า 9 นอกจากนี้การกวนสารละลายจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมได้เร็วขึ้น

นัยนันท์ อริยกานนท์ (2550) ศึกษาผลของสารคีเลตและกรดอินทรีย์ 5 ชนิด คือ ดีทีพีเอ อีดีดีเอส กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดแกลลิก ต่อการช่วยดูดดึงทองแดง สังกะสี และนิกเกิลด้วยต้อยติ่ง [*Ruellia tuberosa* (Burm.f.) Hochr.] ผลการศึกษา พบว่า ต้อยติ่งสามารถสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิล ทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 1,522, 4,111 และ 7,332 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และการเติมสารคีเลตและกรดอินทรีย์ พบว่า อีดีดีเอส ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมของทองแดง และนิกเกิลของต้อยติ่งได้มากที่สุด ส่วนดีทีพีเอจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมสังกะสีของต้อยติ่งได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า ความเป็นพิษของ ดีทีพีเอ อีดีดีเอส กรดออกซาลิก กรดซิตริกและกรดแกลลิกไม่มีผลความเป็นพิษต่อพืชทดลอง

Sandra และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารหนูในน้ำโดยการเปรียบเทียบพืช 2 ชนิด ได้แก่ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) และแหนเล็ก (*Lemna minor*) โดยมีระดับความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเท่ากับ 0.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และกำหนดความหนาแน่นของผักตบชวาในน้ำเท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และแหนเล็กเท่ากับ 4 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการกำจัดสารหนูในน้ำด้วยผักตบชวา และแหนมีค่าสูงสุดในช่วง 14 วันแรกของพืชทั้ง 2 ชนิด โดยแหนเล็กมีการกำจัดสารหนู 140 มิลลิกรัมของสารหนูต่อเฮกตาร์ ส่วนผักตบชวากำจัดสารหนูได้ถึง 600 มิลลิกรัมของสารหนูต่อเฮกตาร์ แสดงให้เห็นว่าผักตบชวามีการผลิตมวลชีวภาพสูงขึ้น จึงเป็นพืชทางเลือกในการกำจัดสารหนูในน้ำได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ใช้ในการทดลองด้วยกัน

Chulalongkorn University

Mishra และTripathi (2009) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของผักตบชวาใน การกำจัดโครเมียม และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งสองชนิด ได้แก่ 1, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษา พบว่า การสะสมโลหะหนักทั้งโครเมียมและสังกะสี มีในส่วนของรากมากกว่าส่วนของลำต้น นอกจากนี้ยังพบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการกำจัดสังกะสีได้ดีที่สุด 95 เปอร์เซ็นต์ และสามารถกำจัดโครเมียมในน้ำได้ 84 เปอร์เซ็นต์ และผลจากการสะสมโลหะหนัก ทั้งสองชนิดภายหลังจากการเก็บตัวอย่างที่ 21 วัน พบว่า โครเมียมมีผลต่อการแสดงความเป็นพิษของผักตบชวา แต่สังกะสีส่งผลต่อการแสดงความเป็นพิษของผักตบชวา

Tanhan และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาการดูดดึงและสะสมแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสีด้วยสาบเสือ โดยมีการทดลองแบบไฮโดรโปนิกส์ มีความเข้มข้นของแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสีเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษา พบว่า มีการสะสมตะกั่วในส่วนรากเท่ากับ 1,772.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในส่วนยอด เท่ากับ 60,655.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การสะสมแคดเมียมในส่วนรากและยอดเท่ากับ 102.3 และ 1,440.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนสังกะสีสะสมในส่วนรากและยอด เท่ากับ 1,876.0 และ 7,011.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่าสาบเสือมีประสิทธิภาพในการสะสมตะกั่วได้สูง (Hyperaccumulator) และมีศักยภาพในการนำไปใช้บำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินได้

Sampanpanish และTippayasa (2007) ได้ศึกษาการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีปลูกพืชไร้ดินโดยใช้ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) และแว่นแก้ว (*Hydrocotyle umbellate* L.) โดยมีความเข้มข้นโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษา พบว่า ในระยะเวลา 7, 15, 21 และ 30 วัน ผักตบชวาทั้งต้นมีการสะสมโครเมียมมากที่สุดที่ 30 วัน เท่ากับ 2.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ส่วนแว่นแก้วทั้งต้นมีการสะสมโครเมียมมากที่สุดที่ 21 วัน เท่ากับ 1.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง แสดงให้เห็นว่าผักตบชวามีประสิทธิภาพในการสะสมโครเมียมได้ดีกว่าแว่นแก้ว

กัลปพฤกษ์ คงเมือง และพันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2553) ได้ทำการศึกษาผลของอีดีทีเอ และกรดซิตริก ต่อการดูดดึงแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผักตบชวา โดยมีการทดลอง 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุมไม่มีการเติมสารคีเลตทั้งสองชนิด 2) ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ 3) ชุดการทดลองที่เติมกรดซิตริก และ 4) ชุดการทดลองที่เติมกรดซิตริกร่วมกับอีดีทีเอ ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน ผลการศึกษา พบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการ

สะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) รองลงมา คือ ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) โดยในชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ และชุดการทดลองที่เติมกรดซิตริกที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้สูงสุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากที่สุด โดยชุดที่เติมอีดีทีเอที่เวลา 15 วัน ผักตบชวามีการสะสมแคดเมียมได้สูงสุดในส่วนรากเท่ากับ 645.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และในชุดที่เติมกรดซิตริกที่เวลา 75 วัน ผักตบชวามีการสะสมแคดเมียมได้สูงสุดในราก เท่ากับ 603.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง แสดงให้เห็นว่า การเติมอีดีทีเอมีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาในน้ำเสียสังเคราะห์มากกว่าการเติมกรดซิตริก

ยศวนันท์ หงศ์พิริยกุล และพันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2553) ได้ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินและน้ำด้วยบอนเขียว โดยทำการปลูกบอนเขียวลงในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว 1,300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยแบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1 ดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว แต่ไม่เติมอีดีทีเอการทดลองที่ 2, 3 และ 4 คือ ดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่วและเติมอีดีทีเอที่ระดับ 1, 2 และ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120 และ 150 วัน ผลการศึกษา พบว่า ชุดการทดลองดินที่ปนเปื้อนตะกั่วและเติมสารอีดีทีเอ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ส่วนใต้ดินของบอนเขียวสามารถดูดดึงตะกั่วได้ดีที่สุด เท่ากับ 8,561.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่เวลา 150 วัน ส่วนการปลูกบอนเขียวในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นตะกั่วเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ใน 4 ชุดการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ และเติมอีดีทีเอ 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร โดยบอนเขียวสามารถดูดดึงตะกั่วได้มากที่สุดในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 502.84 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่เวลา 90 วัน แสดงว่าบอนเขียวมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน และน้ำเสียสังเคราะห์ได้โดยไม่แสดงความเป็นพิษต่อบอนเขียว

Euan และคณะ (2009) ได้ศึกษาตำแหน่งการกระจายตัวและรูปแบบทางเคมีของสารหนูในเนื้อเยื่อต้นข้าว โดยการวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอนด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF) โดยทำการศึกษาการกระจายตัวของสารหนูในส่วนราก หน่อข้าว ใบข้าว และเมล็ดข้าว โดยใช้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ของวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาด 7 GeV ผลการศึกษา พบว่า สารหนูภายในเนื้อเยื่อรากมีความเข้มข้นสูงสุดโดยมีการกระจายตัวที่พื้นผิวราก นอกจากนี้ พบการกระจายตัวของสารหนูในหน่อข้าว และเนื้อเยื่อใบรองลงมาจากเนื้อเยื่อราก และในส่วนของเมล็ดข้าวมีการกระจายของสารหนูน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่ากลไกการสะสมสารหนูนั้นได้มีการกระจายตัวมากที่สุดในส่วนของเนื้อเยื่อราก

Woranan และคณะ (2010) ได้ศึกษาการสะสมและความทนทานต่อโลหะสังกะสีและแคดเมียมด้วยต้นว่านมหากาฬที่ปลูกในระบบเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ซึ่งมีการเติมโลหะสังกะสีและแคดเมียมในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ และทำการวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน ซึ่งศึกษาสถานะออกซิเดชันรูปแบบทางเคมีของสังกะสีและแคดเมียม รวมถึงการกระจายตัวของโลหะในส่วนต่างๆ ของพืชด้วยเทคนิค Extended X-ray absorption fine structure (EXAFS) และ Synchrotron X-ray fluorescence (SXRF) ผลการศึกษา พบว่า ต้นว่านมหากาฬมีการส่งผ่านสังกะสีและแคดเมียมจากส่วนรากไปสู่ส่วนหัว และส่งผ่านตามท่อลำเลียงไปสะสมยังลำต้น และใบ โดยพบสังกะสี และแคดเมียมสะสมมากบริเวณชั้นคอร์เทคซ์ (Cortex) และสะสมน้อยในเนื้อเยื่อบริเวณแกนกลางลำต้นและเนื้อเยื่อลำเลียง สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง EXAFS Zn K-edge พบว่า ส่วนหัว (ลำต้นใต้ดิน) มีการสะสมสังกะสีในรูป Zn (II) ไอออนจับอยู่กับอะตอมออกซิเจน (Zn-O) ส่วนการสะสมแคดเมียมได้มีการนำเข้าไปสะสมยังส่วนเนื้อของหัว ซึ่งแคดเมียมที่สะสมอยู่นั้นอยู่ในรูปของ Cd (II) ไอออน แสดงให้เห็นว่า ต้นว่านมหากาฬมีกลไกการสะสมโลหะสังกะสี และแคดเมียมไปเก็บไว้ในเซลล์ชั้นคอร์เทกซ์ของลำต้น และเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นพาเรงไคมาร์ (Parenchyma) ของใบ

Akegacha (2011) ได้ทำการศึกษาผลของอีดีทีเอและดีทีพีเอต่อการดึงดูดแคดเมียมในดินปนเปื้อนด้วยผักตบชวา โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารคีเลตทั้งสองชนิด 2) ชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอ 3) ชุดการทดลองที่มีการเติมสารดีทีพีเอ และ 4) ชุดการทดลอง ที่มีการเติมสารดีทีพีเอร่วมกับสารอีดีทีเอ ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 20, 40, 60, 80 และ 100 วัน ผลการศึกษา พบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) รองลงมา คือ ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) โดยในชุดที่เติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 160.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งที่เวลา 100 วัน ส่วนในชุดที่เติมสารดีทีพีเอ และชุดที่มีการเติมสารดีทีพีเอร่วมกับสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 231.78 และ 157.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่เวลา 100 วัน แสดงให้เห็นว่าการเติมสารดีทีพีเอมีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวามากกว่าการเติมสารอีดีทีเอ และการเติมสารดีทีพีเอร่วมกับสารอีดีทีเอ

Boris S (2012) ได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการดูดดึงสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม ในน้ำด้วยผักตบชวา โดยมีพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ พีเอชที่ระดับ 6 และ 8 การเติมโลหะแต่ละชนิดในน้ำ การเติมโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดรวมกันในน้ำ และการเพิ่มจำนวนผักตบชวา โดย

มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม เท่ากับ 500, 250, 250 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสี ทองแดง ลดลงมากกว่า ตะกั่ว และแคดเมียม ในน้ำอย่างรวดเร็ว ที่ระดับพีเอช เท่ากับ 8 มากกว่าพีเอช เท่ากับ 6 สำหรับพารามิเตอร์ที่เติมโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดลงไปที่พีเอช เท่ากับ 8 และพีเอช เท่ากับ 6 สามารถบำบัดทองแดงได้ 8 % และ 24 % บำบัดตะกั่วได้ 11 % และ 26 % บำบัดแคดเมียมได้ 24% และ 50 % และสามารถบำบัดสังกะสีได้ 18 % และ 57 % ที่พีเอช 8 และ 6 ตามลำดับ ส่วนการเพิ่มขึ้นของจำนวนผักตบชวามีผลทำให้มวลชีวภาพของพืชเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดดึงโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดดึงโลหะทั้ง 4 ชนิดด้วยผักตบชวามีถึง 74.99 % นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า BCF ในผักตบชวามีความแตกต่างกันต่อการดูดดึงทองแดง > ตะกั่ว > แคดเมียม > สังกะสี ที่พีเอช เท่ากับ 8 และทองแดง > ตะกั่ว > สังกะสี > แคดเมียม ที่พีเอชเท่ากับ 6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 3
# วิธีดำเนินการวิจัย

## 3.1 สถานที่การวิจัย

การดำเนินการทดลองได้ปฏิบัติในโรงเรือนเพาะชำที่ชั้น 2 ของอาคารสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการชั้น 3 ของสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 3.2 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์

1) ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*)

2) ภาชนะพลาสติกเส้นผ่าเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 เซนติเมตร สูง 35 เซนติเมตร

3) ถุงพลาสติกดำ ขนาด 21×24 นิ้ว

4) เครื่องปั่นกวนตัวอย่างดินตะกอนท้องน้ำ

5) กระดาษกรองเบอร์ 40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร (Whatman, England)

6) กระดาษกรอง GF/C (Glass micro filters) เส้นผ่าศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร (Whatman, England)

7) ถุงซิป

8) ขวดพลาสติก 60 มิลลิลิตร และ 200 มิลลิลิตร

9) น้ำปราศจากไอออน

10) ตะแกรงร่อนดินขนาด 2 มิลลิเมตร และ 0.75 มิลลิเมตร

11) พาราฟิล์ม

12) แผงอัดพรรณไม้ (Plant press) ขนาด 30 x 50 เซนติเมตร

13) เครื่องแก้วต่างๆ ได้แก่ กระบอกตวง กรวยกรอง ปิเปต แท่งแก้ว ขวดปรับปริมาตร บีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ และกระจกนาฬิกา เป็นต้น

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1) เครื่องอะตอมมิกแอปซอร์ปชั่นเสปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer; AAS) รุ่น AAnalyst 800, Perkin Elmer

2) เตาไฟฟ้า (Hot plate) รุ่น Cimarec 2, Thermolyne

3) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่งพิกัด 220 กรัม รุ่น BP 221S, Sartorius

4) ตู้อบความร้อน (Hot air oven) รุ่น ULE 500, MEMMERT

5) เครื่องปั่นตัวอย่างพืช(Blender) รุ่น RTO4A, Korea

6) ตู้ดูดอากาศ (Hood)

7) เครื่องวัดความเป็นกรดเป็นด่าง (pH meter)

8) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity meter)

9) เครื่องวัดค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน (ORP meter)

10) เครื่องย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) รุ่น Ethos sel, milestone

11) เครื่องเขย่าแบบหมุนวน (Mechanical shaker) รุ่น OS-2, Green SSeriker2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.3 สารเคมี

1) เอทิลีนไดแอมีนเททระแอซิตริกแอซิด ($C_6H_{16}N_2O_8$)

2) ไดเอธิลลีนไตรเอมีนเพนทระเอซิติกเอซิด ($C_{14}H_{23}N_3O_{10}$)

3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% $H_2O_2$) 3

4) ไนตริกแอซิด (65% HNO3)

5) ไฮโดรคลอริกแอซิด (HCL)

6) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

**3.3 การเตรียมการวิจัย**

3.3.1 การเตรียมภาชนะ

ใช้ภาชนะพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 เซนติเมตร สูง 35 เซนติเมตร มีปริมาตร 25 ลิตร จำนวน 57 ใบ ทำการแช่ด้วยกรดไนตริก 10 เปอร์เซ็นต์ นาน 1 วัน แล้วล้างออกด้วยน้ำ 2 ครั้ง และน้ำกลั่น 1 ครั้ง ผึ่งลมให้แห้ง แล้วห่อหุ้มด้วยถุงพลาสติกสีดำทุกใบ

3.3.2 การเตรียมสารละลายคีเลต

เตรียมสารเอทิลีนไดแอมีนเทตระแอซิตริกแอซิด (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) และไดเอธิลลีนไตรเอมีนเพนทระเอซิติกเอซิด (Diethylenetriaminepentaacetic acid; DTPA) โดยใช้ปริมาณอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมเท่ากับ 0.026 กรัม และดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมเท่ากับ 0.020 กรัม (อ้างอิงจากกัลปพฤกษ์, 2552 และ Akegacha, 2011 ตามลำดับ) โดยคำนวณจากปริมาตรน้ำที่ใช้ คือ 10 ลิตรต่อหนึ่งภาชนะปลูก และทำการละลายสารคีเลตในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยวิธีคำนวณปริมาณสารคีเลตที่ใช้แสดงไว้ในภาคผนวก ค

3.3.3 การเตรียมพืชทดลอง

ทำการสุ่มตัวอย่างผักตบชวาในพื้นที่ที่ไม่มีการปนเปื้อนแคดเมียม โดยได้นำผักตบชวามาเพาะเลี้ยงในบริเวณน้ำที่ไม่มีการปนเปื้อนแคดเมียม ให้มีการขยายพันธุ์จนถึงรุ่นที่ 3 นำมาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมก่อนทำการปลูกทดลอง โดยจากผลการวิเคราะห์ไม่พบปริมาณแคดเมียมทั้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) จึงได้คัดเลือกผักตบชวามาใช้ในการทดลอง โดยทำการคัดเลือกพืชทดลองให้มีขนาดลำต้น ราก และน้ำหนักใกล้เคียงกัน ประมาณ 20-25 กรัม มีจำนวนใบของผักตบชวา 5-6 ใบ และล้างน้ำให้สะอาดก่อนมาปลูกลงในภาชนะทดลองที่เตรียมไว้ โดยปลูกผักตบชวาจำนวน 4 ต้นต่อหนึ่งภาชนะปลูก

3.3.4 การเตรียมตัวอย่างดินตะกอนท้องน้ำ

ตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมที่จะนำมาทดลองจะทำการเก็บที่ความลึก 0-30 เซนติเมตร จากตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก นำมาผึ่งลมให้แห้ง โดยใช้ดิน 5 กิโลกรัม ต่อภาชนะ 1 ใบ โดยนำดินมาผสมกับน้ำจำนวน 10 ลิตร เพื่อเป็นแบบจำลองดินตะกอนท้องน้ำ และสุ่มตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ตามพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินตะกอนท้องน้ำและวิธีการวิเคราะห์

| คุณสมบัติของดินตะกอนท้องน้ำ | วิธีการวิเคราะห์ |
|---|---|
| ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) | pH meter |
| ค่าการนำไฟฟ้า (EC) | electrical conductivity meter |
| อินทรียวัตถุ (OM) | Walkley and black method |
| ปริมาณไนโตรเจน (N) | Kjeldahl method |
| ปริมาณฟอสฟอรัส (P) | Colorimetric method |
| ปริมาณโพแทสเซียม (K) | อะตอมมิกแอปซอร์ปชั่นเสปกโตรมิเตอร์ (AAS) |
| ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) | Ammonium saturation and distillation |
| ลักษณะเนื้อดิน (Soil texture) | ไฮโดรมิเตอร์ |
| ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cd) | อะตอมมิกแอปซอร์ปชั่นเสปกโตรมิเตอร์ (AAS) |

**3.4 วิธีการศึกษาผลของอีดีทีเอและดีทีพีเอต่อการดึงดูดแคดเมียมในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวาที่ระดับพีเอชแตกต่างกัน**

โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 2 ชุด ได้แก่

3.4.1 ชุดควบคุม โดยแบ่งออกเป็น 4 ชุด ดังนี้

1) ชุดควบคุม มีการปลูกพืชในน้ำ ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

2) ชุดควบคุม มีการปลูกพืชในน้ำ มีการเติมอีดีทีเอ (EDTA) ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

3) ชุดควบคุม มีการปลูกพืชในน้ำ มีการเติมดีทีพีเอ (DTPA) ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

4) ชุดควบคุม มีการปลูกพืชในน้ำ ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอช ที่ 4, 5, 7 และ 9

3.4.2 ชุดการทดลอง โดยแบ่งออกเป็น 3 ชุด ดังนี้

1) ชุดทดลอง มีการปลูกพืชในน้ำ มีการเติมอีดีทีเอ (EDTA) ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9

2) ชุดทดลอง มีการปลูกพืชในน้ำ มีการเติมดีทีพีเอ (DTPA) ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9

3) ชุดทดลอง มีการปลูกพืชในน้ำ มีการเติมอีดีทีเอ (EDTA) ที่ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับ ดีทีพีเอ (DTPA) ที่ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในอัตราส่วน 1:1 ที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9

นอกจากนี้ ตลอดการทดลองไม่มีการใส่ปุ๋ยใดๆ และมีการเติมอากาศแบบใช้ใบพัดหมุนเพื่อให้ดินตะกอนหมุนเวียน ไม่ตกนิ่งอยู่กับที่ อันเป็นการจำลองเสมือนลำน้ำที่ดินตะกอนมีการปนเปื้อนแคดเมียม โดยความเร็วรอบของมอเตอร์ใบพัดหมุนกวนตะกอน เท่ากับ 200 รอบต่อนาที และในขั้นตอนการปรับพีเอชใช้สารไฮโดรคลอริกแอซิด (HCL) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 6 นอร์มอล

**3.5 การเก็บตัวอย่าง**

3.5.1 การเก็บตัวอย่างน้ำ

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ทุกๆ 30 วัน ได้แก่ 30, 60, 90 และ 120 วัน โดยทำการเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 200 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด โดยขวดแรกนำไปวิเคราะห์หาคุณภาพน้ำ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ ได้แก่ พีเอช (pH) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (Oxidation reduction potential; ORP) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ค่าของแข็งละลายน้ำ (Dissolves solids) สำหรับขวดที่สองทำการปรับพีเอช (pH) ด้วยการใส่กรดไนตริก 65% ประมาณ 2-3 หยด นำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total cadmium)

3.5.2 การเก็บตัวอย่างดินตะกอนท้องน้ำ

ทำการเก็บตัวอย่างดิน ทุกๆ 30 วัน ได้แก่ 30, 60, 90 และ 120 วัน ทำการเก็บไว้ในถุงซิป จำนวน 100 กรัม จำนวน 2 ถุง โดยถุงแรกนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 วัน จนน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้น บด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total cadmium) ส่วนดินถุงที่ 2 นำไปผึ่งลมให้แห้ง และนำไปวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) และวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน (Cadmium available)

3.5.3 การเก็บตัวอย่างพืช

โดยเก็บตัวอย่างผักตบชวาทุกๆ 30 วัน ได้แก่ 30, 60, 90 และ 120 วัน นำมาล้างน้ำให้สะอาด 3-4 ครั้ง ล้างน้ำกลั่น 1 ครั้ง จากนั้นนำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2-3 ชั่วโมง และแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ชั่งน้ำหนักสด และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 24 - 48 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นบดตัวอย่างพืชแบบแยกส่วนให้ละเอียด เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด

3.5.4 การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต

ทำการเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต ด้วยการจดบันทึกจากน้ำหนักสดของพืชก่อนทดลอง น้ำหนักสดของพืชหลังทดลอง รวมทั้งจดบันทึกน้ำหนักแห้งหลังเก็บตัวอย่างพืชในแต่ละช่วงเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน และทำการคำนวณอัตราการเจริญเติบโต ทุกๆ 30 วัน ได้แก่ 30, 60, 90 และ 120 วัน ดังสูตรต่อไปนี้

- อัตราการเจริญเติบโต (Relative growth rate; RGR) สามารถหาได้จากสูตร (Hoffmann และPoorter, 2002)

$$RGR = [Ln(W_2) - Ln(W_1)] / (t_2-t_1)$$

RGR = อัตราการเจริญเติบโต หน่วย คือ กรัมต่อวัน

$W_1$ = น้ำหนักแห้งของพืชที่เวลาเริ่มทดลอง หน่วย คือ กรัม

$W_2$ = น้ำหนักแห้งของพืชที่เวลาหลังทดลอง หน่วย คือ กรัม

$T_1$ = เวลาเริ่มทดลอง หน่วย คือ วัน

$T_1$ = เวลาหลังทดลอง หน่วย คือ วัน

Ln = Natural logarithm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.5.5 การเก็บตัวอย่างพืชเพื่อวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน (Synchrotron)

โดยเก็บตัวอย่างผักตบชวาที่เวลา 30 วัน และ 120 วัน นำมาล้างน้ำให้สะอาด 3-4 ครั้ง ล้างน้ำกลั่น 1 ครั้ง นำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2-3 ชั่วโมง จากนั้นทำการเก็บและรักษาตัวอย่างพรรณไม้ (Herbarium) โดยใช้กระดาษพับครึ่งสำหรับวางตัวอย่างผักตบชวาที่จะอัดบนแผงอัดพรรณไม้ (Plant press) ขนาด 30 x 50 เซนติเมตร นำไปตากแดดโดยการตั้งแผงอัดพรรณไม้ขึ้น เป็นเวลา 3 – 5 วัน จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน (Synchrotron)

**3.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ ดินตะกอน และพืช**

3.6.1 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างน้ำ

ใช้วิธีการของ USEPA method 3015A (USEPA, 1998) โดยการย่อยด้วยกรด (Acid-digestion) ด้วยเครื่องมือสำหรับย่อยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) และตรวจวัดหาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอร์ปชั่นเสปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer; AAS)

3.6.2 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างพืช และดินตะกอนท้องน้ำ

ใช้วิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996) โดยการย่อยด้วยกรด (Acid Digestion) ด้วยเครื่องมือสำหรับย่อยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) ส่วนการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดินด้วยวิธีการเติมด้วยน้ำยาสกัดดีทีพีเอ (Lindsay and Norvel, 1978) และทำการตรวจวัดหาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total cadmium) และปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน (Cadmium available) ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอร์ปชั่นเสปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer; AAS)

3.6.3 การวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายแคดเมียมไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืชด้วยแสงซินโครตรอน (Synchrotron)

โดยนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ที่ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน สถาบันวิจัยแสงสยามแห่งชาติ ซึ่งเป็นการศึกษาการกระจายตัว การส่งผ่าน และการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืชโดยใช้ระบบลำเลียงแสงที่ 6 (BL6b) ด้วยเทคนิค micro-XRF/XRD โดยใช้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ครอบคลุมตั้งแต่พลังงาน 2–10 keV จากแม่เหล็กสองขั้วหมายเลข 6 ของวงกักเก็บ

อิเล็กตรอนขนาด 1.2 GeV ทำการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมและตรวจวัดการสะสมของแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของผักตบชวา ด้วยโครงสร้างการเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์จากแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยมีหลักการทำงาน คือ

การกระเจิงรังสีเอกซ์โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวตกกระทบผลึกหรือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมอย่างมีระเบียบ จะเกิดการสะท้อนบนระนาบของผลึก และเมื่อผลต่างของระยะทางเดินของรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับจำนวนเท่า(n) ของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\lambda$) จะทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของหัววัด ซึ่งรูปแบบดังกล่าวเรียกว่า Diffraction pattern ดังนั้นเมื่อเราทราบความยาวคลื่น และวัดมุมที่เกิดการเลี้ยวเบน (q) ก็สามารถคำนวณหาค่าระยะระหว่างระนาบของผลึกได้ (d) โดยปรากฏการณ์การเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence) เกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนชั้นในของอะตอมถูกกระตุ้นให้หลุดออกมา และเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นถัดมา ทำให้เกิดการคลายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ โดยที่รังสีเอกซ์ที่คลายออกมานั้นจะเป็นคุณลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุ ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการหาองค์ประกอบทางอะตอมของสารตัวอย่างได้

### 3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวาที่ได้จากการทดลอง โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan’s new multiple range test (DMRT) ทั้งนี้ การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดังกล่าวปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติคือ Statistical package for the social science (SPSS)

# บทที่ 4
# ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

## 4.1 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีในน้ำทดลอง

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้นของน้ำทดลอง

ผลการศึกษาค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่นรีดักชั่น ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ของน้ำก่อนทดลอง โดยปริมาณแคดเมียมของน้ำเริ่มต้นทดลองไม่สามารถตรวจวัดค่าได้หรือไม่พบปริมาณแคดเมียม (ดังตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้นของน้ำทดลอง

| คุณสมบัติของดินตะกอนท้องน้ำ | ค่าที่วัดได้ | หน่วย |
|---|---|---|
| ค่าพีเอช (pH) | 6.61 | |
| ค่าการนำไฟฟ้า (EC) | 51.25 | ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร |
| ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่นรีดักชั่น (ORP) | 90.10 | มิลลิโวลต์ |
| ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) | 5.03 | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cd) | nd | มิลลิกรัมต่อลิตร |

