ผลของอีดีทีเอและกรดซิตริกต่อการดูดดึงแคดเมียมในน้ำด้วยผักตบชวา

นายกัลปพฤกษ์ คงเมือง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF EDTA AND CITRIC ACID ON CADMIUM UPTAKE BY WATER HYACINTH

Mr. Kalpapoek Kongmuang

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอีดีทีเอและกรดซิตริกต่อการดูดดึงแคดเมียมในน้ำด้วยผักตบชวา
โดย	นายกัลปพฤกษ์ คงเมือง
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงศ์ธาริน โล่ห์ตระกูล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. อุทัย เซ็นภักดี)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กัลปพฤกษ์ คงเมือง : ผลของอีดีทีเอและกรดซิตริกต่อการดูดดึงแคดเมียมในน้ำด้วยผักตบชวา (EFFECT OF EDTA AND CITRIC ACID ON CADMIUM UPTAKE BY WATER HYACINTH) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 134 หน้า.

การศึกษาผลของอีดีทีเอ (EDTA) และกรดซิตริก (Citric acid) ต่อการดึงดูดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผักตบชวาที่มีการเติมสารละลายแคดเมียม 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุมไม่มีการเติมสารคีเลตทั้งสองชนิด 2) ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร 3) ชุดการทดลองที่เติม Citric acid ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 4) ชุดการทดลองที่เติม Citric acid ร่วมกับสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.25, 0.5 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ชนิดละเท่าๆ กัน ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน เพื่อหาปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา และปริมาณแคดเมียมในน้ำที่ใช้ในการทดลอง ผลการทดลองในทุกชุดการทดลอง พบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) รองลงมา คือ ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าสารคีเลตทั้งสองชนิดมีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา โดยในชุดที่เติม EDTA และชุดที่เติม Citric acid ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุดในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 156.7 และ 105.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งที่เวลา 15 วัน ตามลำดับ โดยในชุดที่เติม EDTA ที่เวลา 15 วัน พบว่าผักตบชวามีการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุดในส่วนราก เท่ากับ 645.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และในชุดที่เติม Citric acid ที่เวลา 75 วัน ผักตบชวามีการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากที่สุดเท่ากับ 603.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง แสดงให้เห็นว่าการเติม EDTA มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมได้ดีกว่า Citric acid สอดคล้องกับค่าศักยภาพในการสะสมทางชีวภาพของผักตบชวา (Bioconcentration factor: BCF) ที่พบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ที่ 15 วัน มีค่า BCF เฉลี่ยมากที่สุด เท่ากับ 802.5 ซึ่งมีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่เติม Citric acid ที่ 75 วัน ที่มีค่า BCF เฉลี่ยมากที่สุด เท่ากับ 682.1 นอกจากนี้การศึกษาค่า Translocation factor (TF) ยังพบว่า ชุดการทดลองที่เติม EDTA มีค่ามากกว่าชุดการทดลองที่เติม Citric acid โดยมีค่า TF เท่ากับ 0.243, 0.24 และ 0.23 ที่ 15 วัน ตามลำดับความเข้มข้น จึงสามารถสรุปได้ว่าการเติม EDTA มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวามากกว่าการเติม Citric acid

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต กัลปพฤกษ์ คงเมือง

ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

5187111920: MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: EDTA/ CITRIC ACID/ UPTAKE/ CADMIUM/ WATER HYACINTH

KALPAPOEK KONGMUANG: EFFECT OF EDTA AND CITRIC ACID ON CADMIUM UPTAKE BY WATER HYACINTH. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D., 134 pp.

The effects of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) and citric acid (CA) on cadmium (Cd) uptake by water hyacinth, (*Eichhornia crassipes*) in 0.5 mg/L Cd contaminated water were studied. The experimental design was separated into 4 groups: 1) contaminated water without chelating agent (Control), 2) contaminated water with EDTA added at concentrations of 0.5, 1 and 2 mg/L, 3) contaminated water with CA added at concentration of 0.5, 1 and 2 mg/L, and 4) contaminated water with both EDTA and CA added at concentration of 0.5, 1 and 2 mg/L. Plants were harvested at 15, 30, 45, 60, 75 and 90 days. Cd levels were measured in the water samples and two parts of the plant: shoot (stem and leaves) and root. The results showed that Cd accumulation in the shoot in all groups was significantly higher than that in the root and was ($P<0.05$). Cd concentration in plants grown in all EDTA and CA added groups was higher than that in the control samples which indicates that EDTA and CA addition inceases cadmium uptake by water hyacinth. The highest Cd concentration was found in shoot with EDTA and CA added at 2 mg/L and were 156.7 and 105.4 mg/kg at 15 days, respectively. The highest Cd concentration in root was 645.8 mg/kg in EDTA added group at 15 days and 603.2 mg/kg in CA added group at 75 days. This result implies that EDTA has more influence than CA on bioconcentration factor (BCF). The highest score of BCF for EDTA added groups was 802.5 at 15 days and for CA added groups was 682.1 at 90 days. Translocation factor (TF) of plants in EDTA added groups was 0.24, 0.24 and 0.23 at 15 days, respectively. That show EDTA added groups were more cadmium uptake effect than CA added groups.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Field of study Environmental Science Student's signature Kalpapoek Kongmuang

Academic year 2010 Advisor's signature Pantawat Sampanpanish

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ดี เนื่องด้วยความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆ ของการศึกษาด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้ช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ดียิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงศ์ธาริน โล่ห์ตระกูล และ ดร. อุทัย เซ็นภักดี ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา และสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนบางส่วนในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ปฏิบัติการในการทำงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึง คุณวลีพร คุณอารียา คุณจันทพร นักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม ที่ได้ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ นายพนัส พงศ์ผลาดิสัย นายมงคลชัย อัศวดิษฐเลิศ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการออกภาคสนาม และให้คำปรึกษา ตลอดจนบุคคลอื่นๆ ที่มิได้กล่าวถึงในที่นี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ (ร.อ. นิพนธ์ คงเมือง) คุณแม่ (นางสมคิด คงเมือง) บุคคลทุกคนในครอบครัว และนางสาวณัฐกาญจน์ ตันติธีระศักดิ์ ที่คอยช่วยเหลืออย่างมาก และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาระหว่างทำการศึกษา และให้เงินทุนสนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญภาพ ..... ฑ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 สมมุติฐาน 2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 โลหะหนัก 5
2.2 แคดเมียม 5
2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม 6
2.2.2 การใช้ประโยชน์ของแคดเมียม 7
2.2.3 แหล่งที่มาของแคดเมียมที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม 8
2.2.4 ความเป็นพิษของแคดเมียม 12
2.2.5 เกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนของแคดเมียม 16
2.3 สารคีเลต (Chelating Agent) 16
2.3.1 ความหมายของสารคีเลต 16
2.3.2 ประเภทของสารคีเลต 17
2.3.3 การใช้ประโยชน์ของสารคีเลต 17
2.3.4 ปัจจัยในการเลือกใช้สารคีเลต 18
2.3.5 สารคีเลตที่เลือกใช้ในงานวิจัย 19
1) อีดีทีเอ (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid) 19
1.1) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร EDTA 19

บทที่ หน้า

1.2) ประโยชน์ของสาร EDTA 20
1.3) การสลายตัวของสาร EDTA 20
1.4) ความเป็นพิษของสาร EDTA 21
2) กรดซิตริก (Citric acid) 22
2.1) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ CA 22
2.2) ประโยชน์ของ CA 23
2.3) การสลายตัวของ CA 23
2.4) ความเป็นพิษของ CA 23
2.4 การบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation) 24
2.4.1 ชนิดของการบำบัดโดยใช้พืช 24
2.4.2 คุณสมบัติของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัด 26
2.4.3 ข้อดีและข้อจำกัดของการบำบัดโดยใช้พืช 27
2.5 ผักตบชวา 29
2.5.1 การจำแนกชั้นทางวิทยาศาสตร์ของผักตบชวา 29
2.5.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ 30
2.5.3 องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา 33
2.5.4 การใช้ประโยชน์จากผักตบชวา 34
2.5.5 การนำผักตบชวาหลังจากกำจัดโลหะหนักแล้วมาใช้ประโยชน์ 34
2.6 กลไกการดูดดึงโลหะหนักของพืช 36
2.6.1 การดูดดึงโลหะหนักโดยรากพืช (Uptake) 36
2.6.2 การเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากสู่ส่วนต่างๆ ของพืช (Translocation) 37
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 37
2.7.1 งานวิจัยด้าน Phytoremediation 37
2.7.2 งานวิจัยด้านการใช้ผักตบชวาในการกำจัดโลหะหนัก 38
2.7.3 งานวิจัยด้านการใช้สารคีเลต 40
3 วิธีดำเนินการวิจัย 42
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 42
3.1.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกพืชทดลอง 42
3.1.2 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างพืช และน้ำ 42

บทที่ หน้า

3.1.3 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ 43
3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย 44
3.2 สถานที่ดำเนินการวิจัย 44
3.3 ระยะเวลาการวิจัย 45
3.4 การดำเนินการวิจัย 47
3.4.1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม 47
3.4.2 การศึกษาผลของสาร EDTAและ CA ต่อการดึงดูดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผักตบชวา 51
3.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 55
4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย 56
4.1 ผลการศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม 56
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำเสียสังเคราะห์ 56
1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 56
2) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) 56
3) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP) 59
4) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) 60
4.1.2 การเติบโตของผักตบชวาในน้ำเสียสังเคราะห์ 61
4.1.3 การแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมในผักตบชวา 63
4.1.4 การสะสมแคดเมียมในผักตบชวา 64
1) ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) 64
2) ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา (BCF) 67
3) เปอร์เซ็นต์การดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา 68
4.1.5 ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม 70
4.2 การศึกษาผลของ EDTA และ CA ต่อการดึงดูดแคดเมียมด้วยผักตบชวา 71
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำเสียสังเคราะห์ 71
1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 71
2) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) 72

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

3) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP) 75
4) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) 78
4.2.2 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ 80
1) ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่เติม CA 80
2) ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 81
3) ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA 82
4.2.3 ผลของ EDTA และ CA ต่อการเติบโต และการแสดงความเป็นพิษของผักตบชวา 83
1) การเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา 83
2) การเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา 85
4.2.4 ผลของ EDTA และ CA ต่อการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา 88
1) ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาเมื่อเติม CA 88
2) ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาเมื่อเติมสาร EDTA 90
3) ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาเมื่อเติม CA ร่วมกับสาร EDTA 93
4) เปรียบเทียบผลของ CA และสาร EDTA ต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวา 95
4.2.5 ผลของ EDTA และ CA ต่อศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา (Bioconcentration factor; BCF) 99
1) ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA 99
2) ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 101
3) ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ร่วมกับ CA 103
4) เปรียบเทียบผลของ EDTA และ CA ต่อศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา 104

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

4.2.6 ผลของ EDTA และ CA ต่อการลำเลียงแคดเมียม
ในผักตบชวา (Translocation factor; TF) 107
4.2.7 สมดุลมวล (Mass balance) และประสิทธิภาพของ CA
และสาร EDTA ต่อการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา) 109
1) เปอร์เซ็นต์คงเหลือของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ 110
2) ผลของ CA และสาร EDTA ต่อประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียม
ในผักตบชวา 112
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 114
5.1 สรุปผลการวิจัย 114
5.2 ข้อเสนอแนะ 117
รายการอ้างอิง 118
ภาคผนวก 126
ภาคผนวก ก 127
ภาคผนวก ข 129
ภาคผนวก ค 132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 134

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	คุณสมบัติของแคดเมียม	6
2.2	ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่พบในสิ่งมีชีวิต	13
2.3	ความเป็นพิษแบบเฉียบพลันของแคดเมียมที่มีต่อมนุษย์โดยการบริโภค	14
2.4	เกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม	16
2.5	เปอร์เซ็นต์การใช้งานของสารคีเลต ในบ้านเรือนและในโรงงานอุตสาหกรรม	18
2.6	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร EDTA	20
2.7	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร CA	22
2.8	ปริมาณการสะสมโลหะหนักในพืชที่จัดเป็น Hyperaccumulator species	27
2.9	ตัวอย่างชนิดพืชที่จัดเป็นพืช Hyperaccumulator species	27
2.10	องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา	33
3.1	วันที่ทำการทดลอง และดำเนินการเก็บตัวอย่างพืช และน้ำในเรือนทดลอง	47
3.2	ปริมาณสารประกอบแคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) ที่ใส่ลงไปในน้ำ	48
3.3	เกณฑ์การประเมินความเป็นพิษของผักตบชวาหลังจากได้รับโลหะหนักด้วยสายตา	50
3.4	ปริมาณสารประกอบอีดีทีเอไดโซเดียมซอล์ท และ ซิตริกแอซิดโมโนไฮเดรตที่ใช้	52
4.1	ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียสังเคราะห์	57
4.2	ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์	58
4.3	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น - รีดักชั่นในน้ำเสียสังเคราะห์	60
4.4	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ในน้ำเสียสังเคราะห์	61
4.5	น้ำหนักสดและเปอร์เซ็นต์การเติบโตของผักตบชวา	62
4.6	เปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษจากแคดเมียมของผักตบชวา	64
4.7	ปริมาณการสะสมแคดเมียมในผักตบชวา	66
4.8	ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา (BCF)	68
4.9	ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้ทั้งหมด	69
4.10	ค่าความเป็นกรด – ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์	72
4.11	เปรียบเทียบผลของสารคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ	97
4.12	เปรียบเทียบผลของสารคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ	98

ตาราง หน้า

4.13 ศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาเฉลี่ยทั้งต้น (BCF) 106
4.14 ค่า Translocation factor (TF) ของผักตบชวาในแต่ละชุดการทดลอง 109
4.15 สมดุลมวลของแคดเมียม (Mass balance) ในการทดลอง 111
ค1 ปริมาณแคดเมียมและประสิทธิภาพการดูดดึงของผักตบชวาในส่วนใต้น้ำ (ราก) 132
ค2 ปริมาณแคดเมียมและประสิทธิภาพการดูดดึงของผักตบชวา
ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) 133

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แหล่งที่มาของแคดเมียมที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม	9
2.2	สูตรโครงสร้างของสาร EDTA	19
2.3	สูตรโครงสร้างของ CA	22
2.4	การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation)	26
2.5	ส่วนประกอบของผักตบชวา	30
2.6	แนวทางการนำพืชที่ใช้ในการบำบัดแล้วมาใช้ประโยชน์	35
3.1	แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	46
4.1	ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์	59
4.2	ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา	65
4.3	ปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา	66
4.4	เปอร์เซ็นต์การดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา	69
4.5	ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA	74
4.6	ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA	74
4.7	ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA	75
4.8	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA	76
4.9	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA	77
4.10	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA	77
4.11	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA	78
4.12	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA	79

รูปที่ หน้า

4.13 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA 79
4.14 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA 80
4.15 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 81
4.16 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA 82
4.17 น้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA 84
4.18 น้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 84
4.19 น้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA 85
4.20 น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA 87
4.21 น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 87
4.22 น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA 87
4.23 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA 89
4.24 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA 90
4.25 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 92
4.26 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองทีเติมสาร EDTA 92
4.27 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA 94
4.28 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการ ทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA 95

รูปที่ หน้า

4.29 ค่า BCF ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA 100
4.30 ค่า BCF ส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA 100
4.31 ค่า BCF ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลอง ที่เติมสาร EDTA 102
4.32 ค่า BCF ส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 102
4.33 ค่า BCF ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA 103
4.34 ค่า BCF ส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA 104
4.35 เปอร์เซ็นต์คงเหลือของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ 112
4.36 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาในแต่ละชุดการทดลอง 113
ข1 ก) สถานที่เก็บผักตบชวา และ ข) การเพาะเลี้ยงก่อนนำไปใช้ทดลอง 129
ข2 ก) ผักตบชวาที่คัดเลือกไปใช้ทดลอง และ ข) ขนาด และความโตของพืชทดลอง 129
ข3 ก) การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ และ ข) การปลูกพืชทดลอง 129
ข4 โรงเรือนทดลอง 130
ข5 อาการแสดงความเป็นพิษจากแคดเมียมของผักตบชวาในการทดลอง 130
ข6 ก) การเก็บตัวอย่างพืช และ ข) การเก็บตัวอย่างน้ำ 131
ข7 ก) ตัวอย่างพืชที่อบ และบดละเอียดแล้ว และ ข) เครื่องชั่งสารเคมี และตัวอย่างพืช 131
ข8 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ 131

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมของประเทศไทยที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10 ต่อปี (สำนักคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจ และสังคมแห่งชาติ, 2535) ซึ่งเป็นสาเหตุอย่างหนึ่งทำให้เกิดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อมต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำ เนื่องจากแหล่งน้ำต่างๆ มีความสำคัญทางระบบนิเวศในธรรมชาติและยังเป็นแหล่งน้ำสำหรับอุปโภคและบริโภคของมนุษย์ หากแต่เมื่อมีการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำจึงมักก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อาศัยอยู่ รวมถึงประชาชนที่ใช้น้ำจากแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก ตัวอย่างเช่น จากกรณีปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมในน้ำของห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งมีการตรวจพบปริมาณแคดเมียมในน้ำสูงถึง 0.3 – 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐาน และการเหมืองแร่, 2549) ดังนั้นเมื่อมีการนำน้ำไปใช้ในการอุปโภคบริโภคจึงก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสุขภาพต่อประชาชนที่อาศัยในพื้นที่บริเวณดังกล่าว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดโลหะหนักในแหล่งน้ำให้หมดไปหรือให้เหลือน้อยที่สุดจนไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขอนามัยของประชาชนและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำมีวิธีการบำบัดหลายวิธี เช่น การใช้จุลินทรีย์ในการกำจัด (Bioremediation) การใช้วิธีทางเคมี (Chemical treatment) การใช้วิธีทางกายภาพ (Physical treatment) รวมทั้งการใช้พืช (Phytoremediation) ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน โดยการดูดดึงโลหะหนักไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชที่มีชีวิต (Green plants) วิธีการนี้จึงเป็นการใช้พืชเพื่อแก้ปัญหาการปนเปื้อนมลพิษในสิ่งแวดล้อม และถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากหรือซับซ้อน (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2548) ซึ่งได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน นอกจากนี้อาจมีการนำพืชมาแก้ปัญหาโลหะหนักที่ตกค้างหรือปนเปื้อนในน้ำร่วมกับการใช้สารคีเลต (Chelating agent) เนื่องจากสารดังกล่าวเป็นสารที่ให้ไอออนของโลหะหรือจุลธาตุที่ยึดเกาะ และรวมกันเป็นสารประกอบคีเลต ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความคงตัว และสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชได้ (ชวนพิศ แดงสวัสดิ์, 2544) และช่วยให้พืชสามารถดูดดึงโลหะหนักไว้ในส่วนต่างๆ ได้มากขึ้น

สำหรับการศึกษานี้พืชที่เลือกนำมาใช้ คือ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) เนื่องจากผักตบชวามีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม สามารถเจริญได้ดี ดูแลง่าย พบได้ทั่วไปแทบทุกภูมิภาคของ

ประเทศไทย (กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2545) อีกทั้งผักตบชวาเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ลำต้นอวบน้ำ และมีโครงสร้างท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) และท่อลำเลียงอาหาร (Phloem) ที่มาก จึงคาดว่าผักตบชวาน่าจะมีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมได้ดี ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงนำพืชชนิดนี้มาศึกษาถึงความสามารถและประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมออกจากน้ำร่วมกับการใช้สารคีเลต ได้แก่ สาร EDTA และ Citric acid เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมให้ได้ดีที่สุด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมในน้ำได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถของผักตบชวาในการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำ

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนราก ลำต้น และใบของผักตบชวา

1.2.3 เพื่อศึกษาระดับความเข้มข้นของสาร EDTA และ Citric acid ที่มีผลต่อการสะสมแคดเมียมและการแสดงความเป็นพิษในผักตบชวา

1.3 สมมุติฐาน

1.3.1 ผักตบชวามีความสามารถในดูดดึงแคดเมียมในน้ำได้ดี และไปสะสมในส่วนต่างๆ ของพืชศึกษาได้แตกต่างกัน

1.3.2 การเติมสาร EDTA และ Citric acid มีผลต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในผักตบชวาได้มากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และไม่ส่งผลต่อการแสดงความเป็นพิษในพืชศึกษา

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาความสามารถของผักตบชวาในการดูดดึงแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารละลายแคดเมียมปนเปื้อน และมีการใช้สารคีเลตช่วยในการดูดดึงแคดเมียมไปไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช โดยมีรายละเอียดขอบเขตการวิจัยดังต่อไปนี้

1.4.1 พืชที่ใช้ในการศึกษา คือ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes* (Hart.) Solms) จากคลองสาธารณะ บริเวณซอยรามคำแหง 4 ถนนรามคำแหง เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร

1.4.2 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ได้จากการใส่สารประกอบแคดเมียมไนเตรทเททระไฮเดรท (Cadmiumnitrate tetrahydrate; $Cd(NO_3)_2.4H_2O$)

1.4.3 สารคีเลตที่ใช้ คือ เอทิลีนไดแอมีนเททระแอซิตริกแอซิด (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) และกรดซิตริก (Citric acid; CA) โดยใช้ปริมาณสารคีเลตที่ 3 ระดับ คือ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.4.4 การศึกษา แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1) การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม ซึ่งใช้เวลาในการศึกษา 30 วัน โดยมีการวัดคุณภาพน้ำ และเก็บข้อมูลการเติบโตด้านน้ำหนัก และการแสดงความเป็นพิษของพืช ในวันที่ 7, 15, 22 และ 30 ของการทดลอง และเก็บตัวอย่างพืชและน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

2) การศึกษาผลของสาร EDTA และ CA ต่อการช่วยในการดึงดูดแคดเมียมด้วยผักตบชวา โดยทำการวัดคุณภาพน้ำ เก็บข้อมูลการเติบโตด้านน้ำหนักแห้ง รวมทั้งเก็บตัวอย่างพืชและน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่ระยะเวลาของการทดลอง คือ วันที่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

1.4.5 การเก็บตัวอย่างพืชทดลองได้ทำการเก็บตามระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง โดยแยกส่วนพืชออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) สำหรับตัวอย่างน้ำจะทำการเก็บและวัดปริมาตรน้ำก่อน จากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดไปวิเคราะห์

1.4.6 การสังเกตอาการแสดงความเป็นพิษของพืชจากการสะสมแคดเมียม โดยมีการบันทึกการเจริญเติบโต และความผิดปกติของพืชทดลองตลอดการทดลอง

1.4.7 การดำเนินการทดลองจะปฏิบัติในเรือนเพาะชำ และทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงความสามารถและประสิทธิภาพของผักตบชวาในการดูดดึงแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ไปไว้ในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ)

1.5.2 ทราบถึงปริมาณความเข้มข้นของอีดีทีเอและกรดซิตริกต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการสะสมแคดเมียม และผลต่อการแสดงความเป็นพิษของผักตบชวา

1.5.3 สามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะสูงตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป (ความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) มีจำนวน 68 ธาตุ จากจำนวนธาตุที่เป็นโลหะทั้งหมด 83 ธาตุ มีเลขอะตอมอยู่ในช่วง 23-92 จากจำนวนทั้งหมด 105 ธาตุในตารางธาตุ โลหะหนักถือว่าเป็นโลหะปริมาณน้อย (Trace metals) และจัดเป็นธาตุที่มีพิษ (Toxic elements) ที่สามารถทำให้เกิดมลพิษเมื่อมีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม (คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา, 2548) ดังนั้นจึงได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยด้านต่างๆ เป็นอย่างมาก อาทิเช่น การแสดงความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต กลไกการแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อม และการเข้าสู่สิ่งมีชีวิต รวมถึงการศึกษาวิธีการกำจัด เป็นต้น ซึ่งเป็นการพัฒนาองค์ความรู้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการป้องกัน และแก้ไขปัญหาจากโลหะหนักที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้น โดยโลหะหนักที่ได้รับความนิยมในการศึกษาวิจัย คือ กลุ่มของโครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) นิเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) เงิน (Ag) แคดเมียม (Cd) และปรอท (Hg) ซึ่งส่วนมากอยู่ในกลุ่มของธาตุทรานซิชั่น (Transition elements) นอกจากนี้ยังมีอยู่ในกลุ่มของธาตุรีเพรสเซ็นเตตีป (Representative elements) คือ ตะกั่ว (Pb) อาร์เซนิค (As) ซีเลเนียม (Se) และพลวง (Sb) (โสภาพรรณ จิรนิรัติศัย, 2534) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงธาตุแคดเมียมเท่านั้น ซึ่งเป็นชนิดของโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

2.2 แคดเมียม

แคดเมียมถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1817 โดย Friedrich Strohmeyer นักเคมีชาวเยอรมัน ได้ตั้งชื่อในภาษาลาตินว่า Cadmia และในภาษากรีกชื่อว่า Kadmeia ซึ่งชื่อนี้ได้มาจากคำว่า calamine (Zinc carbonate) เป็นการแยกออกไซด์ของธาตุนี้ที่อยู่ปะปนในปริมาณเล็กน้อยกับซิงค์คาร์บอเนต ($ZnCO_3$) โดยทำให้ตกตะกอนออกมาด้วยไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แล้วรีดิวซ์ต่อไปเป็นโลหะอิสระ (Steve, 2007) สามารถพบได้ในธรรมชาติทั้งในดิน น้ำ พืช และสิ่งแวดล้อมทั่วไป จากการศึกษาแคดเมียมในระบบสิ่งแวดล้อมโลกพบว่า มีแคดเมียมที่ผิวดินประมาณ 6.6×10^{13} กรัม ในบรรยากาศมีประมาณ 1.5 x 10 กรัม ในมหาสมุทรมีประมาณ 1.1×10^{14} กรัม ในดินตะกอนมีประมาณ 2.5×10^{18} กรัม ในชีวาลัย (Biosphere) อยู่ในส่วนที่เป็นแผ่นดินประมาณ 7.2×10^{10} กรัม อยู่ในส่วนที่เป็นทะเลประมาณ 1.2 x

10^{10} กรัม ซึ่งทั้งหมดนี้มีหน่วยการละลาย (Flux unit) 10 กรัมต่อปี (Nriagu, 1980) ส่วนใหญ่ในธรรมชาติมักพบแคดเมียมในรูปของซัลไฟต์ (Greenockite, CdS) ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งจะพบปะปนอยู่กับสินแร่สังกะสี (อาจมีปริมาณมากถึง 3% ในสินแร่) จึงเป็นผลิตผลพลอยได้จากการถลุงแร่สังกะสี (Kabata-Pendias และ Pendias, 2000)

2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม

แคดเมียม (Cadmium, Cd) เป็นโลหะหนัก ผลึกมีสีขาวฟ้า วาว คล้ายคลึงกับสังกะสี จัดเป็นธาตุหมู่ IIB ในตารางธาตุ (Periodic Table of Elements) เช่นเดียวกับสังกะสี (Zn) และ ปรอท (Hg) เมื่อผ่านการถลุงและหล่อขึ้นรูปแล้วจะมีสีเงินแกมขาว มีคุณสมบัติเบา อ่อน สามารถดัดงอ และถูกตัดได้ง่าย แต่มีความสามารถทนต่อการกัดกร่อน มักอยู่ในรูปแท่ง แผ่น เส้นลวด หรือเป็นผงเม็ดเล็ก ๆ (Traina, 1999) แคดเมียมเป็นธาตุที่ไม่สามารถละลายในน้ำได้ แต่ละลายได้ในแอมโมเนียมไนเตรท (NH_2NO_3) กรดไนตริก (Nitric acid) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) และกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) (Adriano, 2001) โดยในธรรมชาติแคดเมียมจะถูกออกซิไดซ์ (Oxidize) อย่างช้าๆ ไปเป็นแคดเมียมออกไซด์ (Cadmium oxide; CdO) ได้ในอากาศที่มีความชื้น โดยสามารถแสดงคุณสมบัติของแคดเมียมได้ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแคดเมียม

คุณสมบัติ	แสดงผล
สูตรทางเคมี	Cd
เลขอะตอม	48
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชั่น
สถานะ	ของแข็ง
โครงสร้างผลึก	Hexagonal
เลขออกซิเดชั่น	+2 (ออกไซด์เป็นเบสปานกลาง)
มวลอะตอม	112.411 g/mol
ความหนาแน่นที่ 20 ^{0}C	8.642 g/cm^3
จุดหลอมละลาย	321 ^{0}C
จุดเดือด	767 ^{0}C
ความร้อนจำเพาะที่ 25 ^{0}C	26.020 J/(mol·K)

ที่มา: ดัดแปลงจาก ชิดชนก อัศวโภคี (2550) และกรมควบคุมมลพิษ (2541)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 การใช้ประโยชน์ของแคดเมียม

1) ใช้ในด้านอุตสาหกรรม โลหะแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียมถูกใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น

1.1) อุตสาหกรรมแบตเตอรี่อัลคาไลน์ ใช้ในการทำแบตเตอรี่ร่วมกับโลหะนิกเกิล สามารถประจุไฟใหม่ได้ (Rechargeable battery) เรียกว่าแบตเตอรี่ Ni-Cd (Ni-Cd batteries) มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทนี้มากกว่า 70%

1.2) อุตสาหกรรมการเคลือบผิว (Coatings) เป็นสารเคลือบเงาหรือชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่เรียกว่า Electroplated coating จะได้ผิวโลหะที่เงางาม และทนต่อการกัดกร่อน ไม่เป็นสนิม โลหะที่เคลือบด้วยแคดเมียมจะใช้ในอุปกรณ์รถยนต์ต่างๆ ทั้งที่เป็นส่วนของเครื่องยนต์ และส่วนประกอบอื่นๆ รวมไปถึงน็อตและสกรูด้วย สามารถกันสนิมได้ดี นอกจากนี้ โลหะเคลือบแคดเมียมยังใช้เป็นชิ้นส่วนของเครื่องบิน วิทยุ โทรทัศน์ และตู้เย็น เป็นต้น

1.3) อุตสาหกรรมสีย้อม (Pigments) สำหรับพลาสติกบางชนิด ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวของพลาสติก โดยใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เช่น แคดเมียมสเตียเรท (Cadmium stearate) ในรูปของแคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium kulphide) และแคดเมียมซัลโฟซีลีไนด์ (Cadmium sulphoselenide) จะทำให้ได้สีเหลืองสด ส้ม จนถึงสีแดงเข้ม ใช้ในเม็ดพลาสติก แก้ว เซรามิค การเคลือบแก้วหรือโลหะ และสีในภาพวาด เป็นต้น (International Cadmium Association, 2006)

1.4) อุตสาหกรรมพีวีซี (Polyvinylchloride; PVC) ทำหน้าที่เป็นตัวสเตบิไลเซอร์ (Stabilizers) ทำให้มีความทนทานไม่แตกง่าย

1.5) อุตสาหกรรมอัลลอยด์ (Specialty alloys) โลหะแคดเมียมเมื่อผสมกับโลหะอื่นจะเป็นโลหะอัลลอยด์ เช่น Cd-Au จะให้สีเขียวแววาว จึงนิยมใช้ในการผลิตเครื่องประดับอัญมณีต่างๆ และโลหะเจือ Cd-Ag สามารถต่อต้านการเปลี่ยนเป็นสีดำ จึงนิยมใช้ทำภาชนะ เช่น ขันน้ำ นอกจากนี้เมื่อผสมแคดเมียมกับทองแดง (Cu) สามารถเพิ่มความเหนียวและทนทานต่อการสึกหรอของทองแดงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทนอุณหภูมิสูงได้ และนำไปใช้ผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความร้อน เช่น ทำหม้อน้ำรถยนต์ หรืออุปกรณ์เครื่องเย็บต่างๆ ที่ต้องระบายความร้อนมากๆ ใช้ผสมกับโลหะอื่นๆ เป็นต้น (สุรภี โรจน์อารยานนท์, 2532)

1.6) อุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยนำแคดเมียมมาผสมกับโลหะอื่นๆ ในกิจการเพชรพลอย เช่น ผสมกับโลหะอื่นชนิดเดียว (ผสมทอง) ผสมกับโลหะอื่น 2 ชนิด (ทอง 75% เงิน 16.6%) ผสมกับโลหะอื่น 3 ชนิด (ทองแดง เงิน และทอง) เพื่อเพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการกัดกร่อน

2) ใช้ในด้านทันตกรรม แคดเมียมบางครั้งใช้ผสมกับปรอท (Hg) ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของอะมัลกัม (Amalgam) ที่ใช้สำหรับอุดฟัน เนื่องจากสามารถรับแรงกระแทกในการบดเคี้ยวอาหารได้สูง ทำให้ใช้งานได้ยาวนาน

3) ใช้ในด้านกิจการน้ำมัน แคดเมียมอยู่ในรูปไดเอทิล (Diethyl cadmium) ใช้ในกระบวนการผลิตเททระเอทิลเลด (Tetraethyl lead) ซึ่งเป็นตัวป้องกันการชักกระตุก (Antiknock) ในเครื่องยนต์ ซึ่งช่วยป้องกันการเสียหาย และยืดอายุการใช้งานให้เครื่องยนต์

4) ใช้ในเทคโนโลยีโฟโตอิเล็กทริกเซลล์ (Photoelectric cells) หรือโฟโตเซลล์ (Photocell) โฟโตอิเล็กทริกเซลล์ เป็นส่วนประกอบสำคัญในเครื่องมือที่ใช้ควบคุมการทำงานแทนมนุษย์หลายชนิด เช่น ในเครื่องวัดแสงสำหรับใช้กับกล้องถ่ายรูป ประตูที่ปิดเปิดได้เองเมื่อมีคนเดินผ่าน และเครื่องส่งสัญญาณจับขโมย เป็นต้น

5) ใช้ในกิจการอื่นๆ เช่น

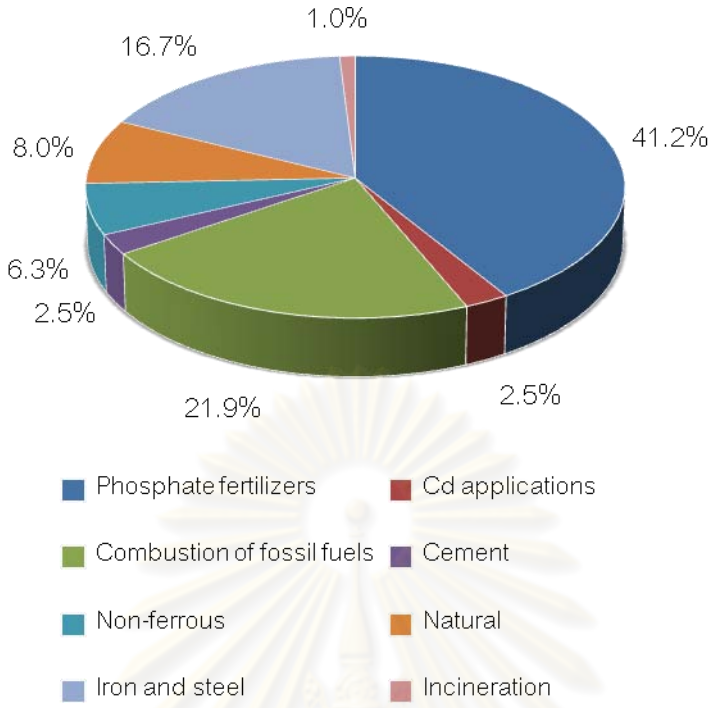
5.1) ใช้ผสมในสารฆ่าเชื้อรา (Fungicides)