หมายเหตุ: nd หมายถึง ไม่พบ (ปริมาณต่ำสุดที่สามารถวัดค่าได้ เท่ากับ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.2 ค่าพีเอช (pH)

การศึกษาพีเอชในน้ำ ซึ่งตลอดระยะเวลาของการทดลองได้มีการปรับพีเอชในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ ชุดการทดลองที่เติมสารดีทีพีเอและชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอที่พีเอช 4, 5, 7 และ 9 ผลการทดลองพบว่า ค่าพีเอชไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากว่ามีการปรับพีเอชในน้ำทุกๆ 7 วัน ตลอดระยะเวลาของการทดลอง 120 วัน ส่วนค่าพีเอชในน้ำของชุดควบคุม พบว่า ชุดควบคุมอีดีทีเอ และชุดควบคุมดีทีพีเอมีค่ามากกว่าชุดควบคุมที่ไม่เติมสารคีเลต ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.04 ถึง 6.94 (ดังตารางที่ 4.2) และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเป็นเพราะว่าได้มีการปั่นกวนน้ำตลอดระยะเวลาของการทดลอง ซึ่งอาจทำให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ และส่งผลต่อคาร์บอเนตในน้ำ จึงทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 ค่าพีเอชในน้ำ

| ชุดการทดลอง | | ระยะเวลาการทดลอง (วัน) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 | 60 | 90 | 120 |
| ชุดควบคุม 1 | | 6.18±0.06 | 6.27±0.06 | 6.42±0.03 | 6.47±0.05 |
| ชุดควบคุม 2 | | 6.27±0.05 | 6.53±0.06 | 6.64±0.16 | 6.94±0.09 |
| ชุดควบคุม 3 | | 6.04±0.06 | 6.04±0.06 | 6.19±0.06 | 6.23±0.03 |
| ชุดควบคุม 4 | พีเอช 4 | 4.28±0.22 | 4.31±0.09 | 4.39±0.12 | 4.50±0.11 |
| | พีเอช 5 | 5.39±0.11 | 5.46±0.16 | 5.56±0.04 | 5.55±0.07 |
| | พีเอช 7 | 7.43±0.28 | 7.64±0.04 | 7.69±0.27 | 7.74±0.05 |
| | พีเอช 9 | 9.18±0.07 | 9.26±0.27 | 9.32±0.16 | 9.37±0.16 |
| อีดีทีเอ | พีเอช 4 | 4.35±0.25 | 4.41±0.26 | 4.44±0.17 | 4.31±0.10 |
| | พีเอช 5 | 5.37±0.22 | 5.37±0.16 | 5.57±0.10 | 5.68±0.15 |
| | พีเอช 7 | 7.19±0.11 | 7.19±0.17 | 7.49±0.15 | 7.61±0.15 |
| | พีเอช 9 | 9.08±0.07 | 9.11±0.12 | 9.19±0.25 | 9.36±0.26 |
| ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 4.18±0.07 | 4.36±0.04 | 4.26±0.28 | 4.43±0.07 |
| | พีเอช 5 | 5.39±0.09 | 5.50±0.06 | 5.40±0.17 | 5.62±0.23 |
| | พีเอช 7 | 7.32±0.19 | 7.36±0.35 | 7.39±0.06 | 7.63±0.09 |
| | พีเอช 9 | 9.05±0.10 | 9.23±0.11 | 9.21±0.10 | 9.50±0.08 |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 4.29±0.07 | 4.40±0.06 | 4.40±0.18 | 4.38±0.16 |
| | พีเอช 5 | 5.48±0.16 | 5.51±0.04 | 5.42±0.11 | 5.56±0.22 |
| | พีเอช 7 | 7.22±0.07 | 7.43±0.18 | 7.57±0.12 | 7.82±0.13 |
| | พีเอช 9 | 9.15±0.14 | 9.18±0.12 | 9.32±0.18 | 9.43±0.21 |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 4 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9

4.1.3 ค่าการนำไฟฟ้า (EC)

การศึกษาค่าการนำไฟฟ้าในน้ำ พบว่า ในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารคีเลตมีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่าในชุดควบคุมที่มีการเติมสารอีดีทีเอ ชุดควบคุมที่เติมสารดีทีพีเอและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยชุดควบคุมที่เติมสารอีดีทีเอมีค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 91.93, 100.90, 136.87 และ 165.40 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง และในชุดควบคุมที่เติมสารดีทีพีเอมีค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 102.40, 102.33, 140.97 และ 150.03 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเติมสารคีเลตลงไปในชุดการทดลองนั้นเป็นการเพิ่มประจุในน้ำ ในส่วนของชุดการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอที่พีเอช 4, 5, 7 และ 9 มีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุดที่เวลา 120 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 318.00, 273.13, 188.37 และ 219.67 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอที่พีเอช 4, 5, 7 และ 9 มีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุดที่เวลา 120 วันเท่ากับ 310.27, 267.00, 174.53 และ 204.60 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอที่พีเอช 4, 5, 7 และ 9 มีแนวโน้มลดลงในระยะเวลา 30 และ 60 วัน เมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่มีการปรับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 โดยที่ 30 วัน มีค่าเท่ากับ 108.60, 107.13, 90.90 และ 88.00 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และที่ 60 วัน 104.70, 105.37, 104.93 และ 100.83 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เนื่องจากว่าในระยะแรกของการทดลองมีค่าปริมาณของไอออนจากแคดเมียมที่สะสมอยู่ในน้ำ และมีการเติมสารคีเลตและปรับพีเอช ซึ่งส่งผลต่อการลายลายได้ของแคดเมียมในน้ำจึงทำให้พืชดูดดึงไปใช้ได้มากขึ้นหรือนำไปสะสมไว้ในพืช ทำให้เกิดประจุลดลง จึงส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าลดลง และเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้นมีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุดที่เวลา 120 วัน เท่ากับ 291.87, 243.20, 152.33 และ 199.83 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.3) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในชุดการทดลองที่มีการเติมสารคีเลตและปรับพีเอชจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าในชุดควบคุม และมีค่ามากที่สุดในชุดการทดลองที่ปรับพีเอช 4 รองลงมาคือ พีเอช 5, 9 และ 7 ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลองจนถึง 120 วัน เนื่องมาจากการเติมสารคีเลตและปรับพีเอชลงไป จึงทำให้เป็นการเพิ่มประจุลงไปในน้ำ (กัลปพฤกษ์, 2552) อีกทั้งเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้นอาจทำให้เศษซากของผักตบชวาที่ร่วงหล่นลงนั้นเกิดการย่อยสลาย และเพิ่มปริมาณประจุมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.3 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำ

| ชุดการทดลอง | | ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ระยะเวลาการทดลอง (วัน) | | | |
| | | 30 | 60 | 90 | 120 |
| ชุดควบคุม 1 | | 90.80±1.49 | 100.90±0.98 | 121.27±3.37 | 148.90±2.26 |
| ชุดควบคุม 2 | | 91.93±0.85 | 100.90±0.98 | 136.87±3.60 | 165.40±0.95 |
| ชุดควบคุม 3 | | 102.40±0.26 | 102.33±0.72 | 140.97±0.55 | 150.03±0.95 |
| ชุดควบคุม 4 | พีเอช 4 | 132.03±2.76 | 107.93±2.33 | 207.33±3.05 | 239.10±2.05 |
| | พีเอช 5 | 103.30±5.40 | 108.60±1.99 | 188.00±3.23 | 200.27±1.91 |
| | พีเอช 7 | 83.70±1.97 | 103.90±0.95 | 158.00±1.54 | 163.10±3.56 |
| | พีเอช 9 | 101.13±1.91 | 103.63±0.73 | 134.67±3.98 | 140.17±0.80 |
| อีดีทีเอ | พีเอช 4 | 149.70±3.53 | 154.33±3.36 | 249.00±0.90 | 318.00±2.62 |
| | พีเอช 5 | 138.73±3.31 | 136.20±3.57 | 183.27±0.87 | 273.13±3.90 |
| | พีเอช 7 | 107.97±2.30 | 124.23±1.55 | 149.10±1.01 | 188.37±2.41 |
| | พีเอช 9 | 125.27±3.93 | 126.17±3.85 | 179.83±2.50 | 219.67±3.05 |
| ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 118.7±02.16 | 123.37±0.21 | 224.6±72.08 | 310.27±1.12 |
| | พีเอช 5 | 101.97±0.96 | 122.90±0.72 | 182.80±2.33 | 267.00±2.64 |
| | พีเอช 7 | 98.13±6.95 | 113.90±0.72 | 169.90±3.25 | 174.53±4.62 |
| | พีเอช 9 | 103.10±2.52 | 108.80±3.60 | 164.80±3.95 | 204.60±1.23 |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 108.60±0.92 | 104.70±0.50 | 208.33±3.21 | 291.87±2.60 |
| | พีเอช 5 | 107.13±2.45 | 105.37±1.16 | 182.53±4.65 | 243.20±2.10 |
| | พีเอช 7 | 90.90±0.65 | 104.93±2.56 | 143.43±3.12 | 152.33±3.06 |
| | พีเอช 9 | 88.00±3.40 | 100.83±0.66 | 127.53±5.27 | 199.83±1.62 |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 4 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9

4.1.4 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP)

จากการศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำ ทุกระยะเวลาของการทดลองที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน พบว่า ในชุดการทดลองมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นมากกว่าในชุดควบคุมอีดีทีเอ และชุดควบคุมดีทีพีเอ โดยชุดการทดลองอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่ 30, 60, 90 และ 120 มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นมากที่สุดที่พีเอช 4 เท่ากับ 113.10, 143.27, 234.03 และ 248.27 มิลลิโวลต์ รองลงมาคือพีเอช 5, 7 และ 9 สำหรับชุดการทดลองดีทีพีเอ ที่พีเอช 4 มีค่าเท่ากับ 102.03, 169.07, 221.67 และ 240.00 มิลลิโวลต์ รองลงมาคือ พีเอช 5, 7และ 9 ส่วนชุดการทดลองอีดีทีเอ ที่พีเอช 4 มีค่าเท่ากับ 120.40, 152.07, 181.33 และ 188.83 มิลลิโวลต์ รองลงมาคือ พีเอช 5, 9 และ 7 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.4) เนื่องจากว่าแคดเมียมละลายได้มากในชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตและมีการปรับพีเอช เพราะสามารถทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปสารละลายได้นาน จึงส่งผลให้ในน้ำรับอิเล็กตรอนจากสารละลายแคดเมียมได้มากกว่าชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tuntullveat (2012) ได้วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำ ผลการศึกษาพบว่า มีค่าสูงมากในทุกชุดการทดลองโดยน้ำได้รับอิเล็กตรอนจากสารละลายแคดเมียม ($Cd^{2+}$) รวมทั้งสารละลายโครเมียม ($H_2CrO_4$) และสารละลายเกลือไดโครเมตด้วย ตัวอย่างเช่น $Na_2Cr_2O_7$ $Cr^{6+}$ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในน้ำทำให้มีค่าสูงขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.4 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำ

| ชุดการทดลอง | | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (มิลลิโวลต์) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ระยะเวลาการทดลอง (วัน) | | | |
| | | 30 | 60 | 90 | 120 |
| ชุดควบคุม 1 | | 122.33±1.35 | 128.37±1.52 | 175.00±1.54 | 182.33±2.06 |
| ชุดควบคุม 2 | | 112.13±0.95 | 121.33±2.56 | 151.23±0.23 | 156.70±2.07 |
| ชุดควบคุม 3 | | 108.07±1.57 | 107.83±1.93 | 146.43±1.45 | 148.83±1.50 |
| ชุดควบคุม 4 | พีเอช 4 | 116.50±1.06 | 174.30±3.79 | 273.80±3.14 | 280.40±1.57 |
| | พีเอช 5 | 127.73±2.11 | 141.90±3.37 | 227.03±0.41 | 229.63±3.07 |
| | พีเอช 7 | 124.23±1.57 | 126.00±1.91 | 192.60±3.55 | 197.73±2.27 |
| | พีเอช 9 | 126.07±2.83 | 121.03±1.76 | 186.30±2.68 | 189.07±1.00 |
| อีดีทีเอ | พีเอช 4 | 120.40±1.87 | 152.07±0.32 | 181.33±1.16 | 188.83±0.66 |
| | พีเอช 5 | 117.50±1.12 | 151.00±3.29 | 160.23±1.07 | 167.40±2.68 |
| | พีเอช 7 | 110.07±2.33 | 129.73±3.69 | 134.13±3.62 | 139.10±1.15 |
| | พีเอช 9 | 105.33±3.83 | 135.90±1.83 | 141.67±1.00 | 144.27±2.81 |
| ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 102.03±1.14 | 169.07±1.30 | 221.67±6.14 | 240.00±1.00 |
| | พีเอช 5 | 97.80±0.43 | 142.13±3.52 | 191.43±3.25 | 217.20±2.90 |
| | พีเอช 7 | 107.53±4.26 | 132.67±1.71 | 180.83±1.91 | 199.13±2.21 |
| | พีเอช 9 | 109.33±1.01 | 127.63±1.93 | 176.27±2.23 | 182.13±2.45 |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 113.10±3.76 | 143.27±3.61 | 234.03±2.47 | 248.27±2.34 |
| | พีเอช 5 | 126.70±1.80 | 149.27±1.84 | 173.67±3.40 | 209.00±1.40 |
| | พีเอช 7 | 110.97±0.85 | 129.03±3.31 | 156.40±1.13 | 186.20±2.49 |
| | พีเอช 9 | 112.80±1.49 | 112.03±3.46 | 148.50±0.43 | 167.17±3.15 |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 4 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอช ที่ 4, 5, 7 และ 9

4.1.5 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

จากการศึกษาปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ พบว่า ในชุดการทดลองมีปริมาณของแข็งแขวนลอยมากกว่าในชุดควบคุม ทุกระยะเวลาการทดลองที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน โดยชุดการทดลองอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ มีปริมาณของแข็งแขวนลอยมากที่สุดที่พีเอช 5 เท่ากับ 310.23 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีมากที่สุดที่เวลา 120 วัน รองลงมา คือ พีเอช 9, 7 และ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 181.13, 171.53 และ 121.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองดีทีพีเอ ที่พีเอช 5 เท่ากับ 310.03 มิลลิกรัมต่อลิตรรองลงมา คือ พีเอช 4, 9 และ 7 โดยมีค่าเท่ากับ 263.20, 244.33 และ 180.60 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองอีดีทีเอ ที่พีเอช 9 มีค่าเท่ากับ 201.95 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีมากที่สุดที่เวลา 120 วัน รองลงมา คือ พีเอช 4, 5 และ 7 มีค่าเท่ากับ 193.72, 150.33 และ 141.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.5) ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ 30 วันแรก ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำมีปริมาณต่ำ อาจมีสาเหตุมาจากยังไม่มีการร่วงหล่นของเศษซากผักตบชวา และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากในทุกระยะของการทดลองได้มีการปั่นกวนหรือเติมอากาศตลอดเวลา จึงทำให้อนุภาคตะกอนดินละลายอยู่ในน้ำ และอาจเกิดจากเศษซากของผักตบชวาที่ร่วงหล่นในน้ำที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บริเวณรากของผักตบชวาและในน้ำช่วยทำการย่อยสลายเศษซากต่างๆ ด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุธินี วดีศิริศักดิ์ (2550) ได้ศึกษาการปลูกพืชไร้ดินในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากเศษซากต่างๆ ที่เกิดจากการหลุดร่วงของผักตบชวาที่เหี่ยวเฉา อีกทั้งในการทดลองได้มีการใส่สารละลายธาตุอาหารลงไปก่อนการปลูกผักตบชวา จึงอาจทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้นได้ และอาจทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.5 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ

| ชุดการทดลอง | | ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ระยะเวลาการทดลอง (วัน) | | | |
| | | 30 | 60 | 90 | 120 |
| ชุดควบคุม 1 | | 36.71±2.16 | 52.08±2.56 | 72.85±2.57 | 93.67±4.04 |
| ชุดควบคุม 2 | | 64.33±4.04 | 91.33±1.53 | 111.67±±3.78 | 163.67±3.21 |
| ชุดควบคุม 3 | | 80.35±2.54 | 71.73±2.05 | 101.00±1.00 | 141.00±2.64 |
| ชุดควบคุม 4 | พีเอช 4 | 10.96±0.84 | 32.79±2.68 | 113.42±3.01 | 141.94±2.37 |
| | พีเอช 5 | 62.19±2.12 | 183.28±3.82 | 232.28±2.44 | 263.25±2.89 |
| | พีเอช 7 | 90.48±0.66 | 101.35±1.23 | 142.46±2.64 | 171.89±3.25 |
| | พีเอช 9 | 103.85±3.63 | 131.41±1.51 | 201.87±1.65 | 241.47±1.54 |
| อีดีทีเอ | พีเอช 4 | 20.83±1.04 | 102.67±3.05 | 170.00±2.00 | 193.72±4.12 |
| | พีเอช 5 | 43.00±2.64 | 72.81±2.56 | 110.61±2.15 | 150.33±4.50 |
| | พีเอช 7 | 31.00±1.00 | 68.33±1.53 | 131.00±4.58 | 141.00±1.73 |
| | พีเอช 9 | 141.74±2.19 | 161.67±2.08 | 184.00±3.60 | 201.95±1.77 |
| ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 123.17±2.02 | 171.00±1.00 | 203.00±3.00 | 263.20±3.02 |
| | พีเอช 5 | 100.33±1.53 | 255.31±4.19 | 292.33±3.21 | 310.03±1.26 |
| | พีเอช 7 | 92.25±2.04 | 109.08±0.87 | 170.50±2.78 | 180.60±1.22 |
| | พีเอช 9 | 153.00±3.60 | 184.29±3.12 | 215.00±2.64 | 244.33±4.51 |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 32.08±2.60 | 42.00±2.00 | 92.00±3.60 | 121.63±1.18 |
| | พีเอช 5 | 11.33±1.53 | 101.00±1.00 | 155.27±5.09 | 310.23±0.71 |
| | พีเอช 7 | 41.00±1.73 | 81.73±1.55 | 131.53±1.79 | 171.53±1.50 |
| | พีเอช 9 | 40.67±1.15 | 91.83±1.15 | 142.00±1.20 | 181.13±1.20 |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 4 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9

**4.2 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีในดินตะกอนท้องน้ำ**

4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้นของดินตะกอนท้องน้ำทดลอง

จากการทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างดินตะกอนท้องน้ำที่ความลึก 0-30 เซนติเมตร โดยผลการศึกษาค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่นรีดักชั่น ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ของดินตะกอนท้องดินตะกอนท้องน้ำก่อนทดลอง (ดังตารางที่ 4.6) โดยมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดเมื่อเริ่มทดลอง เท่ากับ 79.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้นของดินตะกอนท้องน้ำทดลอง

| คุณสมบัติของดินตะกอนท้องน้ำ | ค่าที่วัดได้ | หน่วย |
|---|---|---|
| ค่าพีเอช (pH) | 7.50 | |
| ค่าการนำไฟฟ้า (EC) | 270.18 | ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร |
| ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่นรีดักชั่น (ORP) | 54.15 | มิลลิโวลต์ |
| อินทรียวัตถุ (OM) | 2.56 | เปอร์เซนต์ |
| ปริมาณไนโตรเจน (N) | 0.13 | เปอร์เซนต์ |
| ปริมาณฟอสฟอรัส (P) | 8.33 | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม |
| ปริมาณโพแทสเซียม (K) | 56 | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม |
| ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) | 7.4 | มิลลิอิควิวาเล็นต่อดิน 100 กรัม |
| ลักษณะเนื้อดิน (Soil texture) | ดินร่วน | |
| ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cd) | 79.17 | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม |

4.2.2 ค่าพีเอช (pH)

จากการศึกษาค่าพีเอชในดิน พบว่า ค่าพีเอชของดินอยู่ในช่วง 4.13 ถึง 9.45 ซึ่งหากพิจารณาในแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ค่าพีเอชไม่มีการเปลี่ยนแปลงจาก 30 วันแรกที่ได้มีการปรับพีเอช ทั้งนี้เนื่องมาจากได้มีการปรับพีเอชทุก 7 วัน โดยผลการทดลองยังพบว่า ค่าพีเอชในดินของชุดควบคุม ชุดควบคุมอีดีทีเอ และชุดควบคุมดีทีพีเอ มีค่ามากกว่าชุดควบคุมที่ไม่เติมสารคีเลตที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน (ดังตารางที่ 4.7) ซึ่งชุดควบคุมอีดีทีเอ มีค่าเท่ากับ 6.43, 6.55,

6.54 และ 6.85 ตามลำดับ ชุดควบคุมดีทีพีเอมีค่าเท่ากับ 7.32, 7.48, 7.54 และ 7.61 ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่าพีเอชในดินของชุดทดลอง อีดีทีเอ ชุดทดลองดีทีพีเอและชุดทดลองอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ พบว่า ค่าพีเอชไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า ชุดควบคุมที่มีการเติมสารคีเลตมีค่าพีเอชในดินน้อยกว่าชุดควบคุมที่ไม่เติมสารคีเลต อาจเป็นเพราะว่าการเติมสารคีเลตลงไปทำให้ดินมีสภาพเป็นกรดมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าพีเอชน้อยกว่าชุดควบคุมเล็กน้อย และเมื่อระยะเวลาการทดลองที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการปั่นกวนของตะกอนดิน ซึ่งเป็นการเติมอากาศที่อาจส่งผลให้เกิดปริมาณคาร์บอเนตในดิน จึงทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Yannai และคณะ (2006) ได้ศึกษาลักษณะของดินที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียม โดยใช้ *T.caerulescens* ผลการศึกษา พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับมากที่สุด คือ ค่าพีเอชและโดยค่าพีเอชที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 5-6 โดยทั่วไปแล้วการละลายได้ของสารแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในดิน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อดินมีค่าความเป็นกรดจัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.7 ค่าพีเอชในดิน

| ชุดการทดลอง | | ระยะเวลาการทดลอง (วัน) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 | 60 | 90 | 120 |
| ชุดควบคุม 1 | | 7.32±0.05 | 7.48±0.11 | 7.54±0.55 | 7.61±0.21 |
| ชุดควบคุม 2 | | 6.43±0.15 | 6.55±0.03 | 6.54±0.05 | 6.85±0.03 |
| ชุดควบคุม 3 | | 6.38±0.15 | 6.61±0.23 | 6.58±0.03 | 6.65±0.06 |
| ชุดควบคุม 4 | พีเอช 4 | 4.35±0.11 | 4.34±0.06 | 4.46±0.05 | 4.68±0.05 |
| | พีเอช 5 | 5.27±0.05 | 5.34±0.04 | 5.64±0.04 | 5.75±0.04 |
| | พีเอช 7 | 7.21±0.02 | 7.43±0.02 | 7.58±0.07 | 7.71±0.04 |
| | พีเอช 9 | 9.29±0.07 | 9.32±0.01 | 9.31±0.17 | 9.42±0.09 |
| อีดีทีเอ | พีเอช 4 | 4.26±0.02 | 4.58±0.09 | 4.42±0.02 | 4.74±0.05 |
| | พีเอช 5 | 5.16±0.02 | 5.35±0.04 | 5.53±0.03 | 5.61±0.03 |
| | พีเอช 7 | 7.17±0.03 | 7.21±0.05 | 7.39±0.08 | 7.47±0.05 |
| | พีเอช 9 | 9.25±0.04 | 9.33±0.03 | 9.45±0.04 | 9.42±0.05 |
| ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 4.18±0.09 | 4.34±0.11 | 4.44±0.17 | 4.70±0.09 |
| | พีเอช 5 | 5.32±0.05 | 5.52±0.29 | 5.56±0.12 | 5.60±0.20 |
| | พีเอช 7 | 7.19±0.06 | 7.36±0.10 | 7.25±0.05 | 7.42±0.10 |
| | พีเอช 9 | 9.13±0.15 | 9.15±0.03 | 9.19±0.06 | 9.43±0.12 |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 4.13±0.12 | 4.20±0.01 | 4.50±0.06 | 4.69±0.16 |
| | พีเอช 5 | 5.43±0.39 | 5.31±0.09 | 5.55±0.20 | 5.63±0.11 |
| | พีเอช 7 | 7.07±0.11 | 7.45±0.04 | 7.18±0.06 | 7.30±0.13 |
| | พีเอช 9 | 9.19±0.07 | 9.12±0.10 | 9.21±0.15 | 9.44±0.05 |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 4 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9

4.2.3 ค่าการนำไฟฟ้า (EC)

งานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าในดิน เพื่อทราบถึงคุณสมบัติของดิน ในแต่ละระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30, 60, 90 และ 120 วัน และพบว่า การทดลองชุดควบคุม อีดีทีเอ และชุดควบคุมดีทีพีเอ มีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่าชุดการทดลองตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยชุดควบคุมอีดีทีเอ มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 357.62, 318.02, 363.86 และ 375.22 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับของค่าพีเอช สำหรับชุดควบคุมดีทีพีเอมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 350.55, 386.74, 432.31 และ 401.88 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับของค่าพีเอช ในส่วนของชุดการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอที่พีเอช 4 มีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุด เท่ากับ 447.14, 503.24, 536.92 และ 575.95 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับของค่าพีเอช รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอที่พีเอช 5, 7 และ 9 สำหรับชุดการทดลองที่เติมสารดีทีพีเอที่พีเอช 4 มีค่าเท่ากับ 427.83, 439.17, 469.01 และ 491.09 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับรองลงมาคือ ชุดการทดลอง ที่เติมดีทีพีเอพีเอช 5, 9 และ 7 ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอมีค่าการนำไฟฟ้าน้อยที่สุด โดยที่พีเอช 4 มีค่าเท่ากับ 406.22, 387.33, 425.35 และ 449.87 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.8) ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า เมื่อมีการเติมสารคีเลตลงไปและการปรับพีเอชตลอดระยะเวลาของการทดลองอาจส่งผลต่อการเพิ่มประจุให้กับดิน ทำให้ปริมาณค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าชุดควบคุมได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.8 ค่าการนำไฟฟ้าในดิน

| ชุดการทดลอง | | ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ระยะเวลาการทดลอง (วัน) | | | |
| | | 30 | 60 | 90 | 120 |
| ชุดควบคุม 1 | | 390.18±1.06 | 280.81±1.16 | 300.19±1.67 | 309.53±2.43 |
| ชุดควบคุม 2 | | 357.62±3.01 | 318.02±2.14 | 363.86±1.65 | 375.22±3.47 |
| ชุดควบคุม 3 | | 350.55±0.98 | 386.74±1.55 | 432.31±1.75 | 401.88±2.86 |
| ชุดควบคุม 4 | พีเอช 4 | 497.17±1.77 | 498.91±2.09 | 507.98±3.09 | 519.83±2.94 |
| | พีเอช 5 | 361.14±2.67 | 369.42±2.97 | 405.21±3.27 | 426.27±3.55 |
| | พีเอช 7 | 390.37±1.05 | 334.29±4.86 | 342.09±1.69 | 359.23±3.39 |
| | พีเอช 9 | 304.13±1.81 | 313.52±0.20 | 319.27±3.47 | 330.27±2.53 |
| อีดีทีเอ | พีเอช 4 | 447.14±0.99 | 503.24±1.73 | 536.92±2.81 | 575.95±2.84 |
| | พีเอช 5 | 428.35±0.56 | 435.01±0.67 | 472.54±2.49 | 483.76±3.21 |
| | พีเอช 7 | 345.82±2.35 | 327.78±3.80 | 352.47±2.72 | 370.22±2.02 |
| | พีเอช 9 | 467.04±3.42 | 382.89±3.08 | 421.18±1.62 | 479.26±0.83 |
| ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 427.83±2.01 | 439.17±0.98 | 469.01±3.76 | 491.09±3.52 |
| | พีเอช 5 | 374.20±1.78 | 372.23±2.61 | 400.74±4.73 | 382.67±4.15 |
| | พีเอช 7 | 350.49±1.91 | 352.67±3.06 | 371.38±3.70 | 391.38±1.78 |
| | พีเอช 9 | 375.01±2.64 | 360.53±1.53 | 378.76±1.84 | 398.53±2.95 |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 406.22±3.61 | 387.33±2.36 | 425.35±2.04 | 449.87±0.57 |
| | พีเอช 5 | 390.60±3.22 | 406.63±3.29 | 433.54±2.09 | 451.84±1.78 |
| | พีเอช 7 | 341.46±3.51 | 326.50±3.08 | 379.23±1.81 | 380.44±0.57 |
| | พีเอช 9 | 372.42±2.53 | 311.69±3.14 | 350.13±2.78 | 378.20±1.93 |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 4 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9

4.2.4 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP)

ผลการวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในดิน เมื่อทำการตรวจวัดตลอดระยะเวลาการทดลองที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน พบว่า ชุดการทดลองต่างๆ มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นมากกว่าการทดลองในชุดควบคุมอีดีทีเอ และชุดควบคุมดีทีพีเอ โดยชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอที่พีเอช 4 มีค่ามากที่สุดที่เวลา 90 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 130.90 มิลลิโวลต์ รองลงมาคือ พีเอช 5,7และ9 มีค่ามากที่สุดที่ 120 วัน เท่ากับ 123.47, 102.77 และ 98.73 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ สำหรับในชุดการทดลองดีทีพีเอ ที่พีเอช 4 มีค่ามากที่สุดที่ 120 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 100.07 มิลลิโวลต์ รองลงมา คือ พีเอช 5, 7 และ 9 โดยมีค่าเท่ากับ 94.70, 92.13 และ 85.83 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่มีการเติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นที่พีเอช 5 เท่ากับ 91.50 มิลลิโวลต์พีเอช 4, 9 และ 7 มีค่าเท่ากับ 87.47, 91.10 และ 81.93 มิลลิโวลต์ตามลำดับ ของค่าพีเอช ที่ระยะเวลา 120 วัน ดังแสดงให้เห็นได้ว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นของแต่ละชุดการทดลองจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากว่ามีปริมาณการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินค่อนข้างน้อย ทำให้มีการสร้างอิเล็คตอนในดินต่ำ เพิ่มขึ้น (ดังตารางที่ 4.9) ซึ่งสอคล้องกับงานวิจัยของ Wiwatwongwana (2003) ที่ทดลองและพบว่า การสลายตัวของอินทรียวัตถุในดินมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น ในการสร้างอิเล็คตรอนและออกซิเจนในดิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.9 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในดิน

| ชุดการทดลอง | | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (มิลลิโวลต์) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ระยะเวลาการทดลอง (วัน) | | | |
| | | 30 | 60 | 90 | 120 |
| ชุดควบคุม 1 | | 88.47±2.57 | 71.40±0.70 | 89.67±1.53 | 74.90±1.10 |
| ชุดควบคุม 2 | | 83.03±1.90 | 78.83±0.74 | 85.47±0.55 | 83.33±2.43 |
| ชุดควบคุม 3 | | 86.90±1.30 | 75.93±0.76 | 90.17±1.01 | 80.50±0.70 |
| ชุดควบคุม 4 | พีเอช 4 | 95.63±2.34 | 100.80±0.40 | 102.17±0.32 | 106.43±3.80 |
| | พีเอช 5 | 99.57±0.42 | 96.43±0.77 | 108.20±1.60 | 99.90±1.42 |
| | พีเอช 7 | 91.10±2.02 | 85.17±1.72 | 94.73±0.65 | 87.57±1.65 |
| | พีเอช 9 | 85.13±1.01 | 72.67±0.38 | 85.47±0.47 | 76.53±0.98 |
| อีดีทีเอ | พีเอช 4 | 124.77±4.58 | 104.07±1.36 | 130.90±0.43 | 126.57±2.10 |
| | พีเอช 5 | 114.57±2.81 | 102.10±1.05 | 120.27±1.10 | 123.47±2.48 |
| | พีเอช 7 | 102.17±0.25 | 87.20±1.06 | 105.17±0.93 | 102.77±0.58 |
| | พีเอช 9 | 94.43±1.58 | 85.43±1.59 | 95.80±0.70 | 98.73±1.82 |
| ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 86.40±2.78 | 92.70±0.70 | 88.63±1.07 | 100.07±1.70 |
| | พีเอช 5 | 81.00±1.10 | 90.87±0.76 | 84.30±1.04 | 94.70±1.44 |
| | พีเอช 7 | 83.60±0.43 | 91.13±1.20 | 87.63±0.89 | 92.13±0.95 |
| | พีเอช 9 | 83.13±1.85 | 83.27±0.66 | 83.60±2.69 | 85.83±2.08 |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 93.00±1.99 | 80.53±0.66 | 96.27±1.03 | 87.47±1.62 |
| | พีเอช 5 | 90.83±0.55 | 86.67±0.87 | 93.20±1.05 | 91.50±0.46 |
| | พีเอช 7 | 85.03±1.33 | 78.63±1.49 | 87.10±0.92 | 81.93±1.86 |
| | พีเอช 9 | 86.03±0.78 | 85.07±0.78 | 82.83±0.38 | 91.10±1.91 |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 4 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9

**4.3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำ**

ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำ พบว่า ในชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทุกช่วงระยะเวลาของการทดลอง โดยชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอที่ระดับพีเอช 4 มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเหลือน้อยที่สุด เท่ากับ 0.03, <0.01, <0.01 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับของระยะทุกระยะเวลาการทดลอง รองลงมา คือ ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอที่ระดับพีเอช 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ส่วนในชุดการทดลองที่เติมสารดีทีพีเอ พบว่า มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทุกช่วงระยะเวลาของการทดลองจนถึงระยะเวลาที่ 90 วัน โดยชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอที่ระดับพีเอช 4 มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเหลือน้อยที่สุด เท่ากับ 0.04, <0.01, 0.03 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับของระยะทุกระยะเวลาการทดลอง รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสารดีทีพีเอที่ระดับพีเอช 5, 7 และ 9 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับชุดควบคุม สำหรับชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอพบว่า มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทุกช่วงระยะเวลาของการทดลอง ที่พีเอช 5 มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเหลือน้อยที่สุด เท่ากับ 0.03, 0.02, <0.01 และ <0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดังตารางที่ 4.10) จะเห็นได้ว่าปริมาณแคดเมียมในน้ำเหลือน้อยในทุกชุดการทดลอง เนื่องมาจากก่อนทำการเก็บตัวอย่างน้ำได้มีการหยุดใช้ใบพัดหมุนเวียนในระบบ อาจส่งผลให้แคดเมียมที่อยู่ในน้ำซึ่งฟุ้งกระจายจากดินตะกอนที่ปั่นกวนได้ตกตะกอนลงไปอยู่ด้านล่าง จึงส่งผลต่อปริมาณแคดเมียมในน้ำน้อยลง นอกจากนี้แสดงให้เห็นว่าผลจาสารอีดีทีเอและดีทีพีเอที่ใส่ลงไปร่วมกับการปรับพีเอชนั้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของผักตบชวาในการดูดดึงแคดเมียมได้ดี จึงทำให้ปริมาณแคดเมียมในน้ำลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mishra และTripathi (2009) ที่ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากกิจกรรมต่างๆ ของเหมืองถ่านหินด้วยพืช 3 ชนิด คือ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) แหนเล็ก (*Lemna minor*) และแหนเป็ดใหญ่ (*Spirodela polyrhiza*) โดยผลการศึกษาพบว่า ในน้ำทิ้งมีปริมาณการสะสมโครเมียม แคดเมียม ทองแดง เหล็ก สังกะสี และนิเกิล เท่ากับ 1.3, 0.09, 0.15, 4.8, 7.1และ 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มการสะสมโลหะหนักลดลงเมื่อระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.10 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำ

| ชุดการทดลอง | | ปริมาณแคดเมียมในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ระยะเวลาการทดลอง (วัน) | | | |
| | | 30 | 60 | 90 | 120 |
| ชุดควบคุม 1 | | 0.06±0.01 | 0.05±0.00 | 0.05±0.01 | 0.03±0.02 |
| ชุดควบคุม 2 | | 0.04±0.02 | 0.03±0.01 | 0.04±0.01 | 0.02±0.01 |
| ชุดควบคุม 3 | | 0.05±0.01 | 0.06±0.01 | 0.04±0.01 | 0.04±0.01 |
| ชุดควบคุม 4 | พีเอช 4 | <0.01±0.00 | <0.01±0.00 | 0.06±0.02 | 0.05±0.01 |
| | พีเอช 5 | <0.01±0.00 | <0.01±0.00 | 0.06±0.01 | 0.02±0.02 |
| | พีเอช 7 | <0.01±0.00 | <0.01±0.00 | 0.05±0.01 | <0.01±0.00 |
| | พีเอช 9 | <0.01±0.00 | <0.01±0.00 | 0.05±0.03 | 0.02±0.01 |
| อีดีทีเอ | พีเอช 4 | 0.03±0.01 | <0.01±0.00 | <0.01±0.00 | 0.02±0.01 |
| | พีเอช 5 | 0.02±0.01 | 0.02±0.02 | <0.01±0.00 | <0.01±0.00 |
| | พีเอช 7 | 0.02±0.02 | <0.01±0.00 | <0.01±0.00 | 0.03±0.01 |
| | พีเอช 9 | 0.03±0.02 | <0.01±0.00 | <0.01±0.00 | 0.04±0.01 |
| ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 0.04±0.02 | <0.01±0.00 | 0.03±0.02 | 0.03±0.02 |
| | พีเอช 5 | 0.02±0.02 | 0.02±0.01 | 0.02±0.02 | 0.05±0.02 |
| | พีเอช 7 | 0.05±0.02 | 0.02±0.01 | 0.03±0.02 | 0.02±0.01 |
| | พีเอช 9 | 0.06±0.02 | 0.02±0.01 | 0.02±0.02 | 0.03±0.01 |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 0.04±0.01 | <0.01±0.00 | 0.02±0.01 | 0.03±0.01 |
| | พีเอช 5 | 0.03±0.01 | 0.02±0.01 | <0.01±0.00 | <0.01±0.00 |
| | พีเอช 7 | 0.04±0.02 | <0.01±0.00 | <0.01±0.00 | 0.03±0.01 |
| | พีเอช 9 | 0.05±0.01 | 0.01±0.00 | 0.03±0.02 | 0.02±0.00 |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 4 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9

**4.4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน**

จากผลการศึกษา พบว่า ชุดการทดลองที่พีเอช (ชุดควบคุม) มีแนวโน้มของการสะสมแคดเมียมในดินลดลงทุกช่วงระยะเวลาของการทดลอง โดยที่ระดับพีเอช 5 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมน้อยที่สุด เท่ากับ 56.87, 58.67, 53.00 และ 52.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของทุกระยะเวลาในการทดลอง และมีค่าน้อยที่สุดที่ 120 วัน ส่วนที่ระดับพีเอช 4, 7 และ 9 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินเท่ากับ 54.20, 53.37 และ 56.55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินในแต่ละระยะเวลาของการทดลองที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 ไม่มีแนวโน้มลดลง แต่ที่พีเอช 5 มีแนวโน้มลดลงที่ 30 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 44.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนพีเอช 4, 7 และ 9 มีค่าเท่ากับ 53.43, 52.10 และ 58.80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดควบคุม ทั้งนี้ในชุดควบคุมและชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอมีแนวโน้มลดลงในทุกช่วงระยะเวลาการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากการดูดดึงปริมาณแคดเมียมไปไว้ในส่วนราก และลำต้นของผักตบชวา ในชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 ไม่มีแนวโน้มลดลงและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดควบคุม ซึ่งปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินจะลดลงที่ระยะเวลา 30 วันแรกของการทดลองเท่านั้นโดยที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 มีค่าเท่ากับ 50.67, 53.47, 54.07 และ 54.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 มีแนวโน้มลดลงทุกช่วงระยะเวลาในการทดลอง โดยที่ระดับพีเอช 5 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมน้อยที่สุดของทุกระยะเวลาการทดลอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 51.2, 47.7, 46.1 และ 51.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลองที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน มีค่าน้อยที่สุดที่ 90 วัน และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดควบคุม (ดังตารางที่ 4.11) เนื่องจากว่าการเติมสารคีเลตและการปรับพีเอชมีผลต่อการละลายได้ของแคดเมียมในดินตะกอนท้องน้ำ และพีเอชที่เป็นกรดอ่อนอาจทำให้ส่วนที่ไม่ละลายได้ของแคดเมียมที่อยู่ในดินตะกอนนั้นละลายได้ จึงทำให้ผักตบชวาดูดดึงแคดเมียมไอออนไปใช้และไปสะสมในส่วนต่างๆ ของผักตบชวาได้ ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในดินตะกอนท้องน้ำลดลงมากกว่าชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ยศวนันท์ หงศ์พิริยกุล และพันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2553) ได้ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้บอนเขียว พบว่า ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนสารตะกั่วร่วมกับการเติมสารอีดีทีเอ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีการสะสมตะกั่วทั้งหมดในดินลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใส่สารอีดีทีเอสามารถช่วยทำให้พืชเจริญเติบโตและดูดดึงตะกั่วมาไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.11 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน

| ชุดการทดลอง | | ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ระยะเวลาการทดลอง (วัน) | | | |
| | | 30 | 60 | 90 | 120 |
| ชุดควบคุม 1 | | 70.47±1.55 | 68.10±2.36 | 69.40±1.65 | 63.80±2.94 |
| ชุดควบคุม 2 | | 68.67±2.35 | 66.53±4.33 | 65.53±3.77 | 62.13±4.04 |
| ชุดควบคุม 3 | | 68.80±1.55 | 62.10±1.64 | 60.43±0.06 | 61.17±0.80 |
| ชุดควบคุม 4 | พีเอช 4 | 54.63±0.77 | 63.13±5.00 | 53.80±3.30 | 54.20±1.65 |
| | พีเอช 5 | 56.87±1.01 | 58.67±1.36 | 53.00±0.30 | 52.23±0.21 |
| | พีเอช 7 | 60.03±0.60 | 60.60±2.83 | 53.10±0.78 | 53.37±0.65 |
| | พีเอช 9 | 61.07±0.70 | 62.10±1.55 | 53.57±1.45 | 56.55±3.25 |
| อีดีทีเอ | พีเอช 4 | 52.70±0.72 | 56.60±5.16 | 54.80±4.43 | 51.70±3.66 |
| | พีเอช 5 | 47.33±1.11 | 55.83±1.27 | 62.80±0.61 | 63.30±3.77 |
| | พีเอช 7 | 52.67±0.32 | 62.63±0.61 | 64.57±1.12 | 64.83±2.54 |
| | พีเอช 9 | 54.17±5.70 | 56.65±2.98 | 63.33±1.16 | 59.47±0.51 |
| ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 50.67±0.66 | 59.00±0.36 | 59.03±0.68 | 59.87±0.21 |
| | พีเอช 5 | 53.47±3.87 | 59.60±1.56 | 62.83±1.05 | 55.13±1.87 |
| | พีเอช 7 | 54.07±0.94 | 61.23±0.91 | 60.07±0.75 | 58.70±0.70 |
| | พีเอช 9 | 54.43±1.81 | 59.23±2.89 | 55.67±0.80 | 59.97±0.85 |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 53.43±0.35 | 53.57±1.22 | 49.77±0.30 | 55.83±1.85 |
| | พีเอช 5 | 51.20±0.62 | 47.70±0.52 | 46.10±2.78 | 51.00±0.56 |
| | พีเอช 7 | 52.10±2.09 | 51.17±0.40 | 61.47±5.14 | 54.93±0.58 |
| | พีเอช 9 | 58.80±4.88 | 56.47±1.26 | 50.23±0.15 | 53.03±060 |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 4 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9

**4.5 ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน**

ภายหลังจากการเก็บตัวอย่างผักตบชวา และนำดินตะกอนมาวิเคราะห์แคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน (Bioavailable) จากผลการศึกษาชุดการทดลองเมื่อเติมอีดีทีเอ ดีทีพีเอ และอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 (ดังตารางที่ 4.12) พบว่า ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ที่เหลืออยู่ในดิน มีค่ามากที่สุดในชุดการทดลองอีดีทีเอ ร่วมกับดีทีพีเอที่พีเอช 5 มีค่าเท่ากับ 11.38 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีค่ามากกว่าชุดควบคุมที่ไม่เติมสารคีเลต และชุดควบคุมที่เติมสารคีเลต โดยมีค่ามากที่สุดที่ 90 วัน รองลงมา คือ พีเอช 4, 7 และ 9 เท่ากับ 9.51, 9.27 และ 8.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอที่พีเอช 5 มีค่าเท่ากับ 8.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่เวลา 60 วัน รองลงมา คือ พีเอช 7, 9และ 4 มีค่าเท่ากับ 8.13, 7.99 และ 7.41 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลา 30 วัน ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอ มีปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ที่เหลืออยู่มีค่าน้อยที่สุด ที่พีเอช 4 เท่ากับ 7.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่เวลา 30 วัน รองลงมา คือ พีเอช 5, 9และ 7 มีค่าเท่ากับ 7.84, 7.37 และ 7.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลา 30 วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในชุดการทดลองอีดีทีเอ ดีทีพีเอ และอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอที่พีเอช 4 และพีเอช 5 ส่งผลให้แคดเมียมอยู่ในสภาพที่ละลายได้ซึ่งอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดินสูงกว่าชุดควบคุม ดังนั้นการเติมสารคีเลตและปรับพีเอชสามารถเปลี่ยนแปลงรูปของสารละลายแคดเมียมไอออนให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงไปใช้ได้มากขึ้น ซึ่งต่างกับชุดควบคุมที่เปลี่ยนแคดเมียมไปอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนหรือตกตะกอน ทำให้พืชไม่สามารถดูดดึงไปใช้ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Adriano (2001) ได้ทำการวิเคราะห์แคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดินจะละลายได้ดีเมื่ออยู่ในกรดอ่อน โดยพืชมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักในดินได้ดี และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชดูดดึงได้จะมีค่าลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า สภาพแวดล้อม สารอาหารในดิน ระยะเวลาการปลูกพืช อาจมีผลต่อความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในพืชด้วย (Xian และMckenzie, 1989)

ตารางที่ 4.12 ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน

| ชุดการทดลอง | | ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ระยะเวลาการทดลอง (วัน) | | | |
| | | 30 | 60 | 90 | 120 |
| ชุดควบคุม 1 | | 3.36±0.42 | 4.03±0.11 | 5.05±0.45 | 5.75±0.08 |
| ชุดควบคุม 2 | | 5.31±0.15 | 4.70±0.19 | 3.55±0.08 | 3.06±0.18 |
| ชุดควบคุม 3 | | 6.07±0.25 | 5.65±0.34 | 4.99±1.09 | 4.41±0.37 |
| ชุดควบคุม 4 | พีเอช 4 | 5.12±0.19 | 6.43±0.18 | 6.13±0.42 | 5.51±0.39 |
| | พีเอช 5 | 7.08±0.91 | 6.84±0.22 | 8.49±0.12 | 5.06±0.25 |
| | พีเอช 7 | 4.62±1.32 | 5.92±0.02 | 6.00±0.38 | 4.80±0.23 |
| | พีเอช 9 | 4.50±1.98 | 4.67±0.08 | 5.54±0.15 | 4.97±0.46 |
| อีดีทีเอ | พีเอช 4 | 7.99±0.14 | 6.98±0.42 | 4.94±0.81 | 5.32±0.32 |
| | พีเอช 5 | 8.20±0.45 | 8.53±0.07 | 6.70±0.55 | 5.80±0.74 |
| | พีเอช 7 | 8.13±0.01 | 7.45±0.12 | 5.92±0.09 | 4.72±0.02 |
| | พีเอช 9 | 7.41±0.04 | 7.10±0.17 | 5.47±0.18 | 7.81±1.40 |
| ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 7.97±0.78 | 9.03±0.16 | 6.13±0.26 | 5.39±0.09 |
| | พีเอช 5 | 7.84±0.19 | 7.75±0.42 | 5.88±0.44 | 4.55±0.39 |
| | พีเอช 7 | 7.27±0.25 | 6.48±0.93 | 5.00±0.21 | 4.83±0.32 |
| | พีเอช 9 | 7.37±0.10 | 6.58±0.19 | 5.36±0.51 | 4.45±0.54 |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 7.04±0.21 | 9.72±0.92 | 9.51±0.57 | 4.46±0.46 |
| | พีเอช 5 | 7.80±0.58 | 10.18±0.47 | 11.38±0.66 | 5.43±0.18 |
| | พีเอช 7 | 7.66±0.70 | 8.56±0.33 | 9.27±0.43 | 4.29±0.42 |
| | พีเอช 9 | 7.09±0.01 | 8.44±3.21 | 8.39±0.71 | 4.17±0.20 |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 4 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9

**4.6 ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา**

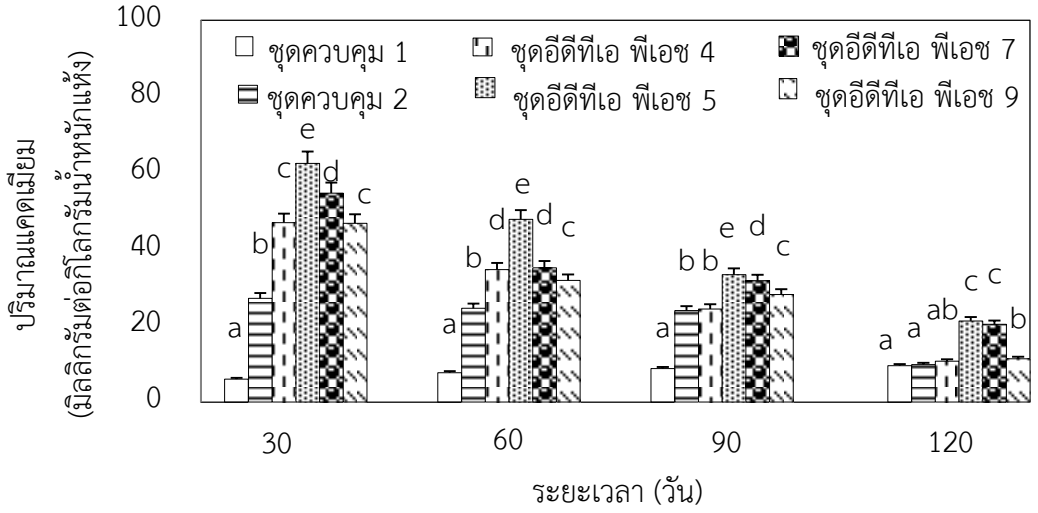
ผลของสารคีเลต คือ อีดีทีเอและดีทีพีเอภายใต้การควบคุมพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา ได้ศึกษาจากการวิเคราะห์หาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ(ลำต้น และใบ) ของผักตบชวาสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังนี้

4.3.1 ผลของอีดีทีเอและพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา

จากผลการศึกษาชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร (อ้างอิงจากกัลปพฤกษ์ ,2553) ที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 พบว่าในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวามีการสะสมแคดเมียมมากกว่าในส่วนเหนือน้ำ(ลำต้นและใบ) ในทุกช่วงระยะเวลาของการทดลองคือ 30, 60, 90 และ 120 วัน (รูปที่ 4.1) โดยชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอระดับพีเอช 5 มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมจากดินตะกอนท้องน้ำไปไว้ในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากที่สุดในทุกระยะเวลาของการทดลอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 62.53, 47.87, 33.37 และ 21.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดที่ 30 วัน ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอที่ระดับพีเอช อื่นๆ และชุดควบคุม รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอที่ระดับพีเอช 7 มีค่าเท่ากับ 54.73, 35.17, 31.77 และ 20.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง และระดับพีเอช 9 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 46.83, 31.87, 28.17 และ 11.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง ส่วนชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอระดับพีเอช 4 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) น้อยที่สุด เท่ากับ 47.00, 34.70, 24.37 และ 10.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอที่ระดับพีเอชต่างๆ มีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการแสดงความเป็นพิษจากสารแคดเมียมตั้งแต่เริ่มการทดลองที่มีการสะสมมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการช่วยดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกัลปพฤกษ์ คงเมือง (2553) ที่ได้ศึกษาผลของอีดีทีเอและกรดซิตริกต่อการดูดดึงแคดเมียมในน้ำด้วยผักตบชวา ผลการศึกษาพบว่า ในชุดที่เติมอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีมากที่สุดที่ 15 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 635.70, 643.22 และ 645.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งตามลำดับความเข้มข้นของอีดีทีเอ และมีแนวโน้มของ

การสะสมแคดเมียมลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น จากการศึกษาในครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในพืชมีปริมาณการสะสมแคดเมียมต่ำกว่าในชุดการศึกษาของกัลปพฤกษ์ คงเมือง (2553) เนื่องจากการทดลองของกัลปพฤกษ์ คงเมือง ได้ทดลองโดยวิธีการเติมสารละลายแคดเมียม 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีผลต่อการละลายได้ของแคดเมียมในน้ำ แต่ในงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทดลองการปลูกพืชในดินตะกอนท้องน้ำที่มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินเริ่มต้นเท่ากับ 79.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ในส่วนของปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) พบว่า จากชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากกว่าชุดควบคุม (รูปที่ 4.2) และมีแนวโน้มลดลงของทุกช่วงเวลาการทดลอง ได้แก่ 30, 60, 90 และ 120 วัน โดยในชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ ระดับพีเอช5 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดที่ 30 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 10.23, 8.67, 6.50 และ 4.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดควบคุม รวมทั้งชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอที่ระดับพีเอช อื่นด้วย รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอระดับพีเอช 9 มีค่าเท่ากับ 8.30, 6.90, 6.40 และ 3.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ ระดับพีเอช 4 มีค่าเท่ากับ 7.43, 5.80, 5.00 และ 3.83 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลองส่วนชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอระดับพีเอช 7 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) น้อยที่สุด เท่ากับ 7.33, 4.70, 4.03 และ 3.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมอีดีทีเอที่ระดับพีเอชต่างๆ มีส่วนช่วยเพิ่มการดูดดึงแคดเมียมไปไว้ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Liphadzi และKirkham (2006) ที่ได้ทำการศึกษาการดูดดึงโลหะหนักจากน้ำทิ้งการเกษตรด้วยต้นทานตะวัน ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอีดีทีเอที่ระดับ 0, 0.5, 1 และ 2 กรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ต้นทานตะวันสามารถดูดดึงโลหะหนักมาสะสมในส่วนลำต้นมากขึ้น โดยที่ระดับความเข้มข้นของอีดีทีเอเท่ากับ 2 กรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ต้นทานตะวันมีความสามารถในการสะสมโลหะหนักลดลง

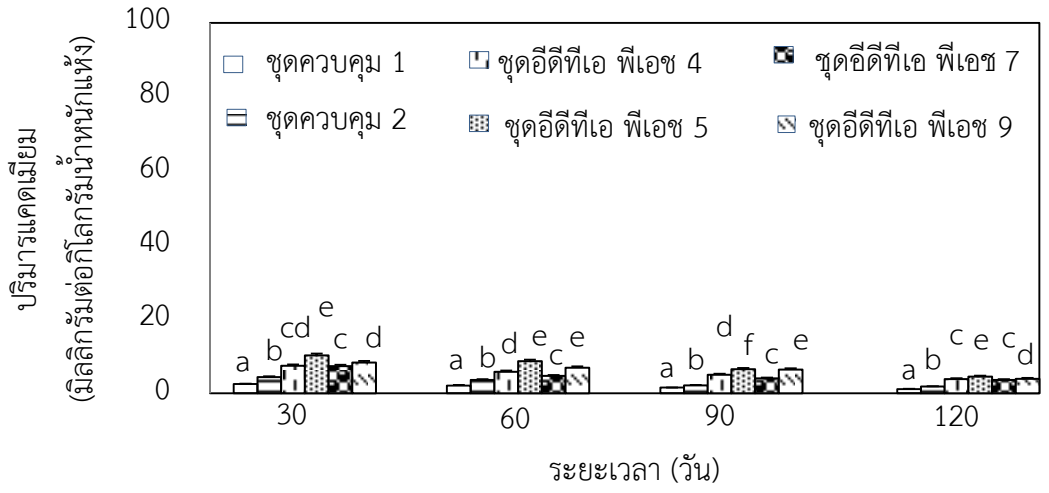



รูปที่ 4.1 ผลของอีดีทีเอ และพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (ภาคผนวก ข)




รูปที่ 4.2 ผลของอีดีทีเอและพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (ภาคผนวก ข)