5.2) ใช้ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นตัวควบคุมอัตราการแตกตัวของนิวเคลียร์

5.3) ใช้ในการผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น

2.2.3 แหล่งที่มาของแคดเมียมที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม

แหล่งที่มาของแคดเมียมที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (James, 1999) โดยมีแหล่งต่างๆ ที่เป็นสาเหตุของการปนเปื้อนได้แก่



รูปที่ 2.1 แหล่งที่มาของแคดเมียมที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม
ที่มา: http://www.jamesmbrown.co.uk/cd_pigments/cadmium.htm

1) จากธรรมชาติ

ในธรรมชาติแคดเมียมจะมีการกระจายตัวอยู่ในเปลือกโลก ซึ่งมีความเข้มข้นเฉลี่ยประมาณ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (WHO, 1992; Alloway, 1995) และมักจะพบอยู่ร่วมกับสินแร่สังกะสีในชั้นหิน โดยมีอัตราส่วน Zn:Cd อยู่ในช่วง 27:1 ถึง 7,000:1 หรือประมาณ 500:1 โดยเฉลี่ย ซึ่งการผุพังของหิน (Weathering) และการกัดกร่อนของดิน (Erosion) เป็นกระบวนการที่มีผลทำให้เกิดการเคลื่อนย้าย (Translocation) แคดเมียมไปสู่พื้นที่ต่างๆ ได้โดยธรรมชาติ

2) จากเหมืองแร่และการถลุงแร่

แคดเมียมมักพบอยู่ในสภาพไม่บริสุทธิ์ โดยอยู่รวมกับธาตุอื่นๆ ในธรรมชาติ ส่วนใหญ่มักพบแร่แคดเมียมอยู่ร่วมกับสินแร่สังกะสี (Zn) เสมอ ดังนั้นในการทำเหมืองสังกะสีจะได้แคดเมียมเป็นผลพลอยได้ (By product) จากการหลอมแร่ซัลไฟด์ (Sulphide) และสามารถนำแคดเมียมเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมได้ (Alloway, 1995) แต่ในกระบวนการทำเหมือง

แร่อาจเกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมในพื้นที่ใกล้เคียงได้ถ้าไม่มีการควบคุมหรือการป้องกันในกระบวนการที่เหมาะสม

3) จากการเกษตรกรรม และการปรับปรุงคุณภาพดิน

3.1) การเกษตรที่มีการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัส เช่น ปุ๋ยจากหินฟอสเฟต อาจทำให้เกิดการปนเปื้อนแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อมได้ ในปุ๋ยฟอสฟอรัสอาจมีระดับแคดเมียมในปริมาณ 7-170 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยการปนเปื้อนแคดเมียมในปุ๋ยมีสาเหตุมาจากบริเวณแหล่งที่มีหินฟอสเฟตที่ใช้ในกระบวนการผลิตปุ๋ย มีปริมาณแคดเมียมอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Kabata-Pendias และ Pendias, 2000) การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตจึงไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดินเพราะ Cadmium phosphate ละลายน้ำได้น้อย และส่วนที่ไม่ละลายน้ำนั้นพืชไม่สามารถดูดซึมได้ ดังนั้นแคดเมียมส่วนนี้จึงสะสมอยู่ในดิน แต่ถ้ามีการใช้ปุ๋ยแอมโมเนียร่วมด้วย แคดเมียมจะละลายได้มากขึ้น เนื่องจากแคดเมียมจะไปรวมตัวกับแอมโมเนียเป็นอิออนอิสระที่ละลายน้ำได้ คือ $Cd(NH_3)_2^{+2}$ และ $Cd(NH_3)_4^{+2}$

ดังนั้นอาจมีการควบคุมปริมาณการใช้หรือชนิดของปุ๋ยฟอสฟอรัส เพื่อลดการปนเปื้อนของแคดเมียมจากการเกษตร ยกตัวอย่างเช่น Bell และคณะ (2001) รายงานว่า ปัจจุบันความเข้มข้นสูงสุดของแคดเมียม ที่ประเทศออสเตรเลียอนุญาตให้มีได้ในปุ๋ยฟอสฟอรัสคือ 300 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส เมื่อมีการจัดเกรดของปุ๋ย พบว่า ซุปเปอร์ฟอสเฟตเชิงเดี่ยว (Single superphosphate) ที่ใช้ในหญ้าสำหรับเลี้ยงสัตว์มีแคดเมียมสูงกว่า 250 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส ต่างจากปุ๋ยที่มีคุณภาพสูง (Premium grade) ที่ใช้สำหรับการปลูกพืช จะพบว่ามีแคดเมียมอยู่ในปุ๋ยซุปเปอร์ฟอสเฟตเชิงเดี่ยวน้อยกว่า 100 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส ส่วนปุ๋ยไนโตรเจนและปุ๋ยโพแทสเซียมมีปริมาณแคดเมียมอยู่ต่ำมาก เป็นต้น

3.1) การเกษตรที่มีการใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชนปรับปรุงดิน

ถึงแม้ว่ากากตะกอนจะเป็นแหล่งธาตุอาหาร และสามารถช่วยปรับปรุงดิน แต่การเติมกากตะกอนลงสู่ดินมากกว่าหนึ่งครั้งในพื้นที่เดิม เท่ากับเป็นการเพิ่มปริมาณโลหะหนัก ซึ่งอาจมีผลเสียแก่สิ่งแวดล้อมได้ Muttamara และ Leong (1997) ได้กล่าวว่า การใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชน (Domestic sewage sludge) หรือกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม ในพื้นที่การเกษตรอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษในพืชได้ เนื่องจากโลหะในกากตะกอนสามารถสะสม และปนเปื้อนลงใน

ดินเพื่อการเกษตรที่มีการใช้กากตะกอน และอาจเคลื่อนย้ายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารไปสู่สัตว์และคนได้ ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในกากตะกอนที่จะนำมาใช้ด้วย

4) จากอุตสาหกรรม

การประกอบอุตสาหกรรมเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อมกองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ (2541) สามารถแสดงสาเหตุการปนเปื้อนจากอุตสาหกรรมได้ดังนี้

4.1) จากอุตสาหกรรมตะกั่วและสังกะสี ในขั้นตอนการหลอมและถลุงสังกะสี และแคดเมียม จะมีการปล่อยฝุ่น ไอ น้ำเสีย และกากตะกอน ที่มีแคดเมียมปนอยู่ออกมา

4.2) จากอุตสาหกรรมชุบโลหะแคดเมียม ซึ่งของเสียจากโรงงานประเภทนี้จะมีแคดเมียมประมาณ 100 – 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีโลหะหนักอื่น ๆ รวมทั้งไซยาไนด์และสารเคมีอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย

4.3) จากอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า (Primary iron and steel industry และ Secondary non-ferous metal industry) อุตสาหกรรมประเภทนี้จะปล่อยฝุ่น ไอ น้ำเสีย และกากตะกอน ที่มีแคดเมียมปนออกมา

4.4) อุตสาหกรรมทุกประเภทที่มีการใช้ถ่านหิน และ Heating oil เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากแคดเมียมเป็นธาตุปริมาณน้อยใน Fossil fuels ดังนั้น เมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้ แคดเมียมจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของไอ และเถ้า โดยปริมาณแคดเมียมในถ่านหินอยู่ในช่วง 0.25-5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และพบในเถ้าถ่านหิน (Coal ash) มีปริมาณแคดเมียมสูงถึง 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมโดยเฉลี่ยใน Heating oil ประมาณ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

5) แหล่งรวบรวม และการกำจัดของเหลือใช้

5.1) จากยางรถยนต์ที่สึกหรอ เนื่องจากยางรถยนต์จะมีแคดเมียมประกอบอยู่ประมาณ 20 – 90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยเป็นสิ่งเจือปน (Impurity) ใน Zinc oxide ซึ่งเป็นสารรักษาความเร่ง ดังนั้นเมื่อมีการทิ้งไว้และเกิดการสึกหรอแคดเมียมก็อาจแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้

5.2) จากการสึกกร่อนของสังกะสี (Corrosion of zinc) แคดเมียมเป็นสิ่งเจือปนในสังกะสี เมื่อโลหะหรือภาชนะที่ชุบสังกะสีเกิดการสึกกร่อน แคดเมียมก็สามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้

5.3) จากการเผาของเสีย (Incineration) การเผาของเสียที่มีแคดเมียมประกอบอยู่ เช่นพลาสติก เม็ดสี โลหะเคลือบ เศษเหล็กหรือโลหะต่างๆ เป็นต้น จะปล่อยแคดเมียมออกมาในรูป Cadmium aerosols เช่น Cadmium oxide (CdO) ในรูปของอนุภาครวมตัวกับเขม่าหรือฝุ่นควันจากการเผาแพร่กระจายอยู่ในบรรยากาศได้

นอกจากแหล่งที่มาของแคดเมียมที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วนั้น การใช้ชีวิตประจำวันต่างๆ ของมนุษย์เองก็อาจมีส่วนทำให้เกิดการปนเปื้อนแคดเมียมได้ ยกตัวอย่างเช่น พฤติกรรมการเสพบุหรี่ เนื่องจากในยาสูบ (Tobacco) มีแคดเมียมปนอยู่ด้วยแม้ว่ามีปริมาณน้อย แต่ก็พบว่า การสูบบุหรี่ทำให้มีแคดเมียมออกสู่บรรยากาศ 1.4 ไมโครกรัมต่อบุหรี่ 1 มวน ซึ่งองค์การอนามัยโลกระบุไว้ว่า ในปัจจุบันคนทั่วโลกสูบบุหรี่มากถึงประมาณ 1,000 ล้านคน ซึ่งก็มีส่วนในการทำให้เกิดแคดเมียมออกสู่บรรยากาศได้อย่างมาก

2.2.4 **ความเป็นพิษของแคดเมียม**

แม้ว่าโดยทั่วไปแล้วสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิดมีความสามารถสะสมแคดเมียมไว้ในร่างกายได้ (ตารางที่ 2.2) แต่ถ้าได้รับในปริมาณที่มากหรือมีการสะสมไว้มากจนเกินไปก็จะมีผลเสียต่อร่างกาย เนื่องจากแคดเมียมมีคุณสมบัติทางเคมีที่คล้ายกับสังกะสี ทำให้แคดเมียมสามารถเข้าไปแทนที่สังกะสีในเอ็นไซม์บางชนิด ด้วยเหตุนี้ทำให้เมตาบอลิซึม (Metabolism) ถูกทำให้เปลี่ยนไปจากปกติ (ศิริมาศ สิทธิกรม, 2550) ซึ่งการแสดงอาการความเป็นพิษของแคดเมียมจะแตกต่างกันไปในแต่ละสิ่งมีชีวิต

ตารางที่ 2.2 ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่พบในสิ่งมีชีวิต

สิ่งมีชีวิต	ส่วนของสิ่งมีชีวิต	ความเข้มข้นของแคดเมียม ($mg\ kg^{-1}$ น้ำหนักแห้ง)
สิ่งมีชีวิตในทะเล (Marine organisms)		
สาหร่าย (Algae)		<1 ถึง 16
หมึก หอย (Mollusca)	ส่วนที่อ่อนนุ่ม	ไม่เกิน 425
	ไต	ไม่เกิน 547
	ตับ	ไม่เกิน 782
	ต่อมสร้างน้ำย่อย	ไม่เกิน 1,163
กุ้ง ปู (Crustaceans)	ทั้งตัว	<0.4 ถึง 6.2
หนอนทะเล (Annelids)	ทั้งตัว	0.1 ถึง 3.6
ปลา (Fish)	ทั้งตัว	ไม่เกิน 5.2
นกทะเล (Birds)	ไต	ไม่เกิน 231
สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Mammals)	ไต	ไม่เกิน 300
สิ่งมีชีวิตในน้ำจืด (Freshwater organisms)		
พืช (Plants)	ทั้งต้น	0.5 ถึง 1.8
	ราก	ไม่เกิน 6.7
หมึก หอย (Mollusca)	ส่วนที่อ่อนนุ่ม (น้ำหนักเปียก)	0.2 ถึง 1.4
ไส้เดือนดิน (Annelids)	ทั้งตัว (น้ำหนักเปียก)	0.5 ถึง 3.2
ปลา (Fish)	ทั้งตัว (น้ำหนักเปียก)	0.01 ถึง 1.04
สิ่งมีชีวิตบนบก (Terrestrial organisms)		
พืช (Plants)	ทั้งต้น	ไม่เกิน 27.1
	เมล็ด	ไม่เกิน 257
ไส้เดือนดิน (Annelids)	ทั้งตัว (น้ำหนักเปียก)	3 ถึง 12.6
นก (Birds)	ทั้งตัว (น้ำหนักเปียก)	<0.05 ถึง 0.24
	ไต (น้ำหนักเปียก)	ไม่เกิน 7.4
สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Mammals)	ไต	ไม่เกิน 8.1

ที่มา: WHO, 1992 อ้างถึงในวราภรณ์ ศรีตัมภวา. 2550

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1) ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ลักษณะความเป็นพิษจากการรับสัมผัสแคดเมียม สามารถจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ

1.1) ความเป็นพิษเฉียบพลัน สามารถจำแนกจากสาเหตุของการได้รับเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

1.1.1) จากการบริโภค (การดื่มน้ำ หรือการกินอาหารที่ปนเปื้อนแคดเมียม) เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะเกิดอาการคลื่นไส้ ปวดท้อง อาเจียน ท้องเสีย ปวดศีรษะ ปวดกล้ามเนื้อ มีน้ำลายไหล ช็อก ไตและตับถูกทำลาย มีอาการเหมือนอาหารเป็นพิษ ดังนั้นจึงห้ามใช้แคดเมียมฉาบกระป๋องอาหาร เพราะหากได้รับสารแคดเมียมเข้าไปในจำนวนมากๆ ในระยะเวลาอันสั้นแล้วจะมีความเป็นพิษต่อไตถึงขั้นไตวายได้ โดยการแสดงอาการต่างๆ จะเกิดขึ้นเมื่อได้รับปริมาณแคดเมียมที่แตกต่างกันไป (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลันของแคดเมียมที่มีต่อมนุษย์โดยการบริโภค

ปริมาณแคดเมียม (มิลลิกรัม)	อาการที่เกิดขึ้น
3-90	เกิดอาการอาเจียน แต่ไม่มีผลทำให้ถึงตาย
15	เกิดการอาเจียน
10-326	เกิดอาการความเป็นพิษอย่างรุนแรงแต่ไม่ถึงตาย
350-3500	ปริมาณที่อาจจะทำให้ถึงตายได้
1530-8900	ปริมาณที่ทำให้ตายได้

หมายเหตุ: ปริมาณที่ไม่มีผลต่อร่างกายแบบเฉียบพลันเมื่อบริโภคในครั้งเดียว คือ 3 มิลลิกรัม
ที่มา: ดัดแปลงจาก กรมควบคุมมลพิษ (2541)

1.1.2) จากการหายใจเอาไอหรือฝุ่นของแคดเมียมที่มีอยู่ในบรรยากาศเป็นจำนวนมากเข้าไป อาการที่พบคือ เกิดความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการไอ เจ็บหน้าอก หายใจสั้น มีกลิ่นโลหะในปาก ไอมีเสมหะเป็นฟองหรือมีเสมหะเป็นเลือด อ่อนเพลีย ปวดขา ต่อมาการถ่ายปัสสาวะจะน้อยลง เริ่มมีไข้ มีอาการของปอดอักเสบ มีเหงื่อออกและสั่น

1.2) ความเป็นพิษเรื้อรัง เกิดจากการได้รับแคดเมียมไม่ว่าจะเป็นการหายใจ การรับประทานหรือการดูดซึมเข้าทางผิวหนัง อาการพิษเรื้อรังจากการหายใจ มีอาการไอ สูญเสียการรับกลิ่น น้ำหนักลด โลหิตจาง (Anemia) หายใจลำบาก แคดเมียมส่วนหนึ่งจะไปเคลือบอยู่ตามเหงือก

และคอฟัน ทำให้ฟันมีคราบเปื้อนสีเหลืองซึ่งล้างไม่ออก ตับและไตอาจถูกทำลาย เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ระบบการไหลเวียนของโลหิตแล้วก็จะไปทำลายปอดทำให้ปอดบวม นอกจากนี้ยังมีอาการเจ็บหัวเข่าและปวดตามกระดูกทั่วร่างกาย มีปัสสาวะสีขาวข้น เนื่องจากไตถูกทำลาย ปริมาณปัสสาวะและเลือดผู้ป่วยเปลี่ยนไป

2) ความเป็นพิษต่อสัตว์

การแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมต่อสัตว์นั้น จะมีความแตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับชนิด ขนาดของสัตว์ ปริมาณของแคดเมียม และกระบวนการที่ได้รับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดของสัตว์จะมีความแตกต่างกันไป สามารถยกตัวอย่างได้ดังนี้

ความเป็นพิษที่มีต่อปลานั้นจะมีความแตกต่างกันไปในแต่ระยะการเจริญเติบโต โดยที่ระยะตัวอ่อนและระยะ Newlyhatched alevins ทนทานต่อพิษได้ดีกว่าระยะ Older alevins หรือระยะ Juveniles (Chapman, 1978)

ความเป็นพิษที่มีต่อสัตว์ปีก พบว่า นกที่มีอายุน้อยจะมีความไวต่อแคดเมียมมากกว่านกที่อายุสูงกว่า จากการทดลองให้อาหารที่มีแคดเมียมปริมาณ 200 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งกับเป็ดป่าระยะเต็มวัยเป็นระยะเวลา 8.5 สัปดาห์จะทำให้เกิดภาวะ Kidney lesions (White et al., 1978) แต่ในลูกเป็ดแคดเมียมในปริมาณ 20 ไมโครกรัมต่อกรัม ในระยะเวลาที่เท่ากันจะมีผลทำให้เกิดอาการดังกล่าวร่วมกับอาการโลหิตจางได้ (Chain et al., 1983)

ความเป็นพิษที่มีต่อสัตว์ป่า พบว่า ลักษณะทางคลีนิกของความเป็นพิษของแคดเมียมที่สำคัญคือ การเกิดโรคโลหิตจางเกิดการพัฒนาการของต่อมสืบพันธุ์ล่าช้า โรคข้อต่อมีการขยายตัว โรคไตและตับถูกทำลาย และการเจริญเติบโตลดลง ซึ่งเป็นลักษณะที่คล้ายคลึงกับการขาดธาตุสังกะสี (Hoffman et al., 1995)

3) ความเป็นพิษต่อพืช

ความเป็นพิษของแคดเมียมต่อพืช เกิดจากการที่แคดเมียมไปมีผลทำให้เมตาบอลิซึม (Metabolism) เปลี่ยนไปจากปกติ (ศิริมาศ สิทธิกรม, 2550) รวมทั้งไปยับยั้งการสังเคราะห์แสงและกระบวนการคายน้ำของพืชด้วย ความรุนแรงของอาการเป็นพิษขึ้นอยู่กับชนิดและความทนทาน

ของพืชชนิดนั้นๆ นอกจากนี้แคดเมียมยังมีผลต่อการลดปริมาณคลอโรฟิล คาโรตินอยด์ และทำให้เกิดความผิดปกติในโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ เช่น การจัดเรียงตัวของลาเมลลา (Lamella) และกรานา (Grana) เป็นต้น (Baszyki, 1880 อ้างถึงในสนธิ คชวัฒน์, 2530) และยังคาดว่าทำให้พืชได้รับธาตุอาหารบางอย่างน้อยลงอีกด้วย เช่น ไนโตรเจน (N) เหล็ก(Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) (Iwai et al.,1975 อ้างถึงในสนธิ คชวัฒน์, 2530)

2.2.5 **เกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนของแคดเมียม**

จากกรณีปัญหาต่างๆ ที่เกิดจากการปนเปื้อนของแคดเมียม จึงมีการกำหนดค่าเกณฑ์มาตรฐานของปริมาณแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมไว้ ดังแสดงตัวอย่างได้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

ตัวกลาง	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด
ดิน : พื้นที่เพื่ออยู่อาศัย และการเพาะปลูก	37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
: นอกเหนือจากพื้นที่เพื่ออยู่อาศัย และการเพาะปลูก	810 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
น้ำผิวดิน	0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม	0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำดื่มในภาชนะบรรจุปิดสนิท	0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมควบคุมมลพิษ (2541)

2.3 **สารคีเลต** (Chelating agent)

2.3.1 **ความหมายของสารคีเลต**

คีเลต เป็นคำที่ได้มาจากภาษากรีก มีความหมายว่า “กรงเล็บ” (Claw) เมื่อพิจารณาจากรากศัพท์จะเห็นได้ว่าสารคีเลตชนิดต่างๆ น่าจะเป็นสารที่มีแนวโน้มที่จะยึดแคตไอออนบางอย่าง ทำให้อยู่ร่วมกันอย่างเหนียวแน่นและไม่ยอมให้พวกแคตไอออนเหล่านั้นไปทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ซึ่งมักจะทำให้พวกแคตไอออนเหล่านั้นตกตะกอน ดังนั้นสารคีเลต (Chelating agent) คือ สารอินทรีย์เคมีซึ่งสามารถจะรวมและคุ้มกันไม่ให้มีการตกตะกอนของพวกแคตไอออนบางชนิด รวมทั้งจุลธาตุอาหารและอนินทรีย์สารที่เป็นบวก ปฏิกิริยารวมนี้เรียกว่า Chelation และผลที่ได้จากปฏิกิริยา คือ คีเลต

(Chelation) โดยสารคีเลตจะห้อมล้อมแคตไอออนของธาตุที่เป็นโลหะ (Metallic cation) เข้าไว้จนไม่เปิดโอกาสให้อนุมูลอื่นๆ เข้าไปเกาะกับโลหะธาตุที่เป็นประจุบวกได้ และทำให้โลหะธาตุที่เป็นองค์ประกอบของคีเลตอยู่ในสารละลายที่มี pH สูงกว่า เมื่อโลหะธาตุเหล่านั้นเป็นแคตไอออนอยู่ในสภาพของสารละลายธรรมดา กล่าวคือ โลหะธาตุในโครงสร้างคีเลตจะเกิดการตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ของโลหะได้ยากขึ้น จึงทำให้พืชสามารถดูดดึงไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น (คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา, 2548)

2.3.2 **ประเภทของสารคีเลต** (Evangelou et al., 2007)

1) สารอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น เอธิลลีนไดเอมินดิสซัคสิเนส (Ethylene diamine disuccinate; EDDS) และ ไนทริโลไตรแอซีติก (Nitrilotriacetic acid; NTA) นอกจากนี้การแบ่งสารอินทรีย์ธรรมชาติจากสารกลุ่ม Natural low molecular weight organic acid (NLMWOA) เช่น กรดฟีโนลิก (Phenolic acid; FA) กรดซิตริก (Citric acid; CA) กรดมาลิก (Malic acid; MA) กรดอะมิโน (Amino acid; AA), กรดฮิวมิก (Humic acid; HA) และฟูลวิก (Fulvic acid; FA) เป็นต้น

2) สารคีเลตสังเคราะห์ เช่น เอธิลลีนไดเอมีนเททระเอซิติกเอซิด (Ethylene diamine tetraacetic acid; EDTA) ไฮดรอกซิลเอธิลลีนเททระเอซิติกเอซิด (Hydroxylethylene tetraacetic acid; HEDTA) ไดเอธิลลีนไตรอะมิโนเพนทระเอซิติกเอซิด (Diethylene triamino pentaacetic acid; DTPA) เอธิลลีนไกลคอลเททระเอซิติกเอซิด (Ethylene glycol tetraacetic acid; EGTA) เป็นต้น

2.3.3 **การใช้ประโยชน์ของสารคีเลต**

สารคีเลตเป็นสารที่นำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งในบ้านเรือน และอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ในอุตสาหกรรมจะนำสารคีเลตมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก เพราะไอออนของโลหะจะสร้างความเสียหายให้กับกระบวนการผลิตในด้านอุตสาหกรรม จากการเกิดตะกอนต่างๆ ซึ่งไม่ละลายน้ำ และอาจกลายสภาพเป็นตะกรันยึดติดกลับอุปกรณ์หรือเครื่องจักรต่างๆ เช่น ในระบบน้ำหล่อเย็น เป็นต้น ทำให้ยากต่อการกำจัด และอาจเกิดการเสียหายได้ ทั้งนี้สารคีเลตนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะหนักเกิดสารเชิงซ้อนได้ มีผลทำให้ป้องกันการเกิดตะกอน จึงนำสารคีเลตมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก นอกจากนี้ยังมีการนำสารคีเลตไปใช้ประโยชน์อีกมากมาย (Oviedo และ Rodriguez, 2003) ดังในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์การใช้งานของสารคีเลต ในบ้านเรือนและในโรงงานอุตสาหกรรม

การนำมาใช้ประโยชน์	สัดส่วนการนำมาใช้ (%)
ผลิตสารทำความสะอาด	33
ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย	17
อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	12
อุตสาหกรรมภาพถ่าย	5
ผลิตสารกำจัดโลหะ	5
อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ความงาม ยา และอาหาร	5
ใช้ในการเกษตร	4
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	4
ผลิตส่วนประกอบของหมึกพิมพ์	3
ผลิตส่วนผสมของคอนกรีต	2
อื่นๆ เช่น ทางการแพทย์ ปศุสัตว์ เป็นต้น	10

ที่มา: Oviedo และ Rodriguez, 2003

2.3.4 ปัจจัยในการเลือกใช้สารคีเลต

การนำสารคีเลตมาใช้ประโยชน์ในการช่วยกำจัดโลหะหนักโดยวิธีต่างๆ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและคุ้มค่าต่อการนำมาใช้นั้น ควรคำนึงถึงปัจจัย 4 ปัจจัยดังนี้ (Peter และ Shem, 1992)

1) สารคีเลตที่นำมาใช้ ควรเป็นสารที่มีความสามารถทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรในช่วงความเป็นกรด-ด่างที่กว้าง และควรมีอัตราส่วนลิแกนด์ต่อโลหะเท่ากับ 1:1 โมลต่อลิตร (M)

2) การย่อยสลายทางชีวภาพของสารคีเลต และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างคีเลตกับโลหะหนักควรมีค่าต่ำ ซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาในการลดการตกตะกอน

3) สารคีเลตที่ใช้ และสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างคีเลตกับโลหะหนัก ควรมีความเป็นพิษและอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ เพื่อความปลอดภัยในการนำมาใช้ในระยะสั้นและระยะยาว

4) สารคีเลตที่นำมาใช้ควรหาได้ง่าย และมีราคาเหมาะสมในการลงทุน ซึ่งคุ้มค่าต่อการนำมาใช้ประโยชน์

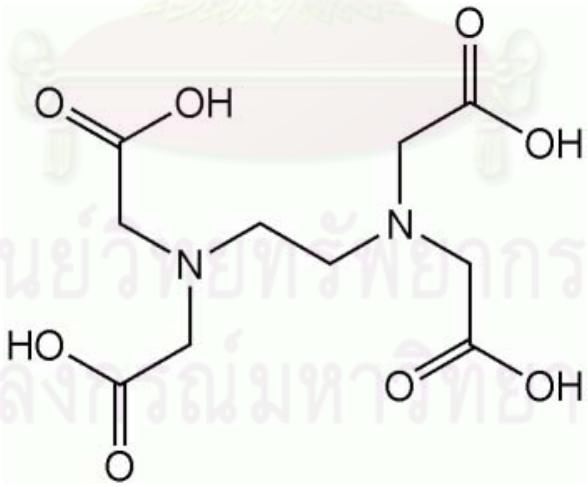
2.3.5 **สารคีเลตที่เลือกใช้ในงานวิจัย**

สารคีเลตที่เลือกใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้คำนึงถึงสารที่มีความเป็นพิษ และอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ หาได้ง่าย และมีราคาเหมาะสมในการลงทุน เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อนได้จริง ซึ่งสารคีเลตที่เลือกนำมาใช้นั้นได้แก่ สาร EDTA ซึ่งเป็นสารคีเลตสังเคราะห์ และ Citric acid ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติ

1) **เอธิลลีนไดเอมีนเททระเอซิติกเอซิด** (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; EDTA)

1.1) **สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร** EDTA

เอธิลลีนไดเอมีนเททระเอซิติกเอซิด (Ethylene diamine tetraacetic acid; EDTA) หรือ สาร EDTA เป็นสารคีเลตสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นเกล็ดหรือผงสีขาว โดยมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 และมีสมบัติทางกายภาพและเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของสาร EDTA
ที่มา: Maryadele et al. (2001)

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร EDTA

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

ที่มา: Chemical (2003) และ Maryadele et al. (2001)

1.2) **ประโยชน์ของสาร** EDTA

สาร EDTA เป็นสารคีเลตที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ อุตสาหกรรมภาพถ่าย อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ความงาม และอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำสารอีดีทีเอไปใช้ประโยชน์อีกมากมาย (Oviedo และ Rodriguez, 2003) เช่น การผลิตสารทำความสะอาด ผลิตสารกำจัดโลหะ ใช้ในการถนอมอาหารประเภทสัตว์ทะเลแช่แข็ง ทางการแพทย์ใช้ในการรักษาอาการที่เกิดจากความเป็นพิษจากโลหะหนัก โดยการฉีดสาร EDTA ในปริมาณน้อยเข้าไปในร่างกายเพื่อช่วยขับโลหะหนักออกมาจากร่างกาย

1.3) **การสลายตัวของสาร** EDTA

Meers และคณะ (2005) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสาร EDDS และ EDTA โดยใช้สาร EDTA ที่ความเข้มข้น 0.8 1.6 และ 4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำการศึกษาเป็นระยะเวลา 40 วัน ผลการศึกษาพบว่า การเติมสาร EDTA ที่ระยะเวลา 40 วัน ไม่พบการลดลงของสาร EDTA อย่างมีนัยสำคัญ จากผลการศึกษาดังกล่าวทำให้ Meer และคณะ ทำการประมาณค่าครึ่งชีวิตของสาร EDTA ได้เท่ากับ 36 วัน

Ginkel และคณะ (1999) ทำการศึกษาการย่อยสลายของสาร EDTA ในน้ำ โดยได้มีการเก็บตัวอย่างน้ำจากแม่น้ำและทะเลสาบ และใส่สาร Na_2EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับของ pH 6.5 และ 8.0 ซึ่งเป็นการทดลองในขวดแบบระบบปิด ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับ

ของ pH 6.5 ที่ระยะเวลา 28 วัน ไม่พบการย่อยสลายของสาร EDTA หรือพบการย่อยสลายเพียงเล็กน้อยประมาณ 2-12% และเมื่อเวลาผ่านไปเป็น 49 วัน พบว่า การย่อยสลายของสาร EDTA มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 60-83% และสาร EDTA ที่ระดับของ pH 8.0 ที่ระยะเวลา 28 วัน มีค่าการย่อยสลายของสาร EDTA เท่ากับ 53-72% และเมื่อการทดลองผ่านไป 35 วัน มีค่าการย่อยสลายของสาร EDTA เท่ากับ 75-89%

1.4) **ความเป็นพิษของสาร** EDTA

สาร EDTA ไม่มีพิษร้ายแรงต่อมนุษย์ แต่หากหายใจเอาละอองหรือฝุ่นของสาร EDTA เข้าไปก็จะทำให้ไอหรือจามได้ การสัมผัสกับผิวหนังหรือลูกตามีผลเพียงทำให้บริเวณที่สัมผัสระคายเคืองและแดงขึ้นเท่านั้น แต่ถ้าหากมีการกินหรือกลืนเข้าไปจะทำให้รู้สึกร้อนในกระเพาะและคลื่นไส้อาเจียน และหากได้รับในปริมาณมากอาจมีผลต่อไตได้ (National Institute for Occupational Safety and Health, 2002)

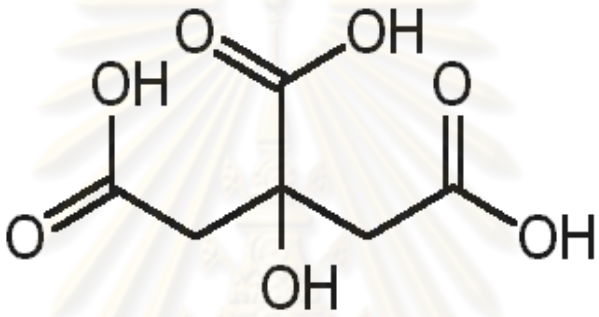
สำหรับความเป็นพิษของสาร EDTA ต่อสัตว์ ได้มีการศึกษาผลของสาร EDTA ในด้านการระคายเคืองต่อผิวหนัง โดยทำการทดสอบกับกระต่าย ในการทดลองได้ใช้สาร EDTA 50% ในน้ำทาใบหูของกระต่ายเป็นเวลา 20 ชั่วโมง พบว่า กระต่ายเกิดการระคายเคืองเล็กน้อย นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบกับตาของกระต่าย โดยใช้สาร EDTA 50 มิลลิกรัมในน้ำเช่นกัน พบว่า กระต่ายเกิดอาการระคายเคืองที่ตา มีอาการตาพร่ามัว มีอาการบวมน้ำอย่างรุนแรง และมีเลือดออกภายใน 1 ชั่วโมง และผลการทดลองเมื่อเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า กระต่ายมีอาการระคายเคืองอย่างรุนแรง มีอาการบวมน้ำและตาพร่ามัวอย่างรุนแรง (BASF AG, 1973)

นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาความเป็นพิษของสาร EDTA ต่อพืช เช่น การศึกษาของ Hernandez และคณะ (2006) ทำการศึกษาผลของสาร EDTA ต่อการดูดดึงโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม และความเป็นพิษต่อพืชของสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 4 ระดับ คือ 0, 250, 500 และ 750 ไมโครโมล ทำการทดลองแบบปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponic) ซึ่งพืชที่ใช้ในการศึกษาคือ *Cynara cardunculus* L. โดยมีระยะเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่างคือ 48 ชั่วโมง หลังจากปลูกพืชในน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสาร EDTA มากขึ้น พืชมีแนวโน้มแสดงความเป็นพิษมากขึ้น เช่น ลดการปิดเปิดของปากใบ ลดอัตราการหายใจ ลดการระเหย และลดการจุน้ำของพืช เป็นต้น