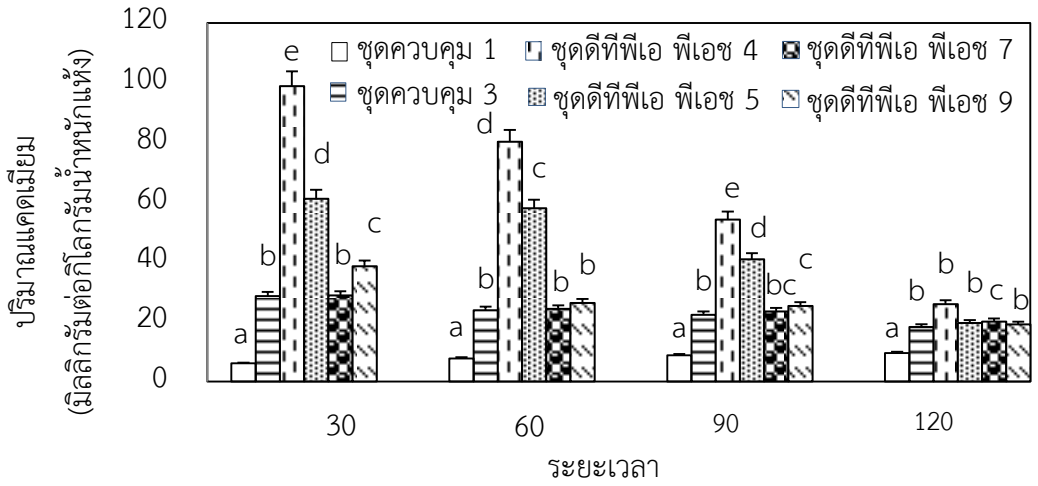
4.3.2 ผลของดีทีพีเอและพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา

ผลการศึกษาในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมมากที่สุด ในทุกช่วงระยะเวลาการทดลองคือ 30, 60, 90 และ 120วัน จากชุดการทดลองที่เติม ดีทีพีเอ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรอ้างอิงจาก Akegacha(2011) ที่ระดับพีเอช4, 5, 7 และ 9 พบว่า ชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอระดับพีเอช 4มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมในดินตะกอนท้องน้ำไปไว้ในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากที่สุดในทุกระยะเวลาของการทดลอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 98.90, 80.27, 54.20 และ 25.87มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และมีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดที่ 30 วัน (รูปที่ 4.3) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอที่ระดับพีเอช อื่น และชุดควบคุม รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอระดับพีเอช 5 มีค่าเท่ากับ 61.17, 58.00, 40.90 และ 19.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และระดับพีเอช 9 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 38.57, 26.27, 25.27 และ 19.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอ ระดับพีเอช 7 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) น้อยที่สุด เท่ากับ 28.80, 24.30, 23.43 และ 20.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น พบว่า ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอที่ระดับพีเอชต่างๆ มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพราะการเติมดีทีพีเอและพีเอชร่วมกัน อาจส่งผลให้เกิดความเป็นกรด ทำให้ผักตบชวาไม่สามารถดูดดึงแคดเมียมได้ และแสดงความเป็นพิษสอดคล้องกับงานวิจัยของ Akegacha ( 2011) ที่ทำการศึกษาผลของอีดีทีเอและดีทีพีเอต่อการดึงดูดแคดเมียมในดินปนเปื้อนด้วยผักตบชวา โดยพบว่า ชุดการทดลองที่เติมสารดีทีพีเอ และชุดที่มีการเติมสารอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 231.78 และ 157.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งที่เวลา 100 วัน ตามลำดับ รองลงมาคือ ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) 16.34 และ 23.61 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งที่เวลา 100 วัน ตามลำดับ ดังนั้น จากการศึกษาในครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในพืชมีปริมาณการสะสมแคดเมียมต่ำกว่าในชุดการศึกษาของ Akegacha ( 2011) เนื่องจากการทดลองของ Akegacha ได้ใช้ดินปนเปื้อนแคดเมียมที่มีค่าเริ่มต้นสูงกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 94.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ในงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทดลองการปลูกพืชในดินตะกอนท้องน้ำที่มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินเริ่มต้นเท่ากับ 79.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) พบว่า ชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากกว่าชุดควบคุม (รูปที่ 4.4) และมี

ปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดที่ 30 วัน โดยในชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอระดับพีเอช 4 มีค่าเท่ากับ 11.37, 12.90, 9.37และ 7.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบชุดการทดลองกับชุดควบคุม รวมทั้งชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอที่ระดับพีเอช อื่นๆ พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอระดับพีเอช 5 มีค่าเท่ากับ 10.20, 9.30, 6.80และ 4.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง ชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอระดับพีเอช 7 มีค่าเท่ากับ 8.20, 7.90, 6.77และ 5.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลองส่วนชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอระดับพีเอช 9 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) น้อยที่สุด เท่ากับ 6.60, 6.13, 4.47และ 3.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง แสดงให้เห็นได้ว่า การเติมดีทีพีเอที่ระดับพีเอชต่างๆ มีส่วนช่วยเพิ่มการดูดดึงแคดเมียมไปไว้ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับ Wongtanet และParkpain (2008) ที่ทำการศึกษาการใช้ผักแว่น เฟิร์น และใบเตย ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารตะกั่ว โดยพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม การเติมสารดีทีพีเอมีส่วนช่วยให้ผักแว่น เฟิร์น และใบเตย มีความสามารถในการช่วยดูดดึง และเคลื่อนย้ายตะกั่วไปสู่ส่วนใบได้มากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

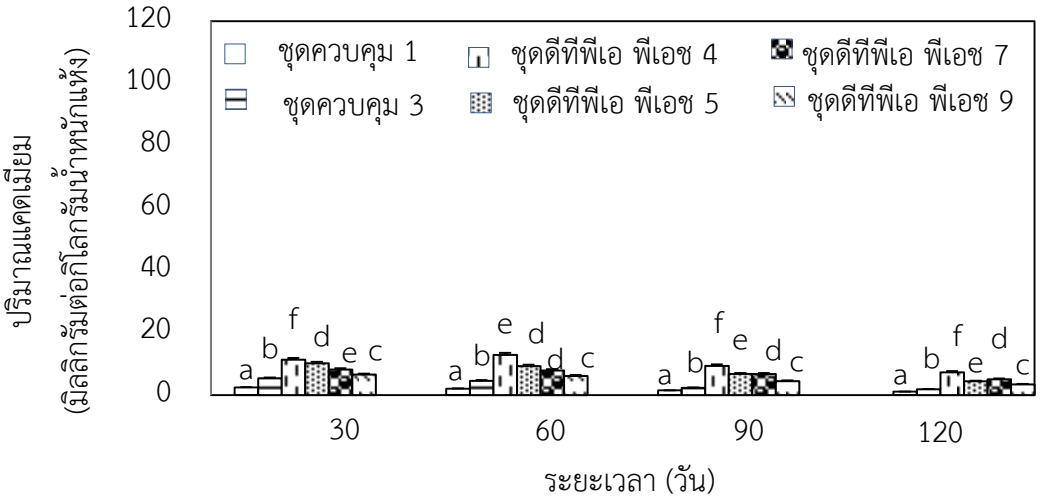



รูปที่ 4.3 ผลของดีทีพีเอ และพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (ภาคผนวก ข)




รูปที่ 4.4 ผลของดีทีพีเอและพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

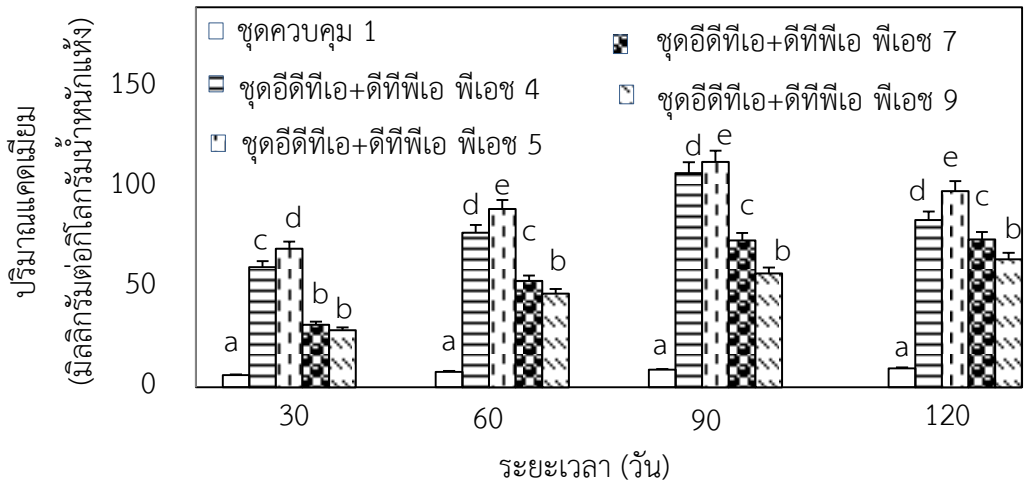
ตัวอักษรภาษาอังกฤษ แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (ภาคผนวก ข)

4.3.3 ผลของอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอและพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา

จากการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 ในช่วงระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน พบว่า ส่วนใต้น้ำ(ราก) ของผักตบชวามีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมมากกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) โดยการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของชุดที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่ระดับพีเอชต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลองจนถึงระยะเวลา 90 วัน (รูปที่ 4.5) ซึ่งชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่ระดับพีเอช 5 มีการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 69.33, 89.20, 112.73 และ 98.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอที่ระดับพีเอชอื่นๆ และชุดควบคุม รองลงมาคือ ชุดการทดลองอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่ระดับพีเอช 4 มีค่าเท่ากับ 60.10, 77.33, 107.13 และ 83.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และระดับพีเอช 7 มีปริมาณการสะสมแคดเมียม เท่ากับ 31.30, 53.23, 73.47 และ 73.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอระดับพีเอช 9 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมน้อยที่สุด เท่ากับ 28.57, 46.87, 56.97 และ 64.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ(ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่ระดับต่างๆมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงระยะเวลา 90 วัน หลังจากระยะเวลาที่ 90 วัน จะไม่มีการสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติมสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดมีผลทำให้พืชทดลองมีการสะสมแคดเมียมได้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในส่วนใต้น้ำ (ราก) ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ นัยนันท์ อริยกานนท์ (2550) ที่ได้ศึกษาผลของสารคีเลตและกรดอินทรีย์ 5 ชนิด คือ ดีทีพีเอ, อีดีดีเอส, กรดออกซาลิก,กรดซิตริก และกรดกัลลิก ในการช่วยดูดดึงทองแดง สังกะสีและนิกเกิลด้วยต้อยติ่ง (*Ruellia tuberosa* (Burm.f.) Hochr.) ผลการศึกษาพบว่า ดีทีพีเอสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมสังกะสีของต้อยติ่งได้ดีที่สุดในส่วนราก เท่ากับ 5,253 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

สำหรับปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) พบว่า ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากกว่าชุดควบคุม อย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.6) และมีแนวโน้มการสะสมที่เพิ่มมากขึ้นของทุกช่วงเวลาการทดลอง โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดควบคุม และแตกต่างกันกับชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่ระดับพีเอชอื่นๆ ด้วย โดยในชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับ

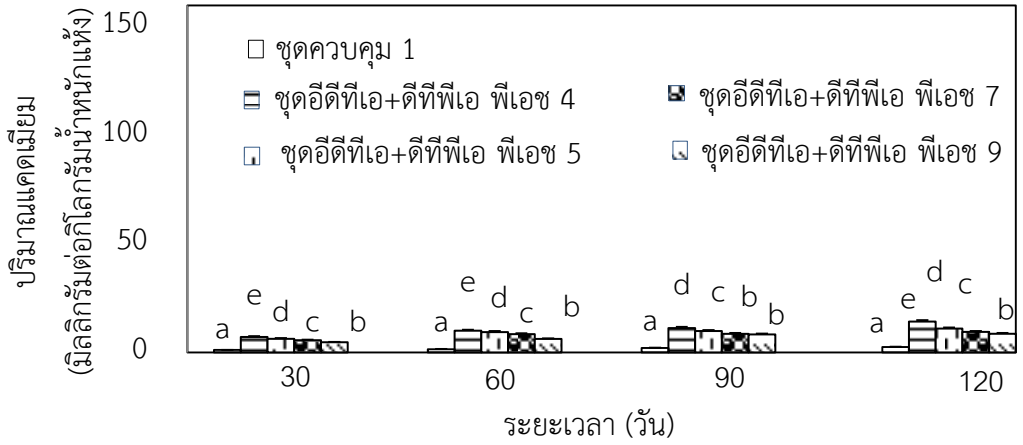
ดีทีพีเอ ที่ระดับพีเอช 4 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุด และเพิ่มขึ้นในทุกช่วงระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าเท่ากับ 7.13, 10.03, 11.23 และ 14.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่ระดับพีเอช 5 มีค่าเท่ากับ 6.27, 9.37, 9.87 และ 11.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่ระดับพีเอช 7 มีค่าเท่ากับ 5.63, 8.43, 8.57 และ 9.47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับส่วนชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอระดับพีเอช 9 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) น้อยที่สุด เท่ากับ 4.70, 6.23, 8.30 และ 8.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่ระดับพีเอช ต่างๆ มีส่วนช่วยเพิ่มการดูดดึงแคดเมียมไปไว้ในส่วนเหนือน้ำ(ลำต้น และใบ) เพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nascimento และคณะ (2006) พบว่า การเติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอจะช่วยให้ผักกาดเขียว (Indian mustard) สะสมทองแดง และตะกั่วในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินได้มากขึ้น เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่เติมสารคีเลตใดๆ




รูปที่ 4.5 ผลของอีดีทีเอ+ดีทีพีเอและพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (ภาคผนวก ข)




รูปที่ 4.6 ผลของอีดีทีเอ+ดีทีพีเอและพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

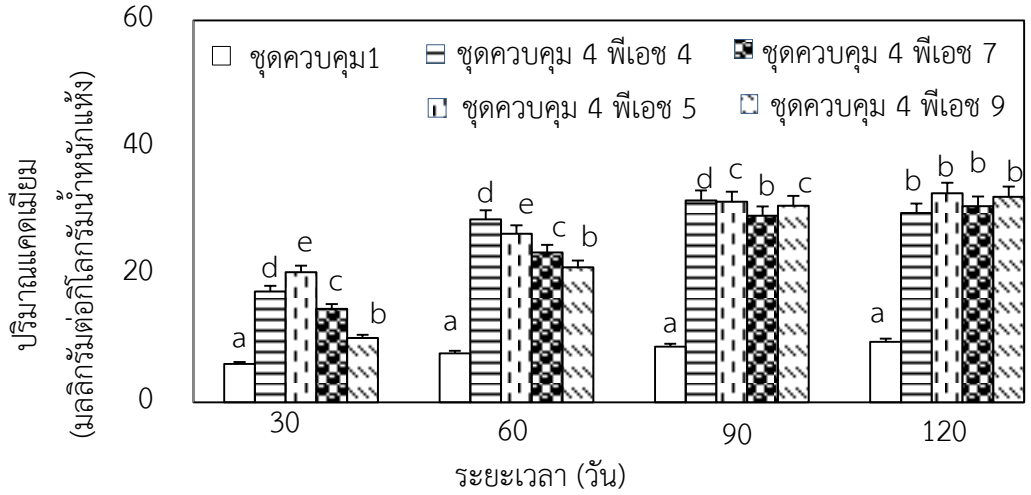
ตัวอักษรภาษาอังกฤษ แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (ภาคผนวก ข)

4.3.4 ผลของพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา

การดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ(ราก) ของชุดการทดลองที่เติมพีเอช ที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 มีมากกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของทุกช่วงระยะเวลาในการทดลองคือ 30, 60, 90 และ 120 วัน และการสะสมแคดเมียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลอง (รูปที่ 4.7) โดยชุดการทดลองที่พีเอช 5 มีการสะสมแคดเมียมมากที่สุดที่เวลา 120 วันซึ่งมีค่าเท่ากับ 20.43, 26.47, 31.15 และ 32.83 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดควบคุม และมีความแตกต่างกันกับชุดการทดลองที่ระดับของพีเอชอื่นๆ รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่พีเอช 4 มีค่าเท่ากับ 17.40, 28.73, 31.80 และ 29.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง และมีค่าสูงสุดในช่วง 90 วันแรก หลังจากนั้นปริมาณการสะสมแคดเมียมมีแนวโน้มคงที่และไม่เพิ่มขึ้น และระดับพีเอช 7 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เพิ่มขึ้นทุกช่วงเวลาการทดลอง เท่ากับ 14.67, 23.53, 29.30และ 30.80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง ส่วนชุดการทดลองที่พีเอช 9 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) น้อยที่สุด เท่ากับ 10.10, 21.20, 30.87 และ 32.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง จากผล

การทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ(ราก) ของผักตบชวามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงระยะเวลา 90 วัน หลังจากระยะเวลาที่ 90 วัน การสะสมแคดเมียมจะไม่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า การเติมสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดและปรับพีเอชที่ระดับต่างๆ มีส่วนช่วยให้เกิดการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวามีมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ David และJame (1984) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมในสารละลายด้วยผักตบชวาและปัจจัยของพีเอชในสารละลายที่ระดับพีเอช 2 ถึง 10 ผลการศึกษา พบว่า การเพิ่มพีเอชตั้งแต่ 2 ถึง 5 สามารถช่วยเพิ่มการดูดดึงแคดเมียมในสารละลายได้มาก ส่วนค่าพีเอชในสารละลายที่มากกว่าพีเอช 5 ขึ้นไป สามารถช่วยให้พืชดูดดึงได้เพียงเล็กน้อย

สำหรับปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) จากการวิจัยในครั้งนี้ พบว่า ชุดการทดลองที่มีการปรับพีเอชระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.8) โดยในชุดการทดลองพีเอช 5 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุด และเพิ่มขึ้นในทุกช่วงระยะเวลาของการทดลอง โดยมีค่าเท่ากับ 3.17, 5.13, 7.37 และ 8.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดการทดลองพีเอช ที่ระดับต่างๆ รองลงมาคือชุดการทดลองที่พีเอช 7 มีค่าเท่ากับ 2.77, 3.80, 5.43 และ 7.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลอง ส่วนชุดการทดลองที่พีเอช 4 มีค่าเท่ากับ 2.20, 3.37, 5.50 และ 6.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และพีเอช 9 เท่ากับ 2.53, 2.70, 4.57 และ 6.83 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของทุกระยะเวลาการทดลองโดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ(ลำต้น และใบ) น้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาของการทดลองมากขึ้น ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน และยังพบว่า เมื่อพีเอชเป็นกรดอ่อน ผักตบชวาจะมีความสามารถในการช่วยดูดดึงแคดเมียมได้ดีกว่าพีเอชอื่นๆ สอดคล้องกับการศึกษาของ Pepper และคณะ (1983) ที่ทำการศึกษาการดูดดึงสังกะสี และแคดเมียมในกากตะกอน โดยใช้ข้าวโพดหมัก (Silage corn) ร่วมกับการใช้ปูนขาว ซึ่งเป็นตัวควบคุม ผลการศึกษาพบว่า ข้าวโพดหมักมีการดูดดึงแคดเมียมได้ลดลงเมื่อมีการเติมปูนขาวจาก พีเอช 4.5 ถึง 6.5 ดังนั้นการใช้ประโยชน์ได้ของแคดเมียมในพืชทดลองจะลดลงเมื่อดินเป็นด่าง(Alkaline) หรือมีค่าพีเอชในดินเพิ่มขึ้น

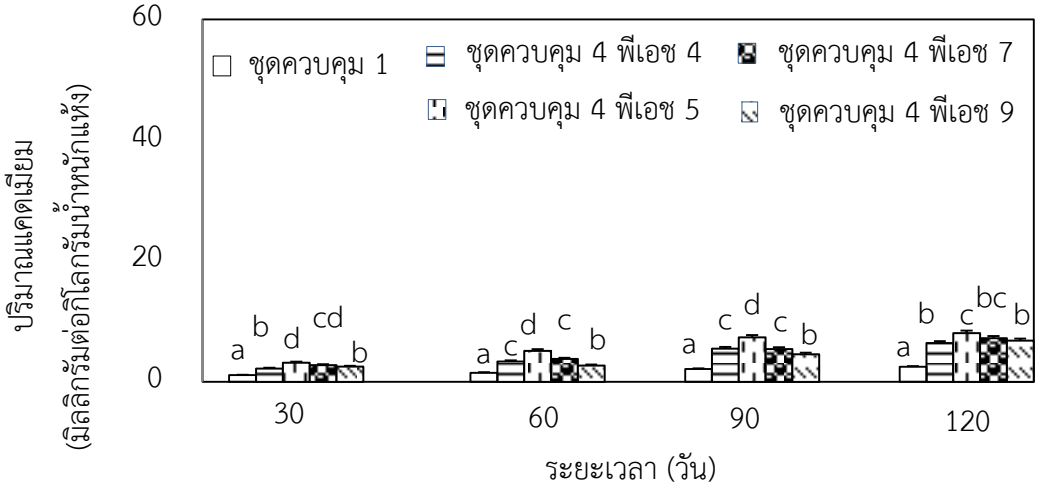



รูปที่ 4.7 ผลของพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 4 = มีการปลูกพืชในน้ำ ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอช

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (ภาคผนวก ข)




รูปที่ 4.8 ผลของพีเอชต่อการดูดดึงแคดเมียมในเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

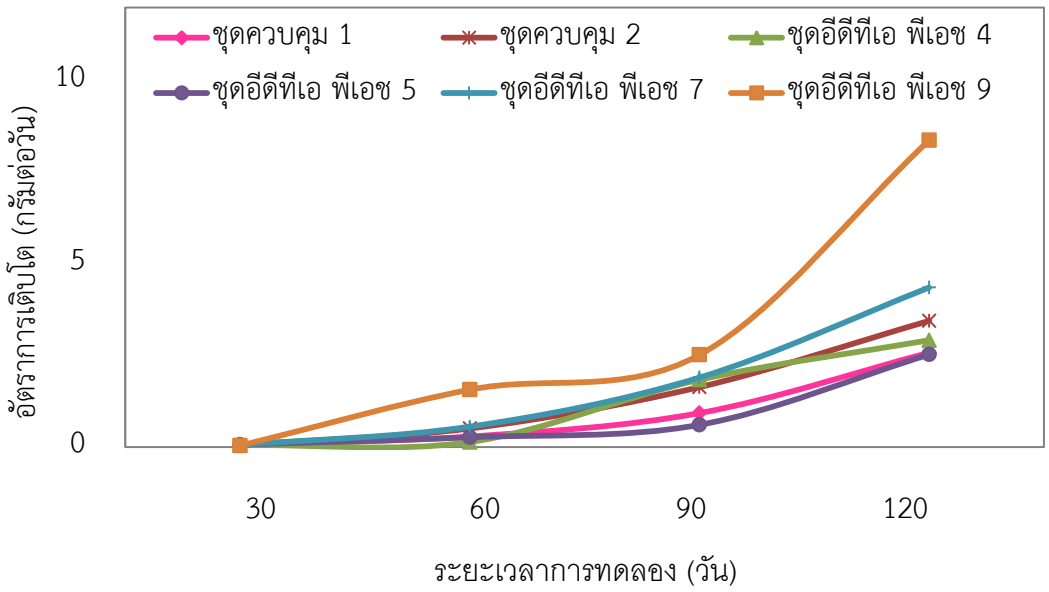
ชุดควบคุม 4 = มีการปลูกพืชในน้ำ ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอช

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (ภาคผนวก ข)

**4.7 ผลของอีดีทีเอและดีทีพีเอต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา**

4.7.1 ผลของอีดีทีเอ

จากผลการเจริญเติบโตของผักตบชวา ที่ได้ทำการทดลองตลอดระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน พบว่า ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอที่พีเอช 9 มีอัตราการเจริญเติบโตมากที่สุดที่ 120 วัน โดยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 8.38 กรัมต่อวัน รองลงมา คือ พีเอช 7, 4 และ 5 มีค่าเท่ากับ 4.36, 2.92 และ 2.53 กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (รูปที่ 4.9) สำหรับชุดควบคุมที่ไม่เติมสารคีเลต มีค่าเท่ากับ 0.07, 0.29, 0.93 และ 2.58 กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง ที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ส่วนชุดควบคุมที่เติมอีดีทีเอมีค่าเท่ากับ 0.06, 0.51, 1.64 และ 3.45 กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ จากผลการทดลองยังสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอที่พีเอช 4 และ 5 มีค่าอัตราการเจริญเติบโตน้อยกว่าชุดควบคุมที่ไม่เติมสารคีเลต และชุดควบคุมอีดีทีเอซึ่งอาจเป็นเพราะว่า เมื่อค่าพีเอชเป็นกรดอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา และทำให้ประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของผักตบชวาในชุดการทดลองอีดีทีเอที่พีเอช 4 และ 5 ลดลง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kohnke และFranzmeir (1995) ที่รายงานว่า พืชสามารถเจริญเติบโตได้ในค่าพีเอชที่แตกต่างกัน และส่วนมากเจริญได้ดีในค่าพีเอชที่เป็นกรดอ่อน โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับพืชอยู่ระหว่าง 6 ถึง 7 แต่ทั้งนี้ยังพบว่า ในพืชบางชนิดชอบดินที่มีค่าพีเอชเป็นกลาง (Neutral Soil) คือ พีเอชเท่ากับ 7 เช่น พืชตระกูลถั่ว ส่วนพืชบางชนิดอาจทนต่อพีเอชในดินต่ำกว่า 5.5 ได้ เช่น มันฝรั่ง และพืชสวน เช่น กุหลาบพันปี และบลูเบอร์รี่ นอกจากนี้ค่าพีเอชที่สูงกว่า 7 ยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารในพืชด้วย



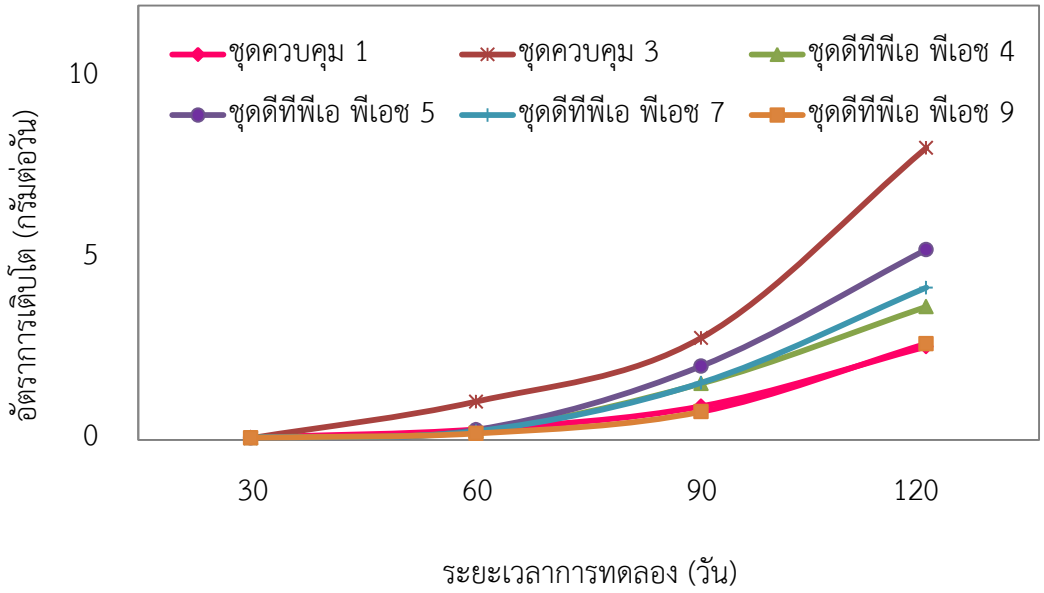

รูปที่ 4.9 ผลของอีดีทีเอต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

4.7.2 ผลของดีทีพีเอ

จากการทดลองตลอดระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ได้ทำการศึกษาผลของการเจริญเติบโตของผักตบชวาในชุดการทดลองดีทีพีเอพบว่าที่พีเอช 5 ผักตบชวามีอัตราการเจริญเติบโตมากที่สุดที่ 120 วัน โดยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 5.26 กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง รองลงมา คือ พีเอช 7, 4 และ 9 มีค่าเท่ากับ 4.21, 3.68 และ 2.66 กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (รูปที่ 4.10) สำหรับชุดควบคุมที่ไม่เติมสารคีเลต มีค่าเท่ากับ 0.07, 0.29, 0.93 และ 2.58 กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง ที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ ส่วนชุดควบคุมที่เติมดีทีพีเอมีค่าเท่ากับ 0.05, 1.06, 2.82 และ 8.07 กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งชุดควบคุมดีทีพีเอพบว่า มีค่าอัตราการเจริญเติบโตของพืชทดลองมากกว่าชุดการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากการเติมสารคีเลตและการปรับพีเอชส่งผลต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในผักตบชวาได้มากกว่าชุดควบคุม จึงทำให้ปริมาณแคดเมียมมีการสะสมมากว่าในชุดควบคุมส่งผลให้เกิดการยับยั้งการสังเคราะห์แสง และขัดขวางกระบวนการคายน้ำของผักตบชวา มีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวามีค่าน้อยกว่าชุดควบคุม (Baszyki และHorvath (1980) อ้างถึงในสนธิ คชวัฒน์ (2530))




รูปที่ 4.10 ผลของดีทีพีเอต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา

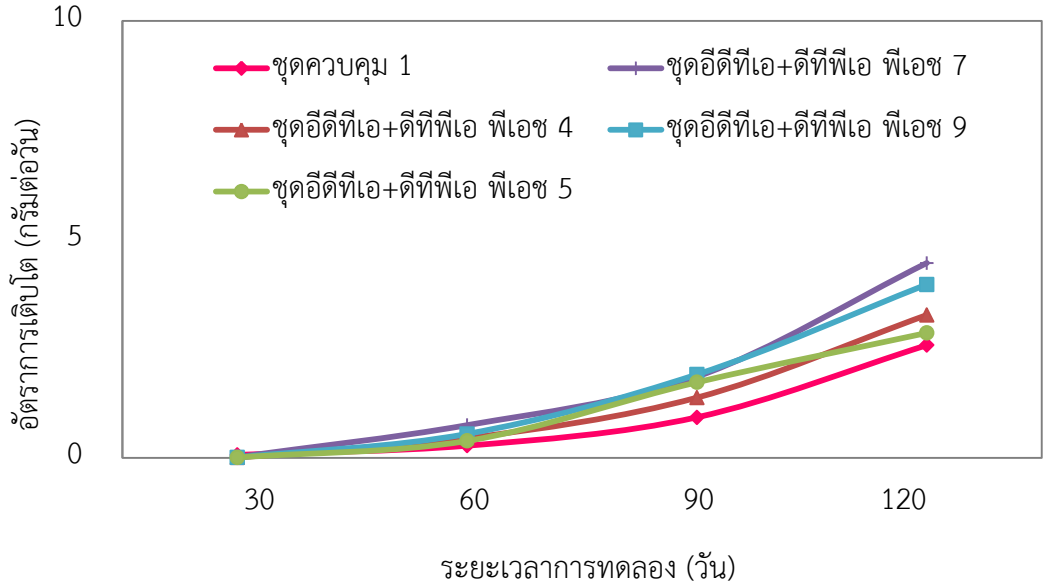
หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

4.7.3 ผลของอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ

จากผลการทดลองในส่วนของการศึกษาผลของการเจริญเติบโตของผักตบชวาในชุดการทดลองที่มีการเติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ พบว่า อีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวามากกว่าชุดควบคุม โดยชุดควบคุมที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน มีค่าเท่ากับ 0.07, 0.28, 0.93 และ 2.58 กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง ส่วนในชุดการทดลองอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ พบว่าที่พีเอช 7 มีอัตราการเจริญเติบโตดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 0.02, 0.75, 1.86 และ 4.46 กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับเวลาของการเก็บตัวอย่างและที่พีเอช 9 มีค่าเท่ากับ 0.01, 0.55, 1.91 และ 3.97 กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ สำหรับพีเอช 4 มีค่าเท่ากับ 0.01, 0.45, 1.38 และ 3.27 กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนที่พีเอช 5 มีค่าเท่ากับ 0.01, 0.39, 1.73 และ 2.86 กรัมต่อวัน ตามลำดับ และจากการทดลองยังพบว่าการเจริญเติบโตโดยวัดที่น้ำหนักแห้งมีมากสุดที่ 120 วัน เท่ากับ 4.46 กรัมต่อวัน รองลงมา คือ พีเอช 9,4 และ5 มีค่าเท่ากับ 3.97, 3.27 และ 2.86 กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (รูปที่ 4.11) ทั้งนี้ยังพบว่า อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ullah และ Evangelou (2014) ที่รายงานการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพในการดูดดึงตะกั่วโดยรากพืช *Juncus*

*effuses* L.ที่เกิดจากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช โดยมีความเข้มข้นของตะกั่ว เท่ากับ 0.5 และ 1.0 มิลลิโมล และความเข้มข้นของอีดีทีเอ ที่ 2.5 และ 5.0 มิลลิโมล ผลการทดลองพบว่า พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดีในระดับความเข้มของตะกั่วที่ 0.5 และ 1.0 มิลลิโมล และยังพบว่า มีการสะสมตะกั่วในส่วนของรากและลำต้น ในชุดการทดลองของอีดีทีเอที่ 2.5 มิลลิโมล และมีอัตราการเติบโตที่ดีกว่าชุดการทดลองของอีดีทีเอที่ 5.0 มิลลิโมล โดยมีมวลชีวภาพที่สูง



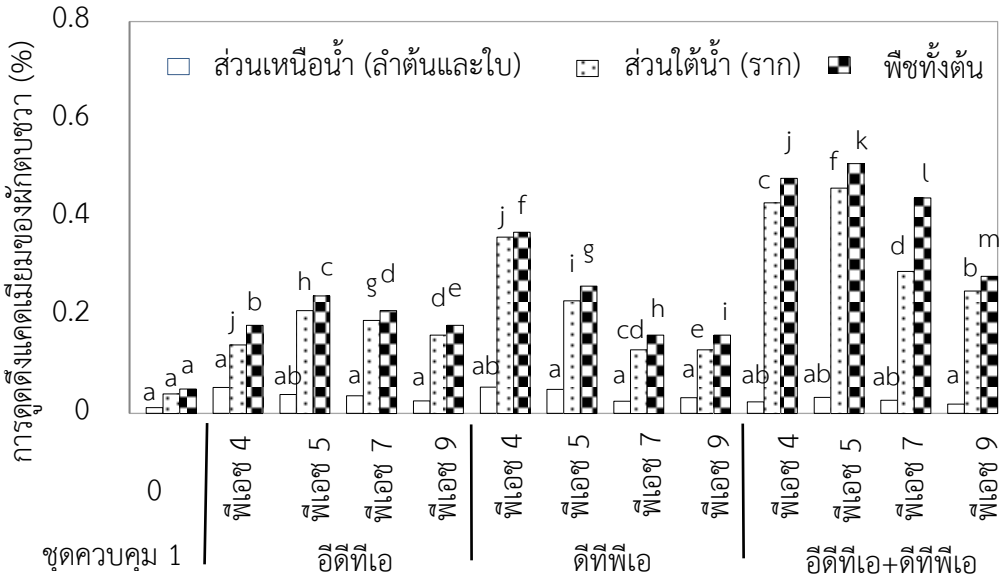

รูปที่ 4.11 ผลของอีดีทีเอ+ดีทีพีเอ ต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

## 4.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารอีดีทีเอและดีทีพีเอต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวา

จากผลการศึกษาสามารถนำมาเพื่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารอีดีทีเอและดีทีพีเอที่ระดับพีเอช 4, 5, 7 และ 9 ที่มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ(ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา (รูปที่ 4.12) โดยพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมในพืชทั้งต้นของชุดควบคุม มีค่าเท่ากับ 0.05 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอที่พีเอช 4, 5, 7 และ 9 มีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมเท่ากับ 0.18, 0.24, 0.21 และ 0.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดควบคุม ในขณะที่ชุดการทดลองที่มีการเติมสารดีทีพีเอที่พีเอช 4, 5, 7 และ 9 มีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมเท่ากับ 0.37, 0.26, 0.16 และ 0.16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดควบคุมเช่นกัน ส่วนชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอที่พีเอช 4, 5, 7 และ 9 พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวารวมทั้งต้น เท่ากับ 0.48, 0.51, 0.44 และ 0.28 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดควบคุม แสดงให้เห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอมีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมได้ดีกว่าชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอและอีดีทีเอ ตามลำดับ เนื่องจากว่าการเติมสารอีดีทีเอ และสารดีทีพีเอได้ทำปฏิกิริยากับแคดเมียมในน้ำ ทำให้เกิดสารประกอบแคดเมียมเชิงซ้อน และคงสภาพไม่เกิดการตกตะกอนจึงทำให้พืชสามารถดูดดึงนำไปใช้ได้เพิ่มขึ้น (ชวนพิศ แดงสวัสดิ์, 2544) ซึ่งผักตบชวาจะลำเลียงแคดเมียมจากรากขึ้นไปสะสมในส่วนลำต้นและใบได้ในปริมาณสูง (ตารางที่ 4.13) ดังนั้น จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าผักตบชวามีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) มากที่สุดเท่ากับ 122.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งพืชมีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณสูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมากกว่า 0.01 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง (Chaney และคณะ, 2000) จึงจัดว่าเป็นพืชชนิดไฮเปอร์แอกคิวมิวเลเตอร์ (Hyperaccumulator) และพืชใช้กลไก Phytoextraction ในการลำเลียงแคดเมียมจากดินตะกอนท้องน้ำ โดยผ่านส่วนใต้น้ำ (ราก) ไปสู่ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ได้ในปริมาณสูง การศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยผลของ Junkang และคณะ (2014) ที่ทำการศึกษาผลของอีดีทีเอในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี สารหนู แคดเมียม และตะกั่วต่อการเติบโตของหญ้าในพื้นที่การเกษตร ผลการศึกษา พบว่า อีดีทีเอมีประสิทธิภาพในการบำบัดสังกะสีได้มากที่สุด รองลงมาคือ สารหนู แคดเมียม และตะกั่ว ตามลำดับ โดยหญ้ามีความสามารถในการสะสมไว้ในส่วนรากมากที่สุด และมีมวลชีวภาพเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น




รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพของอีดีทีเอและดีทีพีเอต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวา

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (ภาคผนวก ข)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา

| ชุดการทดลอง | | ปริมาณแคดเมียมในดินตะกอนที่เวลาเริ่มต้น (มิลลิกรัม) | ส่วนใต้น้ำ (ราก) (มิลลิกรัม) | ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) (มิลลิกรัม) | รวมทั้งต้น (มิลลิกรัม) | เปอร์เซ็นต์รวมทั้งต้น |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ชุดควบคุม 1 | | 395.85 | 0.16 | 0.04 | 0.20 | 0.05 |
| ชุดควบคุม 2 | | 396.15 | 0.43 | 0.06 | 0.49 | 0.12 |
| ชุดควบคุม 3 | | 392.05 | 0.46 | 0.04 | 0.50 | 0.13 |
| ชุดควบคุม 4 | พีเอช 4 | 396.25 | 0.54 | 0.09 | 0.63 | 0.16 |
| | พีเอช5 | 392.70 | 0.46 | 0.13 | 0.59 | 0.15 |
| | พีเอช 7 | 396.70 | 0.49 | 0.11 | 0.60 | 0.15 |
| | พีเอช 9 | 391.00 | 0.47 | 0.07 | 0.54 | 0.14 |
| อีดีทีเอ | พีเอช 4 | 395.60 | 0.58 | 0.12 | 0.70 | 0.18 |
| | พีเอช 5 | 398.45 | 0.83 | 0.14 | 0.97 | 0.24 |
| | พีเอช 7 | 394.45 | 0.71 | 0.10 | 0.81 | 0.21 |
| | พีเอช 9 | 398.25 | 0.59 | 0.12 | 0.71 | 0.18 |
| ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 401.75 | 1.29 | 0.21 | 1.50 | 0.37 |
| | พีเอช 5 | 396.15 | 0.89 | 0.15 | 1.04 | 0.26 |
| | พีเอช 7 | 389.90 | 0.48 | 0.14 | 0.62 | 0.16 |
| | พีเอช 9 | 401.20 | 0.54 | 0.10 | 0.64 | 0.16 |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ | พีเอช 4 | 388.80 | 1.65 | 0.22 | 1.87 | 0.48 |
| | พีเอช 5 | 394.35 | 1.84 | 0.19 | 2.03 | 0.51 |
| | พีเอช 7 | 400.30 | 1.17 | 0.16 | 1.77 | 0.44 |
| | พีเอช 9 | 394.75 | 0.97 | 0.13 | 1.10 | 0.28 |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

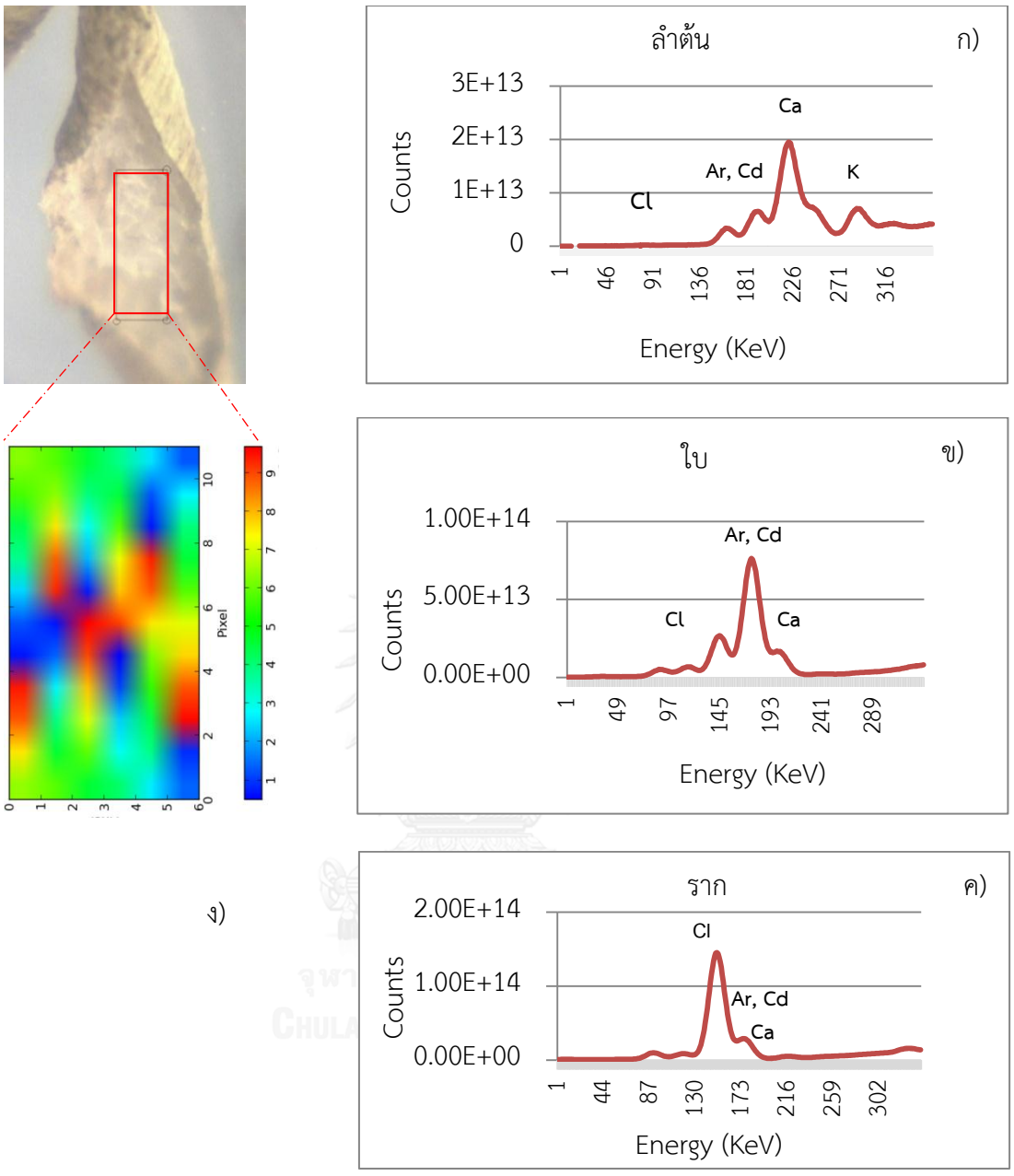
ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 4 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอชที่ 4, 5, 7 และ 9

**4.9 การเคลื่อนที่ของแคดเมียมในผักตบชวาด้วยแสงซินโครตรอน**

ผลจากชุดการทดลองที่มีการเติมสารดีทีพีเอที่ระดับพีเอช 4 มีปริมาณแคดเมียมสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ ซึ่งผลดังกล่าวได้นำมาทำการศึกษาการสะสมของแคดเมียม โดยการวิเคราะห์ใช้ระบบลำเลียงแสงที่ 6 (BL6b) ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (micro-XRF/XRD) ซึ่งการทดลองครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม การตรวจวัดดูการสะสม และการกระจายตัวของแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของผักตบชวา ด้วยโครงสร้างการเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์จากแสงซินโครตรอน ทั้งนี้การสะสมของแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของผักตบชวา ทั้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) จากผลการวิเคราะห์ไม่สามารถวัดการสะสมของแคดเมียมได้ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของผักตบชวามีปริมาณความเข้มข้นต่ำ หากแต่สามารถตรวจพบการเคลื่อนที่ และสะสมของธาตุอื่นๆ ในส่วนต่างๆ ของผักตบชวา ได้แก่ อาร์กอน (Ar) แคลเซียม (Ca) คลอรีน (Cl) และโพแทสเซียม (K) (รูปที่ 4.13 ก-ค) ซึ่งธาตุที่พบมีปริมาณความเข้มข้นที่สูงกว่าแคดเมียม ทั้งนี้พบว่า แคลเซียมมีการสะสมมากที่สุดในส่วนของลำต้น รองลงมาคือ ส่วนใบ และราก ตามลำดับ อย่างไรก็ตามปริมาณการสะสมแคลเซียมที่ต่ำแสดงด้วยสีน้ำเงิน และปริมาณการสะสมแคลเซียมที่สูงแสดงด้วยสีแดง (รูปที่ 4.13 ง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




รูปที่ 4.13 การเคลื่อนที่ของธาตุอาร์กอน (Ar) แคลเซียม (Ca) คลอรีน (Cl) และโพแทสเซียม (K) ในผักตบชวา ก) ลำต้น ข) ใบ ค) ราก และ ง) การกระจายตัวของแคลเซียมในส่วนของลำต้นผักตบชวา

# บทที่ 5
# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของสารคีเลตและพีเอชต่อการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวา โดยแบ่งชุดทดลอง ออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) ชุดการทดลองที่มีดินปนเปื้อนและน้ำมีการเติมสารอีดีทีเอ ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอช ที่ 4, 5, 7 และ 9 2) ชุดการทดลองที่มีดินปนเปื้อนและน้ำมีการเติมสารดีทีพีเอ ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอช ที่ 4, 5, 7 และ 9 และ 3) ชุดการทดลองที่มีดินปนเปื้อนและน้ำมีการเติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารดีทีพีเอ ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอช ที่ 4, 5, 7 และ 9 รวมทั้งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอีดีทีเอ และดีทีพีเอ ต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวาโดยระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน รวมทั้งหาปริมาณแคดเมียมที่สะสมอยู่ในดินและในน้ำตลอดระยะเวลาการทดลองของทุกชุดการทดลองที่เติมสารคีเลต และมีการปรับพีเอช ที่ระดับต่างๆ นั้น พบว่า มีส่วนช่วยให้ผักตบชวามีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนใต้น้ำ (ราก) ได้มากกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) จากผลการทดลองในทุกชุดการทดลองสามารถกล่าวโดยสรุป ได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) ประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวา

ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ และปรับพีเอช ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 เป็นชุดที่ช่วยในการดูดดึงแคดเมียมในดินตะกอนท้องน้ำได้ดีที่สุดในทุกช่วงระยะเวลาของการทดลองและสามารถดูดดึงแคดเมียมได้มากที่สุดในระดับพีเอช 5 และมีปริมาณการสะสมแคดเมียมสูงสุดในส่วนใต้น้ำ(ราก) ที่ 90 วัน เท่ากับ 112.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง เมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ และชุดที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ

สำหรับชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอ และปรับพีเอช ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 นั้น พบว่าผักตบชวามีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมได้มากสุดในส่วนใต้น้ำ(ราก) ที่ระดับพีเอช 4 โดยมีค่ามากที่สุดที่เวลา 30 วัน เท่ากับ 98.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และมีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้น้อยลงมาตามลำดับเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น มีปริมาณการดูดดึงแคดเมียมสูงกว่าพีเอช อื่นๆ

และมีประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมมากกว่าชุดการทดลองอีดีทีเอ แต่น้อยกว่าชุดอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ

ส่วนชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ และปรับพีเอช ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 นั้น พบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมได้น้อยลงเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น โดยมีการสะสมแคดเมียมมากสุดในส่วนใต้น้ำ(ราก) ที่ระดับพีเอช 5 ที่ระยะเวลา 30 วัน เท่ากับ 62.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง โดยมีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับชุดที่เติมสารดีทีพีเอ และ ชุดที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ นอกจากนี้ในทุกชุดการทดลองมีการสะสมปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของผักตบชวา

2) ผลของอีดีทีเอ และดีทีพีเอ ต่ออัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวา

จากการศึกษาผลของอีดีทีเอ และดีทีพีเอ ต่ออัตราการเจริญเติบโตผักตบชวา พบว่า ผักตบชวามีการเจริญเติบโตสูงสุดในชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ ที่พีเอช 9 ที่อายุ 120 โดยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 8.38 กรัมต่อวัน รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมดีทีพีเอ ที่พีเอช 5 พบว่า ผักตบชวามีการเจริญเติบโตโดยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 5.26 กรัมต่อวัน สำหรับชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับดีทีพีเอ ที่พีเอช 7 มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 4.46 กรัมต่อวัน นอกจากนี้พบว่า ผักตบชวามีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาถึง 120 วัน และมีความสามารถในการเจริญเติบโตอยู่ได้ภายใต้การควบคุมที่มีการใส่สารอีดีทีเอ และดีทีพีเอ หากแต่การเติมสารคีเลตทั้งสองชนิดภายใต้การควบคุมที่พีเอชทั้ง 4 ระดับ มีส่วนช่วยให้แคดเมียมสะสมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ได้มากที่สุด จึงส่งผลต่อการอัตราการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**5.2 ข้อเสนอแนะ**

1) ควรมีการเลือกใช้พืชชนิดอื่นๆ เนื่องจากพืชแต่ละชนิดสามารถเจริญเติบโตในค่าพีเอช ที่แตกต่างกัน และเมื่อใช้ร่วมกับสารคีเลตแล้วอาจเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมได้ดีเพราะสารคีเลตมีผลต่อการดูดดึงโลหะหนัก และมีความทนทานได้แตกต่างกัน

2) ควรมีการศึกษาการใช้สารคีเลตชนิดอื่นๆ และอาจเลือกทดลองเฉพาะค่าพีเอช ที่เป็นกรดอ่อน เนื่องจากว่าปริมาณการดูดดึงแคดเมียมจะมีประสิทธิภาพมากกว่า

3) การวิเคราะห์ตัวอย่างพืชด้วยแสงซินโครตรอน เพื่อดูการกระจายตัวของแคดเมียมด้วยระบบลำเลียงแสง BL6 ไม่สามารถตรวจพบการกระจายตัวของธาตุแคดเมียมได้ เนื่องจากการหาธาตุที่ต้องการในตัวอย่างพืชจะต้องใช้ความเข้มข้นที่มีปริมาณสูง จึงควรมีการเลือกใช้ระบบลำเลียงแสงอื่นที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อสามารถหาชนิด และองค์ประกอบของธาตุที่ต้องการได้

4) ความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานในพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม ซึ่งอาจกำหนดพื้นที่โดยกั้นลำน้ำ และทำการกำจัดแคดเมียมในบริเวณพื้นที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# รายการอ้างอิง


ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. (2541). แคดเมียม (*Cadmium).* พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร. จุลสาร.

กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2553). การดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ. แหล่งที่มา: http://www.siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR2. Retrieved 14 มกราคม, 2555

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐาน และการเหมืองแร่. (2549). รายงานการศึกษาวิจัยสาเหตุการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. แหล่งที่มา: http://www.dpim.go.th/dt/pper/00000108 5547312.pdf. Retrieved 28 มกราคม, 2555

กระทรวงอุตสาหกรรม. (2521). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2521เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค. แหล่งที่มา: http://www.cadmium.org. Retrieved 18 มีนาคม, 2557

ก่องกานดา ชยามฤต และนันท์นภัส ภัทรหิรัญไตรสิน. (2552). ลักษณะประจำวงศ์พรรณไม้ เล่มที่ 3. สำนักงานวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.สำนักงานวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช.

กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ. (2545). คู่มือการนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืนและครบวงจร โดยให้เกิดประโยชน์สูงสุด. จุลสารเพื่อการเผยแพร่กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ.

กัลปพฤกษ์ คงเมือง. (2553). ผลของอีดีทีเอและกรดซิตริกต่อการดูดดึงแคดเมียมในน้ำด้วยผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กัลปพฤกษ์ คงเมือง และพันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2553). ผลของอีดีทีเอและกรดซิตริกต่อการดูดดึงแคดเมียมในน้ำด้วยผักตบชวา. Paper presented at the หนังสือประมวลผลการประชุมทางวิชาการ ในการประชุมแม่ฟ้าหลวงวิชาการ 12 ปีตามรอยสมเด็จย่า.

ชวนพิศ แดงสวัสดิ์. (2544). สรีรวิทยาของพืช. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์พัฒนาศึกษา.

ดวงพร สุวรรณกุล และรังสิต สุวรรณเขตนิคม. (2544). วัชพืชในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ดวงรัตน์ อินทร. (2553). เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช. ฉบับที่ 101 ปีที่ 9 ประจำเดือน มกราคม-มีนาคม 2553: มหาวิทยาลัยมหิดล

นัยนันท์ อริยกานนท์. (2550). การศึกษาประสิทธิภาพการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของวัชพืชในประเทศไทย. รายงานวิจัยกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2548). วิวัฒนาการของเทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของเสียอันตราย. วารสารสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ฉบับที่ 1 ปีที่ 9. เล่มประจำเดือนมกราคม-มีนาคม 2548: 29-32.

ยศวนันท์ หงศ์พิริยกุล และพันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2553). การใช้บอนเขียวในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนใน ดินบริเวณห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี. หนังสือประมวลผลการประชุมทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ครั้งที่ 2: หน้า 322-330.

วราภรณ์ ศรีตัมภวา. (2550). การดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกดินที่ปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. (2545). ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี . 1000 เล่ม พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2555). แสงซินโครตรอน BL6b: micro-XRF. แหล่งที่มา: http://www.slri.or.th. Retrieved 2 พฤษภาคม, 2555

สนธิ คชวัฒน์. (2530). ประสิทธิภาพของผักตบชวาในการกำจัดโลหะหนัก แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมชาติ หาญวงษา. (2548). วัชพืชสำคัญในประเทศไทย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตพิษณุโลก.

สุชาดา ศรีเพ็ญ. (2530). พรรณไม้น้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาพฤกษศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุธินี วดีศิริศักดิ์. (2550). การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดินและไร้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุรภี โรจน์อารยานนท์. (2532). มลพิษสภาวะแวดล้อมในสภาวะแวดล้อมของเรา. หน้า 114-115. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อลิสา วังใน. (2553). การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Adriano, D. C. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals.* New york.

Akegacha, T. (2011). *Effect of EDTA and DTPA on cadmium removal from contaminated soil with Eichhornia crassipes (water hyacinth).* Environmental Management, Graduate School, Chulalongkorn University.

Baker, A. J. M. (1981). Accumulators and excludersstrategiesin the response of plants to heavy metals. *Journal Plant Nutri*(3), 643-654.

Baszyki, J., & Horvath, M. (1980). *Morphology, Water hyacinth*. New Delhi, India. 62-71.

Bell, M., Berry, G.,, & Mclaughlin, M. (2001). Managing cadmium in summer grain legumes for premium quality produce. from: http://clu-in.org/ download/remed/introphyto.pdf. Retrieved 20 February, 2012

Boris S. (2012). Uptake of Zn, Cu, Pb, and Cd by water hyacinth in the initial stage of water system remediation. *Applied Geochemistry,* 12, 124-148.

Buckman, & Brady. (1969). Ethylenediamine dissuccinate as a new chelate for environmentally safe enhanced lead phytoextraction. *Journal Environ Qual,* 32, 500-506.

Center, T. D., & Thai, K. V. (1989). Alteration of water hyacinth (Eichhornia crassipes (Mart.) Solms) leaf dynamics and phytochemistry by insect damage and plant density. *Aquatic Botany,* 35(2), 181-195.