2) กรดซิตริก (Citric acid; CA)

2.1) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ CA

กรดซิตริก (Citric acid; CA) หรือชื่ออื่นทางเคมี คือ 2-hydroxy-1,2,3-propanetriccarboxylic acid, 2-hydroxypropanetriccarboxylic acid และ 2-hydroxytriccarballylic acid เป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติ มีคุณสมบัติเป็นกรดอย่างอ่อน เป็นผงสีขาวไม่มีกลิ่น สูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.3 และมีสมบัติทางกายภาพและเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.7



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของ CA
ที่มา: Maryadele et al. (2001)

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร CA

คุณสมบัติ	รายละเอียด
สูตรทางเคมี	$C_6H_8O_7$
มวลโมเลกุล	192.124 g/mol
ความหนาแน่นที่ 20 ^{0}C	1.665 g/cm^3
จุดหลอมเหลว	153 ^{0}C
ความสามารถในการละลายน้ำ ที่ 20 ^{0}C	133 g/100 ml

ที่มา: Maryadele et al. (2001)

2.2) ประโยชน์ของ CA

CA เป็นสารที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น พบได้ในผลไม้ที่มีรถเปรี้ยว เช่น มะนาว สับปะรด ส้ม เป็นต้น พบในกระบวนการย่อยของจุลินทรีย์บางชนิด ในสิ่งมีชีวิตใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการ Kreb's cycle ของการหายใจของสิ่งมีชีวิตต่างๆ (ชวนพิศ แดงสวัสดิ์, 2544) ในอุตสาหกรรมนำมาใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ความงามต่างๆ และเป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อใช้ในการปรุงแต่งรสชาติ รวมทั้งใช้ในอุตสาหกรรมยาอีกด้วย

2.3) การย่อยสลายของ CA

การย่อยสลายของ CA เกิดขึ้นได้ง่ายมากในสิ่งมีชีวิต ตามธรรมชาติจะสลายได้ง่ายในดินที่มีปริมาณจุลินทรีย์สูง ผลที่ได้จากการย่อยสลายของ CA ประกอบไปด้วย Acetic acid (AA), Succinic acid (SA), ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง Acetic acid และ Succinic acid ยังมีคุณสมบัติเป็นสารคีเลตอีกด้วย

2.4) ความเป็นพิษของ CA

ถึงแม้ว่า CA จะเป็นสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ และมีการนำมาใช้ในการบริโภค แต่ CA ก็ยังมีความเป็นพิษถ้าได้รับในปริมาณที่มากจนเกินไป สำหรับมนุษย์การรับประทานอาหารที่มี CA มากจนเกินไปอาจทำให้เกิดการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องอืดเนื่องจากเกิดก๊าซในลำไส้จากการย่อย CA และอาจทำให้ท้องเสียได้ และถ้ามีการหายใจเอา CA เข้าไปก็จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ เกิดอาการไอ สำหรับความเป็นพิษแบบเรื้อรังจาก CA เกิดขึ้นทางอ้อมจากการที่ CA กัดกร่อนสารเคลือบฟัน (United States National Library of Medicine, 2007) ซึ่งมีสารที่เป็นอันตรายผสมอยู่ เช่น สารตะกั่ว ซึ่งทำให้ร่างกายได้รับอันตรายจากการสะสมได้

สำหรับความเป็นพิษต่อสัตว์ ได้มีการทดลองความเป็นพิษของ CA กับหนูทดลอง โดยการทดสอบให้ CA ทางปากหนู การฉีดใต้ผิวหนัง และการฉีดเข้าเส้นเลือด พบว่า มีค่า LD_{50} เท่ากับ 5040, 2700 และ 42 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักของหนูทดลอง ตามลำดับ ซึ่งอาการที่หนูทดลองแสดง ได้แก่ อาการสั่นอย่างรุนแรง และมีอาการตัวเขียว จนถึงอาการเสียชีวิต (United States National Library of Medicine, 2007)

สำหรับความเป็นพิษในพืชนั้น แม้มีการศึกษาที่น้อยมาก แต่อาจคาดได้ว่าเป็นผลเนื่องจากปริมาณของ CA ที่มากเกินไปนั้นอาจส่งผลต่อค่า pH ในดินหรือน้ำที่พืชเจริญเติบโต อีกทั้งส่งผลให้กลไกการดูดซึมน้ำ และธาตุอาหารของพืชลดลง ซึ่งอาจมีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโต และการคายน้ำของพืชลดลง

2.4 การบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

การบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation) คือ การใช้พืชในการกำจัด ควบคุม หรือกระตุ้นการย่อยสลายของเสีย (Brown et al., 1991) เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน และสารกัมมันตรังสี ที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน น้ำ และอากาศ (United States Environmental Protection Agency, 2000) ซึ่งวิธีการนี้ได้รับความสนใจในการศึกษากันมาก เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากและไม่ซับซ้อน สามารถช่วยลดมลพิษในสิ่งแวดล้อมได้ดี โดยมีค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ (วราภรณ์ ศรีตัมภวา และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2551)

2.4.1 ชนิดของการบำบัดโดยใช้พืช

วิธีการบำบัดโดยใช้พืชมีหลายชนิด (สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4) ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามกลไกของพืชที่ใช้ในการกำจัดสารมลพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ได้ดังต่อไปนี้ (United States Environmental Protection Agency, 2000)

1) Phytoextraction หรืออาจเรียกว่า Phytoaccumulation คือ การดูดซับสารปนเปื้อนโดยอาศัยรากพืชและส่งผ่านสารขึ้นไปสู่ส่วนของลำต้นพืช ซึ่งสารมลพิษที่ปนเปื้อนจะถูกสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อในส่วนของรากและส่วนต่างๆ ของพืช หลังจากนั้นสารมลพิษที่ปนเปื้อนจะถูกนำออกไปโดยการเก็บเกี่ยวพืช ตัวกลางที่สามารถใช้วิธีนี้ในการบำบัด ได้แก่ ดิน ตะกอน และกากตะกอน สำหรับสารปนเปื้อนที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ ได้แก่ โลหะหนัก เช่น แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ปรอท ตะกั่ว และสังกะสี เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถบำบัดสารกัมมันตรังสีได้

2) Rhizofiltration คือ การดูดซับสารปนเปื้อนเข้าไปในรากพืช การดักกรองหรือการทำให้ตกตะกอนในบริเวณราก ตัวกลางที่สามารถใช้วิธีนี้ในการบำบัด ได้แก่ น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และน้ำเสีย การบำบัดวิธีการนี้จะทำให้สารปนเปื้อนไม่มีการเคลื่อนที่หรือเกิดการสะสมในบริเวณราก ซึ่งสารปนเปื้อนจะถูกกำจัดออกไปโดยการเก็บเกี่ยวพืช สำหรับสารปนเปื้อนที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ ได้แก่

โลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี และโครเมียม เป็นต้น สำหรับสารกัมมันตรังสีที่สามารถบำบัดโดยวิธีนี้ เช่น ^{137}Cs และ ^{238}U เป็นต้น

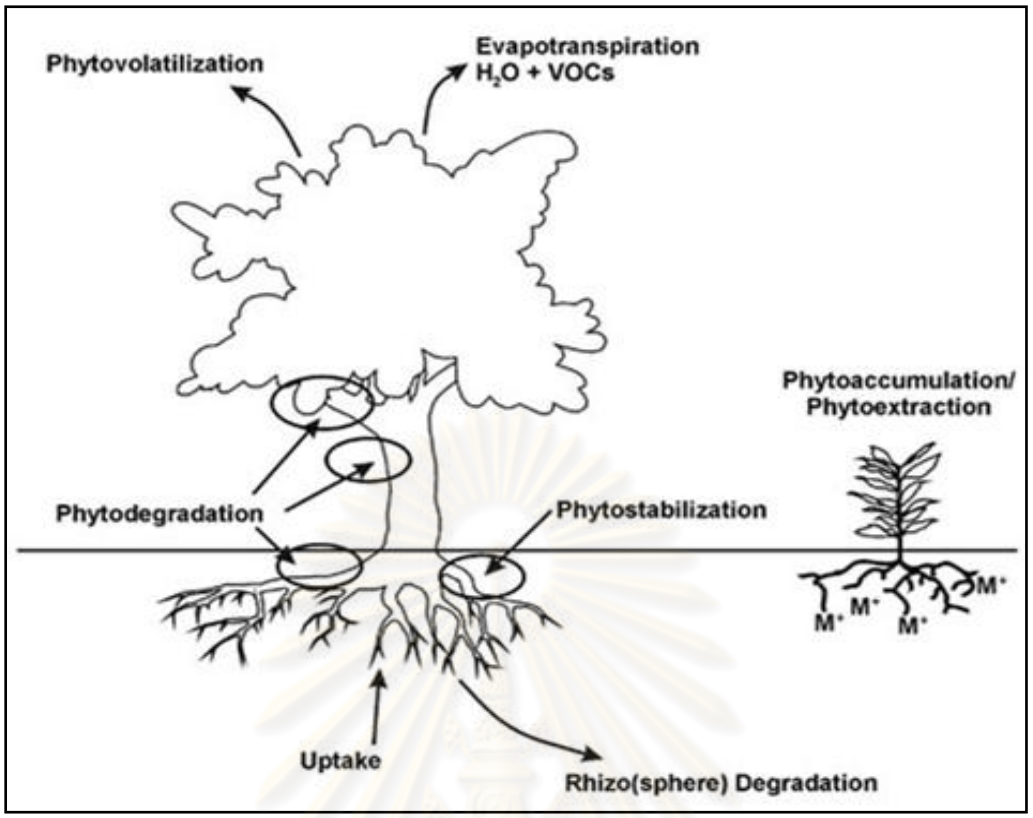
3) Phytostabilization คือ การใช้พืชหรือรากพืชเพื่อยับยั้งไม่ให้สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ในดิน โดยการดูดซับ และสะสมไว้ในราก ในตะกอนดิน หรือในตม ซึ่งทำให้สารปนเปื้อนต่างๆ ภายในตัวกลางเกิดการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียร เกิดการตกตะกอน หรือเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีในบริเวณรากพืช ตัวกลางที่สามารถใช้วิธีนี้ในการบำบัด ได้แก่ ดิน ตะกอน และกากตะกอน สำหรับสารปนเปื้อนที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ ได้แก่ โลหะหนัก เช่น แคดเมียม เป็นต้น

4) Rhizodegradation หรือชื่ออื่นที่มีการเรียกว่า Rhizosphere biodegradation, Bioremediation และ Phytostimulation คือ การกำจัด หรือการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์บริเวณรากพืช ซึ่งจะมีการปล่อยเอ็นไซม์ออกมากระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ในบริเวณนั้น ทำให้สารปนเปื้อนเหล่านั้นถูกย่อยสลาย ตัวกลางที่สามารถใช้วิธีนี้ในการบำบัด ได้แก่ ดิน ตะกอน กากตะกอน และน้ำใต้ดิน สำหรับสารปนเปื้อนที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ สารกำจัดแมลง และศัตรูพืชบางชนิด

5) Phytodegradation หรืออาจเรียกว่า Phytotransformation คือ การทำให้สารปนเปื้อนมีการเปลี่ยนรูป โดยเอ็นไซม์ที่พืชปล่อยออกมา หรือผ่านทางกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ของพืช ทำให้สารปนเปื้อนที่มีโมเลกุลใหญ่เปลี่ยนไปเป็นโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งพืชนั้นๆ สามารถนำไปสร้างเนื้อเยื่อได้ ตัวกลางที่สามารถใช้วิธีการนี้ในการบำบัดได้แก่ ดิน ตะกอน กากตะกอน น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน สำหรับสารปนเปื้อนที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ คือ สารประกอบอินทรีย์

6) Phytovolatilization คือ การดูดซับสารปนเปื้อน และทำให้มีการเปลี่ยนสภาพทางเคมีด้วยกลไกทางกระบวนการเมตาบอลิซึม และการหายใจของพืช ทำให้สารปนเปื้อนมีการเปลี่ยนแปลง (Transformation) ในรูปที่พืชสามารถกำจัดออกโดยผ่านทางใบพืชเพื่อปล่อยออกสู่บรรยากาศ ตัวกลางที่สามารถใช้วิธีการนี้ในการบำบัดได้แก่ ดิน ตะกอน กากตะกอน น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน สำหรับสารปนเปื้อนที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ คือ Chlorinated solvents

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation)
ที่มา: http://bio349.biota.utoronto.ca/20079/20079bio349sasha/phytoremediation.png

2.4.2 คุณสมบัติของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัด

พืชที่เหมาะสมในการบำบัด ควรเป็นพืชที่โตเร็ว มีมวลชีวภาพสูง มีระบบรากที่กว้าง มีวงจรชีวิตสั้น ขยายพันธุ์ได้ดี สามารถเก็บเกี่ยวได้ง่าย มีความทนทาน เจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีการปนเปื้อน และสามารถสะสมสารปนเปื้อน เช่น โลหะหนักได้ในปริมาณที่สูง (Yang et al., 2005) ซึ่งพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณที่มากเป็นพิเศษนี้เรียกว่า Hyperaccumulator plants หรือ Hyperaccumulator species การที่จะระบุว่าพืชชนิดใดเป็น Hyperaccumulator species นั้น สามารถวัดได้จากความสามารถในการสะสมโลหะหนักในต่อน้ำหนักแห้งของพืช ซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละชนิดของโลหะหนัก (ตารางที่ 2.8) ในปัจจุบันพบพืชที่เป็น Hyperaccumulator species มากกว่า 400 ชนิด (ตารางที่ 2.9)

ตารางที่ 2.8 ปริมาณการสะสมโลหะหนักในพืชที่จัดเป็น Hyperaccumulator species

โลหะหนัก	ปริมาณการสะสม	เปอร์เซ็นต์การสะสม
Cd	มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	0.01 % ของน้ำหนักแห้ง
Co, Cu, Cr, Pb , Ni	มากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	0.1 % ของน้ำหนักแห้ง
Mn , Zn	มากกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	1.0 % ของน้ำหนักแห้ง

ที่มา : ดัดแปลงจาก พรรณวิมล ตันหัน (2549)

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างชนิดพืชที่จัดเป็นพืช Hyperaccumulator species

โลหะหนัก	ชนิดพืช	ปริมาณการสะสม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	อ้างอิงจาก
As	*Pteris vittata*	23,000	Ma et al. (2001)
Cd	*Thlaspi caerulescens*	7,400	Escarre et al. (2000)
Co	*Haumanniastrum robertii*	10,200	Brook et al. (1977)
Cu	*Ipomoea alpine*	12,300	Malaisse et al. (1979)
	Aeollanthus biformifolius	13,700	Brook et al. (1992)
Mn	*Alyxia rubicaulis*	11,500	Brook et al. (1981)
Ni	*Phyllanthus serpentinus*	38,100	Kersten et al. (1979)
	Thlaspi goesingense	12,400	Reeves and Baker (1984)
Pb	*Thlaspi rotundifolium*	8,200	Reeves and Brooks (1983b)
Se	*Astragalus racemosa*	14,900	Rosenfeld and Beath (1964)
Zn	*Thlaspi caerulescens*	25,000	Ernst et al. (1974)
	Thlaspi calaminare	39,600	Reeves and Brooks (1983b)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Chaney et al. (2000) อ้างถึงใน พรรณวิมล ตันหัน (2549)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.3 ข้อดีและข้อจำกัดของการบำบัดโดยใช้พืช

1) ข้อดีของการบำบัดโดยใช้พืช

1.1) เป็นเทคนิคที่ค่อนข้างใช้ค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเทียบกับการบำบัดดินโดยวิธีการอื่นๆ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้การบำบัดโดยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายต่ำ เนื่องจากอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก ไม่มีการเคลื่อนย้ายดินออกจากพื้นที่

1.2) มีผลกระทบน้อยหรือไม่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเลย จึงมีความปลอดภัยมากกว่าวิธีการอื่นๆ

1.3) ภายหลังเก็บเกี่ยวพืชที่เป็น Hyperaccumulator species ที่กำจัดโลหะหนักออกนอกพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน แล้วสามารถนำโลหะที่สกัดได้จากมวลชีวภาพไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำมาขาย และการเผามวลชีวภาพยังสามารถนำเอาพลังงานที่ได้มาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ กำไรที่ได้จากการขายโลหะหนักเหล่านั้นยังสามารถนำมาเป็นต้นทุนในการปลูกพืชในครั้งต่อไปได้อีกด้วย

1.4) การปลูกพืชลงในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนช่วยลดการพังทลายของดิน ช่วยป้องกันการแพร่กระจาย หรือลดการปนเปื้อนของโลหะหนักไปยังพื้นที่อื่นๆ หรือลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงในการที่สารปนเปื้อนเหล่านั้นจะเข้าสู่มนุษย์และสัตว์ได้

1.5) พืชที่ปลูกยังสร้างสารอินทรีย์ที่มีส่วนช่วยในการพัฒนาเนื้อดินและความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน และหากพืชมีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ที่นำมาบำบัดแล้ว จะส่งผลให้พื้นที่ที่บำบัดมีสภาพที่ดีขึ้น ร่มรื่น ทำให้เกิดทัศนียภาพที่สวยงามแก่ผู้พบเห็น

2) ข้อจำกัดของการบำบัดโดยใช้พืช

2.1) ไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ลึกลงไปกว่าบริเวณรากพืชได้ นอกจากนี้หากสารปนเปื้อนไม่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ก็จะไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารปนเปื้อนได้

2.2) ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างที่เป็นข้อจำกัดของพืชที่จะนำมาใช้ เช่น สภาพทางธรณีวิทยา สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ ที่ตั้งของแหล่งบำบัด ความสูงจากระดับน้ำใต้ดิน และความสามารถของเครื่องมือทางเกษตรกรรม เป็นต้น

2.3) ใช้ระยะเวลาในการบำบัดนาน การปนเปื้อนในบางกรณีจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขในเวลาอันสั้น เนื่องจากการปนเปื้อนส่งผลกระทบอย่างรุนแรงที่ต้องกำจัดไปอย่างทันที ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำวิธีการนี้ไปใช้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4) พืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนแตกต่างกันไป ถ้าในพื้นที่มีการปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นสูงมากจนเกินความสามารถของพืชนั้น วิธีการนี้ก็ไม่สามารถนำมาใช้ได้

2.5 ผักตบชวา

ผักตบชวา (Water hyacinth) เป็นพืชน้ำล้มลุกอายุหลายฤดู สามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ มีถิ่นกำเนิดในแถบลุ่มน้ำอะเมซอน ประเทศบราซิล ในทวีปอเมริกาใต้ มีดอกสีม่วงอ่อน คล้ายช่อดอกกล้วยไม้ และแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็วจนกลายเป็นวัชพืชที่ร้ายแรงในแหล่งน้ำทั่วไป มีชื่อเรียกในไทยแตกต่างกันไปในแต่ละท้องถิ่น เช่น ผักปอด สวะ ผักโรค ผักตบชวา ผักยะวา ผักอีโยก และผักป่อง เป็นต้น

ผักตบชวาถูกนำเข้ามาในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2444 ในสมัยรัชกาลที่ 5 โดยนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซียในฐานะเป็นไม้ประดับสวยงาม โดยเจ้านายฝ่ายในที่ตามเสด็จประพาสประเทศอินโดนีเซีย ได้เห็นพืชชนิดนี้มีดอกสวยงาม จึงนำกลับมาปลูกในประเทศไทย และใส่อ่างดินเลี้ยงไว้หน้าสนามวังสระปทุม จนกระทั่งเกิดน้ำท่วมวังสระปทุมขึ้น ทำให้ผักตบชวาหลุดลอยแพร่กระจายไปตามแม่น้ำลำคลองทั่วไป และแพร่พันธุ์อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

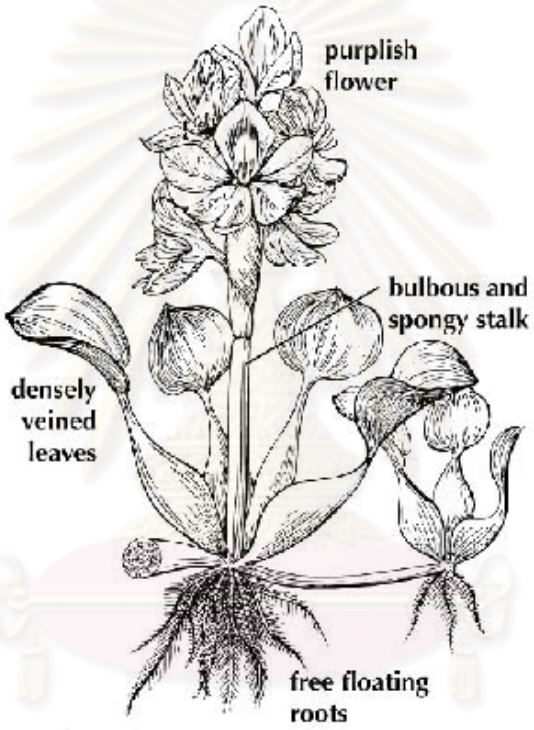
2.5.1 การจำแนกชั้นทางวิทยาศาสตร์ของผักตบชวา

ผักตบชวามีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Echhornia crassipes* (Mart.) Solms สามารถจำแนกชั้นทางวิทยาศาสตร์ได้ดังนี้ (ก่องกานดา ชยามฤต และนันท์นภัส ภัทรหิรัญไตรสิน, 2552)

Kingdom Plantae
Class Agiospermae
Sub class Monocotyledonae
Order Commelinales
Family Pontederiaceae
Genus Eichhornia

2.5.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ผักตบชวาจัดเป็นพืชประเภทลอยน้ำ (Floating plant) เนื่องจากมีการเจริญเติบโตอยู่บนผิวน้ำ โดยปกติรากจะไม่ยึดติดกับพื้นดิน จึงถูกกระแสลมหรือน้ำพัดพาไปได้ไกล แต่ถ้าน้ำตื้นแล้วรากจะสามารถหยั่งยึดติดกับพื้นดินได้ (ดวงพร สุวรรณกุล และรังสิต สุวรรณเขตนิคม, 2544) ส่วนประกอบต่างๆ ของผักตบชวา (รูปที่ 2.5) มีดังนี้



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของผักตบชวา

ที่มา : http://www.kingcounty.gov/environment/waterandland/lakes/plants/weed-identification/water-hyacinth.aspx

1) ลักษณะของลำต้น

ลักษณะต้นผักตบชวา ประกอบด้วยกลุ่มของใบเรียงกันเป็นกระจุก ในต้นหนึ่งๆ จะมีใบตั้งแต่สองใบขึ้นไป ที่โคนก้านใบจะมีกาบใบ (Sheath) ลักษณะเป็นเยื่อบางๆ สีขาวแกมเขียวอ่อนๆ แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นก็จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล บริเวณของกาบใบเป็นสีน้ำตาลแกมม่วงเชื่อมติดต่อกัน

โดยมีไหล (Stolon) ซึ่งเป็นลำต้นที่ทอดไปตามผิวน้ำช่วยในการขยายตัวของผักตบชวาให้เพิ่มขึ้น ต้นหนึ่งๆ ของผักตบชวาจะมีไหลแตกออกไปได้หลายอัน เมื่อไหลแตกออกไปแล้ว ก็จะเจริญขึ้นเป็นต้นใหม่ แต่ยังติดกับต้นเดิมอยู่และเกิดเป็นกอขึ้น พร้อมทั้งมีรากเกิดขึ้น (กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2) ลักษณะของราก

รากของผักตบชวาเป็นแบบรากฝอย (Fibrous root) คือ มีรากย่อยเป็นกระจุก รากที่แทงออก จะมีลักษณะอวบ สีขาว เมื่อมีอายุมากขึ้นจึงจะมีรากขนอ่อน (Root hair) ที่มีสีน้ำตาลอ่อน และเมื่อแก่รากขนอ่อนนี้จะเป็นสีน้ำตาลแก่จนถึงสีดำ ความยาวของรากจะแตกต่างกันไป บางเส้นก็ยาวเกือบถึงหนึ่งเมตร (60-90 เซนติเมตร) ในผักตบชวาที่มีอายุมาก (กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

3) ลักษณะของใบ

ลักษณะใบของผักตบชวาเป็นแบบใบเดี่ยว (Simple leaf) ประกอบด้วย แผ่นใบ (Blade) และก้านใบ (Petiole) แผ่นใบมีลักษณะคล้ายรูปไต (Reniform) หรือคล้ายรูปหัวใจ (Cordate) มักมีความกว้างมากกว่ายาว หรือเกือบจะเท่าๆ กัน เมื่อยังอ่อน ปลายใบมักจะมน แต่เมื่อมีอายุมากขึ้น ปลายใบจะแหลม มีสีเข้มขึ้น ขอบใบเรียบ ระบบเส้นใบ (Venation) ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและอาหาร เป็นแบบเส้นใบขนาน ก้านใบมีลักษณะกลม เรียบ อวบน้ำถ้าต้นผักตบชวาเจริญอยู่ห่างๆ กัน ลำต้นจะเล็กและก้านใบมักจะพองออกเป็นทุ่นลอยน้ำ (ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Buoyancy leaf) แต่ถ้าผักตบชวาเจริญอยู่ในที่เบียดชิดกันมาก โดยเฉพาะในน้ำนิ่ง ก้านใบจะไม่พอง นอกจากนั้น ก้านใบยังยาวมาก บางแห่งพบว่ายาวถึงหนึ่งเมตร (กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

การเกิดใบอ่อน จะเกิดตรงกลางกอ โดยแผ่นใบของใบอ่อนจะม้วนหุ้มรอบโคนก้านใบใกล้เคียง และมีกาบใบบางหุ้มรอบอีกทีหนึ่ง ปลายกาบใบนี้ จะมีลักษณะคอดแล้วบาน ขอบหยักเล็กน้อย เป็นเยื่อบางๆ เมื่อใบอ่อนโตขึ้น ก้านใบก็จะขยายขึ้น ดันกาบใบที่ห่อหุ้มนั้นออก แผ่นใบก็จะค่อยๆ คลี่เป็นอิสระจากโคนก้านใบเดิม ซึ่งในระยะแรกใบจะมีสีเขียวอ่อน ต่อไปจะมีสีเขียวเข้มขึ้น กาบใบนั้นก็จะคงติดอยู่ตรงโคนก้านใบดอก

4) ลักษณะของดอกและเมล็ด

ผักตบชวามีดอกสีฟ้า (หรือฟ้าอมม่วง) ดอกออกเป็นช่อ ไม่มีก้านดอก (Spike) ในช่อหนึ่งๆ จะมีจำนวนดอกแตกต่างกันไป ถ้าช่อดอกเล็ก ก็จะมีดอกประมาณ 4-5 ดอก ถ้าช่อดอกใหญ่อาจจะมีจำนวนดอกเพิ่มขึ้นจนถึง 60 ดอก ช่อดอกจะเกิดบริเวณกลางต้น การเกิดของช่อดอกมีลักษณะคล้ายกับการเกิดใบ เมื่อก้านช่อดอกเจริญมากขึ้น ก็จะดันกาบใบด้านในขาด และก้านช่อดอก (Peduncle) ก็จะแทงชูช่อดอกเจริญโผล่ขึ้นมา โดยมีใบเล็กๆ ที่ปลายก้านใบ และภายในทำหน้าที่เป็นใบประดับ (Bract) รองรับช่อดอกอีกทีหนึ่ง เมื่อเจริญเต็มที่แล้วดอกผักตบชวาจะบานพร้อมกันหมดทั้งช่อ ในแต่ละดอก ประกอบด้วยกลีบดอก 9 Perianth 6 กลีบ ปลายกลีบแยกเป็นแฉก มีขนาดแตกต่างกัน ส่วนโคนกลีบจะติดกันเป็นหลอด (Tube) มีสีเขียว หลอดนี้จะติดไปถึงก้านช่อดอก ส่วนกลีบรวมนั้นจะเป็นสีม่วงอ่อน มีกลีบอันหนึ่งซึ่งอยู่ตรงกลางขนาดใหญ่กว่ากลีบอื่น มีแต้มสีเหลืองทับอยู่บนสีม่วง ทำให้ดอกมีสีสันสวยงาม (กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

นอกจากนี้ ยังมีเกสรตัวผู้ (Stamen) 6 อัน สั้น 3 ยาว 3 ติดอยู่ที่ตอนล่างของกลีบดอก อับเกสรตัวผู้ (Anther) มีสีเหลือง ส่วนเกสรตัวเมีย (Pistil) มีส่วนตรงปลายเรียกว่า Stigma มีสีม่วงอ่อนอยู่บนก้าน (Style) ต่อมาจากรังไข่ (Ovary) ซึ่งอยู่เหนือกลีบดอก (Superior ovary) รังไข่นี้เมื่อได้รับการผสมแล้วจะเจริญขึ้นเป็นผล แต่ตามปกติแล้วในสภาพแวดล้อมของประเทศไทยมักจะไม่ค่อยพบว่ามีการผสมของดอกผักตบชวา จึงไม่ค่อยพบเมล็ดผักตบชวา หากแต่ในกรณีที่มีการผสม เมล็ดจะมีขนาดเล็กมากและมีสีน้ำตาลเข้ม

5) การสืบพันธุ์และการขยายพันธุ์

ผักตบชวามีทั้งการสืบพันธุ์แบบทั้งอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ โดยแบบอาศัยเพศจะเกิดหลังจากที่ดอกบานได้ 48 ชั่วโมง และมีแมลงมาช่วยผสมเกสรหรืออาจเกิดการผสมด้วยตัวเองก็ได้ หลังจากนั้น 3 สัปดาห์ เมล็ดขนาดเล็กสีดำจะแก่ และก้านช่อดอกจะโค้งงอลงเบื้องล่าง เมื่อกระเปาะผลแตก เมล็ดก็จะหลุดลงสู่พื้นท้องน้ำ แต่ส่วนใหญ่แล้วผักตบชวาจะไม่สืบพันธุ์โดยเมล็ด นอกจากในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น ในตอนที่น้ำแห้งในฤดูแล้ง ซึ่งต้นผักตบชวาอาจแห้งตายหมด ถ้ามีการสืบพันธุ์โดยเมล็ดพอถึงฤดูฝนเมล็ดที่พักตัวอยู่ในดินจะเริ่มงอกขึ้นมาเป็นต้นอ่อน และในไม่ช้าก็จะเจริญเติบโตขึ้น (กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

การสืบพันธุ์ของผักตบชวาที่พบเห็นอยู่ทั่วไป และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดก็คือการแตกไหลแล้วกลายเป็นลำต้นติดอยู่กับต้นแม่เป็นจำนวนมากจนเกิดเป็นกอใหญ่ หลังจากที่ต้นอ่อนเกิดตาและใบของตนเองได้ภายในเวลาเพียงไม่กี่วัน ต้นอ่อนเหล่านี้ก็จะเริ่มสร้างต้นอ่อนต่อไปอีก

2.5.3 **องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา**

ผักตบชวาส่วนใหญ่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหลัก โดยมากถึง 90-95% โดยน้ำหนัก เนื่องจากลักษณะที่มีลำต้นอวบน้ำจึงทำให้มีน้ำหนักสดมากเมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำชนิดอื่นๆ ส่วนประกอบที่เป็นเส้นใยมีเพียง 5-10 % เท่านั้น ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 2.10) ดังนี้ (Mishra et al., 2008)

ตารางที่ 2.10 องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณในส่วนใบของผักตบชวา (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณในส่วนรากของผักตบชวา (เปอร์เซ็นต์)
โปรตีน (Crude protein)	11.1	15.2
ไนโตรเจน (N)	16.8	25.8
ฟอสฟอรัส (P)	4.3	6.8
แคลเซียม (Ca)	2.1	2.8
โพแทสเซียม (K)	3.8	4.9
แมกนีเซียม (Mg)	0.9	1.6
เหล็ก (Fe)	0.09	0.57
ทองแดง (Cu)	0.05	0.44
สังกะสี (Zn)	0.2	0.27
นิกเกิล (Ni)	0.07	0.16

ที่มา : Mishra et al. (2008)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.4 การใช้ประโยชน์จากผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีในการนำไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากมีปริมาณมาก และเกิดทดแทนส่วนที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างรวดเร็ว และการลอยน้ำได้ของผักตบชวา ช่วยให้การเก็บเกี่ยวง่ายขึ้นโดยเฉพาะถ้ามีลม หรือกระแสน้ำ ช่วยพัดพามายังสถานที่ที่ตั้งอุปกรณ์การเก็บเกี่ยว หากเป็นในแม่น้ำลำคลอง การขึงลวดสลิงติดทุนลอยขวางลำน้ำให้เป็นมุมลู่มาทางที่ตั้งเครื่องเก็บเกี่ยว ก็จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยวไปได้มาก อีกทั้งยังเป็นการป้องกันมิให้ผักตบชวาลอยต่อไปยังอ่างเก็บน้ำหรือแหล่งน้ำอื่น แล้วไปขยายพันธุ์ในที่ซึ่งกว้างขวางยากแก่การกำจัด โดยสามารถนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้ (กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

1) ใช้เป็นอาหารสัตว์ เช่น โค สุกร เป็นต้น
2) ใช้ทำปุ๋ยเพาะเห็ด
3) ใช้เป็นเครื่องจักสาน
4) ใช้ทำก๊าซหุงต้ม
5) ใช้ทำแท่งเพาะชำ
6) ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ของผักตบชวาในการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก นอกจากเป็นการแก้ปัญหาในเรื่องการแพร่ระบาดของผักตบชวาด้วยแล้วยังเป็นการแก้ปัญหาอื่นๆ อีกด้วย เช่น นำไปแก้ไขปัญหามลพิษต่างๆ ในแหล่งน้ำ เช่น สารอินทรีย์ต่างๆ ที่เกินความจำเป็นในแหล่งน้ำหรือเป็นพิษ เช่น สารเคมีจากยาฆ่าแมลง รวมถึงโลหะหนักที่มีการปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งผักตบชวามีความสามารถในการกำจัดออกจากน้ำ โดยการดูดดึงมาเก็บสะสมไว้ในส่วนต่างๆ เป็นการลดการแพร่กระจายของมลพิษสู่พื้นที่อื่น