Chaney, Y., Shen, Z., & Li, X. (2000). The use of vetiver grass( Vetiveria zizanioides) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Appled Geochemistry,* 19, 1553-1565.

Chemicals. (2003). DTPA (Diethylene Triamine Penta Acetic Acid). from: http://www. avachemicals.net/dtpa.html. Retrieved 15 March, 2013

Commission Regulation. (2006). Setting Maxium Levels for Certain Contaminants in Foodstuffs. *The European Union*, 5-24.

CSTEE. (2003). Opinion on assessment of the European Committee for Standardisation (CEN) report on the risk assessment of organic chemicals in toys Report version. from: http://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/committees/sct/ documents/out20_3_en.pdf. Retrieved 17 March, 2013

David, H. O., & Jame, K. H. (1984). Cadmium Uptake by the Water Hyacinth: Effects of Solution Factors. *Environmental Pollution*, 133-147.

Dirthylene Triamine Pentaacetic acid Chemical Structure. from: http://chemistry.about.com/od/factsstructures/ig/Chemical-Stuctures---P/ Penetic P/Penetic-Acid---DTPA.html. Retrieved 26 April, 2013

Euan, S., Kempson, I., Juhasz, A., Weber, J., Skinner, W., & Gräfe, M. (2009). Localization and speciation of arsenic and trace elements in rice tissues. *Journal of Chemosphere,* 76(4), 529–535.

Ginkel, V. C. G., Kester, H., Stroo, C. A., & Haperen, V. A. M. (1999). Biodrgradation of EDTA in pulp and paper mill effluents by activated sludge. *Water Science and Technology,* 40, 259-266.

Heindorff, J., E.W.D,, & Allaway, H. W. (1973). Chromium in plant. distribution in tissues organelles and extracts and availability of bean leaf Cr to animals. *Agric Food Chem,* 21, 982-986.

Hodgson, M. E., & Valsami, J. E. (1963). Bonemeal Additions as a Remediation Treatment for Metal Contaminated Soil. 34, 3501-3507.

Hoffmann, W. A., & Poorter, H. (2002). Avoiding Bias in Calculations of Relative Growth Rate. *Annals of Botany,* 90(1), 37.

International Cadmium Association. (2006). Cadmium Brussels, Belgium. from: http://www.cadmium.org. Retrieved 4 November, 2013

James, M. B. (1999). The Element Cadmium. United Kingdom. from: http://www.jimesmbrown.co.uk/cd_pigments/cadmium.html. Retrieved 25 February 2013

Junkang, G., Renwei, F., Yongzhen, D., & Ruigang, W. (2014). Applying carbon dioxide plant growth-promoting rhizobacterium and EDTA can enhance the phytoremediation efficiency of ryegrass in a soil polluted with zinc, arsenic, cadmium and lead. *Journal of Environmental Management,* 141(1), 1-8.

Kohnke, H., & Franzmeir, D. P. (1995). *Soil science simplified*. USA: Waveland Press.

Liphadzi, M. S., & Kirkham, M. B. (2006). Availability and plant uptake of heavy metal in EDTA-assisted phytoremediation of siol and composted biosiol. *South African Journal of Botany,* 72, 391-397.

Maryadele, J., Smith, A., Heckelman, P. E., Obenchain, J. R., Gallipeau, J. A., & Arecca, M. A. (2001). *The Merck Index An Encyclopedia of Chemical.* New Jersey: Merck & Co.

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

Mika, S., & Marja, S. (2000). Analysis of EDTA and DTPA. Helsinki University of Technology. 14 February 1997. 1487–1497.

Mishra, V. k., & Tripathi, B. D. (2009). Accumulation of chromium and zinc from aqueous solutions using water hyacinth (Eichhornia crassipes). *Journal of Hazadous Materials,* 164(2-3), 1059-1063.

Nascimento, D., Amarasiriwardena, L., & Xing, B. (2006). Comparison of natural organic acids and synthetic chelates at enhancing phytoextraction of metals from a multi-metal contaminated soil. *Environmental Chemistry,* 140, 144-123.

Oviedo, C., & Rodriguez, J. (2003). EDTA: the chelating agent under environmental scrutiny (pp. 901-905). Quim Nova.

Pepper, I. L., Baker, A. S., & Sims, J. M. (1983). Silage corn uptake of sludge-applied zinc and cadmium as affected by soil pH. *Environmental Quality,* 12(12), 270-275.

Primary Industries Agriculture. (1999). Water hyacinth (Eichhornia crassipes). from: http://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/pests-weeds/weeds/profiles/water-hyacinth. Retrieved 5 March, 2013

Pulford, D., & Watson, C. (2003). Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by tree- a review. Environment International. 29(529-540).

Sampanpanish, P., & Tippayasa, K. (2007). *Chromium uptake on speciation and phytotoxicity by hydroponics with aquatic plants.* Paper presented at the. In Proceeding at The 34th.

Sandra, A., Magdiel G., Marco, P. M., Graterol, N., Anzalone, A. C., & Zaray, G. (2008). Arsenic removal from waters by bioremediation with the aquatic plants Water Hyacinth (Eichhornia crassipes) and Lesser Duckweed (Lemna minor) *Journal of Bioresource Technology*, 8436–8440.

Schardein, J. L., Sakowski, R., Petrere, J., & Humphrey, R. R. (1981). Teratogenesis studies with EDTA and its salts in rats. *Enviromental Technology*, 423-428.

Tancharakorn, S., Tanthanuch, W., Kamonsutthipaijit, N., Wongprachanukul, N., & Yimnirun, R. (2012). The first microbeam syncrontron X-ray fluorescence beamline at the Siam Photon Laboratory. *Journal Synchotron Rad,* 19, 536-540.

Tanhan, P., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., & Chaiyarat, R. (2007). Uptake and accumulation cadmium, lead and zinc by Siam weed [Chromolaena odorata(L.) *Chemosphere,* 68(2), 323-329.

Traina, S. J., McLaughlin, M., & Singh, B. (1999). *The Environmental Chemistry of Cadmium in Soils and Plants.* 11-37.

Tuntullveat, M. S. (2012). *Chemmical in Water and Waste Water.* Chulalongkorn University, Bangkok Thailand.

Ullah, J., & Evangelou, V. P. (2014). Enhancing the lead phytostabilization in wetland plant Juncus effusus L. through somaclonal manipulation and EDTA enrichment. *Environmemtal Chemistry,* 40, 49-58.

USEPA. (1979). Criteria for classification of solid waste disposal facilities and practices. Federal Register Environmental document. 44, 53438-53468.

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

USEPA. (1998). *Microwave assisted acid digestion of Aqueons Samples and Extracts. Method.* 3051*A*. Washington D.C., USA.

USEPA. (2000). Intriduction to Phytoremediation. from: http://clu-in.org/download/remed/introphyto.pdf. Retrieved 2 December, 2012

Wikipedia. (2007). diethylene triamine pentaacetic acid (DTPA). from: http://en.wikipedia.org/wiki/Pentetic_acid. Retrieved 15 March, 2013

Wiwatwongwana, P. (2003). *Soil Chemical*. Chaenghai Thailand.

Wolverton, B. C., & McDonald, R. C. (1975). *Water hyacinth for upgrading sewage lagoon to meet advance waste water treatment standard Part* 1. NASA Technical Memorandum.

Wongtanet, J., & Parkpain, P. (2008). Phytoremediation of lead in contamination water. *Journal of Environmental Research,* 30(2), 1-10.

Woranan, N., Panitlertumpai, N., Sukadeetad, K., Meesungneon, O., & Noisa-nguan, W. (2010). *Advances in Phytoremediation Research: A Case Study of Gynura pseudochina (L.) DC*. Paper presented at the Advanced Knowledge Application in Practice.

Xian, R. J., & Mckenzie, A. F. (1989). Effects of sorbed orthophosphate on zinc status inthree soils from eastern Cannada. *Soil Science,* 40, 49-58.

Yannai, J., Zhao, F. J., McGrath, S. P., & Kosaki, T. (2006). Effect of siol charateristics on Cd Uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Environmental Geochemistry and Health,* 26, 359-371.

# ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**ภาคผนวก ก**

## 1. ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น- รีดักชั่นในน้ำ

### 1.1 ค่าพีเอชในน้ำ (pH)

ตารางที่ ก1 ค่าพีเอชในน้ำ

| ชุดทดลอง | ค่าพีเอช | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ชุดควบคุม 1 | 6.11 | 6.18 | 6.30 | 6.27 | 6.45 | 6.42 | 6.48 | 6.47 |
| | 6.12 | | 6.20 | | 6.40 | | 6.41 | |
| | 6.20 | | 6.30 | | 6.40 | | 6.51 | |
| ชุดควบคุม 2 | 6.20 | 6.27 | 6.50 | 6.53 | 6.50 | 6.64 | 7.01 | 6.94 |
| | 6.30 | | 6.50 | | 6.61 | | 6.99 | |
| | 6.30 | | 6.60 | | 6.80 | | 6.83 | |
| ชุดควบคุม 3 | 6.00 | 6.05 | 6.00 | 6.04 | 6.24 | 6.19 | 6.26 | 6.23 |
| | 6.12 | | 6.00 | | 6.21 | | 6.20 | |
| | 6.01 | | 6.11 | | 6.12 | | 6.22 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 4 | 4.23 | 4.35 | 4.61 | 4.41 | 4.25 | 4.45 | 4.20 | 4.32 |
| | 4.14 | | 4.51 | | 4.53 | | 4.34 | |
| | 4.63 | | 4.12 | | 4.56 | | 4.41 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 5 | 5.55 | 5.37 | 5.55 | 5.37 | 5.64 | 5.57 | 5.50 | 5.68 |
| | 5.44 | | 5.32 | | 5.63 | | 5.79 | |
| | 5.12 | | 5.24 | | 5.45 | | 5.76 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 7 | 7.31 | 7.19 | 7.01 | 7.19 | 7.62 | 7.50 | 7.76 | 7.61 |
| | 7.16 | | 7.21 | | 7.55 | | 7.61 | |
| | 7.11 | | 7.35 | | 7.32 | | 7.46 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 9 | 9.11 | 9.08 | 9.10 | 9.11 | 8.99 | 9.19 | 9.66 | 9.37 |
| | 8.99 | | 9.00 | | 9.46 | | 9.15 | |
| | 9.13 | | 9.24 | | 9.10 | | 9.29 | |

ตารางที่ ก1 ค่าพีเอช (ต่อ)

| ชุดทดลอง | ค่าพีเอช | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 4.10 | 4.18 | 4.31 | 4.36 | 3.98 | 4.26 | 4.51 | 4.43 |
| | 4.21 | | 4.38 | | 4.52 | | 4.40 | |
| | 4.23 | | 4.39 | | 4.29 | | 4.39 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 5.37 | 5.39 | 5.53 | 5.50 | 5.21 | 5.40 | 5.87 | 5.62 |
| | 5.32 | | 5.43 | | 5.55 | | 5.55 | |
| | 5.49 | | 5.55 | | 5.43 | | 5.43 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 7.10 | 7.32 | 7.76 | 7.36 | 7.41 | 7.39 | 7.69 | 7.64 |
| | 7.38 | | 7.22 | | 7.32 | | 7.68 | |
| | 7.47 | | 7.11 | | 7.44 | | 7.53 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 9.12 | 9.06 | 9.11 | 9.23 | 9.23 | 9.21 | 9.59 | 9.50 |
| | 9.11 | | 9.26 | | 9.11 | | 9.43 | |
| | 8.94 | | 9.31 | | 9.30 | | 9.48 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 4.33 | 4.29 | 4.46 | 4.40 | 4.21 | 4.40 | 4.21 | 4.38 |
| | 4.41 | | 4.40 | | 4.57 | | 4.53 | |
| | 4.13 | | 4.33 | | 4.43 | | 4.40 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 5.42 | 5.48 | 5.53 | 5.51 | 5.52 | 5.42 | 5.80 | 5.56 |
| | 5.35 | | 5.47 | | 5.42 | | 5.52 | |
| | 5.66 | | 5.55 | | 5.31 | | 5.36 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 7.22 | 7.22 | 7.55 | 7.43 | 7.71 | 7.57 | 7.89 | 7.82 |
| | 7.30 | | 7.53 | | 7.55 | | 7.91 | |
| | 7.15 | | 7.22 | | 7.46 | | 7.67 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 9.10 | 9.15 | 9.32 | 9.18 | 9.53 | 9.32 | 9.65 | 9.43 |
| | 9.04 | | 9.10 | | 9.19 | | 9.44 | |
| | 9.32 | | 9.12 | | 9.25 | | 9.22 | |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

**1.2 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำ (EC)**

ตารางที่ ก2 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำ

| ชุดทดลอง | ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ชุดควบคุม 1 | 90.20 | 90.80 | 100.10 | 100.90 | 117.40 | 121.27 | 146.30 | 148.90 |
| | 92.50 | | 102.70 | | 123.60 | | 150.00 | |
| | 89.70 | | 100.60 | | 122.80 | | 150.40 | |
| ชุดควบคุม 2 | 91.30 | 91.93 | 100.10 | 100.90 | 140.50 | 136.87 | 165.30 | 165.40 |
| | 92.90 | | 102.00 | | 136.80 | | 166.40 | |
| | 91.60 | | 100.60 | | 133.30 | | 164.50 | |
| ชุดควบคุม 3 | 102.20 | 102.40 | 101.50 | 102.33 | 141.00 | 140.97 | 151.00 | 150.03 |
| | 102.70 | | 102.70 | | 141.50 | | 150.00 | |
| | 102.30 | | 102.80 | | 140.40 | | 149.10 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 4 | 149.10 | 149.70 | 158.00 | 154.33 | 249.00 | 249.00 | 320.20 | 318.00 |
| | 153.50 | | 153.60 | | 249.90 | | 315.10 | |
| | 146.50 | | 151.40 | | 248.10 | | 318.70 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 5 | 135.00 | 138.73 | 138.60 | 136.20 | 183.50 | 183.27 | 277.10 | 273.13 |
| | 139.90 | | 132.10 | | 182.30 | | 269.30 | |
| | 141.30 | | 137.90 | | 184.00 | | 273.00 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 7 | 107.00 | 107.97 | 125.50 | 124.23 | 148.00 | 149.10 | 190.40 | 188.37 |
| | 110.60 | | 124.70 | | 150.00 | | 185.70 | |
| | 106.30 | | 122.50 | | 149.30 | | 189.00 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 9 | 123.30 | 125.27 | 129.60 | 126.17 | 182.30 | 179.83 | 223.00 | 219.67 |
| | 129.80 | | 126.90 | | 177.30 | | 217.00 | |
| | 122.70 | | 122.00 | | 179.90 | | 219.00 | |

ตารางที่ ก 2 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำ (ต่อ)

| ชุดทดลอง | ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 116.30 | 118.70 | 123.30 | 124.70 | 224.00 | 224.67 | 309.00 | 310.27 |
| | 119.30 | | 126.60 | | 223.00 | | 311.10 | |
| | 120.50 | | 124.20 | | 227.00 | | 310.70 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 101.80 | 101.97 | 123.80 | 122.90 | 183.50 | 182.80 | 270.00 | 267.00 |
| | 101.10 | | 123.30 | | 184.70 | | 265.00 | |
| | 103.00 | | 121.60 | | 170.20 | | 266.00 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 93.30 | 98.13 | 113.30 | 113.90 | 170.00 | 169.90 | 170.20 | 174.53 |
| | 95.00 | | 114.70 | | 166.60 | | 174.00 | |
| | 106.10 | | 113.70 | | 173.10 | | 179.40 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 105.40 | 103.10 | 112.80 | 108.80 | 168.60 | 164.80 | 203.70 | 204.60 |
| | 103.50 | | 107.80 | | 165.10 | | 206.00 | |
| | 100.40 | | 105.80 | | 160.70 | | 204.10 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 107.60 | 108.60 | 104.70 | 104.70 | 212.00 | 208.33 | 294.40 | 291.87 |
| | 108.80 | | 104.20 | | 207.00 | | 292.00 | |
| | 109.40 | | 105.20 | | 206.00 | | 289.20 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 109.90 | 107.13 | 106.70 | 105.37 | 184.60 | 182.57 | 241.20 | 243.20 |
| | 106.30 | | 104.80 | | 185.80 | | 245.40 | |
| | 105.20 | | 104.60 | | 177.31 | | 243.00 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 91.60 | 90.90 | 107.60 | 104.93 | 147.10 | 143.54 | 151.20 | 152.33 |
| | 90.80 | | 104.70 | | 142.20 | | 155.80 | |
| | 90.30 | | 102.50 | | 141.33 | | 150.00 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 91.30 | 88.00 | 100.50 | 100.83 | 123.20 | 127.70 | 201.60 | 199.83 |
| | 88.20 | | 100.40 | | 126.00 | | 198.40 | |
| | 84.50 | | 101.60 | | 133.91 | | 199.50 | |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

**1.3 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำ (ORP)**

ตารางที่ ก3 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำ

| ชุดทดลอง | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (มิลลิโวลต์) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ชุดควบคุม 1 | 123.70 | 122.33 | 103.30 | 128.67 | 176.70 | 175.00 | 180.40 | 182.33 |
| | 122.30 | | 128.40 | | 174.60 | | 182.10 | |
| | 121.00 | | 127.30 | | 173.70 | | 184.50 | |
| ชุดควบคุม 2 | 111.20 | 112.13 | 121.70 | 121.33 | 151.50 | 152.90 | 159.00 | 156.70 |
| | 113.10 | | 118.60 | | 153.10 | | 156.10 | |
| | 112.10 | | 123.70 | | 154.10 | | 155.00 | |
| ชุดควบคุม 3 | 109.30 | 108.07 | 108.90 | 107.83 | 145.50 | 146.43 | 147.40 | 148.83 |
| | 106.30 | | 109.00 | | 148.10 | | 148.70 | |
| | 108.60 | | 105.60 | | 145.70 | | 150.40 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 4 | 122.10 | 120.40 | 151.70 | 152.07 | 182.10 | 181.33 | 189.40 | 188.83 |
| | 120.70 | | 152.30 | | 181.90 | | 189.00 | |
| | 118.40 | | 152.20 | | 180.00 | | 188.00 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 5 | 118.80 | 117.50 | 147.20 | 151.00 | 161.40 | 160.23 | 170.30 | 167.40 |
| | 116.80 | | 153.10 | | 159.30 | | 166.90 | |
| | 116.90 | | 152.70 | | 160.00 | | 165.00 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 7 | 112.60 | 110.07 | 133.70 | 129.73 | 138.30 | 134.13 | 138.00 | 139.10 |
| | 109.60 | | 129.10 | | 131.70 | | 140.30 | |
| | 108.00 | | 126.40 | | 132.40 | | 139.00 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 9 | 108.30 | 105.33 | 136.30 | 135.90 | 142.80 | 141.67 | 147.50 | 144.27 |
| | 106.70 | | 137.50 | | 141.30 | | 142.90 | |
| | 101.00 | | 133.90 | | 140.90 | | 142.40 | |

ตารางที่ ก 3 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำ(ต่อ)

| ชุดทดลอง | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (มิลลิโวลต์) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 103.30 | 102.03 | 169.50 | 169.07 | 222.90 | 221.67 | 240.00 | 240.00 |
| | 101.10 | | 167.60 | | 215.00 | | 239.00 | |
| | 101.70 | | 170.10 | | 227.10 | | 241.00 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 98.10 | 97.80 | 146.20 | 142.13 | 194.70 | 191.43 | 220.20 | 217.20 |
| | 98.00 | | 140.20 | | 188.20 | | 214.40 | |
| | 97.30 | | 140.00 | | 191.40 | | 217.00 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 106.20 | 107.53 | 134.50 | 132.67 | 178.80 | 180.83 | 201.60 | 199.13 |
| | 104.10 | | 131.10 | | 181.10 | | 198.50 | |
| | 112.30 | | 132.40 | | 182.60 | | 197.30 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 109.20 | 109.33 | 125.40 | 127.63 | 177.70 | 176.27 | 184.60 | 182.13 |
| | 108.40 | | 128.80 | | 177.40 | | 182.10 | |
| | 110.40 | | 128.70 | | 173.70 | | 179.70 | |
| อีดีทีเอ+ ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 115.80 | 113.10 | 147.40 | 143.27 | 231.80 | 234.03 | 245.60 | 248.27 |
| | 114.70 | | 141.70 | | 236.70 | | 250.00 | |
| | 108.80 | | 140.70 | | 233.60 | | 249.20 | |
| อีดีทีเอ+ ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 128.40 | 126.70 | 151.30 | 149.27 | 177.60 | 173.67 | 210.40 | 209.00 |
| | 126.90 | | 147.70 | | 171.60 | | 209.00 | |
| | 124.80 | | 148.80 | | 171.80 | | 207.60 | |
| อีดีทีเอ+ ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 111.60 | 110.97 | 126.60 | 129.03 | 155.90 | 156.40 | 187.00 | 186.20 |
| | 111.30 | | 127.70 | | 155.60 | | 183.40 | |
| | 110.00 | | 132.80 | | 157.70 | | 188.20 | |
| อีดีทีเอ+ ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 114.50 | 112.80 | 108.40 | 112.03 | 148.30 | 148.50 | 170.30 | 167.17 |
| | 111.70 | | 112.40 | | 149.00 | | 167.20 | |
| | 112.20 | | 115.30 | | 148.20 | | 164.00 | |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

## 2. ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในดิน

### 2.1 ค่าพีเอชในดิน (pH)

ตารางที่ ก4 ค่าพีเอชในดิน

| ชุดทดลอง | ค่าพีเอช | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ชุดควบคุม 1 | 7.28 | 7.32 | 7.34 | 7.48 | 7.51 | 7.54 | 7.69 | 7.61 |
| | 7.19 | | 7.34 | | 7.57 | | 7.58 | |
| | 7.48 | | 7.75 | | 7.53 | | 7.58 | |
| ชุดควบคุม 2 | 6.40 | 6.43 | 6.54 | 6.55 | 6.60 | 6.54 | 6.82 | 6.85 |
| | 6.30 | | 6.54 | | 6.51 | | 6.84 | |
| | 6.59 | | 6.59 | | 6.51 | | 6.88 | |
| ชุดควบคุม 3 | 6.35 | 6.38 | 6.54 | 6.61 | 6.55 | 6.58 | 6.71 | 6.65 |
| | 6.43 | | 6.54 | | 6.55 | | 6.82 | |
| | 6.34 | | 6.74 | | 6.64 | | 6.42 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 4 | 4.24 | 4.26 | 4.53 | 4.58 | 4.41 | 4.42 | 4.80 | 4.74 |
| | 4.27 | | 4.53 | | 4.45 | | 4.71 | |
| | 4.28 | | 4.69 | | 4.41 | | 4.71 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 5 | 5.14 | 5.16 | 5.38 | 5.35 | 5.55 | 5.53 | 5.64 | 5.61 |
| | 5.17 | | 5.37 | | 5.55 | | 5.62 | |
| | 5.18 | | 5.31 | | 5.50 | | 5.57 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 7 | 7.19 | 7.17 | 7.18 | 7.21 | 7.33 | 7.39 | 7.42 | 7.48 |
| | 7.19 | | 7.17 | | 7.37 | | 7.52 | |
| | 7.13 | | 7.24 | | 7.48 | | 7.48 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 9 | 9.29 | 9.25 | 9.36 | 9.33 | 9.42 | 9.45 | 9.40 | 9.42 |
| | 9.23 | | 9.32 | | 9.44 | | 9.39 | |
| | 9.23 | | 9.31 | | 9.50 | | 9.49 | |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก4 ค่าพีเอชในดิน (ต่อ)

| ชุดทดลอง | ค่าความพีเอช | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 4.08 | 4.18 | 4.22 | 4.34 | 4.64 | 4.44 | 4.78 | 4.71 |
| | 4.18 | | 4.42 | | 4.33 | | 4.61 | |
| | 4.28 | | 4.39 | | 4.34 | | 4.73 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 5.29 | 5.32 | 5.35 | 5.52 | 5.51 | 5.56 | 5.40 | 5.60 |
| | 5.28 | | 5.85 | | 5.47 | | 5.61 | |
| | 5.37 | | 5.35 | | 5.70 | | 5.80 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 7.16 | 7.19 | 7.29 | 7.36 | 7.22 | 7.26 | 7.49 | 7.42 |
| | 7.16 | | 7.47 | | 7.23 | | 7.30 | |
| | 7.27 | | 7.31 | | 7.32 | | 7.46 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 9.00 | 9.13 | 9.14 | 9.15 | 9.22 | 9.19 | 9.29 | 9.43 |
| | 9.10 | | 9.19 | | 9.23 | | 9.52 | |
| | 9.29 | | 9.14 | | 9.11 | | 9.46 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 4.06 | 4.13 | 4.21 | 4.20 | 4.54 | 4.51 | 4.84 | 4.70 |
| | 4.05 | | 4.20 | | 4.44 | | 4.52 | |
| | 4.26 | | 4.19 | | 4.54 | | 4.74 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 5.16 | 5.43 | 5.22 | 5.31 | 5.47 | 5.55 | 5.70 | 5.63 |
| | 5.27 | | 5.30 | | 5.40 | | 5.50 | |
| | 5.86 | | 5.41 | | 5.78 | | 5.69 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 7.07 | 7.07 | 7.12 | 7.15 | 7.21 | 7.18 | 7.16 | 7.30 |
| | 7.08 | | 7.20 | | 7.22 | | 7.33 | |
| | 7.07 | | 7.12 | | 7.11 | | 7.42 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 9.27 | 9.19 | 9.02 | 9.12 | 9.34 | 9.21 | 9.41 | 9.44 |
| | 9.15 | | 9.12 | | 9.24 | | 9.51 | |
| | 9.15 | | 9.22 | | 9.05 | | 9.41 | |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

**2.2 ค่าการนำไฟฟ้าในดิน (EC)**

ตารางที่ ก5 ค่าการนำไฟฟ้าในดิน

| ชุดทดลอง | ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ชุดควบคุม 1 | 389.10 | 390.18 | 282.15 | 280.81 | 299.82 | 300.19 | 306.76 | 309.53 |
| | 391.21 | | 280.11 | | 298.74 | | 311.35 | |
| | 390.24 | | 280.16 | | 302.01 | | 310.48 | |
| ชุดควบคุม 2 | 355.92 | 357.62 | 318.20 | 318.02 | 362.82 | 363.86 | 374.10 | 375.22 |
| | 361.10 | | 320.06 | | 363.00 | | 379.11 | |
| | 355.84 | | 315.79 | | 365.77 | | 372.44 | |
| ชุดควบคุม 3 | 351.42 | 350.55 | 385.41 | 386.74 | 431.26 | 432.31 | 401.30 | 401.88 |
| | 350.75 | | 388.45 | | 434.33 | | 399.35 | |
| | 349.48 | | 386.37 | | 431.35 | | 405.00 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 4 | 447.20 | 447.14 | 504.22 | | 535.78 | 536.92 | 575.84 | 575.95 |
| | 448.11 | | 501.24 | | 540.12 | | 578.85 | |
| | 446.12 | | 504.26 | | 534.86 | | 573.16 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 5 | 428.04 | 428.35 | 435.47 | 435.01 | 470.22 | 472.54 | 480.82 | 483.76 |
| | 429.00 | | 435.35 | | 472.24 | | 483.26 | |
| | 428.01 | | 434.22 | | 475.17 | | 487.19 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 7 | 344.52 | 345.82 | 323.43 | 327.78 | 349.89 | 352.47 | 372.44 | 370.22 |
| | 344.40 | | 330.44 | | 355.32 | | 368.48 | |
| | 348.53 | | 329.48 | | 352.21 | | 369.73 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 9 | 463.09 | 467.71 | 386.26 | 382.89 | 420.45 | 421.18 | 479.39 | 479.26 |
| | 469.02 | | 380.22 | | 423.04 | | 480.02 | |
| | 471.01 | | 382.19 | | 420.06 | | 478.38 | |