2.5.5 การนำผักตบชวาหลังจากกำจัดโลหะหนักแล้วมาใช้ประโยชน์

ผักตบชวาภายหลังจากการกำจัดโลหะหนักแล้วไม่ควรนำมาทำเป็นปุ๋ยสำหรับพืชที่ใช้เป็นอาหาร แต่สามารถนำมาใช้ได้อย่างปลอดภัยในการทำ Biogas ซึ่งจากการศึกษาของ Wolverton และ McDonald (1976) ที่ทำการใช้ผักตบชวาที่ปราศจากโลหะหนักผลิต Biogas พบว่าหากให้ C/N ratio เท่ากับ 30:1 จะให้ค่า Biogas ซึ่งเป็นก๊าซมีเทนสูงที่สุด คือ 13.9 มิลลิกรัมของก๊าซต่อกรัม

น้ำหนักเปียกของพืชโดยเฉลี่ย นอกจากนี้ยังได้เสนอแนะแนวทางในการที่จะนำผักตบชวาหลังจากกำจัดโลหะหนักแล้วมาใช้ประโยชน์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยเศษซากผักตบชวาที่เหลือภายหลังจากนำผักตบชวาไปผลิต Biogas แล้ว สามารถรวบรวมไว้ และใส่ลงไปรวมกับตะกอนจากการบำบัดน้ำในหลุมพิเศษที่ออกแบบโดยไม่ให้น้ำซึมผ่านเข้าไปได้ รอจนมีปริมาณเพียงพอหรือให้เหมาะสมก่อนจะนำมาสกัด (Extraction) หรือใช้วิธีอื่นๆ ต่อไป เช่น การนำโลหะหนักมาใช้ใหม่ได้ (Recycle) (Wolverton และ McDonald, 1975)

Pollution removal application	Harvested plants - Process alternatives	Products
Removal of heavy metals from chemical and industrial waste waters	Anaerobic fermentation → Methane gas ↓ Residual sludge → Metal extraction process → Silver, Gold, Cadmium, Mercury, Lead, etc. base metals	
Removal of nitrates and phosphates from domestic sewage	Anaerobic fermentation → Methane gas ↓ Residual sludge → Dryed-utilizing metal gas or solar energy as source of thermal energy → Agricultural fertilization (bagged or bulk)	
	and / or	
	Chopped and dryed plant meterial → Animal feed processing → Additive for cattle, Swine and poultry feeds Chopped and dryed plant meterial → Portable-food processing → Protein supplement flour or meal cereal ingredient	
	and / or	
	Composted → Yard and garden mulch	

ที่มา : Wolverton และ McDonald. (1975)

รูปที่ 2.6 แนวทางการนำพืชที่ใช้ในการบำบัดแล้วมาใช้ประโยชน์

2.6 กลไกการดูดดึงโลหะหนักของพืช

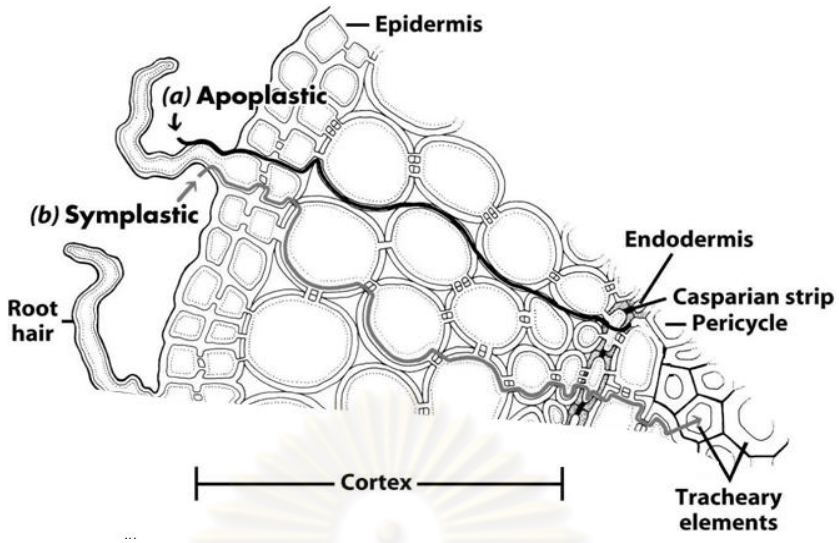
สำหรับกลไกของการดูดดึงแคดเมียมของพืชโดยหลักการพื้นฐานของการสะสมแคดเมียมในพืชสามารถบอกถึงกลไกการดูดดึงแคดเมียมได้พอสังเขป ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการหลัก 2 กระบวนการ (Welch และ Norvell, 1999) ได้แก่

2.6.1 การดูดดึงโลหะหนักโดยรากพืช (Uptake)

กระบวนการนี้โลหะหนักจะถูกดูดดึงเข้าสู่รากของพืชมาพร้อมกับน้ำที่รากของพืชดูดซึมเข้ามา โดยผ่านการเคลื่อนที่ของน้ำได้ทั้ง 2 วิธีการ (ดังรูปที่ 2.7) คือ

1) Apoplastic pathway เป็นการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ของรากพืช ซึ่งเป็นกลไกที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์พืช (Passive transport) โดยอาศัยวิธีการแพร่ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของระดับพลังงาน จากที่มีพลังงานสูงไปยังที่มีพลังงานต่ำ ได้แก่ ค่า Water potential ซึ่งแปรผันไปตามความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ และแรงดันของน้ำภายในรากพืช โดยวิธีการนี้ เมื่อน้ำมาถึงชั้นเอนโดเดอร์มิส (Endodermis) ซึ่งมี Suberin ซึ่งเป็นสารเหมือนไขมัน และไม่ละลายน้ำเคลือบอยู่เป็นแนวกั้นคือบริเวณ Casparian strip น้ำจะผ่านไปไม่ได้ (เชาวน์ ชิโนรักษ์ และวรรณี ชิโนรักษ์, 2541) ทำให้โลหะหนักผ่านไปไม่ได้เช่นกัน จึงต้องมีวิธีการอื่นให้น้ำเคลื่อนที่เข้าไปในเซลล์

2) Symplastic pathway เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านช่องพลาสโมเดสมาตา (Plasmodesmata) ภายในเซลล์ของพืช เป็นวิธีการที่น้ำสามารถผ่านเข้าสู่ชั้นเอนโดเดอร์มิสเข้าไปได้ ซึ่งทำให้โลหะหนักถูกขนส่งจากรากเข้าสู่ทางท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) โดยวิธีการนี้มีทั้งกลไกในการเคลื่อนที่ของน้ำแบบ Passive transport และแบบ Active transport โดยกลไกแบบ Active transport ต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์พืช ได้แก่ การลำเลียงผ่านตัวลำเลียงประจุบวก และการแพร่ผ่านเข้าช่องที่เป็นประจุบวกสอง (Divalent cation membrane channel) โดยโลหะหนักจะผ่านเข้าเยื่อหุ้มไปโดยกลไกเหล่านี้ (Kochain, 1991)



รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของน้ำแบบ Apoplastic pathway และ Symplastic pathway
ที่มา: ดัดแปลงจาก http://mason.gmu.edu/~jlawrey/biol304/biol304/water%20lab.html

2.6.2 **การเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืช** (Translocation)

หลังจากที่โลหะหนักถูกขนส่งจากรากเข้าสู่ทางท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) แล้ว โลหะหนักก็จะเคลื่อนย้ายไปพร้อมกับน้ำที่ถูกลำเลียงไปสู่ยอด (Upward conduction) โดยอาศัยแรงดึงจากการคายน้ำของพืชที่เรียกว่า Transpiration pull เมื่อพืชคายน้ำออกไปแล้วจะทำให้เซลล์ใบของพืชขาดน้ำจึงมีแรงดึงออกจากเซลล์ข้างเคียง ทำให้เกิดการดึงต่อกันไปเป็นลำดับจากเซลล์ในท่อลำเลียงน้ำของใบ ก้านใบ กิ่ง ลำต้น และราก ตามลำดับ ทำให้พืชสามารถลำเลียงน้ำจากรากไปสู่ยอดสูงได้ ซึ่งโลหะหนักที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับน้ำจะถูกขนส่งไปยังส่วนต่างๆ ของพืช และเกิดการสะสมขึ้นได้ (Kochain, 1991)

2.7 **งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

2.7.1 **งานวิจัยด้าน** Phytoremediation

แววลี ประมูล (2548) ทำการศึกษาการสะสมแคดเมียมในผักบุ้ง (*Ipomoea aquatica*) ที่ปลูกในน้ำที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในระยะยาวที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ และการสะสมแคดเมียมในผักบุ้งในน้ำที่มีการปนเปื้อนสูงแต่ใช้ในระยะเวลาสั้น โดยศึกษาถึงการแสดงความ

เป็นพิษของแคดเมียมในผักบุ้ง ผลการศึกษา พบว่า ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 7.6 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถปลูกผักบุ้งได้เป็นเวลา 30 วัน แต่ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 59.1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ผักบุ้งเกิดอาการใบเหลือง และตาย ส่วนในการปลูกที่ระยะยาว คือ 130 วัน พบว่า ผักบุ้งให้ผลผลิตลดลงแตกต่างจากแปลงควบคุมที่ไม่มีการเติมแคดเมียม สำหรับที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมไม่เกิน 0.053 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ผักบุ้งมีการเจริญเติบโตปกติ ในขณะที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 0.446 มิลลิกรัมต่อลิตร พืชเริ่มตายหลังจากปลูกไปแล้ว 40 วัน นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของผักบุ้งมีสูงสุดในราก ลำต้น และใบ ตามลำดับ

สุธินี วดีศิริศักดิ์ (2550) ศึกษาความสามารถในการดูดดึงโครเมียมจากดินด้วยต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulates* Poir.) โดยวิธีการปลูกพืชในดินที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์เท่ากับ 0 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และวิธีการปลูกพืชไร้ดินในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ที่ระดับความเข้มข้น 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการศึกษานี้พบว่า วิธีการปลูกพืชในดินมีการสะสมโครเมียมทั้งหมดในราก ลำต้น และใบของต้นก้างปลา เท่ากับ 390.57, 61.47 และ 58.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับที่เวลา 90 วัน ส่วนวิธีการปลูกพืชไร้ดินมีการสะสมโครเมียมทั้งหมดในราก ลำต้น และใบของต้นก้างปลา เท่ากับ 6,616.12, 14.46 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับที่เวลา 60 วัน ซึ่งผลจากการสะสมและเคลื่อนย้ายโครเมียมในส่วนต่างๆ ของพืชพบว่า โครเมียมส่วนใหญ่ถูกเคลื่อนย้ายโดย Phytoextraction และต้นก้างปลาเป็นพืชที่มีศักยภาพสามารถนำมาใช้ในการกำจัดโครเมียมได้ดี โดยเฉพาะวิธีการบำบัดโครเมียมในน้ำ ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการปลูกพืชในดิน ทั้งนี้เนื่องจากรากของพืชที่อยู่ในน้ำสามารถดูดดึงโครเมียมได้โดยตรง

2.7.2 งานวิจัยด้านการใช้ผักตบชวาในการกำจัดโลหะหนัก

Hasan et al. (2006) ได้ทำการศึกษาการดูดดึงแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการใช้ผักตบชวา ในการทดลองใช้ความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายที่ระดับ 1.0, 2.0, 2.5, 4.0 และ 6.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายที่ระดับ 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ 12.0 มิลลิกรัมต่อลิตร การศึกษาครั้งนี้พบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักทั้งสองชนิดได้ดี โดยมีเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ในทุกๆ ระดับความเข้มข้น นอกจากนี้ยังพบว่า ผักตบชวามีการสะสมโลหะหนักทั้งสองชนิดในรากมากกว่าส่วนของลำต้น โดยปริมาณการสะสมทั้งสองส่วนจะมากขึ้นตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มากขึ้น และยังพบว่า มีการสะสมสังกะสี

มากกว่าแคดเมียม อีกทั้งระดับความเข้มข้นของโลหะหนักมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวา คือ เมื่อระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นทำให้อัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวาลดลง โดยเฉพาะสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 4.0 และ 6.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ผักตบชวาตายทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าผักตบชวามีความทนทานต่อโลหะหนักได้จำกัด ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย

Sampanpanish และ Tippayasak (2007) ได้ทำการศึกษาการสะสมโครเมียมเฮกซาวาเลนท์โดยวิธีการปลูกพืชไร้ดินโดยพืชที่ใช้ในการศึกษา คือ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) และแว่นแก้ว (*Hydrocotyle umbellate* L.) ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการศึกษานี้พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 7, 15, 21 และ 30 วัน ผักตบชวาทั้งต้นมีการสะสมโครเมียมเท่ากับ 1.29, 1.76, 2.56 และ 2.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนแว่นแก้วทั้งต้นมีการสะสมโครเมียมเท่ากับ 0.74, 1.10, 1.26 และ 1.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผักตบชวามีประสิทธิภาพในการสะสมโครเมียมมากกว่าแว่นแก้ว นอกจากนี้ยังพบว่าในส่วนของรากพืชทั้งสองชนิดนี้มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ได้มากที่สุด

Mishra et al. (2008) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากกิจกรรมต่างๆ ของเหมืองถ่านหินด้วยการเปรียบเทียบพืชน้ำ 3 ชนิด ได้แก่ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) แหนเล็ก (*Lemna minor*) และแหนเป็ดใหญ่ (*Spirodela polyrhiza*) เป็นการนำน้ำทิ้งจากพื้นที่มาทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของโลหะ ผลการศึกษาพบว่า ในน้ำทิ้งมีปริมาณการสะสมของโครเมียม แคดเมียม ทองแดง เหล็ก สังกะสี และนิกเกิล ปริมาณเท่ากับ 1.3, 0.09, 0.15, 4.8, 7.1 และ 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในขณะที่น้ำทิ้งที่นำมาใช้ในการทดลอง พบว่า พืชทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่แตกต่างกัน โดยผักตบชวามีประสิทธิภาพสูงที่สุด คือ 70.5, 69.1, 76.9, 66.4, 65.3 และ 55.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผักตบชวามีความเหมาะสมที่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ใช้ในการทดลองด้วยกัน

Mishra และ Tripathi (2009) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของผักตบชวาในการกำจัดโครเมียม และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งสองชนิดที่ระดับความเข้มข้น 1, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการกำจัดสังกะสีได้ดีที่สุดคิดเป็น 95 เปอร์เซ็นต์ และผักตบชวาสามารถกำจัดโครเมียมในน้ำได้ คิดเป็น 84

เปอร์เซ็นต์ และยังพบว่า การสะสมโลหะหนักทั้งสองชนิดมีมากในส่วนที่เป็นรากมากกว่าส่วนของลำต้น และผลจากการสะสมของโลหะหนักทั้งสองชนิดภายหลังการเก็บตัวอย่างที่ 21 วัน พบว่าผักตบชวามีการแสดงความเป็นพิษที่เกิดจากการสะสมโครเมียมในพืช ในขณะที่ไม่พบการแสดงความเป็นพิษของการสะสมสังกะสีของผักตบชวา

2.7.3 งานวิจัยด้านการใช้สารคีเลต

Hernandez et al. (2006) ทำการศึกษาการใช้สารคีเลต คือ สาร EDTA โดยใช้ความเข้มข้นที่ 250, 500 และ 750 ไมโครโมลต่อลิตร ในการช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมด้วยการปลูกพืช *Cynara carduncylus* ในสารละลาย ผลการศึกษาพบว่าสาร EDTA ช่วยในการดูดดึงโลหะหนักได้ดีขึ้นที่ระดับความเข้มข้น 250 ไมโครโมลต่อลิตร โดยมีการสะสมโลหะหนักได้มากในส่วนของลำต้น และลดลงในส่วนของราก แสดงให้เห็นว่าสาร EDTA มีส่วนช่วยในการสะสม และเคลื่อนย้ายโลหะหนักไปยังส่วนต่างๆ ได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของสาร EDTA ต่อความเป็นพิษของพืชที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งพบว่า ความเข้มข้นที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชมากขึ้น เช่น พืชมีอัตราการคายน้ำลดลง การเปิดปิดของปากใบลดลง และการจุน้ำลดลง เป็นต้น

Santos et al. (2006) ศึกษาการใช้สารคีเลต 2 ชนิด ได้แก่ สาร EDTA และ EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เพื่อชักนำให้พืชดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว ที่ปนเปื้อนดินโดยใช้หญ้า *Brachiaria decumbens* ผลการศึกษา พบว่า สาร EDTA มีผลต่อการช่วยดูดดึงโลหะในดินได้ ส่วนสาร EDDS มีความเป็นอันตรายต่อพืชน้อย อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการช่วยให้ *B. decumbens* มีการดูดดึงโลหะหนักในดินได้ดีกว่าสาร EDTA นอกจากนี้สาร EDDS สามารถช่วยให้ *B. decumbens* ดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วไปสะสมไว้ในส่วนลำต้นเหนือดิน คิดเป็น 2.54, 2.74 และ 4.30 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ส่วน EDTA สามารถช่วยให้ *B. decumbens* ดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วได้เท่ากับ 1.77, 1.11 และ 1.87 เท่าตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่า EDDS มีประสิทธิภาพมากกว่า EDTA ในการช่วยทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายประจุบวกของโลหะหนักจากรากสู่ส่วนลำต้นเหนือดิน จากการศึกษาในครั้งนี้ยังพบว่า *B. decumbens* สามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่ปนเปื้อน โดยไม่แสดงอาการให้เห็นถึงลักษณะความเป็นพิษ อีกทั้งมีความทนทานต่อโลหะหนัก มีการเจริญเติบโตเร็ว และมีมวลชีวภาพสูง

ชิดชนก อัศวโภคี (2550) ทำการศึกษาผลของการใช้สารคีเลต ได้แก่ สาร EDTA, EDDS และ Citric acid เพื่อช่วยในการดูดดึงแคดเมียมจากดินด้วยทานตะวัน (*Helianthus annuus*

Linn.) ซึ่งเป็นการเติมสารละลายแคดเมียมไนเตรต ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ภายหลังจากปลูกพืชเป็นเวลา 35 วัน และเติมสารคีเลตทั้ง 3 ชนิด ที่ระดับความเข้มข้น 0.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน จำนวน 1 ครั้ง ผลการศึกษาพบว่า ทานตะวันมีความสามารถในการสะสมแคดเมียมทั้งต้นมากที่สุดคือ 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (น้ำหนักแห้ง) โดยพบว่า EDTA มีการสลายตัวช้ากว่า EDDS และ Citric acid และมีส่วนช่วยในการดูดดึงได้มากที่สุด

นัยนันท์ อริยกานนท์ (2550) ศึกษาผลของสารคีเลตและกรดอินทรีย์ 5 ชนิด คือ DTPA, EDDS, Oxalic acid, Citric acid และ Gullic acid ในการช่วยดูดดึงทองแดง สังกะสี และนิกเกิลด้วยต้อยติ่ง (*Ruellia tuberosa* (Burm.f.) Hochr.) ผลการศึกษาพบว่า ต้อยติ่งสามารถสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลทั้งต้นได้มากที่สุดเท่ากับ 1,522 4,111 และ 7,332 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และภายหลังจากเติมสารคีเลตและกรดอินทรีย์ พบว่า EDDS ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมของทองแดงและนิกเกิลของต้อยติ่งได้มากที่สุด ส่วน DTPA จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมสังกะสีของต้อยติ่งได้ดีที่สุด นอกจากนี้การศึกษาความเป็นพิษของสารคีเลตและกรดอินทรีย์ที่มีต่อพืชพบว่า DTPA, EDDS, Oxalic acid, Citric acid และ Gullic acid ไม่มีความเป็นพิษต่อพืชทดลอง

Kai-sung et al. (2008) ศึกษาสารคีเลตสองชนิด ได้แก่ สาร EDTA และไตรตอน (Triton X-100; TX-100) ที่ระดับความเข้มข้น 10 และ 100 ไมโครโมลต่อลิตร เพื่อเพิ่มการดูดดึงแคดเมียมโดยการใช้ต้นผักบุ้ง (*Ipomoea aquatica*) ในสารละลายที่มีระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0.3, 1 และ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่า EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 10 ไมโครโมลต่อลิตร และ TX-100 ที่ระดับความเข้มข้นทั้งสองระดับ สามารถช่วยในการสะสมแคดเมียมในส่วนของลำต้นได้เพิ่มมากขึ้น แต่มีปริมาณลดลงในส่วนของรากอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารคีเลตทั้งสองชนิดมีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมของผักบุ้ง และมีส่วนช่วยในการเคลื่อนที่ของแคดเมียมจากรากสู่ลำต้นได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกพืชทดลอง

1) ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*)
2) เรือนเพาะชำ ขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 6 เมตร สูง 3 เมตร
3) ภาชนะพลาสติก ขนาดเส้นผ่านสูงกลาง 35 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร
4) ถุงพลาสติกสีดำ ขนาด 16x20 นิ้ว
5) น้ำประปา
6) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
7) กระบอกตวงน้ำ ขนาด 2 ลิตร
8) ปั๊มอากาศ และหัวฟู่เติมอากาศ
9) กระดาษกาว และปากกาทำเครื่องหมาย

3.1.2 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างพืช และน้ำ

1) ถุงพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างดิน
2) ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำ ขนาด 200 มิลลิลิตร
3) มีดหรือกรรไกร
4) กาลักน้ำ
5) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
6) เครื่องชั่งหยาบ 1 ตำแหน่ง
7) ตะกร้าพลาสติก
8) ฉลากสำหรับติดตัวอย่าง และปากกาทำเครื่องหมาย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

1) เครื่องแก้วชนิดต่างๆ ได้แก่
   (1) บีกเกอร์ (Beaker)
   (2) กระบอกตวง (Cylinder)
   (3) ปิเปต (Pipet)
   (4) กรวยกรอง (Funnel)
   (5) แท่งแก้ว (Glass rod)
   (6) ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
   (7) กระจกนาฬิกา (Watch grass)
   (8) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
2) กระดาษกรอง เบอร์ 40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร (Whatman, England)
3) กระกาษกรอง GF/C (Glass micro filters) เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร (Whatman, England)
4) พาราฟิล์ม
5) ชุด Flask buchner filtration
6) ขวดพลาสติก สำหรับใส่สารละลายสกัดขนาด 60 มิลลิลิตร
7) เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer; AAS) รุ่น AAnalyst 800, Perkin Elmer
8) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) รุ่น ETHOS SEL, MILESTONE
9) ตู้อบความร้อน (Hot air oven) รุ่น ULE 500, MEMMERT
10) เตาไฟฟ้า (Hot plate) รุ่น Cimarec 2, Thermolyne
11) เครื่องวัดความเป็นกรดเป็นด่าง (pH Meter)
12) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC Meter)
13) เครื่องวัดค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน (ORP Meter)
14) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง พิกัด 220 กรัม รุ่น BP 221S, Sartorius
15) ปั๊มดูดอากาศ รุ่น N035AN.18-IP20
16) เครื่องบดตัวอย่างพืช (Blender)
17) ตู้ดูดอากาศ (Hood)

3.1.4 **สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย**

สารเคมีที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ เตรียมอาหารสำหรับพืชทดลอง และใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง สารเคมีทั้งหมดเป็นสารเคมีเกรดงานวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ได้แก่

1) แคดเมียมไนเตรทเททระไฮเดรต ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$)
2) เอทิลีนไดแอมีนเททระแอซิตริก แอซิด ($C_6H_{16}N_2O_8$)
3) ซิตริกแอซิดโมโนไฮเดรต ($C_6H_8O_7.H_2O$)
4) กรดไนตริกเข้มข้น (65% HNO_3)
5) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% H_2O_2)
6) โปแทสเซียมไนเตรท (KNO_3)
7) โปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)
8) แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปทะไฮเดรต ($MgSO_4.7H_2O$)
9) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
10) โบริคแอซิด (H_3BO_3 85%)
11) แมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($MnSO_4.H_2O$)
12) ซิ้งค์ซัลเฟตเฮปทะไฮเดรต ($ZnSO_4.7H_2O$)
13) คอปเปอร์ซัลเฟตเททระไฮเดรต ($CuSO_4.5H_2O$)
14) โมลิบดิคแอซิด ($MoO_3.2H_2O$ 85%)
15) เฟอริคคลอไรด์ ($FeCl_3$)
16) แคลเซียมไนเตรทเททระไฮเดรต ($Ca(NO_3)_2.4H_2O$)

3.2 **สถานที่ดำเนินการวิจัย**

การดำเนินงานวิจัยได้ปฏิบัติการปลูกพืชทดลองในโรงเรือนที่มีหลังคากันน้ำฝน และแสงสว่างสามารถส่องผ่านได้อย่างเพียงพอ บริเวณชั้น 2 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการศึกษาวิเคราะห์ตัวอย่างได้ปฏิบัติการในห้องปฏิบัติการชั้น 3 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อทำการตรวจวัดคุณสมบัติของตัวอย่างน้ำ และวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างพืช และน้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 ระยะเวลาการวิจัย

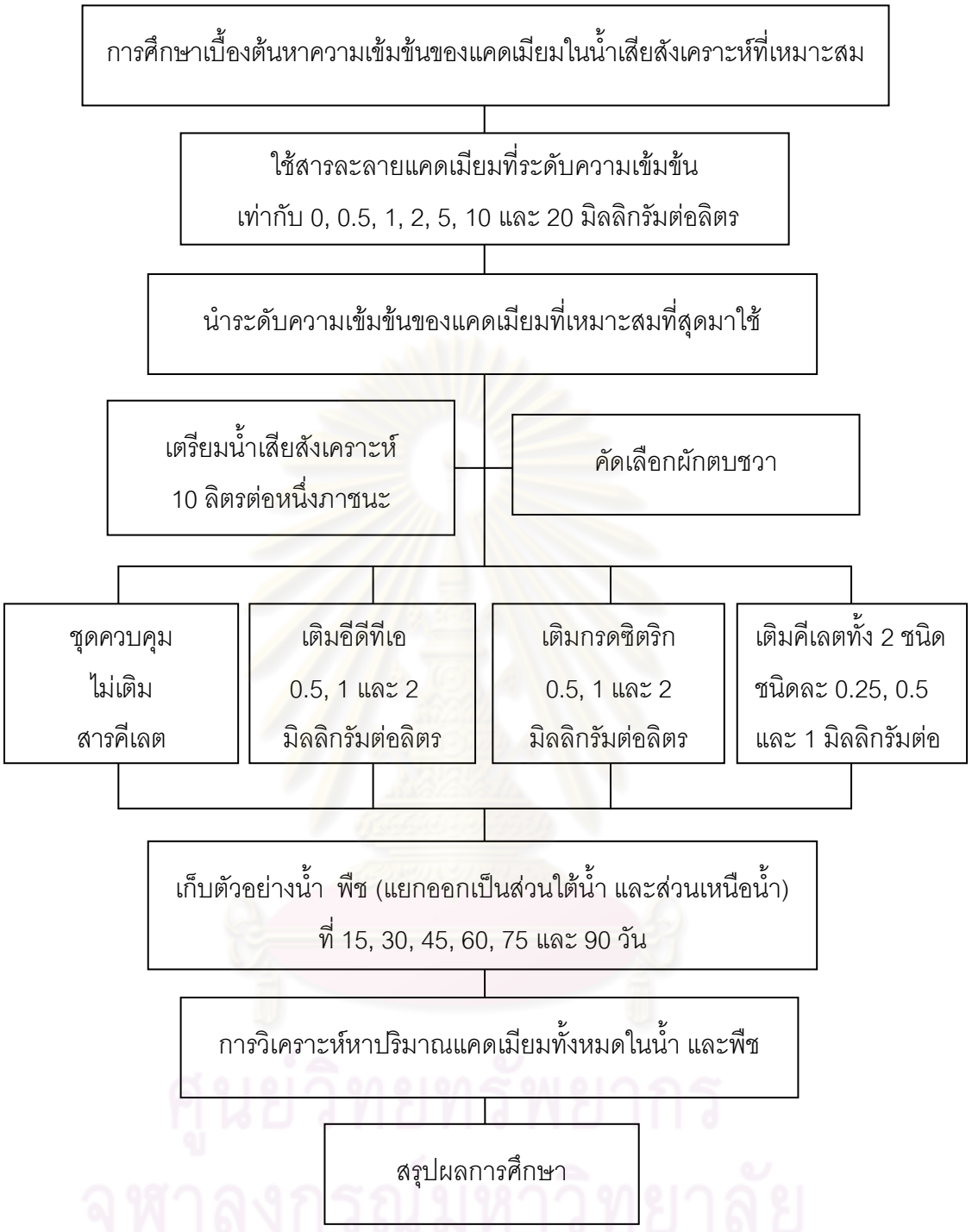
เริ่มดำเนินการวิจัยในระหว่างเดือนเมษายน 2552 ถึง พฤษภาคม 2553 ตั้งแต่การค้นคว้าหาข้อมูล การทบทวนเอกสาร การวางแผนการวิจัย การเตรียมและการปลูกพืชทดลอง การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ การวิเคราะห์ผล วิจารณ์ และสรุปผลการวิจัย ทั้งนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่

1) การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม โดยใช้เวลาในการศึกษา 30 วัน ทำการวัดคุณภาพน้ำ และเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต ในวันที่ 7, 15, 22 และ 30 ของการทดลอง และเก็บตัวอย่างพืชและน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

2) การศึกษาผลของ EDTA และ Citric acid ต่อการดึงดูดแคดเมียมด้วยผักตบชวา โดยทำการวัดคุณภาพน้ำ เก็บข้อมูลการเจริญเติบโต รวมทั้งเก็บตัวอย่างพืชและน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

โดยสามารถแสดงขั้นตอนของการศึกษาได้ดังรูปที่ 3.1 และรายละเอียดของวันที่ทำการเก็บตัวอย่างดังตารางที่ 3.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 3.1 วันที่ทำการทดลอง และดำเนินการเก็บตัวอย่างพืช และน้ำในเรือนทดลอง

ขั้นตอนการศึกษา	วันที่
1. การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม	
1.1 การจัดเตรียมโรงเรือน พืชทดลอง และน้ำเสียสังเคราะห์	1 - 31ตุลาคม 2552
1.2 การเก็บตัวอย่างพืช และตัวอย่างน้ำ	
การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1	9 พฤศจิกายน 2552
การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2	17 พฤศจิกายน 2552
การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 3	24 พฤศจิกายน 2552
การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 4	2 ธันวาคม 2552
2. การศึกษาผลของ EDTA และ Citric acid ต่อการดึงดูดแคดเมียมด้วยผักตบชวา	
2.1 การจัดเตรียมโรงเรือน พืชทดลอง และน้ำเสียสังเคราะห์	1-30 ธันวาคม 2552
2.2 การเก็บตัวอย่างพืช และตัวอย่างน้ำ	
การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1	20 มกราคม 2553
การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2	5 กุมภาพันธ์ 2553
การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 3	20 กุมภาพันธ์ 2553
การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 4	6 มีนาคม 2553
การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 5	21 มีนาคม 2553
การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 6	5 เมษายน 2553

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การดำเนินการวิจัย

3.4.1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

1) การเตรียมภาชนะ

ใช้ภาชนะพลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 35 เซนติเมตร จำนวน 21 ใบ ทำการแช่ด้วยกรดไนตริก 10% นาน 1 วัน แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง และน้ำกลั่น 1 ครั้ง

2) การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ชั่งน้ำหนักสารประกอบแคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) ให้ได้ตามสัดส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 และ 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) โดยคำนวณจากปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 10 ลิตรต่อหนึ่งภาชนะปลูก ดังตารางที่ 3.2 และทำการละลายสารประกอบแคดเมียมไนเตรทในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วเทลงในภาชนะปลูกจำนวน 3 ภาชนะปลูกต่อระดับความเข้มข้น (ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ) และปรับปริมาตรให้เท่ากับ 10 ลิตร

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารประกอบแคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) ที่ใส่ลงไปในน้ำ

ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณสารประกอบแคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) (กรัมต่อภาชนะปลูก)
0	-
0.5	0.0137
1	0.0274
2	0.0549
5	0.1372
10	0.2744
20	0.5488

หมายเหตุ: มวลโมเลกุลของแคดเมียม เท่ากับ 112.411 และมวลโมเลกุลของสารประกอบแคดเมียมไนเตรท เท่ากับ 308.479 (วิธีคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ก)

3) การเตรียมพืชทดลอง

นำผักตบชวาจากพื้นที่ที่ไม่มีการปนเปื้อนแคดเมียมในน้ำ ทำการสุ่มตัวอย่างจำนวน 3 ต้น เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมสะสม โดยการย่อยด้วยกรดไนตริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามวิธีการของ United States Environmental Protection Agency (USEPA) Method 3052 (USEPA, 1996) แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer; AAS) ซึ่งพบว่า เครื่องไม่สามารถวัดค่าได้ (Not detectable) แสดงให้เห็นว่า ผักตบชวาที่นำมาใช้ในการทดลองไม่มีการปนเปื้อนแคดเมียมจากนั้นทำการคัดเลือกผักตบชวาให้มีขนาดลำต้น ราก และน้ำหนักใกล้เคียงกันประมาณ 25-30 กรัม จำนวน 21 ต้น นำมาล้างทำความสะอาด 3-4 ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีสิ่งปนเปื้อน

4) การปลูกพืช และการดูแลรักษา

นำผักตบชวามาปลูกลงในภาชนะทดลองที่เตรียมไว้ที่มีสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 0, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 และ 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในแต่ละภาชนะได้มีการติดตั้งเครื่องเติมอากาศในน้ำ และมีการเติมสารอาหารสำหรับพืชทดลอง เพียงครั้งเดียวเมื่อเริ่มการทดลอง ซึ่งเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา และมีการสังเกตระดับน้ำในภาชนะทดลอง เมื่อลดลงได้มีการเติมน้ำเพื่อรักษาปริมาตรให้เท่ากับ 10 ลิตร ตลอดระยะเวลาของการทดลอง

5) การเก็บข้อมูล และการวิเคราะห์ตัวอย่าง

5.1) การเก็บข้อมูลการเติบโต และอาการความเป็นพิษของพืชทดลอง โดยการจดบันทึกการเติบโต ด้วยการชั่งน้ำหนักสด คำนวณอัตราการเติบโต สังเกตและบันทึกอาการผิดปรกติจากความเป็นพิษของแคดเมียม ในวันที่ 7, 15, 22 และ 30 ของการทดลอง

5.2) วิเคราะห์คุณภาพน้ำ ได้แก่ พีเอช (pH) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; ORP) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) และปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended solid) โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ในวันที่ 7, 15, 22 และ 30 ของการทดลอง ใส่ขวดปริมาตร 200 มิลลิลิตร และนำไปตรวจวิเคราะห์

5.3) วิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม โดยทำการเก็บตัวอย่างพืช และน้ำ เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 30 วัน ไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม โดยในตัวอย่างพืชได้ทำการแยกวิเคราะห์เป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)

6) วิเคราะห์ และประมวลผลการศึกษาเบื้องต้น

ทำการประมวลผล และเปรียบเทียบผลการศึกษาเพื่อนำระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองส่วนที่ 2 ต่อไป โดยทำการเปรียบเทียบจากผลที่ได้จากการศึกษาดังนี้

6.1) เปรียบเทียบการเติบโตของผักตบชวา

6.2) เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมในผักตบชวา และในน้ำ

6.3) เปรียบเทียบอาการแสดงความเป็นพิษ จากเกณฑ์การให้น้ำหนักคะแนนดังในตารางที่ 3.3 โดยการประเมินจากการสังเกตด้วยสายตา และนำไปประเมินจากเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษที่ได้รับ (Phytotoxicity หรือ Plant injury) จากจำนวนใบของพืชในการทดลอง

ตารางที่ 3.3 เกณฑ์การประเมินความเป็นพิษของผักตบชวาหลังจากได้รับโลหะหนักด้วยสายตา

ระดับความเป็นพิษ (คะแนน)	ลักษณะแสดงอาการของพืชทดลอง
0	พืชปกติ ไม่มีการเปลี่ยนสีของใบ
1	เป็นพิษต่อพืชเล็กน้อย แผ่นใบเริ่มมีสีแดงหรือสีน้ำตาลบริเวณขอบใบ
2	เป็นพิษต่อพืชเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แผ่นใบมีสีแดงหรือสีน้ำตาล
3	เป็นพิษต่อพืชเพิ่มมากขึ้น แผ่นใบมีสีแดงหรือสีน้ำตาล
4	เป็นพิษต่อพืชรุนแรง ใบมีสีแดงหรือสีน้ำตาลเกือบทั้งแผ่นใบ
5	เป็นพิษต่อพืชรุนแรงมาก ใบมีสีแดงหรือสีน้ำตาลหรือแห้งไหม้ทั้งใบ

หมายเหตุ : เกณฑ์การประเมินความเป็นพิษของพืชดัดแปลงมาจาก Brown et al. (1991) และ สุภาพร แป้งมา (2552)

ทำการประเมินความเป็นพิษของผักตบชวาด้วยสายตาหลังจากได้รับโลหะหนัก นำผลการประเมินความเป็นพิษของผักตบชวามาคำนวณเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษ โดยวิธีการคำนวณดังนี้

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของแคดเมียม

จากสูตร = $$\frac{(A_0\times B_0)+(A_1\times B_1)+(A_2\times B_2)+(A_3\times B_3)+(A_4\times B_4)+(A_5\times B_5)\times 100}{(A_r\times B_r)}$$

เมื่อ A_0 คือ จำนวนใบของลักษณะพืชปกติ ไม่มีการเปลี่ยนสีของใบ

A_1 คือ จำนวนใบที่เกิดลักษณะแผ่นใบเริ่มมีสีแดงหรือสีน้ำตาลบริเวณขอบใบ ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์

A_2 คือ จำนวนใบที่เกิดลักษณะเป็นพิษเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แผ่นใบมีสีแดงหรือสีน้ำตาล ไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์

A_3 คือ จำนวนใบที่เกิดลักษณะเป็นพิษต่อพืชเพิ่มมากขึ้น แผ่นใบมีสีแดงหรือสีน้ำตาล ไม่เกิน 60 เปอร์เซ็นต์

A_4 คือ จำนวนใบที่เกิดลักษณะเป็นพิษต่อพืชรุนแรง ใบมีสีแดงหรือสีน้ำตาลเกือบทั้งแผ่นใบ ไม่เกิน 80 เปอร์เซ็นต์

A_5 คือ จำนวนใบที่เกิดลักษณะเป็นพิษต่อพืชรุนแรงมาก ใบมีสีแดงหรือสีน้ำตาลหรือแห้งไหม้ทั้งใบ มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

A_r คือ จำนวนใบทั้งหมด

B_0 คือ คะแนนความเป็นพิษ 0 คะแนน

B_1 คือ คะแนนความเป็นพิษ 1 คะแนน

B_2 คือ คะแนนความเป็นพิษ 2 คะแนน

B_3 คือ คะแนนความเป็นพิษ 3 คะแนน

B_4 คือ คะแนนความเป็นพิษ 4 คะแนน

B_5 คือ คะแนนความเป็นพิษ 5 คะแนน

B_r คือ คะแนนความเป็นพิษสูงที่สุด 5 คะแนน

6.4) เปรียบเทียบค่าศักยภาพในการสะสมทางชีวภาพของสิ่งมีชีวิต (สำนักคณะกรรมการอาหารและยา, 2552) หรือที่เรียกว่าค่า Bioaccumulation factor (BF) หรือ Bioconcentration factor (BCF) (Lu et al., 2004) จากการคำนวณตามสมการ

$$\text{ศักยภาพในการสะสมทางชีวภาพ} = \frac{\text{ปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)}}{\text{ปริมาณความเข้มข้นในน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)}}$$

3.4.2. การศึกษาผลของสาร EDTA และ CA ต่อการดึงดูดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผักตบชวา

1) การเตรียมภาชนะ

ใช้ภาชนะพลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 35 เซนติเมตร จำนวน 30 ใบ ทำการแช่ด้วยกรดไนตริก 10% นาน 1 วัน แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง และน้ำกลั่น 1 ครั้ง

2) การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

โดยทำการเตรียมสารละลายจากแคดเมียมไนเตรทเตตระไฮเดรท (Cadmiumnitrate tetrahydrate; $Cd(NO_3)_2.4H_2O$) ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้น โดยใช้ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 10 ลิตรต่อหนึ่งภาชนะปลูก โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ดังนี้

2.1) ชุดการทดลองที่ 1 คือ ชุดควบคุม ไม่มีการเติมสารคีเลต

2.2) ชุดการทดลองที่ 2 เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3) ชุดการทดลองที่ 3 เติมกรดซิตริก (CA) ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4) ชุดการทดลองที่ 4 เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) และกรดซิตริก (CA) ร่วมกันอัตราส่วน 1:1 ที่ระดับความเข้มข้นชนิดละ 0.25, 0.5 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (ระดับความเข้มข้นของสารคีเลตทั้งหมดเท่ากับ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร)

โดยทุกชุดการทดลองใช้จำนวนภาชนะปลูก 3 ภาชนะปลูกต่อระดับความเข้มข้น (ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ) รวมภาชนะปลูกที่ใช้ทั้งหมด 30 ใบ

3) การเตรียมสารละลายคีเลต

ชั่งน้ำหนักสารประกอบอีดีทีเอไดโซเดียมซอล์ท (Na_2EDTA salt) และซิตริกแอซิดโมโนไฮเดรต ($C_6H_8O_7.H_2O$) ให้ได้ตามสัดส่วนความเข้มข้นที่จะใช้ในแต่ละชุดการทดลอง ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 โดยคำนวณจากปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 10 ลิตรต่อหนึ่งภาชนะปลูก และทำการละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วเทลงในภาชนะปลูกจำนวน 3 ภาชนะปลูกต่อระดับความเข้มข้น (ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ) และปรับปริมาตรให้เท่ากับ 10 ลิตร

ตารางที่ 3.4 ปริมาณสารประกอบอีดีทีเอไดโซเดียมซอล์ท และซิตริกแอซิดโมโนไฮเดรตที่ใช้

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นของสารคีเลตที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณสารประกอบอีดีทีเอไดโซเดียมซอล์ท (กรัมต่อภาชนะปลูก)	ปริมาณสารประกอบซิตริกแอซิดโมโนไฮเดรต (กรัมต่อภาชนะปลูก)
ชุดควบคุม	-	-	-
เติมสารอีดีทีเอ	0.5	0.0064	-
	1	0.0127	-
	2	0.0255	-
เติมกรดซิตริก	0.5	-	0.0055
	1	-	0.0109
	2	-	0.0219
เติมสารคีเลต	0.5	0.0037	0.0027
ทั้ง 2 ชนิด	1	0.0064	0.0055
	2	0.0127	0.0109

หมายเหตุ: วิธีคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ก

4) การเตรียมพืชทดลอง

นำผักตบชวาที่ใช้ในการทดลอง ทำการสุ่มตัวอย่าง จำนวน 3 ต้น เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมสะสม โดยการย่อยด้วยกรดไนตริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามวิธีการของ United States Environmental Protection Agency (USEPA) Method 3052 (USEPA, 1996) แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer; AAS) ซึ่งพบว่า ไม่สามารถวัดค่าได้ (Not detectable) แสดงให้เห็นว่า ผักตบชวาที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีการปนเปื้อนแคดเมียม จากนั้นคัดเลือกผักตบชวาให้มีขนาดลำต้น ราก และน้ำหนักใกล้เคียงกันประมาณ 25-30 กรัม จำนวน 180 ต้น นำไปทำความสะอาดโดยการล้าง 3-4 ครั้ง แล้วนำไปใช้ในการทดลอง

5) การปลูกพืช และการดูแลรักษา

นำผักตบชวามาปลูกลงในภาชนะทดลองที่เตรียมไว้ 6 ต้นต่อภาชนะ โดยในแต่ละภาชนะได้มีการติดตั้งเครื่องเติมอากาศในน้ำ และมีการเติมสารอาหารสำหรับพืชทดลองเพียงครั้งเดียวเมื่อเริ่มการทดลอง ซึ่งเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา และมีการสังเกตระดับน้ำในภาชนะทดลอง เมื่อลดลงต้องทำการเติมน้ำเพื่อรักษาปริมาตรให้เท่ากับ 10 ลิตร ตลอดระยะเวลาของการทดลอง

6) การเก็บตัวอย่าง

6.1) การเก็บตัวอย่างน้ำ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ ทุกๆ 15 วัน ของการทดลอง ได้แก่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน ทำการเก็บใส่ขวดปริมาตร 200 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด โดยขวดแรกนำไปวิเคราะห์หาคุณภาพน้ำ พารามิเตอร์ที่ใช้ ได้แก่ พีเอช (pH) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (Oxidation reduction potential; ORP) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) และปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended solid) สำหรับขวดที่สองทำการปรับ pH ด้วยการใส่กรดไนตริก 65% ประมาณ 2-3 หยด นำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total cadmium)

6.2) การเก็บตัวอย่างพืช โดยเก็บตัวอย่างผักตบชวาครั้งละ 1 ต้น ทุกๆ 15 วัน ได้แก่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน นำมาล้างน้ำให้สะอาด 3-4 ครั้ง ล้างน้ำกลั่น 1 ครั้ง จากนั้นนำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2-3 ชั่วโมง และนำมาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ชั่งน้ำหนักสด และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 - 48 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นบดพืชตัวอย่างแบบแยกส่วนให้ละเอียด เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด

6.3) การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต โดยการจดบันทึกการเจริญเติบโต ด้วยการวัดความยาวรากและใบ ชั่งน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และคำนวณอัตราการเจริญเติบโต ทุกๆ 15 วัน ได้แก่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน

7) การวิเคราะห์ตัวอย่าง

7.1) การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืช

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของผักตบชวา ทั้งหมด 2 ส่วน คือ ส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ทำการวิเคราะห์โดยใช้ตัวอย่างพืชที่ผ่านการบดละเอียดแล้ว ชั่งน้ำหนัก 0.5 กรัม ย่อยด้วยกรดไนตริก (HNO_3) 65% จำนวน 8 มิลลิลิตร กับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30% จำนวน 2 มิลลิลิตร ตามวิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996) ด้วยเครื่องมือสำหรับย่อยระบบไมโครเวฟ และวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer; AAS)

7.2) การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในน้ำ

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในน้ำ ทำโดยการตวงตัวอย่างน้ำ 45 มิลลิลิตร แล้วนำมาย่อยด้วยกรดไนตริก (HNO_3) 65% จำนวน 5 มิลลิลิตร ตามวิธีการของ USEPA method 3051A (USEPA, 1998) ด้วยเครื่องมือสำหรับย่อยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) และวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer; AAS)

8) คำนวณหาค่าศักยภาพในการสะสมทางชีวภาพของสิ่งมีชีวิต (BCF) และค่า Translocation factor (TF) เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมของพืช และการลำเลียงแคดเมียมของพืชในแต่ละชุดการทดลอง โดยค่า TF สามารถคำนวณได้ตามสมการ (Zacchini et al., 2009)

$$\text{Translocation factor} = \frac{\text{ปริมาณการดูดดึงโลหะในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ)}}{\text{ปริมาณการดูดดึงโลหะในส่วนใต้น้ำ (ราก)}}$$

3.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณการดูดดึงและสะสมของแคดเมียม ที่ได้จากการทดลอง โดยใช้ ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan' s new Multiple Range Test (DMRT) ทั้งนี้ การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดังกล่าวจะปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติคือ Statistical package for the social science (SPSS)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

การศึกษาผลของ EDTA และ CA ต่อการดูดดึงแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผักตบชวา ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม และส่วนที่ 2 การศึกษาผลของ EDTA และ CA ต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวา ซึ่งทำการศึกษาการเติบโต การแสดงความเป็นพิษ และปริมาณการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 ผลการศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม โดยมีการทดลองระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 0, 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรในการปลูกผักตบชวา และใช้ระยะเวลาในการศึกษา 30 วัน โดยทำการวัดคุณภาพน้ำ และเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของผักตบชวา ในวันที่ 7, 15, 22 และ 30 ของการทดลอง และเก็บตัวอย่างพืชและน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดการทดลอง สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำเสียสังเคราะห์

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละแคดเมียมในน้ำที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อทำการตรวจวัดก่อนปลูกพืชทดลอง ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.61, 6.56, 6.55, 6.54, 6.55, 6.53 และ 6.53 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.1) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากปริมาณแคดเมียมที่เติมลงไปในน้ำนั้นอาจถือได้ว่าเป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรน้ำทั้งหมดจึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์ สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เมื่อทำการปลูกพืชทดลอง พบว่า ทุกระดับระดับความเข้มข้น

ของแคดเมียมมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงทุกระยะเวลาในการทดลอง โดยเฉพาะที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) โดยค่าที่ลดลงเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 30 วัน คือ 5.87, 6.15 และ 6.19 ตามลำดับ ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างที่ลดลงนั้นอาจมีสาเหตุมาจากสารละลายแคดเมียมไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์มีสภาพความเป็นด่าง เมื่อมีการปลูกผักตบชวาลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ทำให้พืชสามารถดูดดึงแคดเมียมไปสะสมไว้ในพืชได้จึงทำให้ปริมาณแคดเมียมไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างที่อาจลดลงบ้างเล็กน้อย นอกจากนี้ผักตบชวาที่เจริญเติบโตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรมีการแสดงความเป็นพิษเมื่อระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำและรากของผักตบชวาจะช่วยทำการย่อยสลายเศษซากต่างๆ จึงอาจทำให้เกิดสภาวะกรดอ่อนๆ ในน้ำ แม้มีปริมาณไม่มากแต่ก็อาจส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง

ตารางที่ 4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียสังเคราะห์

ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าความเป็นกรดด่าง (pH)				
	0 (วัน)	7 (วัน)	15 (วัน)	22 (วัน)	30 (วัน)
0	6.61±0.04	6.56±0.03	6.55±0.05	6.54±0.05	6.55±0.09
0.5	6.56±0.03	6.54±0.04	6.54±0.05	6.55±0.08	6.52 ±0.04
1	6.55±0.05	6.53±0.06	6.52±0.05	6.52±0.04	6.52±0.04
2	6.54±0.05	6.55±0.09	6.53±0.04	6.53±0.03	6.49±0.03
5	6.55^{a}±0.09	6.53^{a}±0.04	6.53^{a}±0.03	6.39^{b}±0.03	6.19^{c}±0.06
10	6.53^{a}±0.04	6.53^{a}±0.03	6.35^{b}±0.06	6.27^{b}±0.08	6.15^{c}±0.07
20	6.53^{a}±0.03	6.33^{b}±0.08	6.26^{b}±0.05	6.06^{c}±0.05	5.87^{d}±0.12

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างระยะเวลาในการทดลอง

2) ค่าการนำไฟฟ้า (EC)

ผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคดเมียมในน้ำที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยได้มีการตรวจวัดก่อนปลูกพืชทดลอง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 54.27, 52.40, 51.87, 51.47,

52.13, 51.07 และ 51.20 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรตามลำดับ ภายหลังการปลูกพืชทดลองและทำการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าในวันที่ 7 ของการทดลอง พบว่า มีค่าเท่ากับ 262.40, 261.73, 261.33, 262.13, 261.07, 261.20 และ 253.20 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ (ดังตารางที่ 4.2) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากผักตบชวาที่ปลูกอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารละลายในน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปัจจัยอื่นๆ ที่มีส่วนในการแตกตัวของสารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์ในน้ำจึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงเพิ่มมากขึ้น

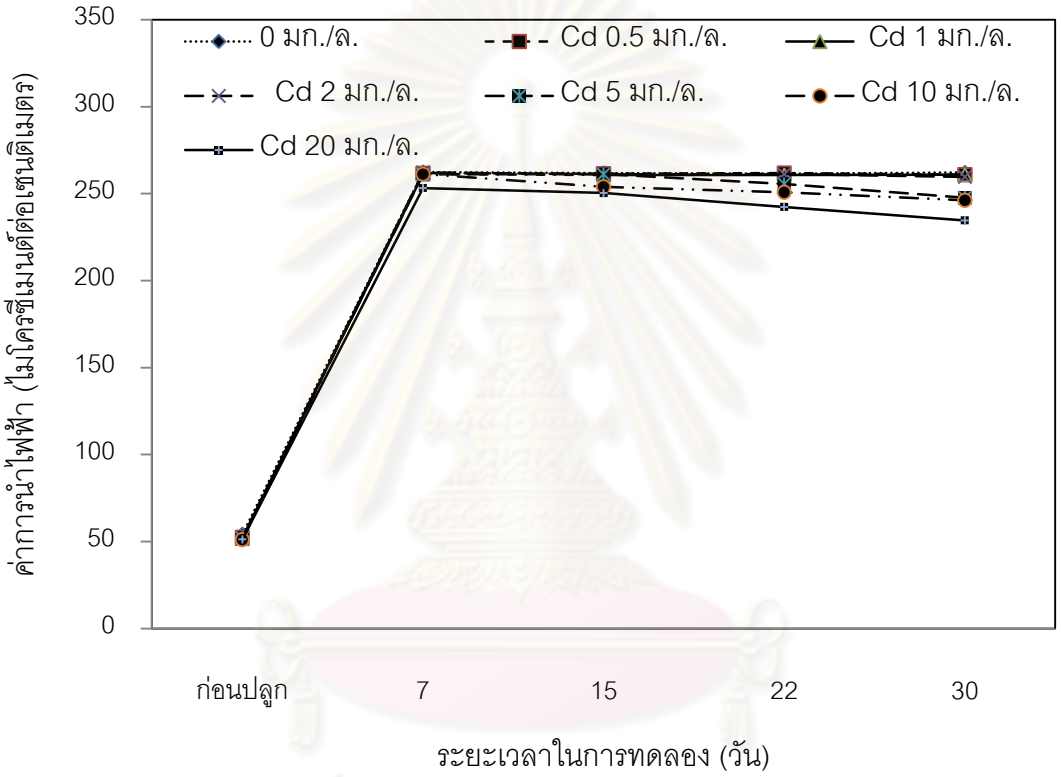
ตารางที่ 4.2 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์

ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (EC) (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)				
	0 (วัน)	7 (วัน)	15 (วัน)	22 (วัน)	30 (วัน)
0	54.27^{a} ±1.40	262.40^{b}±1.20	261.87^{b} 1.89	261.47^{b} 2.01	262.13^{b}±3.61
0.5	52.40^{a} ±1.20	261.73^{b}±1.67	261.47^{b} 2.01	261.8^{b} ±3.23	260.93^{b}±1.40
1	51.87^{a} ±1.89	261.33^{b}±2.20	260.80^{b}±2.12	260.80^{b} 1.44	260.93^{b}±1.40
2	51.47^{a} ±2.01	262.13^{b}±3.61	261.07^{b}±1.40	261.20^{b} 1.06	259.60^{b}±1.20
5	52.13^{a}±3.61	261.07^{b}±1.40	261.20^{b}±1.06	255.60^{c}±1.20	247.60^{d}±2.23
10	51.07^{a}±1.40	261.20^{b}±1.06	254.00^{c}±2.23	250.80^{c}±3.02	246.13^{d}±2.60
20	51.20^{a}±1.06	253.20^{b}±3.02	250.40^{c}±1.83	242.40^{d}±2.00	234.67^{e}±4.64

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างระยะเวลาในการทดลอง

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้าหลังจากระยะเวลาการทดลองที่ 15, 22 และ 30 วัน พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 0, 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) และมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 4.1 สำหรับระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 261.20, 255.60 และ 247.60 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรตามลำดับของเวลาการทดลองที่ 15, 22 และ 30 วัน ส่วนระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 254.00, 250.80 และ 246.13 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรตามลำดับ ส่วนระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า

เท่ากับ 250.40, 242.40 และ 234.67 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งในระดับความเข้มข้นทั้ง 3 ระดับ มีค่าการนำไฟฟ้าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของแต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดลอง โดยปริมาณของแคดเมียมที่ลดลงจากการที่ผักตบชวามีการดูดดึงไปสะสมไว้ในพืช รวมถึงปริมาณของสารประกอบต่างๆ ที่เติมลงไปเมื่อเริ่มการทดลองที่เป็นธาตุอาหารของพืชที่ผักตบชวาสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ทำให้ปริมาณไอออนต่างๆ ซึ่งช่วยในการนำไฟฟ้าลดน้อยส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์

3) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP)

ผลการศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคดเมียมในน้ำที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการตรวจวัดก่อนปลูกพืชทดลอง พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 198.20, 196.80, 196.40, 196.10, 196.60, 195.80 และ 195.90 มิลลิโวลต์ตามลำดับความเข้มข้นของแคดเมียม และเมื่อทำการปลูกพืชทดลองและทำการตรวจวัดในวันที่ 7 ของการทดลอง พบว่า มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น เท่ากับ 204.26, 205.28, 206.09,

206.40, 208.7, 213.97 และ 214.68 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ (ดังตารางที่ 4.3) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 30 วัน พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 252.71, 259.18, 261.81 , 263.33, 268.07 , 279.38 และ 284.32 มิลลิโวลต์ ตามลำดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ 4.3 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น - รีดักชั่นในน้ำเสียสังเคราะห์

ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP) (มิลลิโวลต์)				
	0 (วัน)	7 (วัน)	15 (วัน)	22 (วัน)	30 (วัน)
0	198.20^{a}±7.29	204.26^{b}±6.23	215.16^{c}±9.82	232.12^{d}±10.45	252.71^{e}±18.73
0.5	196.80^{a}±6.23	205.28^{b}±8.65	219.81^{c}±9.45	237.98^{d} ±16.79	259.18^{e}±7.29
1	196.40^{a}±9.82	206.09^{b}±11.44	220.63^{c}±10.99	240.01^{d} ±7.49	261.81^{e}±7.29
2	196.10^{a}±10.45	206.40^{b}±18.73	222.14^{c}±7.29	242.13^{d} ±5.50	263.33^{e}±6.23
5	196.60^{a}±18.73	208.70^{b}±7.29	224.46^{c}±5.50	245.05^{d} ±6.23	268.07^{e}±11.56
10	195.80^{a}±7.29	213.97^{b}±5.50	233.35^{c}±11.56	255.15^{d} ±15.68	279.38^{e}±13.51
20	195.90^{a}±5.50	214.68^{b}±15.68	236.48^{c}±9.52	258.89^{d} ±10.39	284.32^{e}±24.07

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างระยะเวลาในการทดลอง

4) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

ผลการศึกษาปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคดเมียมในน้ำที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการตรวจวัดก่อนปลูกพืชทดลองไม่พบปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในทุกความเข้มข้น หากแต่ภายหลังการปลูกพืชทดลอง และทำการตรวจวัดในวันที่ 7 ของการทดลอง พบว่ามีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด เท่ากับ 2.26, 6.28, 6.09, 5.40, 7.07, 5.97 และ 4.68 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ (ดังตารางที่ 4.4) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 30 วัน พบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 53.71, 58.18, 60.08, 62.13, 66.07, 59.83 และ 64.23 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดย

ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่มีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากเศษซากต่างๆ ที่เกิดจากการหลุดร่วงของผักตบชวา รวมทั้งสารละลายธาตุอาหารที่ใส่ลงไปก่อนการปลูกผักตบชวา อาจเกิดตะกอนขึ้นได้จึงทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มมากขึ้น (สุธินี วดีศิริศักดิ์, 2550)

ตารางที่ 4.4 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ในน้ำเสียสังเคราะห์

ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ในน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
	0 (วัน)	7 (วัน)	15 (วัน)	22 (วัน)	30 (วัน)
0	0	2.26±0.23	15.17±3.82	34.12± 4.88	53.71± 7.38
0.5	0	6.28±0.65	19.08±2.54	39.98 ± 6.09	58.18± 2.99
1	0	6.09±0.44	20.36±2.89	41.01± 7.01	60.08± 5.23
2	0	5.40±0.73	12.14±3.92	43.13± 5.05	62.13± 4.34
5	0	7.07±0.29	14.46±5.55	46.05± 5.32	66.07± 9.48
10	0	5.97±0.50	13.35±3.67	54.15± 5.86	59.83± 5.13
20	0	4.68±0.68	16.48±5.25	55.89± 9.39	64.23± 7.04

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างระยะเวลาในการทดลองเข้มข้นของแคดเมียม

4.1.2 การเติบโตของผักตบชวาในน้ำเสียสังเคราะห์

จากการศึกษาการเติบโตของผักตบชวาในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเมื่อเริ่มการทดลองได้คัดเลือกใช้ผักตบชวาที่มีอายุ 2 สัปดาห์ คัดเฉพาะต้นให้มีขนาดใกล้เคียงกันประมาณ 13 – 15 กรัม ซึ่งค่าน้ำหนักสดเฉลี่ยของผักตบชวามีค่าเท่ากับ 14.67, 14.54, 14.4,14.66, 14.39,14.36 และ 14.50 กรัม ตามลำดับความเข้มข้นของแคดเมียม (ดังตารางที่ 4.5) ภายหลังสิ้นสุดการทดลองที่ 30 วัน พบว่า ค่าน้ำหนักสดเฉลี่ยของผักตบชวามีค่าเท่ากับ 85.61, 33.74, 33.14, 30.47, 20.72,19.82 และ 19.13 กรัม ตามลำดับ โดยสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การเติบโตได้ เท่ากับ 483.51, 132.08, 130.09, 107.94, 44.02, 38.08 และ 31.89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของแคดเมียมการเติบโตของผักตบชวาจะมีค่าที่ลดลง ทั้งนี้ผักตบชวาที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าพืชสามารถเติบโตอยู่ได้ และเมื่อคิดเป็นค่าการเติบโตสัมพัทธ์ (Relative

growth) ได้เท่ากับ 2.32, 2.30 และ 2.07 เท่าของน้ำหนักเริ่มต้น ตามลำดับ ความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0, 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่าการเติบโตสัมพัทธ์ของผักตบชวาที่ปลูกลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าเท่ากับ 0.44, 0.38 และ 0.31 เท่าของน้ำหนักเริ่มต้น ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่เหมาะสมต่อการเติบโตของผักตบชวาของระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าว

ตารางที่ 4.5 น้ำหนักสดและเปอร์เซ็นต์การเติบโตของผักตบชวา

ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)		การเติบโต (วัน)				
		0	7	15	22	30
0	น้ำหนักสด (กรัม)	14.67	23.02	34.42	53.00	85.61
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	56.94	134.61	261.26	483.51
	การเติบโตสัมพัทธ์	-	0.57	1.34	2.61	4.84
0.5	น้ำหนักสด (กรัม)	14.54	21.26	24.62	30.43	33.74
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	46.19	69.32	109.31	132.08
	การเติบโตสัมพัทธ์	-	0.46	0.69	1.09	1.32
1	น้ำหนักสด (กรัม)	14.40	20.81	24.20	29.18	33.14
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	44.50	68.05	102.61	130.09
	การเติบโตสัมพัทธ์	-	0.45	0.68	1.02	1.30
2	น้ำหนักสด (กรัม)	14.66	20.12	23.41	26.94	30.47
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	37.27	59.72	83.83	107.94
	การเติบโตสัมพัทธ์	-	0.37	0.60	0.84	1.08
5	น้ำหนักสด (กรัม)	14.39	15.87	17.32	19.42	20.72
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	10.26	20.33	34.96	44.02
	การเติบโตสัมพัทธ์	-	0.10	0.20	0.35	0.44

ตารางที่ 4.5 น้ำหนักสดและเปอร์เซ็นต์การเจริญเติบโตของผักตบชวา (ต่อ)

ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)		การเจริญเติบโต (วัน)				
		0	7	15	22	30
10	น้ำหนักสด (กรัม)	14.36	15.39	16.09	17.91	19.82
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	7.17	12.06	24.79	38.08
	การเติบโตสัมพัทธ์	-	0.07	0.12	0.25	0.38
20	น้ำหนักสด (กรัม)	14.50	15.66	14.77	15.53	19.13
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	7.98	1.87	7.09	31.89
	การเติบโตสัมพัทธ์	-	0.08	0.02	0.07	0.32

4.1.3 การแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมในผักตบชวา

การศึกษาการแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมในผักตบชวา โดยการประเมินจากเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษ (Phytotoxicity หรือ Plant injury) ที่ 7, 15, 22 และ 30 วัน หลังจากปลูกผักตบชวาลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่า ผักตบชวาที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 0.5, 1, 2 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษต่ำที่ระยะเวลา 7 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 4, 4, 4 และ 8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังในตารางที่ 4.6) ในขณะที่พบว่า ผักตบชวาที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ผักตบชวามีเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษที่ได้รับเท่ากับ 22.67 และ 24 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น พบว่า เปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษที่ได้รับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยในทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียม โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 30 วัน ผักตบชวาที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษสูงมากถึง 81.33 และ 88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยอาการแสดงความเป็นพิษของผักตบชวา ได้แก่ ก้านใบและใบมีการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลแดงเกือบทั้งต้น และมีอาการเหี่ยวเฉา รวมทั้งต้นมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาน้ำหนักสดและอัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวา ทั้งนี้การที่ผักตบชวาแสดงความเป็นพิษจากสารละลายแคดเมียมดังกล่าวออกมานั้น เนื่องจากสารละลายแคดเมียมไปมีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากปกติ (ศิริมาศ สิทธิกรม, 2550) รวมทั้ง

สารละลายแคดเมียมอาจส่งผลยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสง และกระบวนการคายน้ำของพืชด้วย นอกจากนี้แคดเมียมยังมีผลต่อการลดปริมาณคลอโรฟิล คาโรตินอยด์ และทำให้เกิดความผิดปกติในโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ เช่น การจัดเรียงตัวของลาเมลลา (Lamella) และกรานา (Grana) เป็นต้น (Baszyki, 1980 อ้างถึงในสนธิ คชวัฒน์, 2530) ทำให้ผักตบชวามีอาการเปลี่ยนสีไปเป็นสีม่วงหรือสีน้ำตาลแดง และยังอาจทำให้พืชได้รับธาตุอาหารบางอย่างน้อยลงอีกด้วย เช่น ไนโตรเจน (N) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) (Iwai et al.,1975 อ้างถึงในสนธิ คชวัฒน์, 2530) ดังที่ผักตบชวาแสดงการเจริญเติบโตลดลง

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษจากแคดเมียมของผักตบชวา

ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษจากแคดเมียมของผักตบชวา (%)			
	7 (วัน)	15 (วัน)	22 (วัน)	30 (วัน)
0.5	4.00 [a] ±0.00	10.67 [a] ±6.11	21.33 [a] ±2.31	30.67 [a] ±4.62
1	4.00 [a] ±0.00	10.67 [a] ±2.31	22.67 [a] ±4.62	33.33 [a] ±2.31
2	4.00 [a] ±0.00	12.00 [a] ±0.00	26.67 [a] ±2.31	42.67 [b] ±4.62
5	8.00 [b] ±0.00	24.00 [b] ±4.00	46.67 [b] ±6.11	61.33 [c] ±6.11
10	22.67 [c] ±2.31	30.67 [c] ±4.62	57.33 [c] ±2.31	81.33 [d] ±8.33
20	24.00 [c] ±0.00	34.67 [c] ±6.11	60.00 [c] ±4.00	88.00 [d] ±4.00

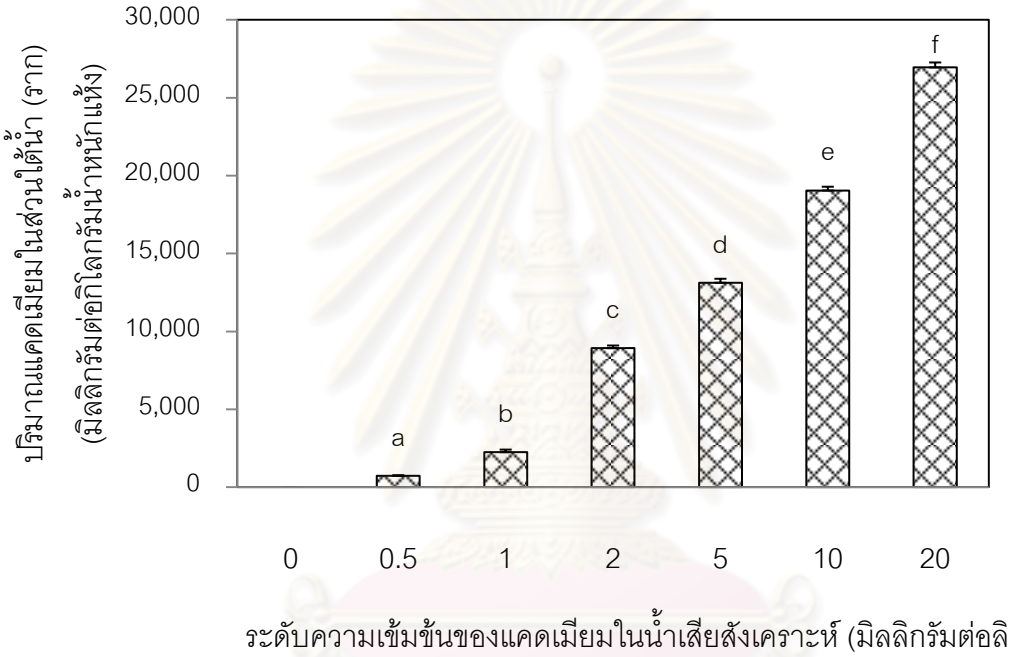
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

4.1.4 การสะสมแคดเมียมในผักตบชวา

1) ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ)

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 726.10, 2,239.70, 8,918.70, 13,116.70, 19,039.70 และ 26,937.80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.2) สำหรับปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) คือ 116.00, 410.70, 988.40, 2,435.20, 3,711.10 และ 5,434.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.3) ทั้งนี้