ตารางที่ ก5 ค่าการนำไฟฟ้าในดิน (ต่อ)

| ชุดทดลอง | ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 427.87 | 427.83 | 438.18 | 439.17 | 472.10 | 469.01 | 490.11 | 491.09 |
| | 425.80 | | 440.15 | | 464.82 | | 488.15 | |
| | 429.82 | | 439.17 | | 470.11 | | 495.00 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 373.11 | 374.20 | 370.27 | 372.23 | 401.23 | 400.74 | 387.04 | 382.67 |
| | 373.23 | | 371.23 | | 405.21 | | 382.19 | |
| | 376.26 | | 375.19 | | 395.78 | | 378.78 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 348.35 | 350.49 | 349.33 | 352.67 | 374.43 | 371.38 | 393.22 | 391.38 |
| | 352.02 | | 353.32 | | 372.46 | | 389.66 | |
| | 351.11 | | 355.36 | | 367.26 | | 391.25 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 378.00 | 375.01 | 362.20 | 360.53 | 379.29 | 378.76 | 401.04 | 398.53 |
| | 373.01 | | 360.22 | | 380.28 | | 395.28 | |
| | 374.02 | | 359.18 | | 376.72 | | 399.27 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 402.21 | 406.22 | 386.43 | 387.33 | 425.24 | 425.35 | 450.20 | 449.87 |
| | 409.22 | | 390.01 | | 427.45 | | 449.21 | |
| | 407.22 | | 385.55 | | 423.37 | | 450.19 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 388.24 | 390.60 | 404.29 | 406.63 | 435.22 | 433.54 | 453.35 | 451.84 |
| | 394.28 | | 410.40 | | 434.20 | | 452.29 | |
| | 389.29 | | 405.21 | | 431.19 | | 449.87 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 345.12 | 341.46 | 324.23 | 326.50 | 378.81 | 379.23 | 380.11 | 380.44 |
| | 338.11 | | 325.25 | | 381.21 | | 381.12 | |
| | 341.16 | | 330.01 | | 377.66 | | 380.10 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 375.11 | 372.42 | 311.21 | 311.69 | 349.49 | 350.13 | 378.89 | 378.20 |
| | 370.09 | | 308.82 | | 353.18 | | 379.69 | |
| | 372.05 | | 315.05 | | 347.72 | | 376.02 | |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

**2.3 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในดิน (ORP)**

ตารางที่ ก6 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในดิน

| ชุดทดลอง | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (มิลลิโวลต์) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ชุดควบคุม 1 | 85.70 | 88.47 | 71.90 | 71.40 | 88.00 | 89.67 | 73.80 | 74.90 |
| | 88.90 | | 70.60 | | 90.00 | | 74.90 | |
| | 90.80 | | 71.70 | | 91.00 | | 76.00 | |
| ชุดควบคุม 2 | 83.10 | 83.03 | 79.40 | 78.83 | 85.20 | 85.47 | 85.50 | 83.33 |
| | 81.10 | | 78.00 | | 86.10 | | 80.70 | |
| | 84.90 | | 79.10 | | 85.10 | | 83.80 | |
| ชุดควบคุม 3 | 86.90 | 86.90 | 76.80 | 75.93 | 89.10 | 90.17 | 80.00 | 80.50 |
| | 85.60 | | 75.40 | | 90.10 | | 80.20 | |
| | 88.20 | | 75.60 | | 91.30 | | 81.30 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 4 | 129.00 | 124.77 | 102.50 | 104.07 | 131.20 | 130.90 | 129.00 | 126.57 |
| | 119.90 | | 104.70 | | 130.40 | | 125.30 | |
| | 125.40 | | 105.00 | | 131.10 | | 125.40 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 5 | 116.80 | 114.57 | 103.10 | 102.10 | 121.00 | 120.27 | 125.00 | 123.47 |
| | 111.40 | | 102.20 | | 119.00 | | 124.80 | |
| | 115.50 | | 101.00 | | 120.80 | | 120.60 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 7 | 101.90 | 102.67 | 88.00 | 87.20 | 104.90 | 105.17 | 103.00 | 102.77 |
| | 102.40 | | 87.60 | | 104.40 | | 102.10 | |
| | 102.20 | | 86.00 | | 106.20 | | 103.20 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 9 | 92.70 | 94.43 | 87.20 | 85.43 | 95.00 | 95.80 | 96.70 | 98.73 |
| | 95.80 | | 85.00 | | 96.10 | | 99.30 | |
| | 94.80 | | 84.10 | | 96.30 | | 100.20 | |

ตารางที่ ก6 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในดิน (ต่อ)

| ชุดทดลอง | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (มิลลิโวลต์) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 85.60 | 86.40 | 92.20 | 92.70 | 87.40 | 88.63 | 98.40 | 100.07 |
| | 84.10 | | 93.50 | | 89.20 | | 100.00 | |
| | 89.50 | | 92.40 | | 89.30 | | 101.80 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 79.90 | 81.00 | 91.20 | 90.87 | 83.60 | 84.30 | 95.10 | 94.70 |
| | 82.10 | | 90.00 | | 85.50 | | 93.10 | |
| | 81.00 | | 91.40 | | 83.30 | | 95.90 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 83.40 | 83.60 | 92.40 | 91.13 | 88.20 | 87.63 | 92.10 | 92.13 |
| | 84.10 | | 90.00 | | 88.10 | | 91.20 | |
| | 83.30 | | 91.00 | | 86.60 | | 93.10 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 81.20 | 83.13 | 83.60 | 83.27 | 86.70 | 83.60 | 88.10 | 85.83 |
| | 83.30 | | 82.50 | | 81.80 | | 84.00 | |
| | 84.90 | | 83.70 | | 82.30 | | 85.40 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 91.70 | 93.00 | 81.30 | 80.53 | 95.40 | 96.27 | 89.20 | 87.47 |
| | 92.00 | | 80.20 | | 96.00 | | 87.20 | |
| | 95.30 | | 80.10 | | 97.40 | | 86.00 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 90.20 | 90.83 | 86.90 | 86.67 | 94.30 | 93.20 | 91.10 | 91.50 |
| | 91.20 | | 87.40 | | 92.20 | | 92.00 | |
| | 91.10 | | 85.70 | | 93.10 | | 91.40 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 85.90 | 85.03 | 77.40 | 78.63 | 87.90 | 87.10 | 79.80 | 81.93 |
| | 85.70 | | 80.30 | | 86.10 | | 82.80 | |
| | 83.50 | | 78.20 | | 87.30 | | 83.20 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 85.40 | 86.03 | 85.70 | 85.07 | 82.40 | 82.83 | 89.10 | 91.10 |
| | 85.80 | | 84.20 | | 83.00 | | 91.30 | |
| | 86.90 | | 85.30 | | 83.10 | | 92.90 | |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

**3. ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา**

**3.1 ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา**

ตารางที่ ก7 ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา

| ชุดทดลอง | ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ชุดควบคุม 1 | 5.60 | 6.03 | 7.60 | 7.70 | 9.50 | 8.73 | 9.00 | 9.50 |
| | 6.20 | | 7.20 | | 8.20 | | 10.20 | |
| | 6.30 | | 8.30 | | 8.50 | | 9.30 | |
| ชุดควบคุม 2 | 28.80 | 27.17 | 25.00 | 24.57 | 23.70 | 23.97 | 9.80 | 9.80 |
| | 27.70 | | 24.10 | | 24.00 | | 9.00 | |
| | 25.00 | | 24.60 | | 24.20 | | 10.60 | |
| ชุดควบคุม 3 | 29.00 | 28.57 | 24.00 | 23.83 | 22.30 | 22.30 | 18.10 | 18.23 |
| | 28.30 | | 24.00 | | 22.80 | | 18.20 | |
| | 28.40 | | 23.50 | | 21.80 | | 18.40 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 4 | 47.80 | 47.00 | 34.70 | 34.70 | 23.30 | 24.37 | 11.10 | 10.70 |
| | 47.00 | | 32.80 | | 24.40 | | 10.90 | |
| | 46.20 | | 36.60 | | 25.40 | | 10.10 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 5 | 62.50 | 62.53 | 46.70 | 47.87 | 33.40 | 33.37 | 21.10 | 21.23 |
| | 63.30 | | 47.50 | | 32.10 | | 22.40 | |
| | 61.80 | | 49.40 | | 34.60 | | 20.20 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 7 | 54.70 | 54.73 | 34.20 | 35.17 | 28.20 | 31.77 | 20.40 | 20.37 |
| | 57.20 | | 37.40 | | 27.50 | | 20.20 | |
| | 52.30 | | 33.90 | | 28.80 | | 20.50 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 9 | 46.80 | 46.83 | 31.20 | 31.87 | 31.80 | 28.17 | 11.70 | 11.33 |
| | 47.10 | | 33.30 | | 32.30 | | 11.00 | |
| | 46.60 | | 31.10 | | 31.20 | | 11.30 | |

ตารางที่ ก7 ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา (ต่อ)

| ชุดทดลอง | ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 98.90 | 98.90 | 78.60 | 80.27 | 55.10 | 54.20 | 29.50 | 25.87 |
| | 98.20 | | 81.00 | | 53.50 | | 22.20 | |
| | 99.60 | | 81.20 | | 54.00 | | 25.90 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 61.20 | 61.17 | 55.10 | 58.00 | 40.30 | 40.90 | 19.60 | 19.57 |
| | 62.10 | | 57.30 | | 40.00 | | 19.70 | |
| | 60.20 | | 61.60 | | 42.40 | | 19.40 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 28.90 | 28.80 | 25.00 | 24.30 | 20.20 | 23.43 | 20.10 | 20.03 |
| | 29.20 | | 23.90 | | 26.00 | | 19.20 | |
| | 28.30 | | 24.00 | | 24.10 | | 20.80 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 38.60 | 38.57 | 25.00 | 26.27 | 23.70 | 25.27 | 19.10 | 19.10 |
| | 36.90 | | 27.90 | | 25.20 | | 19.20 | |
| | 40.20 | | 25.90 | | 26.90 | | 19.00 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 61.00 | 60.10 | 77.00 | 77.33 | 107.80 | 107.13 | 86.20 | 83.67 |
| | 56.90 | | 79.30 | | 105.90 | | 82.60 | |
| | 62.40 | | 75.70 | | 107.70 | | 82.20 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 60.20 | 69.33 | 90.10 | 89.20 | 112.60 | 112.73 | 99.10 | 98.13 |
| | 70.90 | | 88.20 | | 112.90 | | 95.90 | |
| | 76.90 | | 89.30 | | 112.70 | | 99.40 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 30.50 | 31.30 | 55.80 | 53.23 | 71.40 | 73.47 | 75.40 | 73.97 |
| | 32.40 | | 52.80 | | 72.00 | | 73.40 | |
| | 31.00 | | 51.10 | | 77.00 | | 72.60 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 26.80 | 28.57 | 48.40 | 46.87 | 52.80 | 56.97 | 61.20 | 64.03 |
| | 29.00 | | 45.90 | | 60.30 | | 66.20 | |
| | 29.90 | | 46.30 | | 57.80 | | 64.70 | |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

### 3.2 ปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา

ตารางที่ ก8 ปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา

| ชุดทดลอง | ปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ชุดควบคุม 1 | 1.00 | 1.13 | 1.50 | 1.50 | 1.90 | 2.10 | 2.50 | 2.47 |
| | 1.40 | | 1.90 | | 2.10 | | 2.30 | |
| | 1.00 | | 1.10 | | 2.30 | | 2.60 | |
| ชุดควบคุม 2 | 2.00 | 1.83 | 2.00 | 2.13 | 4.60 | 3.60 | 4.10 | 4.37 |
| | 1.90 | | 2.10 | | 2.80 | | 4.70 | |
| | 1.60 | | 2.30 | | 3.40 | | 4.30 | |
| ชุดควบคุม 3 | 2.00 | 1.87 | 2.10 | 2.33 | 5.00 | 4.57 | 5.80 | 5.40 |
| | 1.90 | | 2.30 | | 4.20 | | 5.20 | |
| | 1.70 | | 2.60 | | 4.50 | | 5.20 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 4 | 4.00 | 3.83 | 5.00 | 5.00 | 5.70 | 5.80 | 7.60 | 7.43 |
| | 3.70 | | 5.10 | | 5.80 | | 7.30 | |
| | 3.80 | | 4.90 | | 5.90 | | 7.40 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 5 | 4.50 | 4.50 | 6.40 | 6.50 | 8.70 | 8.67 | 10.10 | 10.23 |
| | 4.60 | | 6.70 | | 8.80 | | 10.60 | |
| | 4.40 | | 6.40 | | 8.50 | | 10.00 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 7 | 3.60 | 3.60 | 4.00 | 4.03 | 4.70 | 4.70 | 7.50 | 7.33 |
| | 3.50 | | 3.90 | | 4.40 | | 7.20 | |
| | 3.70 | | 4.20 | | 5.00 | | 7.30 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 9 | 3.90 | 3.90 | 6.10 | 6.40 | 6.70 | 6.90 | 7.80 | 8.30 |
| | 4.00 | | 6.60 | | 7.30 | | 8.80 | |
| | 3.80 | | 6.50 | | 6.70 | | 8.30 | |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก8 ปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ(ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา (ต่อ)

| ชุดทดลอง | ปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 7.30 | 7.30 | 9.70 | 9.37 | 13.10 | 12.90 | 11.40 | 11.37 |
| | 7.00 | | 9.00 | | 12.60 | | 10.80 | |
| | 7.60 | | 9.40 | | 13.00 | | 11.90 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 4.40 | 4.43 | 7.00 | 6.80 | 9.10 | 9.30 | 10.20 | 10.20 |
| | 4.00 | | 6.70 | | 9.50 | | 9.80 | |
| | 4.90 | | 6.70 | | 9.30 | | 10.60 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 5.10 | 5.07 | 6.70 | 6.77 | 7.40 | 7.90 | 8.20 | 8.20 |
| | 5.00 | | 6.80 | | 8.30 | | 8.40 | |
| | 5.10 | | 6.80 | | 8.00 | | 8.00 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 3.50 | 3.43 | 4.10 | 4.47 | 6.10 | 6.13 | 6.60 | 6.60 |
| | 3.40 | | 4.90 | | 6.40 | | 6.90 | |
| | 3.40 | | 4.40 | | 5.90 | | 6.30 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 7.00 | 7.13 | 9.90 | 10.03 | 11.50 | 11.23 | 14.60 | 14.23 |
| | 7.30 | | 10.00 | | 11.40 | | 14.00 | |
| | 7.10 | | 10.20 | | 10.80 | | 14.10 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 6.10 | 6.27 | 9.00 | 9.37 | 9.70 | 9.87 | 11.00 | 11.00 |
| | 6.80 | | 9.50 | | 1010 | | 10.80 | |
| | 5.90 | | 9.60 | | 9.80 | | 11.20 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 5.40 | 5.63 | 8.60 | 8.43 | 8.40 | 8.57 | 9.70 | 9.47 |
| | 5.50 | | 8.70 | | 9.00 | | 9.30 | |
| | 6.00 | | 8.00 | | 8.30 | | 9.40 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 4.80 | 4.70 | 5.90 | 6.23 | 8.60 | 8.30 | 8.00 | 8.60 |
| | 4.30 | | 6.50 | | 8.10 | | 8.70 | |
| | 5.00 | | 6.30 | | 8.20 | | 9.10 | |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

**4. ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน**

ตารางที่ ก9 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน

| ชุดทดลอง | ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ชุดควบคุม 1 | 69.00 | 70.47 | 67.80 | 68.10 | 68.30 | 69.40 | 62.00 | 63.80 |
| | 70.30 | | 70.60 | | 68.60 | | 67.20 | |
| | 72.10 | | 65.90 | | 71.30 | | 62.20 | |
| ชุดควบคุม 2 | 68.90 | 68.67 | 71.40 | 66.53 | 61.40 | 65.53 | 60.00 | 62.13 |
| | 66.20 | | 65.10 | | 68.80 | | 59.60 | |
| | 70.90 | | 63.10 | | 66.40 | | 66.80 | |
| ชุดควบคุม 3 | 70.30 | 68.80 | 60.30 | 62.10 | 60.50 | 60.43 | 61.30 | 61.17 |
| | 68.90 | | 63.50 | | 60.40 | | 61.90 | |
| | 67.20 | | 62.50 | | 60.40 | | 60.30 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 4 | 51.90 | 52.70 | 48.10 | 56.60 | 57.23 | 64.85 | 47.70 | 51.70 |
| | 52.90 | | 55.00 | | 64.30 | | 54.90 | |
| | 53.30 | | 58.20 | | 65.40 | | 52.50 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 5 | 48.60 | 47.33 | 55.60 | 55.83 | 62.40 | 62.80 | 69.10 | 73.30 |
| | 46.50 | | 57.20 | | 63.50 | | 76.40 | |
| | 46.90 | | 54.70 | | 62.50 | | 74.40 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 7 | 52.90 | 52.67 | 63.30 | 62.63 | 63.60 | 64.57 | 64.30 | 64.83 |
| | 52.80 | | 62.50 | | 65.80 | | 67.60 | |
| | 52.30 | | 62.10 | | 64.30 | | 62.60 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 9 | 55.90 | 54.17 | 61.80 | 56.65 | 63.90 | 63.33 | 59.10 | 59.87 |
| | 58.80 | | 56.40 | | 64.10 | | 60.10 | |
| | 47.80 | | 56.90 | | 62.00 | | 59.80 | |

ตารางที่ ก9 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน (ต่อ)

| ชุดทดลอง | ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 51.40 | 50.67 | 59.30 | 59.00 | 59.80 | 59.03 | 59.70 | 57.13 |
| | 50.50 | | 59.10 | | 58.50 | | 60.10 | |
| | 50.10 | | 58.60 | | 58.80 | | 59.80 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 49.00 | 53.47 | 60.60 | 59.60 | 63.90 | 62.83 | 55.10 | 57.13 |
| | 55.50 | | 60.40 | | 61.80 | | 57.50 | |
| | 55.90 | | 57.80 | | 62.80 | | 58.80 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 53.00 | 54.07 | 61.90 | 61.23 | 60.50 | 60.07 | 59.40 | 58.70 |
| | 54.40 | | 61.60 | | 59.20 | | 58.70 | |
| | 54.80 | | 60.20 | | 60.50 | | 58.00 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 56.10 | 54.43 | 61.00 | 59.23 | 55.20 | 55.67 | 59.90 | 59.57 |
| | 5250 | | 60.80 | | 56.60 | | 58.60 | |
| | 54.70 | | 55.90 | | 55.20 | | 60.20 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 53.80 | 53.43 | 52.50 | 53.57 | 49.70 | 49.77 | 57.60 | 55.83 |
| | 53.40 | | 54.90 | | 50.10 | | 56.00 | |
| | 53.10 | | 53.30 | | 49.50 | | 53.90 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 50.50 | 51.20 | 46.70 | 46.10 | 49.60 | 47.70 | 50.90 | 51.00 |
| | 51.40 | | 45.80 | | 49.00 | | 51.60 | |
| | 51.70 | | 45.80 | | 44.50 | | 50.50 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 49.80 | 52.10 | 51.40 | 51.17 | 59.40 | 53.47 | 55.60 | 54.93 |
| | 52.60 | | 50.70 | | 50.30 | | 54.50 | |
| | 53.90 | | 51.40 | | 50.70 | | 54.70 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 50.20 | 45.00 | 57.90 | 56.47 | 50.10 | 50.23 | 53.10 | 53.03 |
| | 40.50 | | 55.50 | | 50.20 | | 53.60 | |
| | 44.30 | | 56.00 | | 50.40 | | 52.40 | |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

**5. ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำ**

ตารางที่ ก10 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำ

| ชุดทดลอง | ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ชุดควบคุม 1 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.01 | 0.03 |
| | 0.05 | | 0.05 | | 0.05 | | 0.05 | |
| | 0.05 | | 0.05 | | 0.05 | | 0.04 | |
| ชุดควบคุม 2 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.01 | 0.02 |
| | 0.04 | | 0.04 | | 0.04 | | 0.02 | |
| | 0.05 | | 0.02 | | 0.04 | | 0.01 | |
| ชุดควบคุม 3 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.04 | 0.04 |
| | 0.05 | | 0.07 | | 0.07 | | 0.03 | |
| | 0.06 | | 0.05 | | 0.05 | | 0.04 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 4 | 0.04 | 0.03 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.02 | 0.02 |
| | 0.03 | | <0.01 | | <0.01 | | 0.01 | |
| | 0.03 | | <0.01 | | <0.01 | | 0.02 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 5 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 |
| | 0.02 | | 0.02 | | <0.01 | | <0.01 | |
| | 0.02 | | 0.04 | | <0.01 | | <0.01 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 7 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.04 | 0.03 |
| | 0.04 | | <0.01 | | <0.01 | | 0.04 | |
| | 0.02 | | <0.01 | | <0.01 | | 0.02 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 9 | 0.04 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.03 | 0.04 |
| | 0.01 | | 0.02 | | <0.01 | | 0.05 | |
| | 0.04 | | 0.01 | | <0.01 | | 0.03 | |

ตารางที่ ก10 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำ (ต่อ)

| ชุดทดลอง | ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 0.05 | 0.04 | <0.01 | <0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.01 | 0.03 |
| | 0.04 | | <0.01 | | 0.01 | | 0.03 | |
| | 0.02 | | <0.01 | | 0.05 | | 0.05 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 20.01 | 0.07 | 0.05 |
| | 0.04 | | 0.03 | | 0.01 | | 0.03 | |
| | 0.02 | | 0.02 | | 0.01 | | 0.04 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 0.04 | 0.05 | 0.03 | 0.02 | 0.05 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| | 0.07 | | 0.01 | | 0.02 | | 0.03 | |
| | 0.04 | | 0.01 | | 0.01 | | 0.02 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 0.04 | 0.06 | 0.02 | 0.02 | <0.01 | <0.01 | 0.04 | 0.03 |
| | 0.07 | | 0.03 | | <0.01 | | 0.02 | |
| | 0.06 | | 0.02 | | <0.01 | | 0.04 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 0.04 | 0.04 | <0.01 | <0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.03 |
| | 0.03 | | <0.01 | | 0.02 | | 0.04 | |
| | 0.04 | | <0.01 | | 0.03 | | 0.05 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | <0.01 | <0.01 | <0.01 |
| | 0.02 | | 0.02 | | 0.02 | | <0.01 | |
| | 0.03 | | 0.03 | | <0.01 | | <0.01 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 0.05 | 0.04 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.02 | 0.03 |
| | 0.04 | | <0.01 | | <0.01 | | 0.03 | |
| | 0.02 | | <0.01 | | <0.01 | | 0.04 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 0.06 | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| | 0.04 | | <0.01 | | 0.01 | | 0.02 | |
| | 0.05 | | <0.01 | | 0.02 | | 0.02 | |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

**6. ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน**

ตารางที่ ก11 ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน

| ชุดทดลอง | ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ชุดควบคุม 1 | 3.26 | 3.36 | 4.00 | 4.03 | 5.10 | 5.05 | 5.65 | 5.75 |
| | 3.16 | | 3.98 | | 4.95 | | 5.79 | |
| | 3.66 | | 4.11 | | 5.09 | | 5.80 | |
| ชุดควบคุม 2 | 5.21 | 5.31 | 4.50 | 4.70 | 3.45 | 3.55 | 2.99 | 3.06 |
| | 5.50 | | 4.76 | | 3.59 | | 3.19 | |
| | 5.24 | | 4.83 | | 3.60 | | 3.01 | |
| ชุดควบคุม 3 | 6.00 | 6.07 | 5.50 | 5.65 | 5.22 | 4.99 | 4.30 | 4.41 |
| | 5.96 | | 5.56 | | 4.97 | | 4.26 | |
| | 6.24 | | 5.89 | | 4.79 | | 4.66 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 4 | 7.70 | 7.99 | 6.96 | 6.98 | 4.61 | 4.94 | 5.22 | 5.32 |
| | 8.18 | | 6.70 | | 5.51 | | 5.19 | |
| | 8.09 | | 7.28 | | 4.70 | | 5.54 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 5 | 8.10 | 8.20 | 8.30 | 8.53 | 6.50 | 6.70 | 6.33 | 5.80 |
| | 8.27 | | 7.81 | | 6.51 | | 5.48 | |
| | 8.23 | | 9.48 | | 7.09 | | 5.60 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 7 | 8.05 | 8.13 | 7.30 | 7.45 | 5.82 | 5.92 | 4.60 | 4.72 |
| | 8.18 | | 7.23 | | 6.05 | | 4.82 | |
| | 8.14 | | 7.53 | | 5.99 | | 4.73 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 9 | 7.58 | 7.41 | 7.00 | 7.10 | 5.51 | 5.47 | 8.80 | 7.81 |
| | 7.21 | | 7.08 | | 5.30 | | 6.93 | |
| | 7.44 | | 7.22 | | 5.59 | | 7.70 | |

ตารางที่ ก11 ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน (ต่อ)

| ชุดทดลอง | ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 7.77 | 7.97 | 8.90 | 9.03 | 6.00 | 6.13 | 5.89 | 5.39 |
| | 7.61 | | 8.28 | | 6.08 | | 5.09 | |
| | 8.52 | | 9.92 | | 6.32 | | 5.20 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 7.60 | 7.84 | 7.65 | 7.75 | 5.68 | 5.88 | 4.83 | 4.55 |
| | 7.95 | | 8.05 | | 5.76 | | 4.47 | |
| | 7.98 | | 7.55 | | 6.19 | | 4.35 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 7.20 | 7.27 | 6.02 | 6.48 | 5.15 | 5.00 | 4.70 | 4.83 |
| | 7.16 | | 7.14 | | 5.00 | | 4.74 | |
| | 7.44 | | 6.28 | | 4.85 | | 5.06 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 7.40 | 7.37 | 6.48 | 6.58 | 5.73 | 5.36 | 4.83 | 4.45 |
| | 7.44 | | 6.55 | | 5.06 | | 5.21 | |
| | 7.27 | | 6.71 | | 5.30 | | 4.30 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 6.98 | 7.04 | 10.07 | 9.72 | 9.40 | 9.51 | 4.79 | 4.46 |
| | 7.23 | | 9.62 | | 9.22 | | 4.23 | |
| | 6.89 | | 9.47 | | 9.91 | | 4.36 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 7.70 | 7.80 | 8.69 | 10.18 | 11.20 | 11.38 | 5.30 | 5.43 |
| | 7.59 | | 10.00 | | 10.09 | | 5.43 | |
| | 8.21 | | 11.85 | | 11.85 | | 5.56 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 7.40 | 7.66 | 8.46 | 8.56 | 9.10 | 9.27 | 4.59 | 4.29 |
| | 7.42 | | 8.79 | | 9.14 | | 4.09 | |
| | 8.15 | | 8.43 | | 9.57 | | 4.19 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 6.80 | 7.09 | 8.24 | 8.44 | 8.89 | 8.39 | 4.10 | 4.17 |
| | 7.37 | | 6.37 | | 8.09 | | 4.09 | |
| | 7.10 | | 10.71 | | 8.20 | | 4.31 | |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

**7. ผลของอีดีทีเอ และดีทีพีเอต่ออัตราการเติบโตของผักตบชวา**

ตารางที่ ก12 ผลของอีดีทีเอ และดีทีพีเอต่ออัตราการเติบโตของผักตบชวา

| ชุดทดลอง | อัตราการเติบโตของผักตบชวา (กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ชุดควบคุม 1 | 0.07 | 0.07 | 0.11 | 0.29 | 0.97 | 0.93 | 2.54 | 2.58 |
| | 0.07 | | 0.47 | | 0.88 | | 2.38 | |
| | 0.07 | | 0.28 | | 0.95 | | 2.82 | |
| ชุดควบคุม 2 | 0.05 | 0.06 | 0.65 | 0.51 | 2.11 | 1.64 | 3.58 | 3.45 |
| | 0.06 | | 0.52 | | 1.38 | | 3.37 | |
| | 0.06 | | 0.37 | | 1.42 | | 3.40 | |
| ชุดควบคุม 3 | 0.05 | 0.05 | 1.23 | 1.06 | 3.17 | 2.82 | 8.11 | 8.07 |
| | 0.05 | | 0.93 | | 2.23 | | 7.66 | |
| | 0.05 | | 1.03 | | 3.07 | | 8.44 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 4 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.14 | 1.63 | 1.84 | 2.61 | 2.92 |
| | 0.06 | | 0.19 | | 2.43 | | 3.64 | |
| | 0.06 | | 0.16 | | 1.46 | | 2.51 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 5 | 0.07 | 0.07 | 0.26 | 0.27 | 0.60 | 0.61 | 2.47 | 2.53 |
| | 0.07 | | 0.29 | | 0.78 | | 2.89 | |
| | 0.07 | | 0.25 | | 0.44 | | 2.22 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 7 | 0.06 | 0.06 | 0.34 | 0.56 | 1.33 | 1.90 | 3.44 | 4.36 |
| | 0.06 | | 0.53 | | 1.61 | | 4.64 | |
| | 0.05 | | 0.81 | | 2.75 | | 5.01 | |
| อีดีทีเอ พีเอช 9 | 0.04 | 0.04 | 1.31 | 1.57 | 2.00 | 2.52 | 6.96 | 8.38 |
| | 0.03 | | 1.81 | | 2.87 | | 9.88 | |
| | 0.04 | | 1.60 | | 2.68 | | 8.31 | |