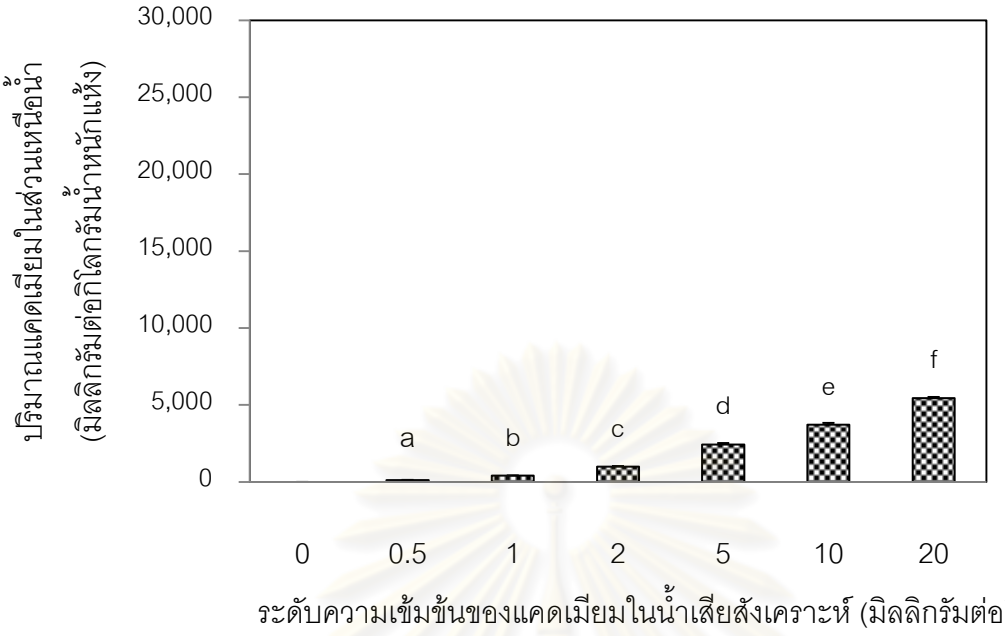
เมื่อนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งต้นของพืชทดลอง พบว่า มีค่าเท่ากับ 421.00, 1325.20, 4,953.60, 7,775.90, 11,375.40 และ 16,186.40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าการสะสมของแคดเมียมทั้งหมดในผักตบชวาที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสะสมแคดเมียมมากที่สุด รองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 10, 5, 2, 1 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มขึ้นนั้น ปริมาณการสะสมแคดเมียมในผักตบชวาจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน



หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม

รูปที่ 4.2 ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา (n=3)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม

รูปที่ 4.3 ปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา (n=3)

ตารางที่ 4.7 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในผักตบชวา

ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)			อัตราส่วนปริมาณแคดเมียมระหว่างส่วนเหนือน้ำ และส่วนใต้น้ำ
	ส่วนเหนือน้ำ	ส่วนใต้น้ำ	เฉลี่ยทั้งสองส่วน	
0	nd	nd	-	-
0.5	116.00[a] ±15.0	726.10[a] ±25.7	421.00[a] ±20.3	0.16±0.02
1	410.70[b] ±12.4	2,239.70[b] ±166.5	1,325.20[b] ±89.4	0.18±0.01
2	988.40[c] ±42.9	8,918.70[c] ±170.0	4,953.60[c] ±106.4	0.11±0.00
5	2,435.20[d] ±90.6	13,116.70[d] ±256.7	7,775.90[d] ±173.7	0.19±0.01
10	3,711.10[e] ±123.0	19,039.70[e] ±241.3	11,375.40[e] ±182.2	0.19±0.01
20	5,434.90[f] ±83.9	26,937.80[f] ±320.9	16,186.40[f] ±202.9	0.20±0.00

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม

nd หมายถึง ไม่พบ (ปริมาณต่ำสุดที่สามารถวัดค่าได้ เท่ากับ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการสะสมแคดเมียมในผักตบชวาระหว่างส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำมีค่ามากกว่าส่วนเหนือน้ำอย่างเห็นได้ชัด (ดังตารางที่ 4.7) และจากการคำนวณอัตราส่วนปริมาณการสะสมแคดเมียมระหว่างส่วนเหนือน้ำและส่วนใต้น้ำที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 0.16, 0.18, 0.11, 0.19, 0.19 และ 0.20 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.7) แสดงให้เห็นได้ว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมของผักตบชวาในส่วนเหนือน้ำน้อยกว่าส่วนใต้น้ำมาก อาจเนื่องมาจากเมื่อแคดเมียมถูกดูดดึงมายังส่วนรากแล้ว จุลินทรีย์ที่อยู่ในรากอาจมีส่วนทำให้มีการเปลี่ยนรูปทางเคมีของแคดเมียม ซึ่งอาจอยู่ในรูปที่มีความสามารถเคลื่อนย้ายได้น้อย เช่น แคดเมียมออกไซด์ (CdO) เป็นต้น จึงทำให้ผักตบชวามีการสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนของรากได้มาก สอดคล้องกับการศึกษาของ Mishra และ Tripathi (2009) ที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพของผักตบชวาในการกำจัดโครเมียม และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งสองชนิดที่ระดับความเข้มข้น 1, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่า ผักตบชวามีการสะสมโลหะหนักทั้งสองชนิดมีมากในส่วนที่เป็นรากมากกว่าส่วนของลำต้น

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อเริ่มการทดลองแตกต่างกันในแต่ละระดับความเข้มข้น ผักตบชวาจึงมีโอกาสในการดูดดึงแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสูงได้มากกว่าความเข้มข้นในระดับที่รองลงมา ดังนั้นค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในพืชจึงยังไม่สามารถนำมาสรุปถึงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหมาะสมได้

2) ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา (BCF)

จากการศึกษาค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา (BCF) ที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละแคดเมียมในน้ำที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ค่า BCF ของผักตบชวาในส่วนเหนือน้ำมีค่าเท่ากับ 231.90, 410.60, 494.20, 487.00, 371.10 และ 271.70 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.8) สำหรับส่วนใต้น้ำมีค่าBCF เท่ากับ 1,452.30, 2,239.70, 4,459.40, 2,623.30, 904.00 และ 1,346.90 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.8) โดยมีค่าเฉลี่ยรวมกันทั้งต้นเท่ากับ 842.10, 1,325.20, 2,476.80, 1,555.20, 1,137.50 และ 809.30 ตามลำดับ โดยที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่ามากที่สุด และที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้หากพิจารณาจากถึงแนวโน้ม พบว่า ทั้งในส่วนใต้น้ำและส่วนเหนือน้ำของผักตบชวามีแนวโน้มของค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพเพิ่มขึ้นจนถึงระดับความเข้มข้นที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงเมื่อระดับ

ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Delgado et al. (1993) ซึ่งศึกษาอาการความเป็นพิษของผักตบชวาจากการสะสมสังกะสี โครเมียม และแคดเมียม พบว่า ระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวาทำให้มีการเจริญเติบโตลดลง และส่งผลต่อความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมทำให้ศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาลดลงด้วย

ตารางที่ 4.8 ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา (BCF)

ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา (BCF)		
	ส่วนเหนือน้ำ	ส่วนใต้น้ำ	เฉลี่ยทั้งต้น
0.5	231.90[a] ±29.9	1,452.30[a] ±51.5	842.10[a] ±37.9
1	410.60[b] ±12.4	2,239.70[b] ±166.5	1,325.20[b] ±89.4
2	494.20[c] ±21.4	4,459.40[c] ±85.0	2,476.80[c] ±53.2
5	487.00[c] ±18.1	2,623.30[d] ±51.3	1,555.20[d] ±28.8
10	371.10[d] ±12.3	1,904.00[e] ±24.1	1,137.50[e] ±6.0
20	271.70[e] ±4.2	1,346.90[f] ±16.0	809.30[a] ±10.1

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม

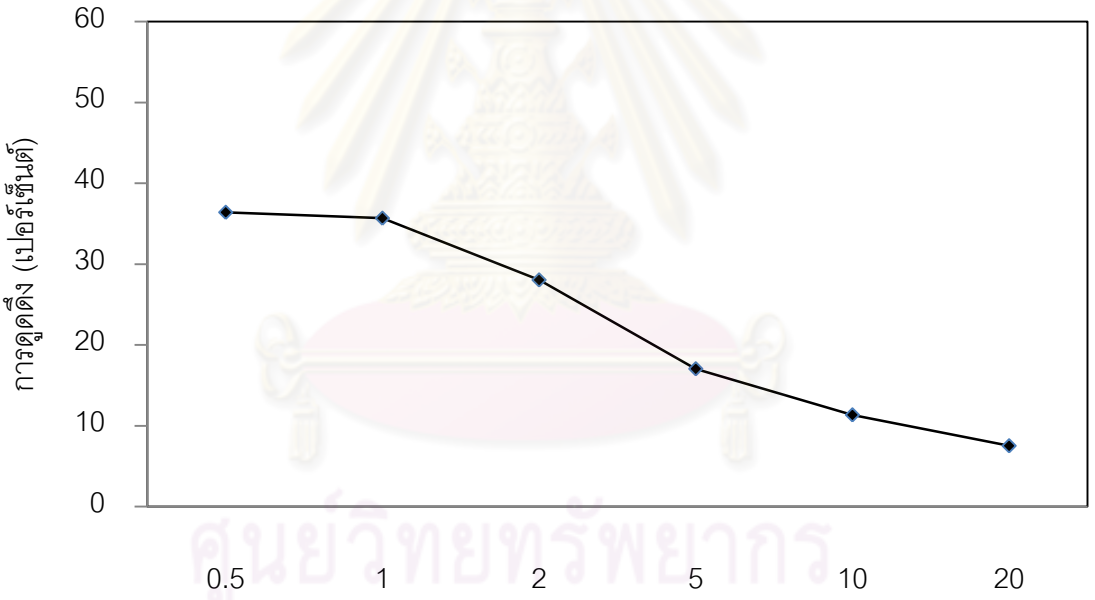
3) เปอร์เซ็นต์การดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา

การดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมคิดเป็น 36.40, 35.67, 28.04, 17.05, 11.35 และ 7.52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.9) โดยที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีเปอร์เซ็นต์การดูดดึงแคดเมียมมากที่สุด และที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีเปอร์เซ็นต์การดูดดึงแคดเมียมได้น้อยที่สุด ซึ่งส่งผลให้ผักตบชวาแสดงอาการความเป็นพิษจึงทำให้มีการดูดดึงแคดเมียมลดลง โดยสอดคล้องกับการศึกษาศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา หากแต่แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวามีค่าสูงสุดที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น (ดังรูปที่ 4.4)

ตารางที่ 4.9 ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้ทั้งหมด

ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดดึงได้ (มิลลิกรัม)			เปอร์เซ็นต์การดูดดึง (%)
	ส่วนเหนือน้ำ	ส่วนใต้น้ำ	รวมทั้งต้น	
0.5	0.34	1.48	1.82	36.40
1	0.83	2.73	3.57	35.67
2	1.32	4.29	5.61	28.04
5	2.62	5.90	8.52	17.05
10	3.68	7.67	11.35	11.35
20	4.63	10.42	15.05	7.52

หมายเหตุ: คำนวณจากค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียม และน้ำหนักแห้งของผักตบชวา



รูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา

4.1.5 ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

การศึกษาการสะสมแคดเมียมในผักตบชวา ถ้าพิจารณาถึงปริมาณแคดเมียมที่สะสมทั้งในส่วนเหนือน้ำและส่วนใต้น้ำที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าน้อยที่สุด คือ 116 และ 726.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา (BCF) ที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าลดลง แต่มีการแสดงอาการเป็นพิษมาก คือ 61.33, 81.33 และ 88 เปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษที่ได้รับจากแคดเมียม ตามลำดับ อีกทั้งมีการเติบโตที่ลดลง คือ มีค่าเท่ากับ 44.02, 38.08 และ 31.89 เปอร์เซ็นต์การติบโต ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความเข้มข้นทั้ง 3 ระดับดังกล่าว ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองขั้นตอนไป ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Delgado et al. (1993) ที่ทำการศึกษาการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวาที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0.25, 0.5, 0.75, 2.5 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ผักตบชวาสามารถเติบโตอยู่ได้ในระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 0.25 ถึง 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ไม่สามารถเติบโตอยู่ได้ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 36.40, 35.67, 28.04, 17.05, 11.35 และ 7.52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 0.5, และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมที่ดีใกล้เคียงกัน แต่จากการศึกษาการเติบโตของผักตบชวาในแต่ละระดับความเข้มข้นของแคดเมียม พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีเปอร์เซ็นต์ของการเติบโตมากที่สุด และไม่ส่งผลต่อการแสดงอาการความเป็นพิษของผักตบชวาตลอดระยะเวลาของการทดลอง

ดังนั้น เมื่อพิจารณาถึงความสามารถของผักตบชวาที่สามารถอยู่รอดได้ตลอดการทดลองที่ต้องมีการเติมสารคีเลตในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งอาจทำให้มีการช่วยดูดดึงแคดเมียมได้มากขึ้น จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ส่งผลต่อการเติบโตของผักตบชวาหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด และมีการแสดงอาการความเป็นพิษน้อยที่สุด ดังนั้นระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรมีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะนำไปใช้ในการทดลองในขั้นตอนต่อไป ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Lu et al. (2004) ที่ทำการศึกษาการกำจัดแคดเมียมจากการปลูกผักตบชวาโดยใช้สารละลายแคดเมียมคลอไรด์ ที่ความระดับเข้มข้นเท่ากับ 0.5,

1, 2 และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบว่า ผักตบชวาสามารถเจริญเติบโตได้ในสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ผักตบชวามีการเจริญเติบโตดีที่สุด

4.2 การศึกษาผลของ EDTA และ CA ต่อการดึงดูดแคดเมียมด้วยผักตบชวา

การศึกษาผลของ EDTA และ CA ต่อการดึงดูดแคดเมียมด้วยผักตบชวาที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาในการศึกษา 90 วัน โดยทำการวัดคุณภาพน้ำ เก็บข้อมูลการเติบโต รวมทั้งเก็บตัวอย่างพืชและน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทุก 15 วันตลอดระยะเวลาของการทดลอง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำเสียสังเคราะห์

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทำการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างก่อนการทดลอง พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยความสำคัญ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากปริมาณสารคีเลตที่เติมลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละชุดการทดลองนั้นมีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับปริมาตรน้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ 10 ลิตรต่อภาชนะ จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์ สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างภายหลังจากการปลูกผักตบชวาแล้ว พบว่าเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นค่าความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในแต่ละชุดการทดลอง (ดังตารางที่ 4.10) โดยในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เท่ากับ 6.9, 7.0 และ 6.6 ตามลำดับ สำหรับในชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เท่ากับ 6.8, 6.5 และ 6.7 ตามลำดับ และในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA ระดับความเข้มข้นรวมของสารคีเลตทั้งสองชนิดที่ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เท่ากับ 6.7, 6.8 และ 6.5 ตามลำดับ โดยค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้นนั้น อาจเนื่องมาจาก ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำถูกควบคุมโดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอเนตที่อยู่ในน้ำ (วงศ์พงา เส็งสาย, 2544) ซึ่งจากการทดลองได้มีการเติมอากาศลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ในขั้นตอนของการดูแลรักษาผักตบชวา ส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำมีการเปลี่ยนแปลง และส่งผลถึงปริมาณคาร์บอเนตที่อยู่ในน้ำ (สุธินี วดีศิริศักดิ์, 2550) รวมถึงปริมาณ

สารคีเลตทั้งสองชนิดที่มีคุณสมบัติเป็นกรดมีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าเมื่อเริ่มการทดลองการเติมสารทั้งสองชนิดลงไปนั้นจะไม่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างให้ลดลง หากแต่เมื่อพิจารณาร่วมกับปัจจัยอื่นๆ ตามที่กล่าวมา สามารถกล่าวได้ว่าเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 4.10 ค่าความเป็นกรด - ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์

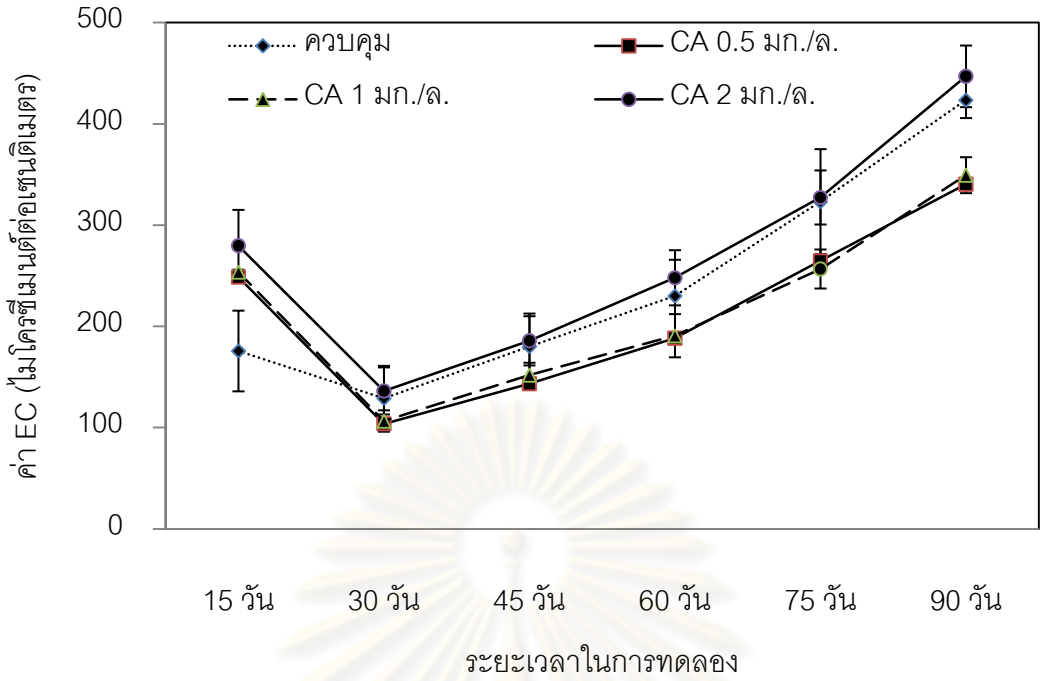
ความเข้มข้นของคีเลต (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าความเป็นกรดด่าง (pH)					
		15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน	75 วัน	90 วัน
ชุดควบคุม	0	6.2±0.04	6.0±0.05	6.3±0.03	6.0±0.05	6.3±0.02	6.2±0.02
EDTA	0.5	6.1±0.03	6.2±0.02	6.4±0.01	6.2±0.07	6.2±0.02	6.9±0.05
EDTA	1	6.0±0.06	6.2±0.05	6.2±0.08	6.6±0.04	6.4±0.07	7.0±0.10
EDTA	2	6.1±0.06	6.3±0.02	6.6±0.07	6.5±0.02	6.2±0.06	6.6±0.02
CA	0.5	6.2±0.04	5.5±0.07	6.4±0.01	6.2±0.03	6.2±0.02	6.8±0.02
CA	1	6.3±0.05	6.0±0.02	6.5±0.07	6.2±0.11	6.6±0.06	6.5±0.01
CA	2	6.1±0.05	6.1±0.03	6.5±0.06	6.4±0.01	6.5±0.05	6.7±0.04
EDTA+CA	0.5	6.1±0.06	6.3±0.08	6.5±0.02	6.5±0.06	6.1±0.06	6.7±0.04
EDTA+CA	1	6.2±0.07	6.2±0.06	6.5±0.04	6.5±0.07	6.2±0.02	6.8±0.04
EDTA+CA	2	6.2±0.01	6.3±0.02	6.4±0.04	6.6±0.08	6.2±0.02	6.5±0.05

2) ค่าการนำไฟฟ้า (EC)

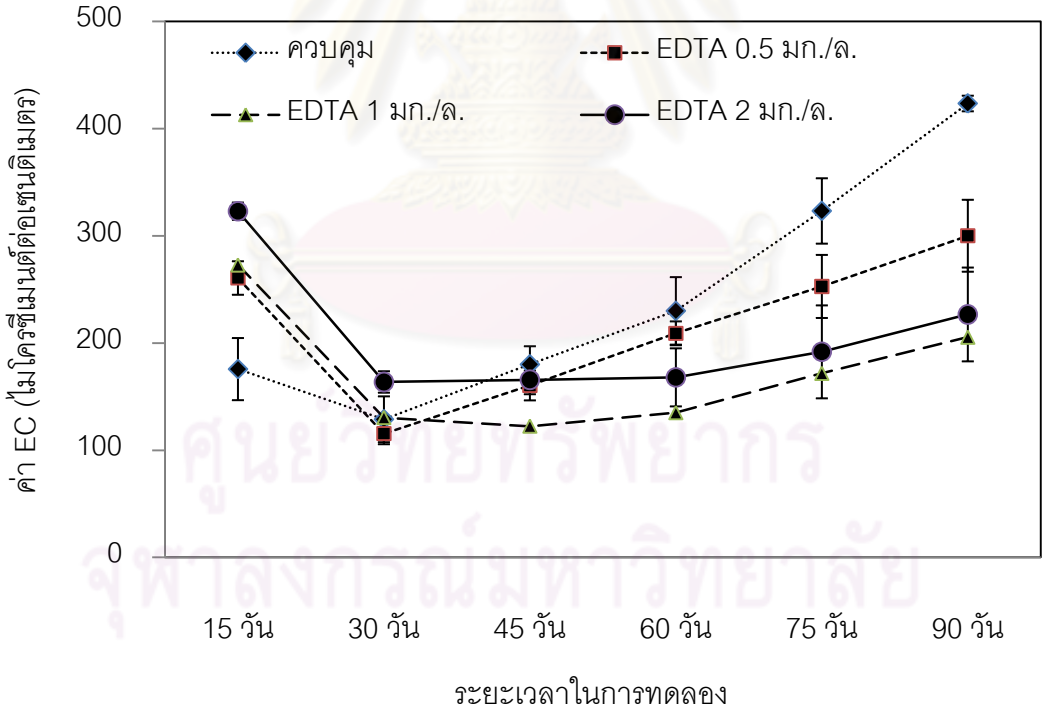
จากการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทำการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าก่อนการทดลอง พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยความสำคัญ ($P \leq 0.05$) แต่ภายหลังการปลูกผักตบชวาแล้ว พบว่า ในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารคีเลตค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 175.7, 128.9, 180.1, 230.0, 323.2 และ 423.5 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง (ดังรูปที่ 4.5) ซึ่งมีแนวโน้มลดลงในช่วงระยะเวลา 30 วันของการทดลอง หลังจากนั้นแนวโน้มของค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วงแรกของการทดลองมีปริมาณสารละลายพวกที่มีประจุ (Electrolyte) ต่างๆ อยู่ในสารละลาย ซึ่งเป็นสื่อของการนำไฟฟ้า ได้แก่ แคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมลงไป รวมถึงไอออนของโลหะต่างๆ เช่น แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) โซเดียม (Na) เป็นต้น (อนนท์ สุขสวัสดิ์, 2547) จากการใส่สารละลายธาตุอาหารที่ใส่ลงไปให้แก่พืช ซึ่งผักตบชวาได้มีการดูด

ดึงสารเหล่านี้ไปสะสมไว้หรือนำไปใช้จึงทำให้เกิดประจุ (Electrolyte) ลดลง และส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงด้วย ซึ่งปริมาณประจุ (Electrolyte) ต่างๆ ควรมีค่าลดลงตลอดการทดลอง แต่เนื่องจากการเจริญเติบโตของผักตบชวานั้น เมื่อเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นพืชทดลองมีการทิ้งเศษซากบางส่วน และร่วงหล่นลงไปในน้ำ โดยเฉพาะในชุดควบคุมที่พืชมีการเจริญเติบโตมาก จึงทำให้เกิดการย่อยสลายเศษซากของผักตบชวาในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งทำให้มีการเติมประจุ (Electrolyte) ของสารอินทรีย์ลงไปเพิ่ม โดยมีปริมาณที่มากกว่าอัตราการดูดดึงประจุ (Electrolyte) ของพืชตั้งแต่ช่วงระยะเวลาหลังจาก 30 วัน ทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (แววลี ประมูล, 2548) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของแข็งแขวนลอยในทุกชุดการทดลองที่เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาในการศึกษา

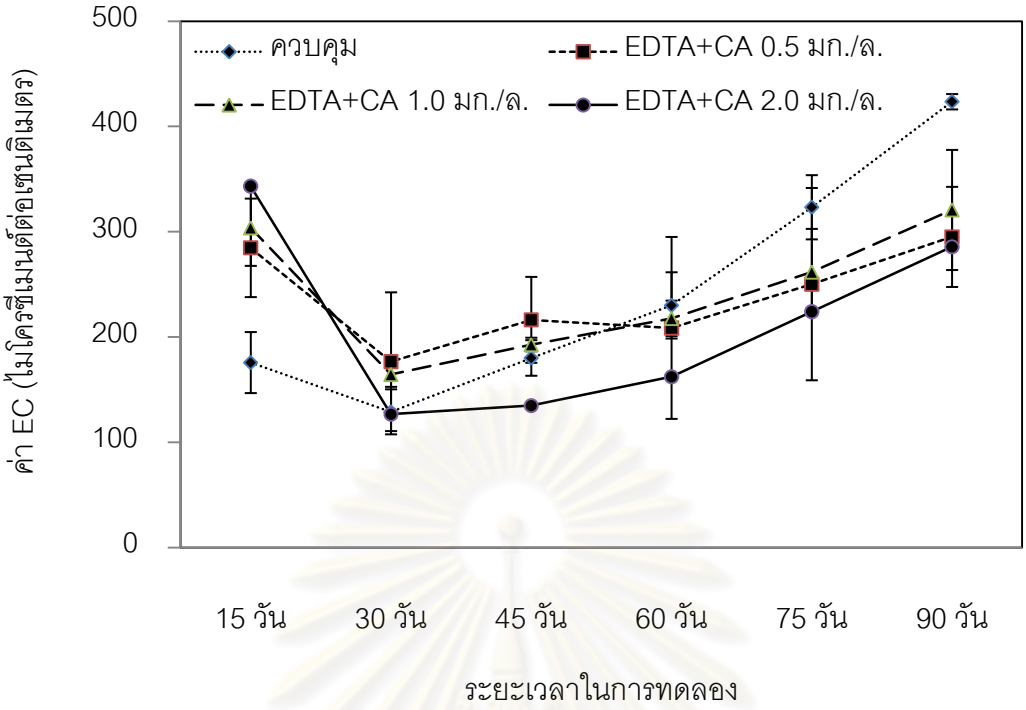
สำหรับในชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตนั้น จากการศึกษา พบว่า มีแนวโน้มของค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยในชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการนำไฟฟ้าที่ 15 วัน เท่ากับ 248.7, 253.7 และ 279.7 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.5) ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการนำไฟฟ้าที่ 15 วัน เท่ากับ 260.7, 273.0 และ 323.0 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.6) สำหรับชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการนำไฟฟ้าที่ 15 วัน เท่ากับ 284.7, 303.7, และ 343.3 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.7) ซึ่งเป็นค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าชุดควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณประจุ (Electrolyte) มากกว่าในชุดการทดลองจากสารคีเลตที่ใส่ลงไป และพบว่ามีค่ามากที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้น 1 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรในทุกชุดการทดลอง นอกจากนี้ปริมาณสารคีเลตที่เติมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ และผลของสารคีเลตที่ใส่ลงไปมีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมได้มากกว่าชุดควบคุม ซึ่งปริมาณแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์มีน้อยกว่า ทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 90 วัน ค่าการนำไฟฟ้าจึงมีค่าน้อยกว่าในชุดควบคุมในทุกชุดการทดลองที่เติมสารคีเลต โดยเฉพาะค่าการนำไฟฟ้าในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA มีค่าน้อยที่สุด คือ 300.1, 205.5 และ 226.7 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับของระดับความเข้มข้น จากปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่คงเหลืออยู่น้อยกว่าชุดการทดลองที่เติม CA และชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับ EDTA ซึ่งผักตบชวามีการดูดดึงแคดเมียมไปสะสมไว้มากกว่า ทำให้ปริมาณแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยกว่าจึงส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่าในชุดการทดลองอื่น



รูปที่ 4.5 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA (n=3)



รูปที่ 4.6 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA (n=3)



รูปที่ 4.7 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA (n=3)

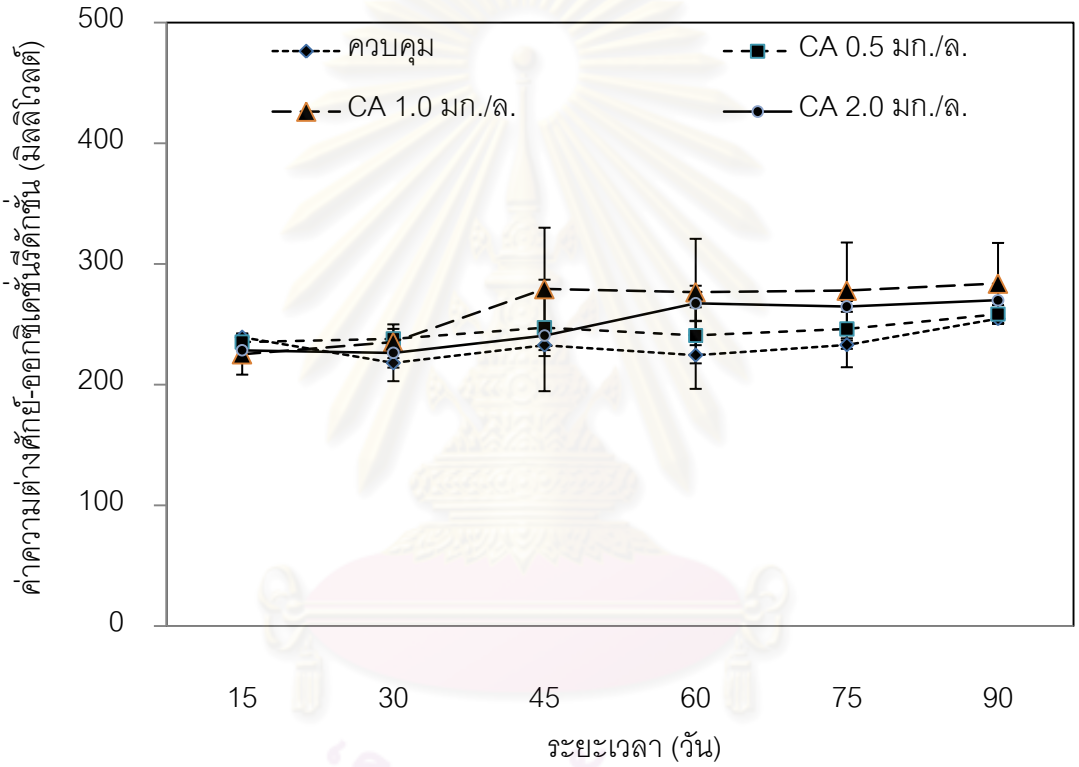
3) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP)

จากการศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อทำการตรวจวัดก่อนการทดลอง พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยภายหลังการปลูกผักตบชวา พบว่า ในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารคีเลตมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น เท่ากับ 239.26, 217.90, 232.70, 224.4, 232.96 และ 254.66 มิลลิโวลต์ ตามลำดับระเวลาในการดลอง (ดังรูปที่ 4.8) ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตลอดระยะเวลาในการทดลอง

สำหรับในชุดการทดลองที่เติมสารคีเลต พบว่า ชุดการทดลองที่เติม CA และชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับ EDTA มีแนวโน้มของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น เท่ากับ 235.3, 225.2 และ 228.4 มิลลิโวลต์ ตามลำดับความเข้มข้นที่ 15 วัน และ 258.4, 283.7 และ 269.9 มิลลิโวลต์ ตามลำดับความเข้มข้นที่ 90 วัน (ดังรูปที่ 4.8) ซึ่งชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น เท่ากับ 230, 224.5 และ 214 มิลลิโวลต์ ตามลำดับความ

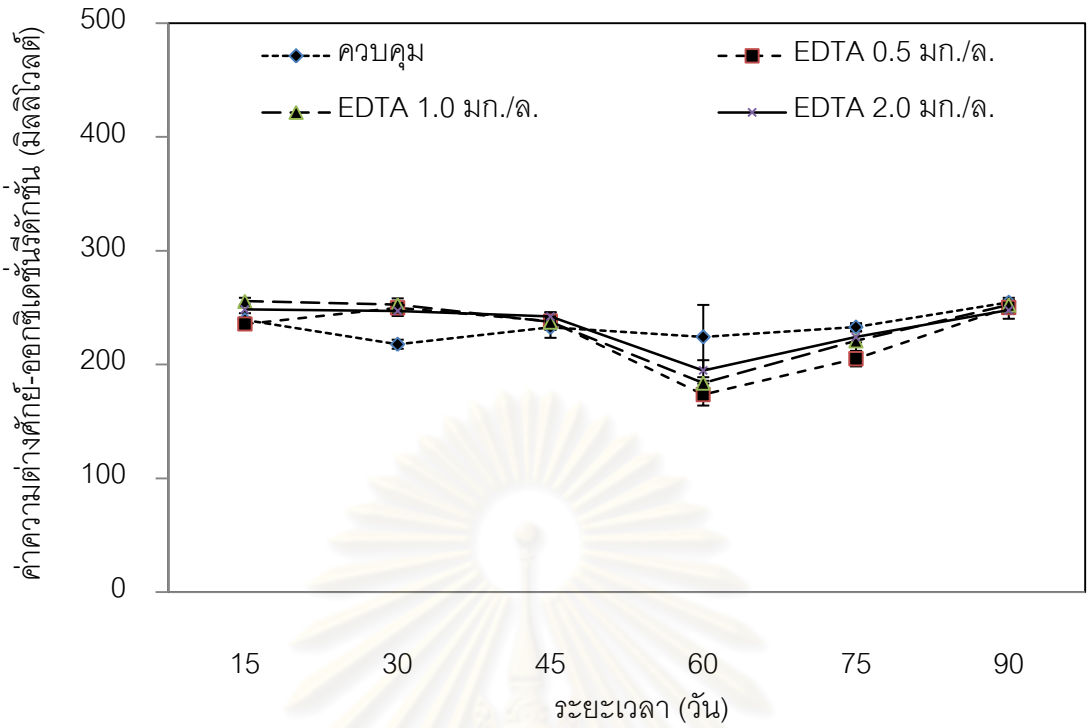
เข้มข้นที่ 15 วัน และ 274.9, 257.8 และ 282.7 มิลลิโวลต์ ตามลำดับความเข้มข้นที่ 90 วัน (ดังรูปที่ 4.10)

สำหรับในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่น เท่ากับ 235.7, 255.7 และ 248.4 มิลลิโวลต์ ตามลำดับความเข้มข้นที่ 15 วัน และ 250.1, 252.5 และ 247.8 มิลลิโวลต์ ตามลำดับความเข้มข้นที่ 90 วัน (ดังรูปที่ 4.9) ซึ่งค่ามีแนวโน้มที่ลดลง และมีความแตกต่างกับชุดการทดลองอื่นๆ ในช่วงระยะเวลาที่ 45 ถึง 60 วันของการทดลอง

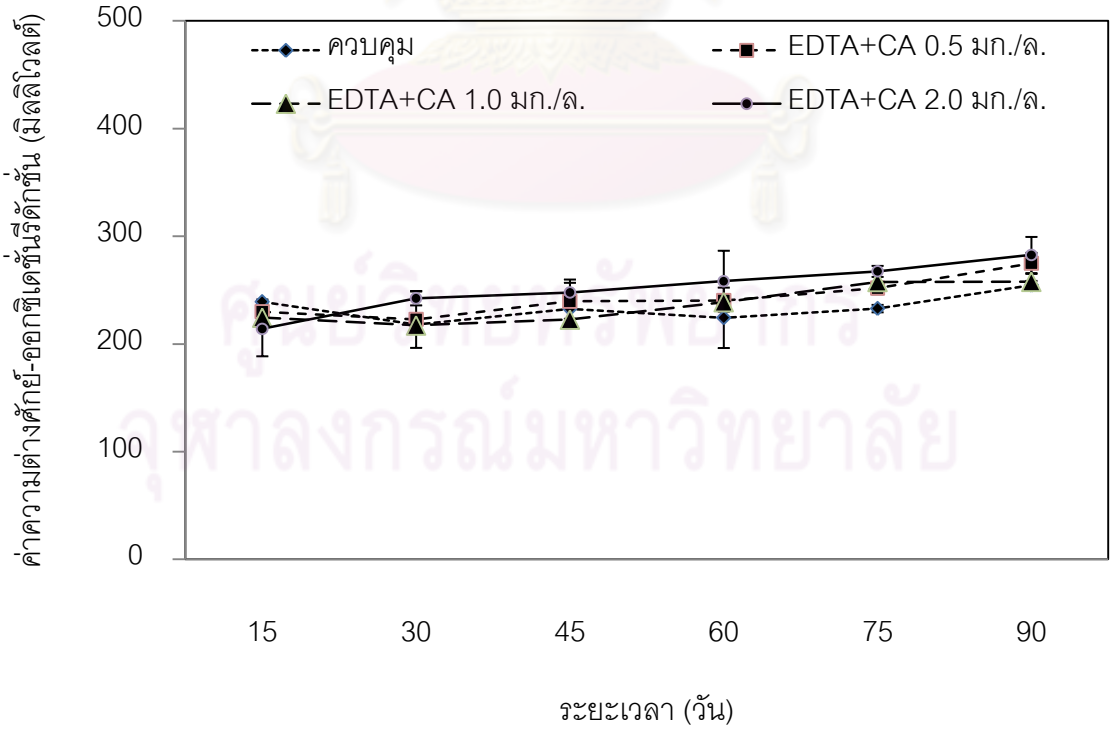


รูปที่ 4.8 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA (n=3)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



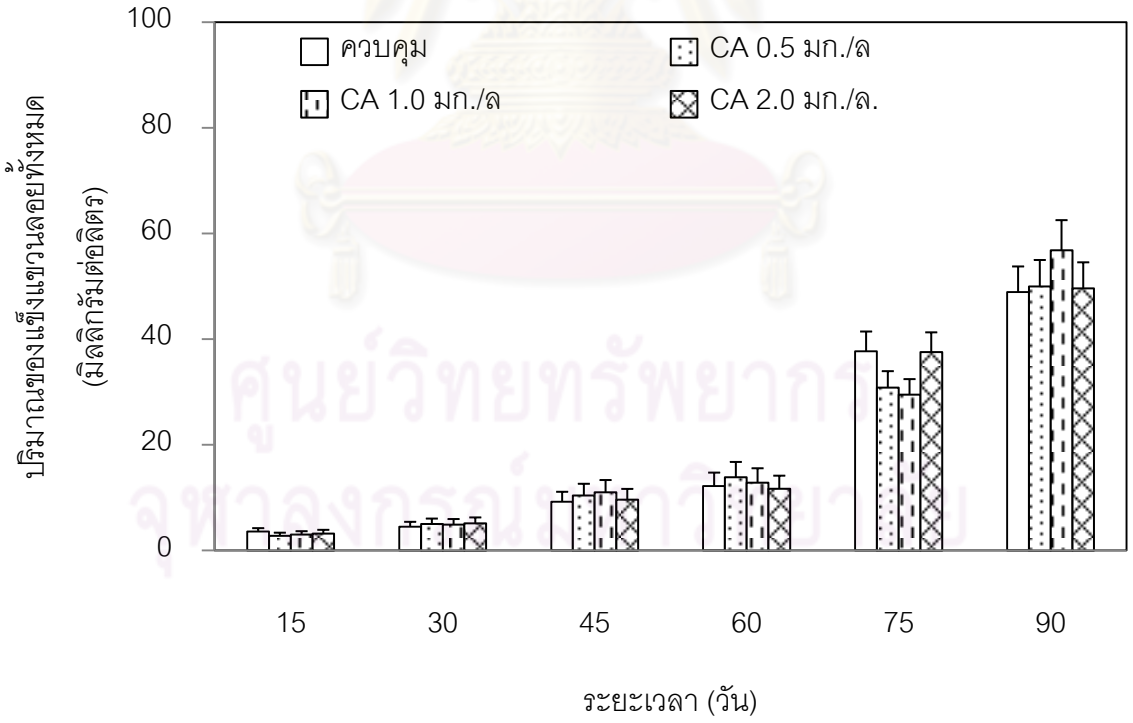
รูปที่ 4.9 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA (n=3)



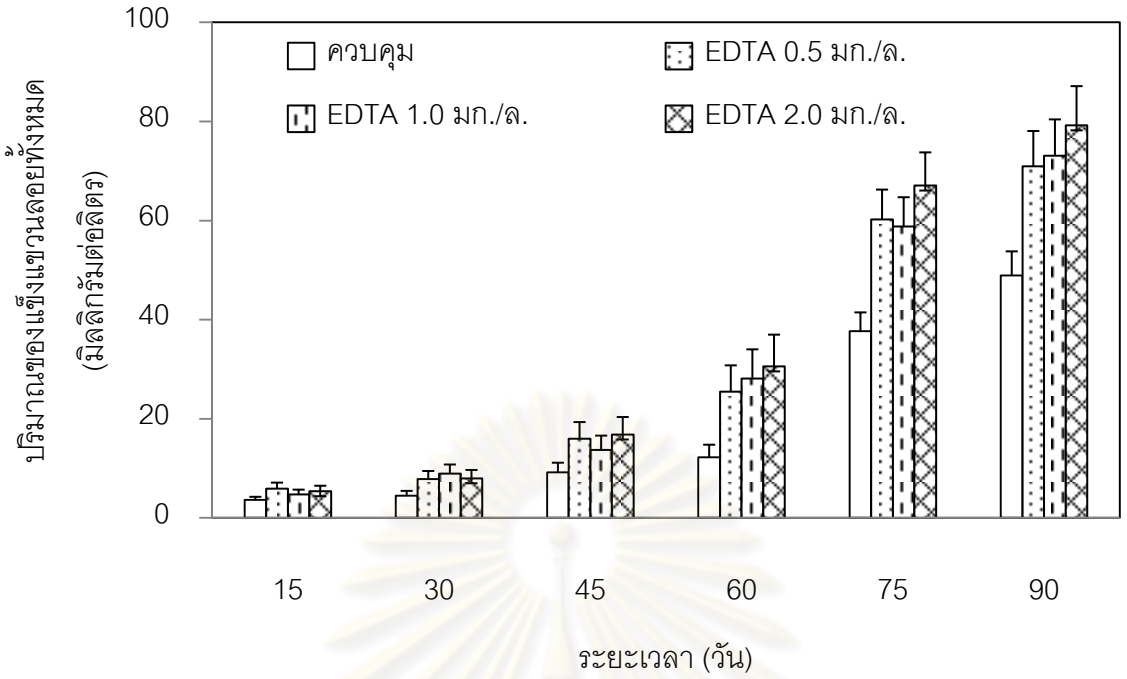
รูปที่ 4.10 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชั่น-รีดักชั่นในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA (n=3)

4) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

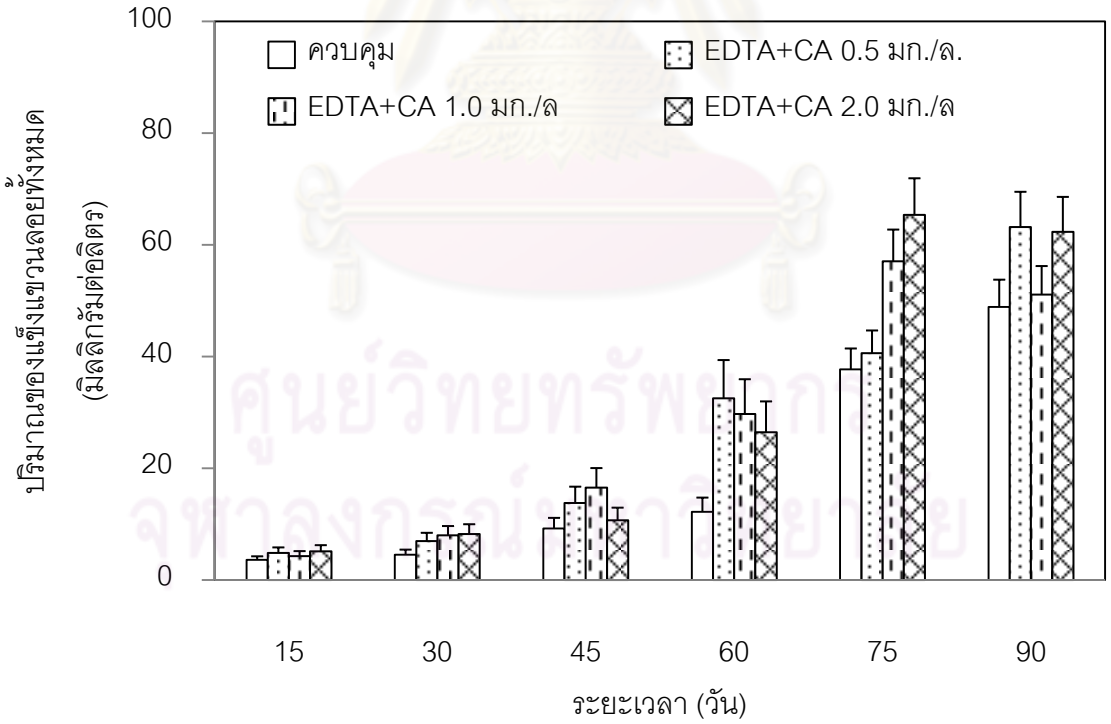
จากการศึกษาปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า หลังการปลูกผักตบชวาแล้ว ในทุกชุดการทดลองมีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลา โดยมีปริมาณสูงสุดที่ 90 วัน ซึ่งชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเท่ากับ 50.01, 56.87 และ 49.61 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับที่ 90 วัน (ดังรูปที่ 4.11) ส่วนชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเท่ากับ 70.98, 73.11 และ 79.21 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับที่ 90 วัน (ดังรูปที่ 4.12) สำหรับชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเท่ากับ 63.21, 51.12 และ 62.38 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับที่ 90 วัน (ดังรูปที่ 4.13) ทั้งนี้ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากเศษซากต่างๆ ของพืช ที่เกิดการหลุดร่วงของผักตบชวา รวมทั้งสารละลายธาตุอาหารที่ใส่ลงไปก่อนการปลูกผักตบชวา อาจเกิดตะกอนขึ้นได้จึงทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มมากขึ้น (สุธินี วดีศิริศักดิ์, 2550)



รูปที่ 4.11 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA (n=3)



รูปที่ 4.12 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA (n=3)

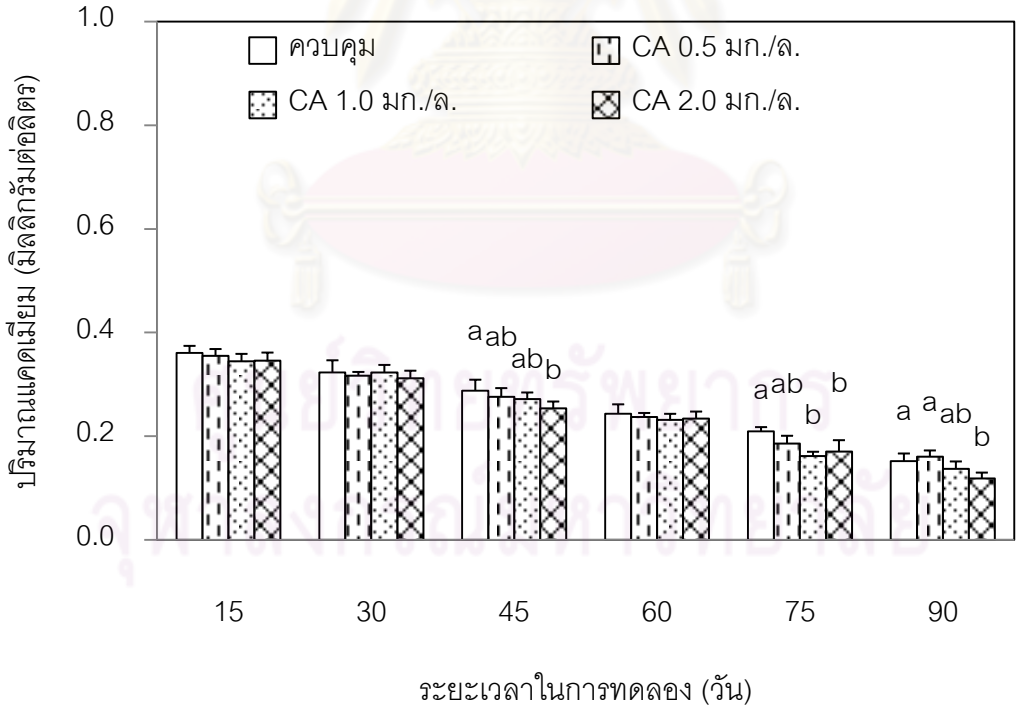


รูปที่ 4.13 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA

4.2.2 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

1) ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่เติม CA

ผลการศึกษาปริมาณแคดเมียมที่คงเหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองที่เติม CA พบว่า ทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง แม้ว่าในบางช่วงระยะเวลาพบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุม อย่างไรก็ตามสามารถกล่าวได้ว่าตลอดระยะเวลาของการทดลองมีปริมาณแคดเมียมคงเหลือในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยกว่าในชุดควบคุมโดยมีค่าเท่ากับ 0.36, 0.32, 0.29, 0.24, 0.21 และ 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง โดยในชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมคงเหลือในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยที่สุด เท่ากับ 0.35, 0.31, 0.25, 0.23, 0.17 และ 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับของระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.14) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 1 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

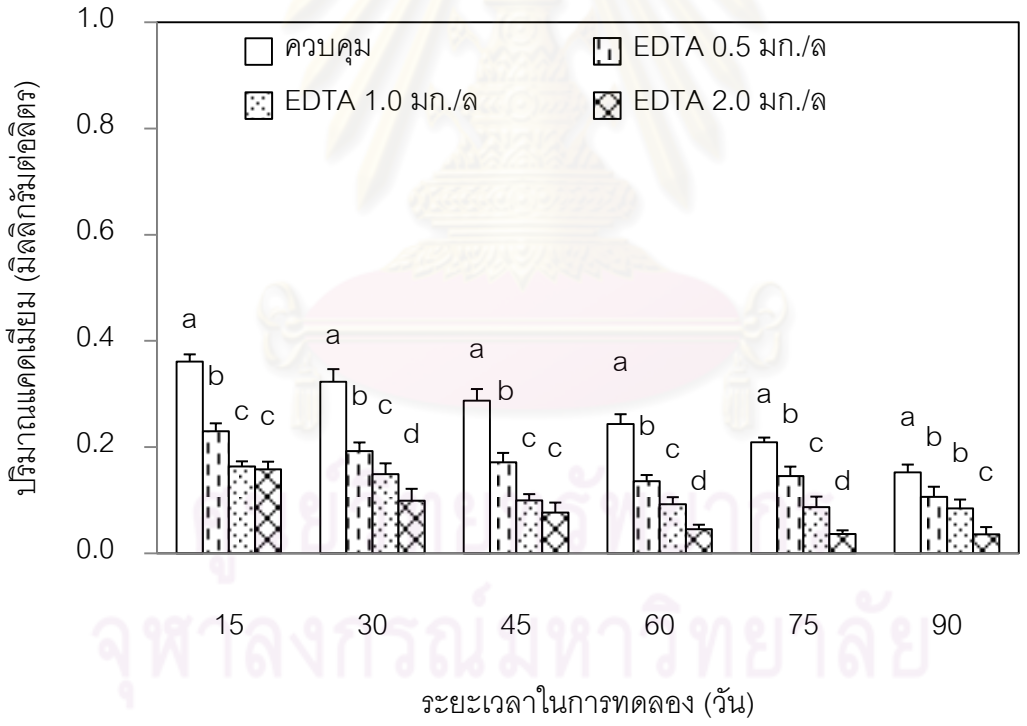


รูปที่ 4.14 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกันตามวิธีการของ DMRT

2) ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA

จากการศึกษาปริมาณแคดเมียมที่คงเหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ ในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA พบว่า ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลองเช่นเดียวกับชุดการทดลองที่เติม CA แต่พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุมในทุกชุดการทดลอง ซึ่งปริมาณแคดเมียมที่คงเหลือในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยกว่าในชุดควบคุมมากอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ EDTA ที่มีผลต่อผักตบชวาในการช่วยดูดดึงแคดเมียมได้ดี ทำให้ปริมาณแคดเมียมในน้ำลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยในชุดการทดลองที่เติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยที่สุด เท่ากับ 0.16, 0.10, 0.08, 0.05, 0.04 และ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับของระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.15) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

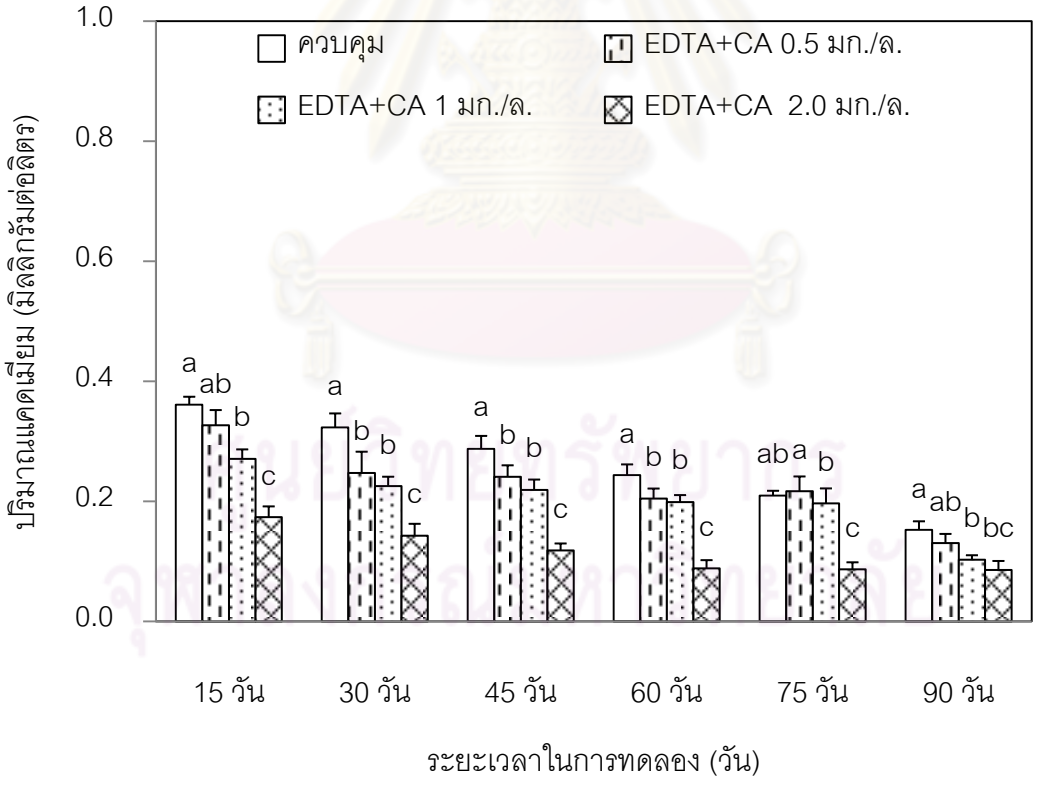


รูปที่ 4.15 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกันตามวิธีการของ DMRT

3) ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA

สำหรับปริมาณแคดเมียมที่คงเหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA พบว่า ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลองเช่นเดียวกับชุดการทดลองอื่นๆ และพบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุมในทุกชุดการทดลอง ซึ่งมีปริมาณแคดเมียมคงเหลือในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยกว่าในชุดควบคุมมากอย่างเห็นได้ชัด แต่มีปริมาณแคดเมียมคงเหลือในน้ำมากกว่าชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA อย่างไรก็ตามผลการศึกษายังแสดงให้เห็นถึงผลของสารคีเลตทั้งสองชนิดที่มีต่อผักตบชวาในการช่วยดูดดึงแคดเมียมได้ดีทำให้ปริมาณแคดเมียมในน้ำลดลง โดยในชุดการทดลองที่เติมสาร CA ร่วมกับสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมคงเหลือในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยที่สุด เท่ากับ 0.17, 0.14, 0.12, 0.09, 0.09 และ 0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับของระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสาร CA ร่วมกับสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.16)



รูปที่ 4.16 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกันตามวิธีการของ DMRT

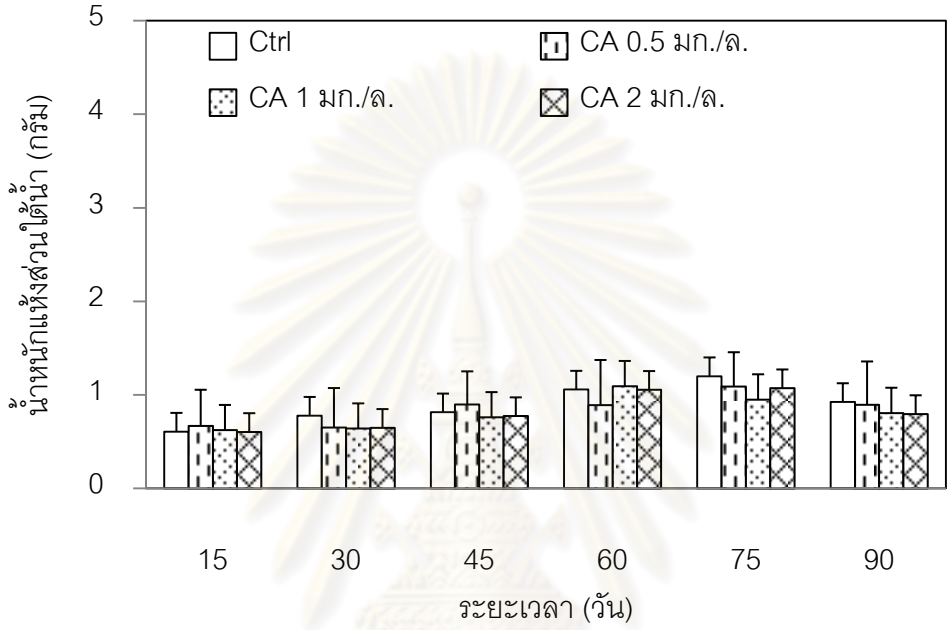
4.2.3 ผลของ EDTA และ CA ต่อการเติบโต และการแสดงความเป็นพิษของผักตบชวา

ก่อนการศึกษาครั้งนี้ได้มีการทดลองเบื้องต้น โดยการปลูกผักตบชวาในน้ำที่มีการเติมสาร EDTA และ CA ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ชุดควบคุม), 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่มีการเติมแคดเมียม เป็นเวลา 30 วัน ทำการสังเกตอาการแสดงความเป็นพิษ และการเจริญเติบโตของผักตบชวา ผลการศึกษาพบว่า ไม่พบอาการแสดงความเป็นพิษจากสาร EDTA และ CA ในผักตบชวา และอัตราการเจริญเติบโตของผักตบชวาในทุกระดับความเข้มข้นของสารคีเลตทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างกันกับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าสาร EDTA และ CA ไม่มีความเป็นพิษต่อผักตบชวา อย่างไรก็ตาม ในส่วนของการทดลองที่ 2 การศึกษาผลของสาร EDTA และ CA ต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวา แม้ว่าสาร EDTA และ CA อาจไม่มีความเป็นพิษต่อผักตบชวาโดยตรง แต่จากการที่สารคีเลตทั้งสองชนิดมีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมไปสะสมไว้ในผักตบชวาได้เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณแคดเมียมที่เพิ่มขึ้นนั้นอาจส่งผลการเจริญเติบโตของผักตบชวาได้ โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาการเติบโตของผักตบชวาด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

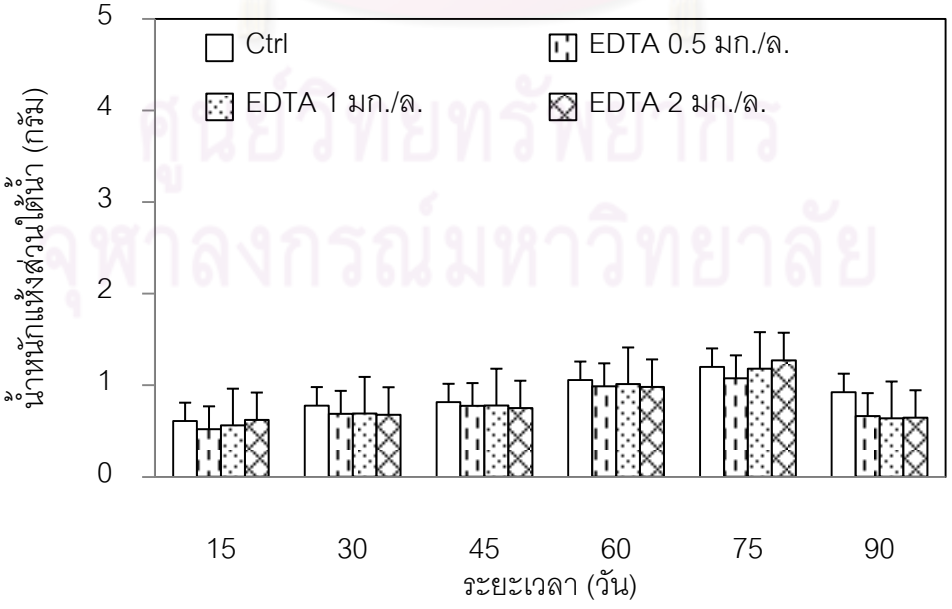
1) การเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา

จากการศึกษา พบว่า ในทุกชุดการทดลองน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ 15, 30, 45, 60 และ 75 วัน และลดลงที่ 90 วัน โดยในชุดควบคุมมีน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 0.65, 0.78, 0.81, 1.06, 1.20 และ 0.92 กรัม ตามลำดับระยะเวลา ในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.17) สำหรับชุดการทดลองที่เติม CA พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) น้อยที่สุด เท่ากับ 0.60, 0.65, 0.77, 1.06, 1.07 และ 0.80 กรัม ตามลำดับระยะเวลา ส่วนชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) น้อยที่สุดเท่ากับ 0.52, 0.69, 0.77, 0.99, 1.07 และ 0.66 กรัม ตามลำดับระยะเวลา (ดังรูปที่ 4.18) และชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) น้อยที่สุดเท่ากับ 0.52, 0.66, 0.75, 0.96, 1.18 และ 0.66 กรัม ตามลำดับระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.19) ทั้งนี้ในทุกชุดการทดลองที่เติมสารคีเลต พบว่า น้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่าสาร EDTA และ CA ไม่ส่งผลต่อการเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา สอดคล้องกับงานวิจัยของ นัยนันท์ อริยกานนท์ (2550) ที่ทำการศึกษาผลของสารคีเลตและกรดอินทรีย์ 5 ชนิด ต่อการช่วยดูดดึงทองแดง สังกะสี และนิกเกิล

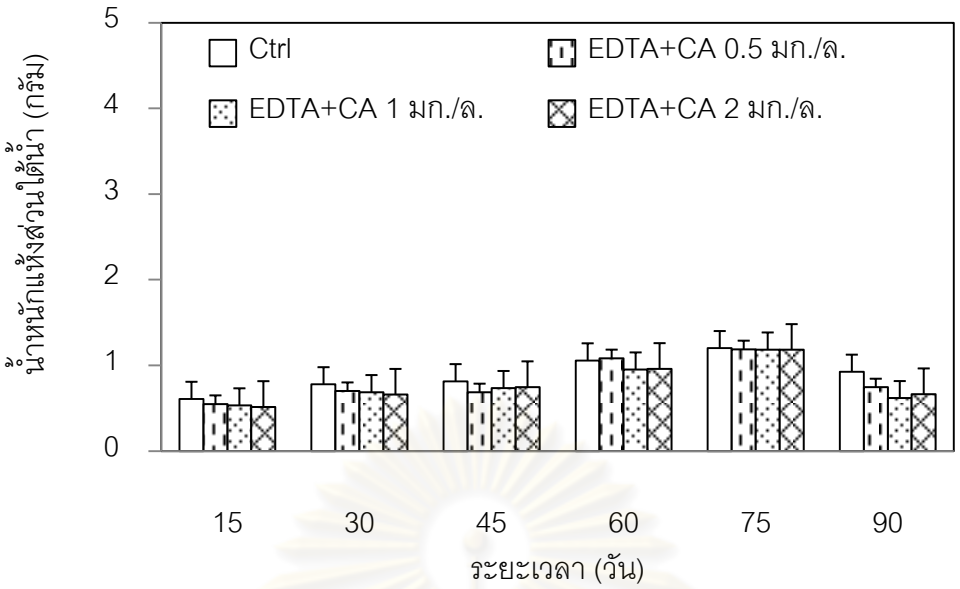
ของต้อยติ่ง (*Ruellia tuberosa* (Burm.f.) Hochr.) โดยพบว่า สารคีเลตไม่มีความเป็นพิษต่อพืชทดลอง และไม่ส่งผลต่อการเจริญเติมโตของต้อยติ่ง และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ German et al. (2003) ที่ศึกษาสาร EDTA และ EDDS เพื่อช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม ด้วยการปลูกผักกาดเขียวปลี พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ที่ 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ไม่ส่งผลต่อน้ำหนักแห้งของผักกาดเขียวปลี



รูปที่ 4.17 น้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA (n=3)



รูปที่ 4.18 น้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA (n=3)

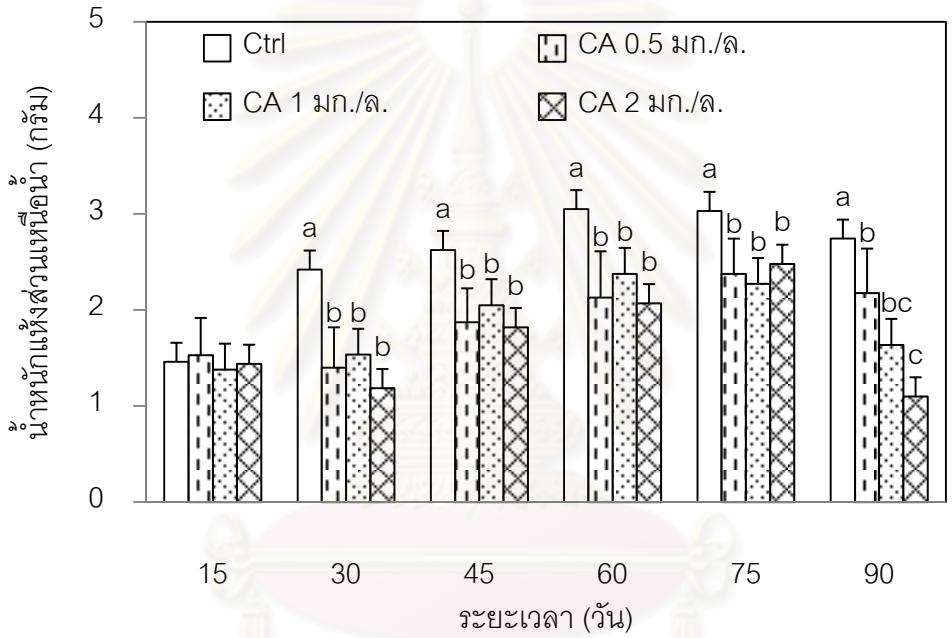


รูปที่ 4.19 น้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA (n=3)

2) การเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา

ในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารคีเลต พบว่า มีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) มีค่าเท่ากับ 1.46, 2.42, 2.62, 3.05, 3.03 และ 2.74 กรัม ตามลำดับระยะเวลาที่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วันของการทดลอง สำหรับชุดการทดลองที่เติมสารคีเลต พบว่า การเติมสารคีเลตที่ระดับความเข้มข้นที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาให้ลดลงมากที่สุด โดยชุดการทดลองที่เติม CA พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 1.44, 1.19, 1.82, 2.07, 2.48 และ 1.10 กรัม ตามลำดับของระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.20) ส่วนชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 1.27, 1.36, 1.55, 2.40, 2.30 และ 0.85 กรัม ตามลำดับระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.21) และชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 1.03, 1.51, 1.28, 2.16, 2.84 และ 1.54 กรัม ตามลำดับระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.22) ทั้งนี้ในทุกชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตในทุกระดับความเข้มข้นมีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) น้อยกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารคีเลตในทุกช่วงระยะเวลาของการทดลอง และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) เนื่องมาจากสารคีเลตที่เติมลงไปในการทดลองมีส่วนช่วยให้พืชดูดดึงโลหะได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นปริมาณ