ตารางที่ ก12 ผลของอีดีทีเอ และดีทีพีเอ ต่ออัตราการเติบโตของผักตบชวา (ต่อ)

| ชุดทดลอง | อัตราการเติบโตของผักตบชวา (กรัมต่อวันโดยน้ำหนักแห้ง) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 วัน | ค่าเฉลี่ย | 60 วัน | ค่าเฉลี่ย | 90 วัน | ค่าเฉลี่ย | 120 วัน | ค่าเฉลี่ย |
| ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 0.07 | 0.07 | 0.30 | 0.25 | 0.93 | 1.06 | 2.72 | 2.68 |
| | 0.07 | | 0.23 | | 0.93 | | 2.52 | |
| | 0.07 | | 0.22 | | 1.33 | | 2.80 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 0.06 | 0.06 | 0.14 | 0.28 | 1.81 | 2.04 | 4.34 | 5.26 |
| | 0.05 | | 0.07 | | 2.79 | | 7.12 | |
| | 0.06 | | 0.01 | | 1.51 | | 4.33 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 0.06 | 0.06 | 0.13 | 0.24 | 1.55 | 1.58 | 4.27 | 4.21 |
| | 0.06 | | 0.44 | | 1.97 | | 4.91 | |
| | 0.06 | | 0.16 | | 1.23 | | 3.44 | |
| ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 0.06 | 0.06 | 0.25 | 0.18 | 0.89 | 0.78 | 2.88 | 2.66 |
| | 0.07 | | 0.24 | | 0.80 | | 2.89 | |
| | 0.07 | | 0.15 | | 0.64 | | 2.20 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 4 | 0.01 | 0.01 | 0.50 | 0.45 | 2.53 | 1.73 | 3.28 | 3.27 |
| | 0.01 | | 0.17 | | 1.56 | | 2.62 | |
| | 0.02 | | 0.69 | | 1.11 | | 3.92 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 5 | 0.01 | 0.01 | 0.35 | 0.39 | 1.53 | 1.86 | 2.79 | 2.86 |
| | 0.01 | | 0.47 | | 2.36 | | 3.00 | |
| | 0.01 | | 0.36 | | 1.69 | | 2.79 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 7 | 0.01 | 0.02 | 0.50 | 0.75 | 1.68 | 1.91 | 3.38 | 4.46 |
| | 0.02 | | 0.91 | | 2.00 | | 5.74 | |
| | 0.02 | | 0.85 | | 2.06 | | 4.26 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ พีเอช 9 | 0.02 | 0.01 | 0.92 | 0.55 | 1.35 | 1.38 | 3.57 | 3.97 |
| | 0.01 | | 0.50 | | 1.14 | | 4.57 | |
| | 0.01 | | 0.22 | | 1.65 | | 3.77 | |

หมายเหตุ: ชุดควบคุม 1 = ไม่มีการเติมสารคีเลต และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 2 = มีการเติมอีดีทีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

ชุดควบคุม 3 = มีการเติมดีทีพีเอ ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่มีการปรับพีเอช

# ภาคผนวก ข

# การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

## 1. ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา

ตารางที่ ข1 ผลของอีดีทีเอ ต่อปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา

| Duncan[a] ระยะเวลาและชุดการทดลอง | N | Subset for alpha = .05 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ชุดควบคุม 1: 30 วัน | 3 | 6.03 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 60 วัน | 3 | 7.70 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 90 วัน | 3 | 8.73 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 120 วัน | 3 | 10.70 | | | | | |
| ชุดควบคุม 2: 30 วัน | 3 | | 27.17 | | | | |
| ชุดควบคุม 2: 60 วัน | 3 | | 24.57 | | | | |
| ชุดควบคุม 2: 90 วัน | 3 | | 23.97 | | | | |
| ชุดควบคุม 2: 120 วัน | 3 | 9.80 | | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 4): 30 วัน | 3 | | | 47.00 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 4): 60 วัน | 3 | | | | 34.70 | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 4): 90 วัน | 3 | | 24.37 | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 4): 120 วัน | 3 | 10.70 | 10.70 | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 5): 30 วัน | 3 | | | | | 62.53 | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 5): 60 วัน | 3 | | | | | 47.87 | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 5): 90 วัน | 3 | | | | | 33.37 | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 5): 120 วัน | 3 | | | 21.23 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 7): 30 วัน | 3 | | | | 54.73 | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 7): 60 วัน | 3 | | | | 35.17 | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 7): 90 วัน | 3 | | | | 31.77 | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 7): 120 วัน | 3 | | | 20.37 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 9): 30 วัน | 3 | | | 46.83 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 9): 60 วัน | 3 | | | 31.87 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 9): 90 วัน | 3 | | | 28.17 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 9): 120 วัน | 3 | | 11.33 | | | | |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข2 ผลของดีทีพีเอ ต่อปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา

| Duncan[a] ระยะเวลาและชุดการทดลอง | N | Subset for alpha = .05 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ชุดควบคุม 1: 30 วัน | 3 | 6.03 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 60 วัน | 3 | 7.70 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 90 วัน | 3 | 8.73 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 120 วัน | 3 | 9.50 | | | | | |
| ชุดควบคุม 3: 30 วัน | 3 | | 58.57 | | | | |
| ชุดควบคุม 3: 60 วัน | 3 | | 23.83 | | | | |
| ชุดควบคุม 3: 90 วัน | 3 | | 22.30 | | | | |
| ชุดควบคุม 3: 120 วัน | 3 | | 18.23 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 30 วัน | 3 | | | | | 98.90 | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 60 วัน | 3 | | | | 80.27 | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 90 วัน | 3 | | | | | 54.20 | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 120 วัน | 3 | | | 25.87 | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 30 วัน | 3 | | | | 61.17 | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 60 วัน | 3 | | | 58.00 | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 90 วัน | 3 | | | | 40.90 | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 120 วัน | 3 | | 19.57 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 30 วัน | 3 | | 28.80 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 60 วัน | 3 | | 24.30 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 90 วัน | 3 | | 23.43 | 23.43 | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 120 วัน | 3 | | 20.03 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 30 วัน | 3 | | | 38.57 | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 60 วัน | 3 | | 26.27 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 90 วัน | 3 | | | 25.27 | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 120 วัน | 3 | | 19.10 | | | | |

ตารางที่ ข3 ผลของอีดีทีเอ +ดีทีพีเอ ต่อปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา

| Duncan[a] ระยะเวลาและชุดการทดลอง | N | Subset for alpha = .05 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ชุดควบคุม 1: 30 วัน | 3 | 6.03 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 60 วัน | 3 | 7.70 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 90 วัน | 3 | 8.73 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 120 วัน | 3 | 9.50 | | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 30 วัน | 3 | | | 60.10 | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 60 วัน | 3 | | | | 77.33 | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 90 วัน | 3 | | | | 107.13 | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 4):120 วัน | 3 | | | | 83.67 | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 30 วัน | 3 | | | | 69.33 | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 60 วัน | 3 | | | | | 89.20 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 90 วัน | 3 | | | | | 112.73 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 5):120 วัน | 3 | | | | | 98.13 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 30 วัน | 3 | | 31.30 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 60 วัน | 3 | | | 53.23 | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 90 วัน | 3 | | | 73.47 | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 7):120 วัน | 3 | | | 73.97 | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 30 วัน | 3 | | 28.57 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 60 วัน | 3 | | 46.87 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 90 วัน | 3 | | 56.97 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 9):120 วัน | 3 | | 64.03 | | | | |

ตารางที่ ข4 ผลของอีดีทีเอ ต่อปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา

| Duncan[a] ระยะเวลาและชุดการทดลอง | N | Subset for alpha = .05 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ชุดควบคุม 1: 30 วัน | 3 | 1.13 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 60 วัน | 3 | 1.50 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 90 วัน | 3 | 2.10 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 120 วัน | 3 | 2.47 | | | | | |
| ชุดควบคุม 2: 30 วัน | 3 | | 1.83 | | | | |
| ชุดควบคุม 2: 60 วัน | 3 | | 2.13 | | | | |
| ชุดควบคุม 2: 90 วัน | 3 | | 3.60 | | | | |
| ชุดควบคุม 2: 120 วัน | 3 | | 4.37 | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 4): 30 วัน | 3 | | | 3.83 | 3.83 | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 4): 60 วัน | 3 | | | | 5.00 | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 4): 90 วัน | 3 | | | | 5.80 | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 4): 120 วัน | 3 | | | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 5): 30 วัน | 3 | | | | | 4.50 | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 5): 60 วัน | 3 | | | | | 6.50 | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 5): 90 วัน | 3 | | | | | | 8.66 |
| อีดีทีเอ (พีเอช 5): 120 วัน | 3 | | | | | 10.23 | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 7): 30 วัน | 3 | | | 3.60 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 7): 60 วัน | 3 | | | 4.03 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 7): 90 วัน | 3 | | | 4.70 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 7): 120 วัน | 3 | | | 7.33 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 9): 30 วัน | 3 | | | | 3.90 | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 9): 60 วัน | 3 | | | | | 6.40 | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 9): 90 วัน | 3 | | | | | 6.90 | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 9): 120 วัน | 3 | | | | 8.30 | | |

ตารางที่ ข5 ผลของดีทีพีเอ ต่อปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา

| Duncan[a] ระยะเวลาและชุดการทดลอง | N | Subset for alpha = .05 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ชุดควบคุม 1: 30 วัน | 3 | 1.13 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 60 วัน | 3 | 1.50 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 90 วัน | 3 | 2..10 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 120 วัน | 3 | 2.47 | | | | | |
| ชุดควบคุม 3: 30 วัน | 3 | | 1.87 | | | | |
| ชุดควบคุม 3: 60 วัน | 3 | | 2.33 | | | | |
| ชุดควบคุม 3: 90 วัน | 3 | | 4.57 | | | | |
| ชุดควบคุม 3: 120 วัน | 3 | | 5.40 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 30 วัน | 3 | | | | | | 9.37 |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 60 วัน | 3 | | | | | 9.37 | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 90 วัน | 3 | | | | | | 12.90 |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 120 วัน | 3 | | | | | | 11.37 |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 30 วัน | 3 | | | | 4.43 | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 60 วัน | 3 | | | | 6.80 | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 90 วัน | 3 | | | | | 9.30 | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 120 วัน | 3 | | | | | 10.20 | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 30 วัน | 3 | | | | | 5.07 | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 60 วัน | 3 | | | | 6.77 | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 90 วัน | 3 | | | | 7.90 | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 120 วัน | 3 | | | | 8.20 | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 30 วัน | 3 | | | 3.43 | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 60 วัน | 3 | | | 4.67 | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 90 วัน | 3 | | | 3.13 | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 120 วัน | 3 | | | 6.60 | | | |

ตารางที่ ข6 ผลของอีดีทีเอ+ดีทีพีเอ ต่อปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา

| Duncan[a] ระยะเวลาและชุดการทดลอง | N | Subset for alpha = .05 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ชุดควบคุม 1: 30 วัน | 3 | 1.13 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 60 วัน | 3 | 1.50 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 90 วัน | 3 | 2.10 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 120 วัน | 3 | 2.47 | | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 30 วัน | 3 | | | | | 7.13 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 60 วัน | 3 | | | | | 10.03 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 90 วัน | 3 | | | | 11.23 | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 4):120 วัน | 3 | | | | | 14.23 | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 30 วัน | 3 | | | | 6.27 | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 60 วัน | 3 | | | | 9.37 | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 90 วัน | 3 | | | 9.87 | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 5):120 วัน | 3 | | | | 11.00 | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 30 วัน | 3 | | | 5.63 | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 60 วัน | 3 | | | 8.43 | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 90 วัน | 3 | | 8.57 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 7):120 วัน | 3 | | | 9.47 | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 30 วัน | 3 | | 4.70 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 60 วัน | 3 | | 6.23 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 90 วัน | 3 | | 8.30 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 9):120 วัน | 3 | | | 8.60 | | | |

ตารางที่ ข7 ผลของอีดีทีเอ ต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน

| Duncan[a] ระยะเวลาและชุดการทดลอง | N | Subset for alpha = .05 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ชุดควบคุม 1: 30 วัน | 3 | 49.77 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 60 วัน | 3 | 49.43 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 90 วัน | 3 | 48.40 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 120 วัน | 3 | 47.13 | | | | | |
| ชุดควบคุม 2: 30 วัน | 3 | | | 58.67 | | | |
| ชุดควบคุม 2: 60 วัน | 3 | 53.20 | 53.20 | | | | |
| ชุดควบคุม 2: 90 วัน | 3 | 45.53 | | | | | |
| ชุดควบคุม 2: 120 วัน | 3 | 48.13 | | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 4): 30 วัน | 3 | | 52.70 | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 4): 60 วัน | 3 | 53.77 | 53.77 | 53.77 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 4): 90 วัน | 3 | | 62.31 | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 4): 120 วัน | 3 | 51.70 | | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 5): 30 วัน | 3 | 47.33 | | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 5): 60 วัน | 3 | | 55.83 | 55.83 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 5): 90 วัน | 3 | | | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 5): 120 วัน | 3 | | | 73.30 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 7): 30 วัน | 3 | | 52.67 | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 7): 60 วัน | 3 | | | | 62.63 | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 7): 90 วัน | 3 | | 62.80 | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 7): 120 วัน | 3 | | 64.83 | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 9): 30 วัน | 3 | | 54.17 | 54.17 | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 9): 60 วัน | 3 | | | 58.37 | 58.37 | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 9): 90 วัน | 3 | | 63.33 | | | | |
| อีดีทีเอ (พีเอช 9): 120 วัน | 3 | | 59.47 | | | | |

ตารางที่ ข8 ผลของดีทีพีเอ ต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน

| Duncan[a] ระยะเวลาและชุดการทดลอง | N | Subset for alpha = .05 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ชุดควบคุม 1: 30 วัน | 3 | 49.77 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 60 วัน | 3 | 49.43 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 90 วัน | 3 | 48..40 | | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 120 วัน | 3 | 47.13 | | | | | |
| ชุดควบคุม 3: 30 วัน | 3 | | | | 58.80 | | |
| ชุดควบคุม 3: 60 วัน | 3 | | 62.70 | | | | |
| ชุดควบคุม 3: 90 วัน | 3 | | | | 60.43 | | |
| ชุดควบคุม 3: 120 วัน | 3 | | 61.17 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 30 วัน | 3 | 50.67 | 50.67 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 60 วัน | 3 | | 59.00 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 90 วัน | 3 | | | 59.03 | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 120 วัน | 3 | | 59.87 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 30 วัน | 3 | | 53.47 | 53.47 | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 60 วัน | 3 | | 59.60 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 90 วัน | 3 | | | | | 62.83 | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 120 วัน | 3 | | 57.13 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 30 วัน | 3 | | 54.07 | 54.07 | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 60 วัน | 3 | | 61.23 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 90 วัน | 3 | | | 60.07 | 60.07 | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 120 วัน | 3 | | 58.70 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 30 วัน | 3 | | | 54.43 | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 60 วัน | 3 | | 59.23 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 90 วัน | 3 | | 55.67 | | | | |
| ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 120 วัน | 3 | | 59.57 | | | | |

ตารางที่ ข9 ผลของอีดีทีเอ +ดีทีพีเอ ต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน

| Duncan[a] ระยะเวลาและชุดการทดลอง | N | Subset for alpha = .05 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ชุดควบคุม 1: 30 วัน | 3 | | 49.77 | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 60 วัน | 3 | | 49.43 | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 90 วัน | 3 | 48.40 | 48.40 | | | | |
| ชุดควบคุม 1: 120 วัน | 3 | 47.13 | | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 30 วัน | 3 | | 53.43 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 60 วัน | 3 | | | 53.57 | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 4): 90 วัน | 3 | 49.77 | 49.77 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 4):120 วัน | 3 | | | 55.83 | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 30 วัน | 3 | | 51.20 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 60 วัน | 3 | 46.10 | | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 5): 90 วัน | 3 | 47.70 | | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 5):120 วัน | 3 | 51.00 | 51.00 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 30 วัน | 3 | | 52.10 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 60 วัน | 3 | | 51.17 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 7): 90 วัน | 3 | | 53.47 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 7):120 วัน | 3 | | 54.93 | 54.93 | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 30 วัน | 3 | 45.00 | | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 60 วัน | 3 | | | | 56.47 | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 9): 90 วัน | 3 | 50.23 | 50.23 | | | | |
| อีดีทีเอ+ดีทีพีเอ (พีเอช 9):120 วัน | 3 | | 53.03 | 53.03 | | | |

# ภาคผนวก ค

# สูตรคำนวณในการทดลอง

## 1. การคำนวณสารประกอบคีเลต

น้ำหนักสารประกอบแคดเมียมที่ต้องใช้ (กรัม) สามารถหาได้จากสูตร

$$\frac{A \times MW \times S}{MC}$$

เมื่อ A คือ ปริมาณของสารคีเลตที่ต้องการใช้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

S คือ ปริมาตรน้ำที่ใช้ (ลิตร)

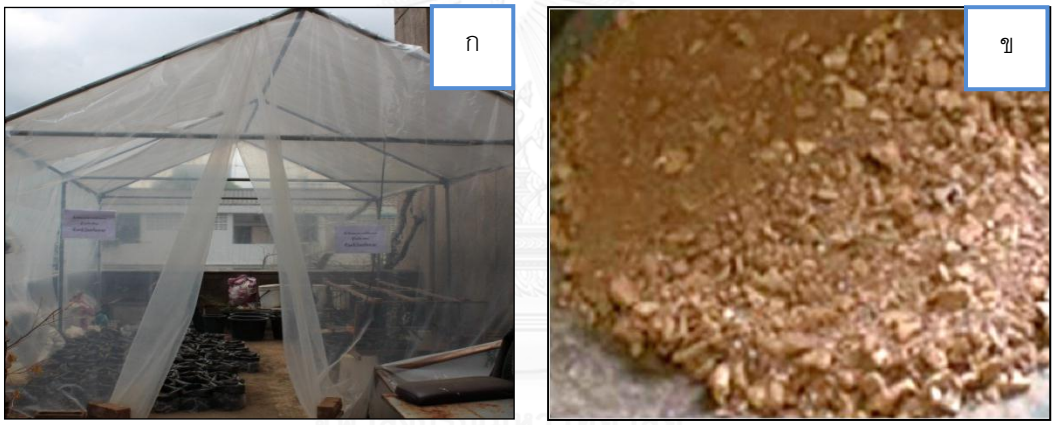
MC คือ มวลอะตอมของสารคีเลตที่ใช้ (กรัม)

MW คือ มวลโมเลกุลของสารประกอบคีเลตที่ใช้ (กรัม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

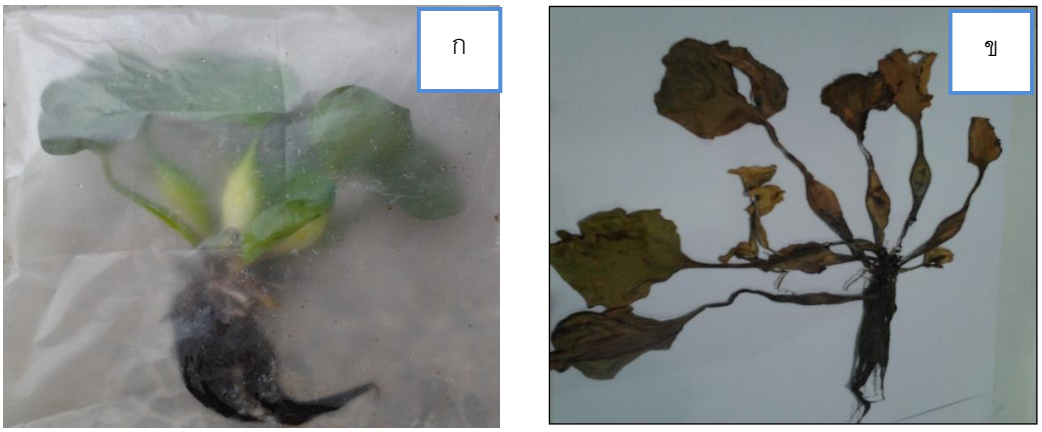
**ภาคผนวก ง**

รูปที่ ค1 ก) สถานที่เก็บผักตบชวา และ ข) การเพาะเลี้ยงผักตบชวาก่อนนำไปทดลอง

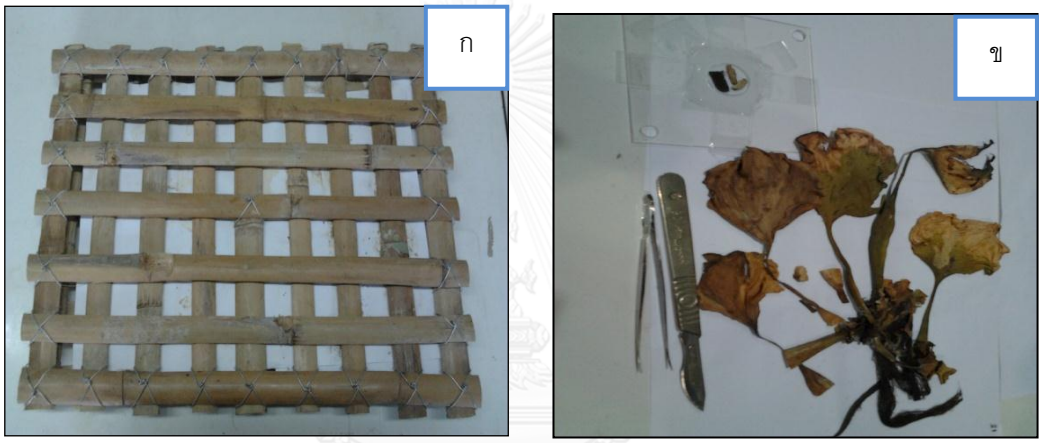



รูปที่ ค2 ก) โรงเรือนทดลอง และ ข) ตัวอย่างดินทดลอง

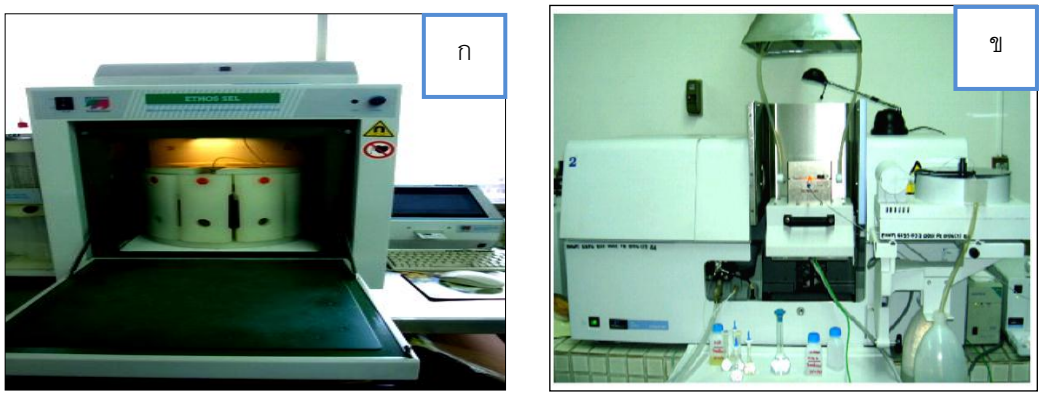
รูปที่ ค3 ก) การเตรียมน้ำและดินตะกอน และ ข) การปลูกพืชทดลอง



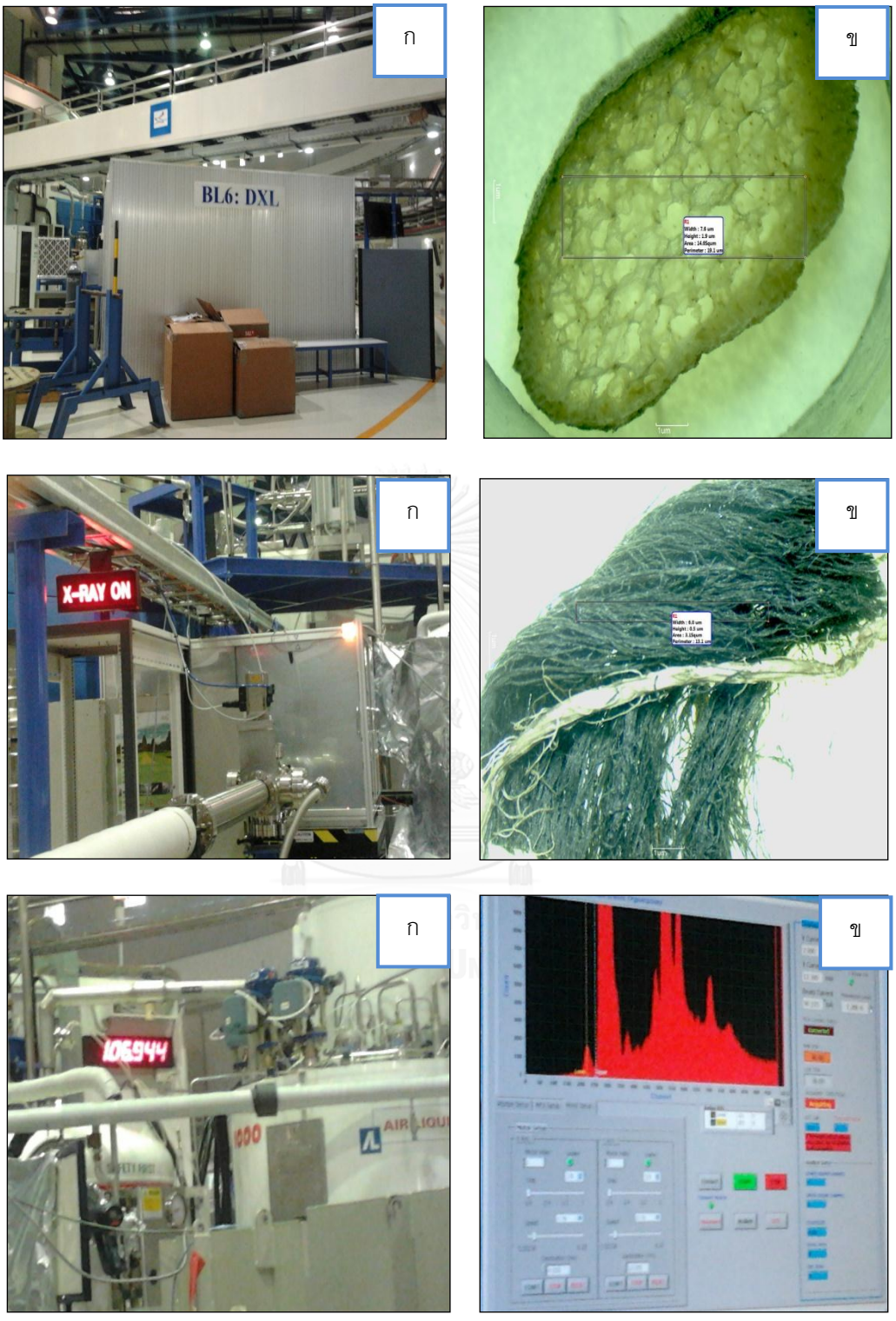

รูปที่ ค4 ก) การเก็บตัวอย่างผักตบชวา และ ข) ตัวอย่างผักตบชวาหลังอบแห้ง




รูปที่ ค5 ก) อุปกรณ์เก็บตัวอย่างพืชแบบ Herbarium และ ข) ตัวอย่างผักตบชวานำไปวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน




รูปที่ ค6 ก) เครื่องย่อยตัวอย่างพืชและน้ำ ด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) และ ข) เครื่องวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมจากตัวอย่างพืชและน้ำ (Atomic absorption spectrometer; AAS)




รูปที่ ค7 ก) สถานีทดลองระบบลำเลียงแสงที่ 6 และ ข) การตรวจวัดแสงด้วยระบบคอมพิวเตอร์

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกัลย์สุดา ปิ่นพา เกิดเมื่อวันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดสิงห์บุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2552 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554 ในระหว่างการศึกษาได้เข้าร่วมเสนอผลงานวิจัย ในการประชุมวิชาการระดับชาติ โดยได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานดังต่อไปนี้

กัลย์สุดา ปิ่นพา และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. “ผลของสารคีเลตและพีเอชต่อการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวา” ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13 จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย วันที่ 26-28 มีนาคม 2557 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รองเมือง กรุงเทพฯ.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University