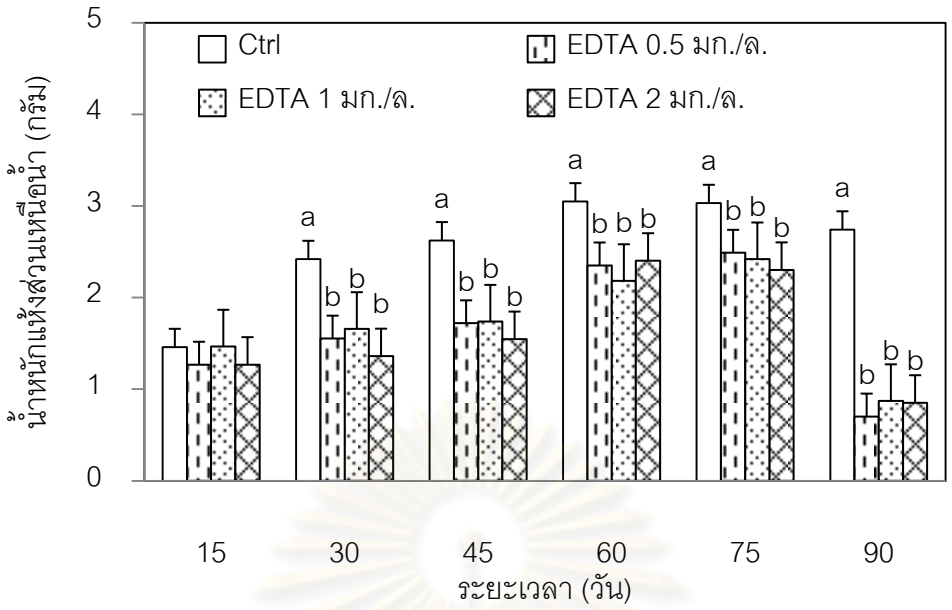
การสะสมโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของพืชที่เพิ่มมากขึ้นอาจส่งผลให้พืชชะงักการเติบโตได้ (จารุวรรณ วงศ์ธเนศ, 2549) จึงส่งผลให้น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตจึงน้อยกว่าในชุดควบคุมที่ไม่การเติมสารคีเลต อย่างไรก็ตาม จากการศึกษายังพบว่า การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในทุกชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นได้ว่าผักตบชวาสามารถเติบโตได้ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu et al. (2004) ที่ทำการศึกษาการปลูกผักกาดเขียวปลี โดยการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม พบว่า สาร EDTA ไม่มีความเป็นพิษต่อผักกาดเขียวปลี



รูปที่ 4.20 น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA (n=3)

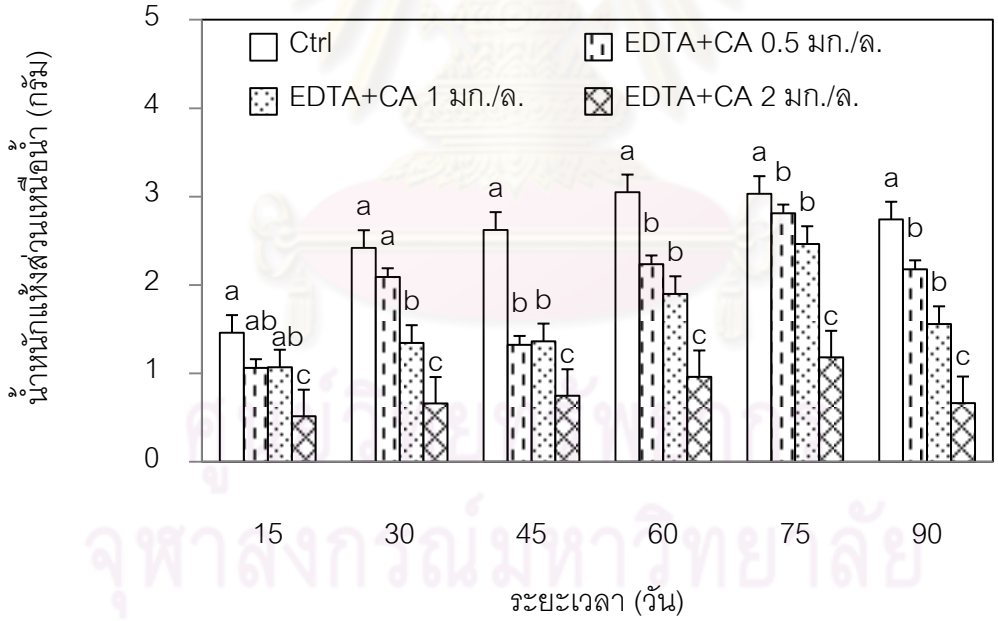
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกันตามวิธีการของ DMRT

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกันตามวิธีการของ DMRT



รูปที่ 4.22 น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกันตามวิธีการของ DMRT

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

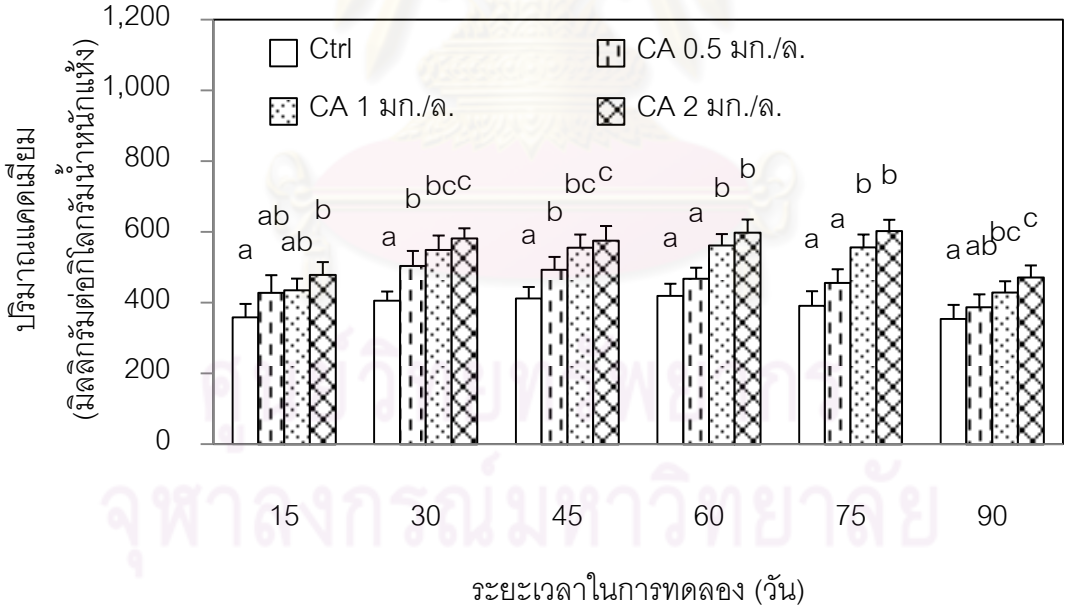
4.2.4 ผลของ EDTA และ CA ต่อการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา

ผลของ EDTA และ CA ต่อการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา ศึกษาได้จากการตรวจวิเคราะห์ค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในผักตบชวา โดยทำการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมของผักตบชวา 2 ส่วน คือ ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) ซึ่งผลการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1) ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาเมื่อเติม CA

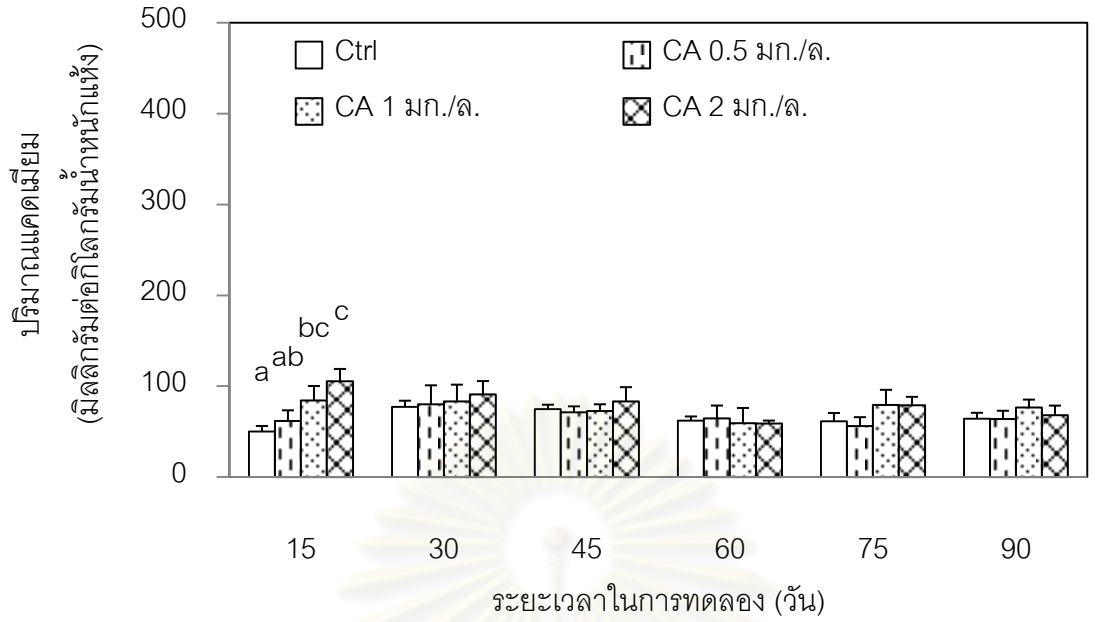
ผลการศึกษา พบว่า ในชุดการทดลองที่เติม CA ทุกระดับความเข้มข้น ได้แก่ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรมีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีปริมาณการสะสมมากกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ในทุกช่วงระยะเวลาของการทดลอง คือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 358.51, 405.61, 411.77, 419.49, 391.34 และ 353.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.23) ทั้งนี้ชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมในน้ำมากที่สุดในทุกระยะเวลาของการทดลอง ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้นอื่น โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 478.39, 581.55, 575.65, 598.57, 603.19 และ 471.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 435.22, 549.38, 555.40, 561.83, 557.02 และ 428.92 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง และชุดการทดลองที่เติม CA 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมแคดเมียมน้อยที่สุด โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมเท่ากับ 428.38, 504.28, 493.13, 468.28, 455.92 และ 387.14 ตามลำดับของระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง ทั้งนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อเวลามากขึ้นปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Duarte et al. (2007) ที่ทำการศึกษาการดูดดึงแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 2 และ 4 ไมโครโมลต่อลิตร และนิกเกิลที่ระดับความเข้มข้น 20 และ 40 ไมโครโมลต่อลิตร ด้วยการใช้พืช *Halimione portulacoides* และมีการเติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 25 และ 50 ไมโครโมลต่อลิตร เพื่อช่วยในการดูดดึง และการสะสมโลหะของพืช ผลการศึกษาพบว่า CA มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมของพืชเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมากกว่าลำต้นและใบ

สำหรับปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) พบว่า มีปริมาณการสะสมมากกว่าชุดควบคุมในระยะเวลาของการทดลองที่ 15 วันเท่านั้น ส่วนในระยะเวลาของการทดลองอื่นพบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของ CA ที่มากขึ้น (ดังรูปที่ 4.24) โดยในชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 1 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 105.37, 84.28 และ 61.71 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับความเข้มข้นที่ระยะเวลา 15 วัน ซึ่งมีค่าที่แตกต่างจากปริมาณการสะสมในส่วนของรากอย่างเห็นได้ชัด และมีแนวโน้มปริมาณการสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้นในทุกระยะเวลาของการทดลอง แสดงให้เห็นได้ว่า CA มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมไปสะสมไว้ในเหนือน้ำได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nascimento et al. (2006) ที่ศึกษาและทำการเปรียบเทียบความสามารถของสารคีเลตธรรมชาติ และคีเลตสังเคราะห์ในการสะสมโลหะหนักโดยใช้พืช Indian mustard (*Brassica juncea* L.) พบว่า การเติม CA ช่วยเพิ่มการสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นและใบเพิ่มขึ้น จาก 85.5 ไมโครกรัมต่อกรัมในชุดควบคุม เป็น 138 ไมโครกรัมต่อกรัมในชุดที่เติมสารทดลอง



รูปที่ 4.23 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกันตามวิธีการของ DMRT



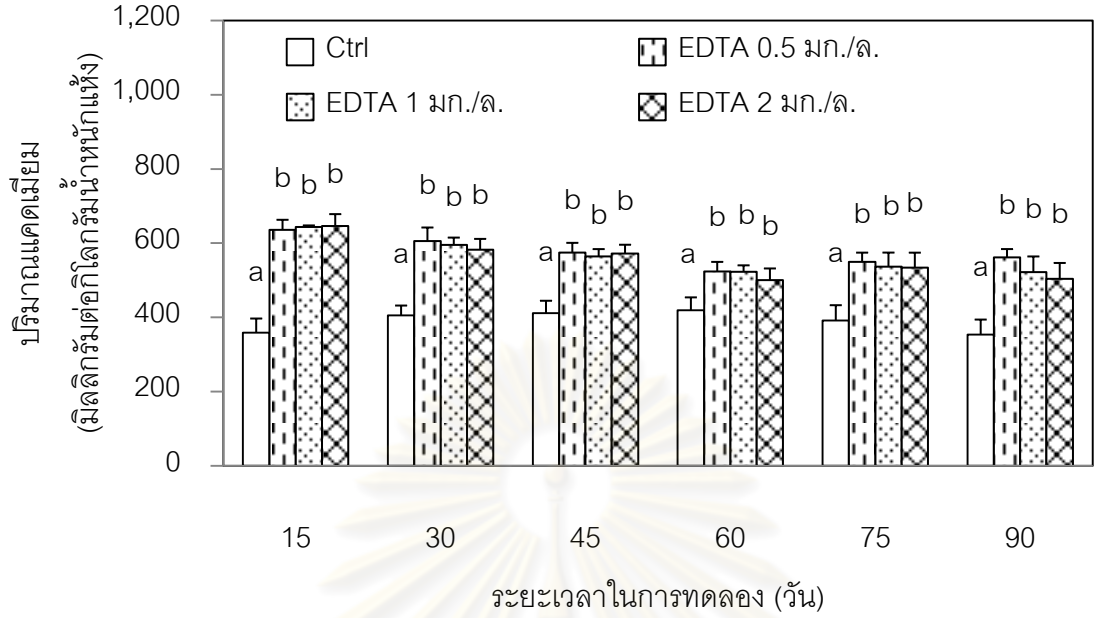
รูปที่ 4.24 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกันตามวิธีการของ DMRT

2) ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาเมื่อเติมสาร EDTA

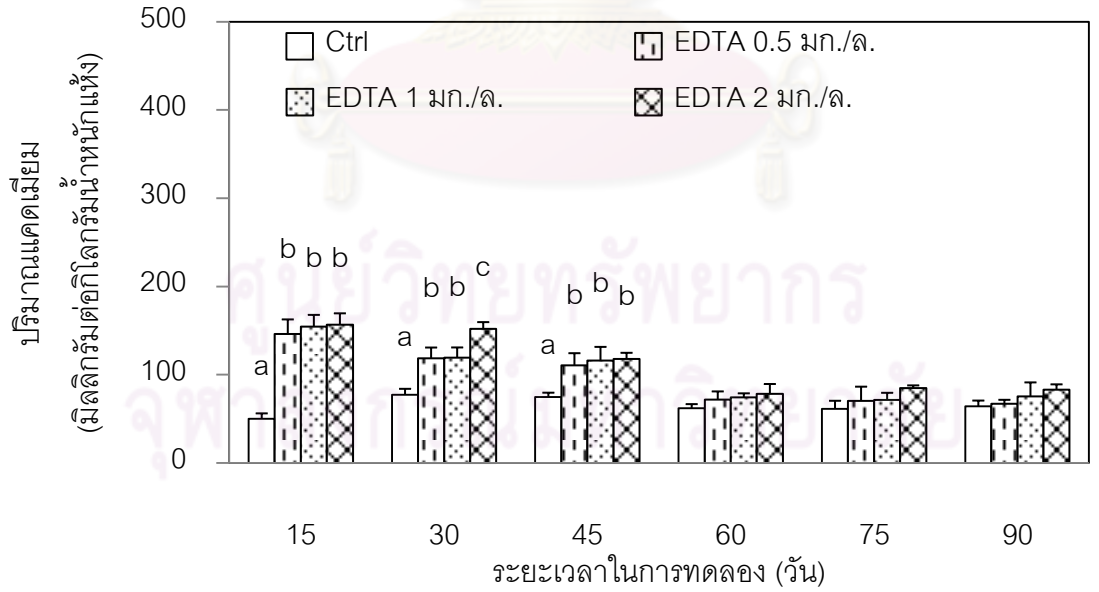
จากการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA พบว่า ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ทุกระดับความเข้มข้นได้แก่ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งผลของการสะสมแคดเมียมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุม โดยส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวามีการสะสมแคดเมียมมากกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ทุกช่วงระยะเวลาในการทดลอง คือ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน และการสะสมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของทุกระดับความเข้มข้น ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ทั้งนี้ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแนวโน้มปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในน้ำมากที่สุด เมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้นอื่นๆ โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมเท่ากับ 635.70, 605.15, 574.22, 523.64, 549.15 และ 561.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.25) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมเท่ากับ 643.22, 595.43, 564.12, 522.50, 536.47 และ 521.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการ

สะสมแคดเมียมน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 645.82, 582.31, 571.76, 500.23, 533.64 และ 503.58 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีมากที่สุดที่ 15 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 635.70, 643.22 และ 645.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับความเข้มข้น และมีแนวโน้มของการสะสมแคดเมียมลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA พบว่า มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัดที่ระยะเวลา 15, 30 และ 45 วัน โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมไปสะสมไว้ในส่วนของลำต้นและใบมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 156.68, 151.90, 117.81, 78.28, 84.77 และ 83.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง (ดังรูปที่ 4.26) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ 1 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยทุกระดับความเข้มข้นมีแนวโน้มการสะสมแคดเมียมที่ลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากการแสดงความเป็นพิษจากแคดเมียมที่สะสมมาตั้งแต่เริ่มการทดลองที่มากขึ้นจึงอาจทำให้ประสิทธิภาพในการช่วยดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาลดลง อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมสาร EDTA มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมไปไว้ในส่วนต่างๆ ของผักตบชวาเพิ่มมากขึ้น โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hernandez et al. (2006) ซึ่งได้ทำการศึกษาการใช้สาร EDTA ในการช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมด้วยการปลูกพืช *Cynara carduncylus* ในสารละลาย ผลการศึกษาพบว่า สาร EDTA ช่วยในการดูดดึงโลหะหนักได้ดีขึ้น โดยมีการสะสมโลหะหนักมากในส่วนลำต้นและใบ และลดลงในส่วนราก หรือกล่าวได้ว่าสาร EDTA มีส่วนช่วยในการสะสม และการเคลื่อนที่โลหะหนักไปยังส่วนต่างๆ ของพืชได้ดีขึ้น และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wongtanet และ Parkpain (2008) ที่ได้ศึกษาการใช้พืชบำบัดสารตะกั่วในน้ำ โดยมีการเติมสาร EDTA พบว่า พืชทดลองได้แก่ ผักแว่น (*Hydrocotyle umbella*) ต้นเฟิร์น (*Pityrogramma calomelanos*) และต้นใบเตย (*Pandanus amaryllifolius* Roxb.) มีการสะสมตะกั่วเพิ่มขึ้นในส่วนลำต้นและใบ มีค่าเท่ากับ 19, 31.7 และ 3.2 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยชุดการทดลองที่ไม่เติม EDTA มีการสะสมตะกั่วเท่ากับ 11.4, 17.4 และ 2.4 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกันตามวิธีการของ DMRT



รูปที่ 4.26 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA

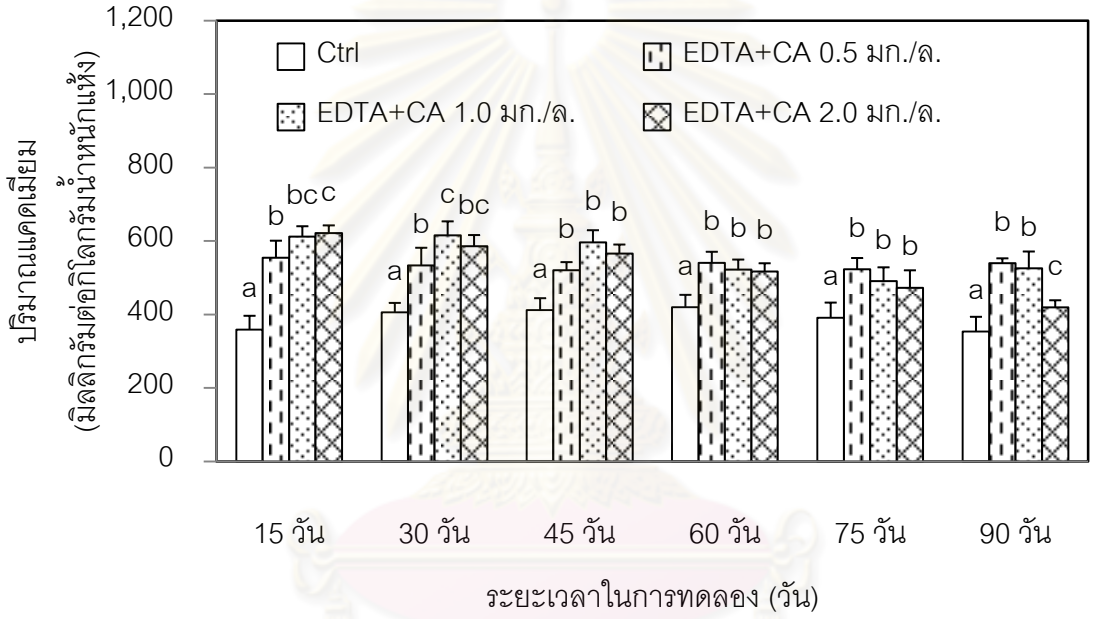
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกันตามวิธีการของ DMRT

3) ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาเมื่อเติม CA ร่วมกับสาร EDTA

จากการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) พบว่า ชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลต่อการช่วยดูดดึงแคดเมียมในน้ำไปสะสมในส่วนรากมากที่สุดในระยะเวลาเริ่มต้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก CA มีส่วนช่วยในการสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนรากได้มาก ในขณะที่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นสาร EDTA ได้ช่วยในการลำเลียงแคดเมียมไปสะสมไว้ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น) ได้มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณการสะสมแคดเมียมมีค่าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้นอื่นๆ และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 621.71, 585.87, 565.94, 517.20, 473.15 และ 419.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.27) สำหรับชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 612.82, 615.50, 597.07, 522.87, 490.93 และ 525.81 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) น้อยกว่าระดับความเข้มข้นอื่นในช่วงแรก และยังพบว่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เพิ่มขึ้นในช่วงระยะสิ้นสุดการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสาร EDTA น้อยกว่าระดับความเข้มอื่นๆ การดูดดึงจึงเกิดขึ้นน้อย ดังนั้นปริมาณการสะสมในรากจึงยังคงมีอยู่มาก โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 554.80, 533.55, 521.06, 540.75, 523.47 และ 539.69 ตามลำดับระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jean et al. (2008) ที่ได้ทำการทดลองการดูดดึงโครเมียม และนิกเกิล ด้วยพืช *Darura Innoxia* โดยการปลูกในดินที่ปนเปื้อน และอยู่ในสารละลายในอัตราส่วน 1:10 และทำการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ CA ที่ระดับความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า การเติมสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดมีผลทำให้พืชทดลองมีการสะสมโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในส่วนรากที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

ส่วนการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA พบว่า ผลการศึกษาคล้ายกับชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA คือ มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำมากกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัดที่ระยะเวลา 15, 30 และ 45 วัน และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) โดยชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมไปสะสมไว้ในส่วนของลำต้นและใบมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 146.89, 103.58, 86.21, 79.03, 80.62 และ 84.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนัก

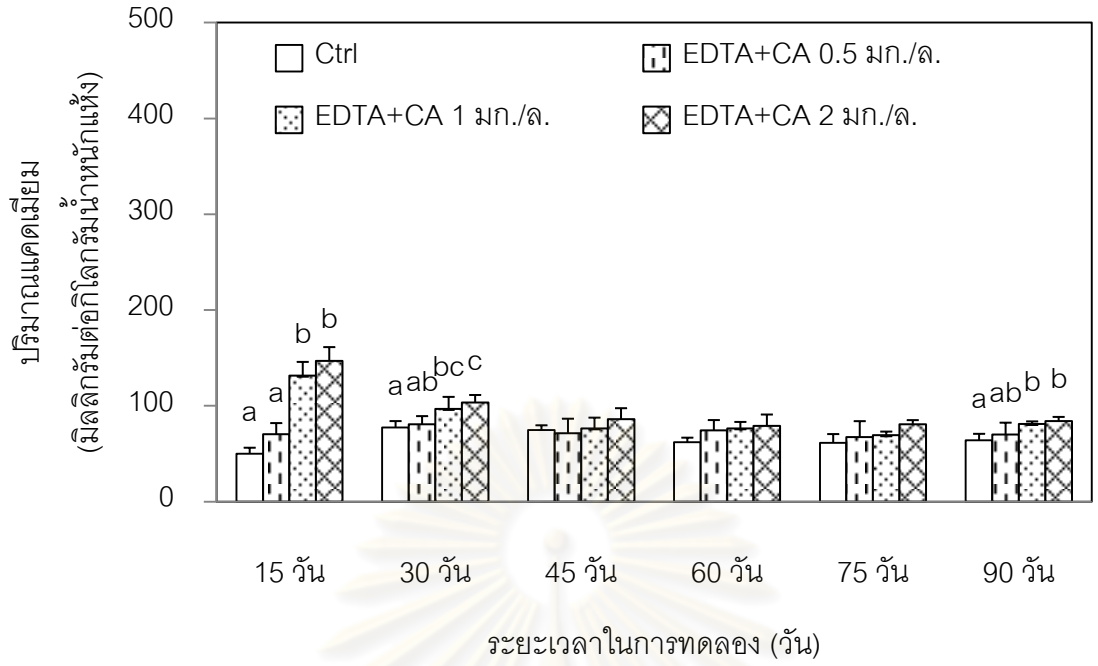
แห้ง ตามลำดับในแต่ละระยะเวลาของการทดลอง (ดังรูปที่ 4.28) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA ที่ 1 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยทุกระดับความเข้มข้นมีแนวโน้มของการสะสมแคดเมียมลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA แม้ว่าจะมีปริมาณการสะสมแคดเมียมที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเติมสาร CA ร่วมกับสาร EDTA มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมไปไว้ในส่วนต่างๆ ของผักตบชวาเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lombi et al. (2001) ที่ได้ศึกษาการใช้สาร EDTA เพื่อเพิ่มความสามารถในการสะสมของพืช 2 ชนิด คือ *Thaaspi caeruscens* และข้าวโพด (*Zea mays* L.) ผลการศึกษาพบว่า สาร EDTA ช่วยเพิ่มความสามารถในการสะสมแคดเมียมในพืชทั้งสองชนิดได้



รูปที่ 4.27 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกันตามวิธีการของ DMRT

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.28 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกันตามวิธีการของ DMRT

4) เปรียบเทียบผลของ CA และสาร EDTA ต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวา

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) ในทุกชุดการทดลอง พบว่า ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) มีปริมาณการสะสมแคดเมียมน้อยกว่าในส่วนใต้น้ำ (ราก) อย่างเห็นได้ชัดในทุกชุดการทดลอง อันเป็นผลเนื่องมาจาก การดูดดึงโลหะหนักในพืชนั้นจะถูกดูดดึงเข้าสู่รากพร้อมกับน้ำที่รากของพืชดูดซึมเข้ามา โดยการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ของรากพืช ซึ่งเกิดขึ้นได้ง่ายเนื่องจากไม่ต้องการใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึม เมื่อมาถึงชั้นเอนโดเดอร์มิส (Endodermis) ซึ่งมีสาร Suberin เคลือบอยู่เป็นแนวกั้นบริเวณ Casparian strip (เชาวน์ ชิโนรักษ์ และวรรณี ชิโนรักษ์, 2541) น้ำจะผ่านเข้าไปโดยผ่านช่องพลาสโมเดสมาตา (Plasmodesmata) ภายในเซลล์ของพืช ซึ่งมีขนาดของช่องว่างที่เล็ก ในขณะที่โลหะหนักอาจมีขนาดที่ใหญ่เกินไปกว่าที่จะผ่านเข้าไปได้ จึงมีการลำเลียงโดยใช้วิธีการแบบ Active transport โดยต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์พืช โดยการแพร่ผ่านเข้าช่องที่เป็นประจุบวกสอง (Divalent cation membrane channel) (Kochain, 1991) ซึ่งเกิดขึ้นได้ช้ามาก ทำให้แคดเมียมผ่านเข้าไปสู่ทางท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) และลำเลียงไปยังส่วนต่างๆ ที่อยู่เหนือรากได้น้อย ทำให้ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีมากกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการลำเลียงแคดเมียมเข้าสู่ทางท่อลำเลียงผ่านทางเซลล์ในบริเวณที่เป็นชั้นเอนโดเดอร์มิสอาจเกิดขึ้นได้ยาก แต่เอนโดเดอร์มิสจะพบในเนื้อเยื่อของรากที่เจริญเติบโตเต็มที่ (Region of maturation) ในขณะที่บริเวณที่มีการแบ่งเซลล์ (Region of cell division) และบริเวณที่มีเซลล์ขยายตามยาว (Region of cell elongation) จะยังไม่พบเอนโดเดอร์มิส (วันเพ็ญ ภูติจันทร์, 2540) ซึ่งอาจทำให้แคดเมียมถูกลำเลียงเข้าสู่ทางท่อลำเลียงน้ำได้โดยไม่ต้องใช้วิธีการ Active transport และจากการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งในส่วนเหนือน้ำ และส่วนใต้น้ำ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับชุดควบคุม พบว่า ในทุกชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตมีปริมาณการสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเติม CA และสาร EDTA ไปทำปฏิกิริยากับแคดเมียมและเกิดเป็นสารประกอบแคดเมียมเชิงซ้อน ซึ่งช่วยไม่ให้เกิดการตกตะกอน และเกิดการชักนำให้พืชมีการดูดดึงเข้าไปได้เพิ่มมากขึ้น (ชวนพิศ แดงสวัสดิ์, 2544) นอกจากนี้จากการเติมสารคีเลตลงไปในระดับความเข้มข้นต่างๆ อาจทำให้ระดับความเข้มข้นของสารละลายทั้งหมดในน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่า Water potential ซึ่งแปรผันไปกับระดับความเข้มข้นของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสารคีเลตที่เติมลงไป และจะทำให้เกิดการแพร่ของน้ำเข้าสู่เซลล์รากของพืชที่มีค่า Water potential ที่น้อยกว่าได้ดี (สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์) จึงอาจทำให้แคดเมียมที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับน้ำเข้าสู่พืชได้มากยิ่งขึ้น ในขณะที่ชุดควบคุม ค่า Water potential ในน้ำอาจมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น เนื่องจากไม่มีการเติมสารคีเลต จึงอาจทำให้แคดเมียมที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับน้ำเข้าสู่พืชได้ไม่ดีเท่ากับชุดการทดลองที่เติมสารคีเลต

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตในแต่ละระดับความเข้มข้น พบว่า ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA มากที่สุดในทุกระดับความเข้มข้น รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA และชุดการทดลองที่เติม CA ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.11) โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในระดับความเข้มข้นของสารคีเลตที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อพิจารณาร่วมกับปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) จากการศึกษาพบว่า ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดเช่นเดียวกันกับในส่วนเหนือน้ำ (ดังตารางที่ 4.12) แสดงให้เห็นได้ว่า สาร EDTA มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมได้มากกว่า CA สอดคล้องกับงานวิจัยของ Turgut et al. (2004) ที่ได้ทำการศึกษาความสามารถของสาร EDTA และ CA ในการช่วยดูดดึงแคดเมียม โครเมียม และนิกเกิล โดยใช้ทานตะวัน (*Helianthus annuus*) ซึ่งพบว่า สาร EDTA สามารถช่วยในการดูดดึงแคดเมียมได้มากกว่า CA และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Muhammad et al. (2009) ที่ได้ทำการศึกษาความสามารถของสาร EDTA และ CA ในการดูดดึงแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และโครเมียม โดยใช้ธูปฤาษี (*Typha angustifolai*) ผลการศึกษาพบว่า สาร EDTA สามารถเพิ่มการดูดดึงแคดเมียมได้มากกว่า CA เช่นกัน

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบผลของสารคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ

ระยะเวลา	ปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
(วัน)	Ctrl	CA	EDTA	EDTA+CA
ระดับความเข้มข้นของสารคีเลต 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร				
15	50.03 ^{a} ±6.2	61.71 ^{a} ±11.8	146.10 ^{b} ±33.8	70.24 ^{a} ±11.7
30	77.21 ^{a} ±6.8	80.03 ^{a} ±21.0	118.56 ^{b} ±20.5	80.84 ^{a} ± 8.4
45	74.67 ^{a} ±5.0	71.23 ^{a} ± 6.6	110.79 ^{b} ±13.6	71.36 ^{a} ±15.1
60	62.14 ±4.6	64.53 ±14.2	71.75 ± 9.4	74.53 ±10.6
75	61.33 ±9.1	56.18 ± 9.7	70.49 ±16.0	67.24 ±16.7
90	64.07 ±6.6	63.94 ± 9.0	67.25 ± 4.3	70.04 ±12.3
ระดับความเข้มข้นของสารคีเลต 1 มิลลิกรัมต่อลิตร				
15	50.03 ^{a} ±6.21	84.28 ^{b} ±15.9	154.60 ^{c} ±13.22	131.39 ^{c} ±14.4
30	77.21 ^{a} ±6.82	83.42 ^{b} ±18.3	119.45 ^{c} ±27.45	96.71 ^{bc} ±12.6
45	74.67 ^{a} ±5.00	72.82 ^{b} ±7.31	116.03 ^{b} ±21.01	76.44 ^{a} ±11.2
60	62.14 ^{a} ±4.60	59.30 ^{ab} ±16.8	74.41 ^{bc} ± 4.55	76.49 ^{c} ±6.69
75	61.33 ±9.16	79.36 ±16.7	71.48 ± 8.07	69.20 ±3.89
90	64.07 ^{a} ±6.68	76.67 ^{ab} ±8.58	75.53 ^{ab} ±35.12	80.96 ^{b} ±2.76
ระดับความเข้มข้นของสารคีเลต 2 มิลลิกรัมต่อลิตร				
15	50.03 ^{a} ±6.21	105.37 ^{b} ±13.6	156.68 ^{c} ±30.5	146.89 ^{c} ±14.4
30	77.21 ^{a} ±6.82	91.18 ^{ab} ±14.5	151.90 ^{c} ±7.75	103.58 ^{b} ±7.72
45	74.67 ^{a} ±5.00	83.2 ^{a} ±15.8	117.81 ^{b} ±7.06	86.21 ^{a} ±11.3
60	62.14 ^{a} ±4.60	58.85 ^{ab} ±3.34	78.28 ^{b} ±11.2	79.03 ^{b} ±11.9
75	61.33 ^{a} ±9.16	78.96 ^{b} ±9.37	84.77 ^{b} ±3.17	80.62 ^{b} ±4.43
90	64.07 ^{a} ±6.68	67.98 ^{b} ±10.7	83.17 ^{c} ±5.97	84.13 ^{c} ±4.27

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างสารคีเลตที่เติมลงในการทดลอง

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบผลของสารคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ

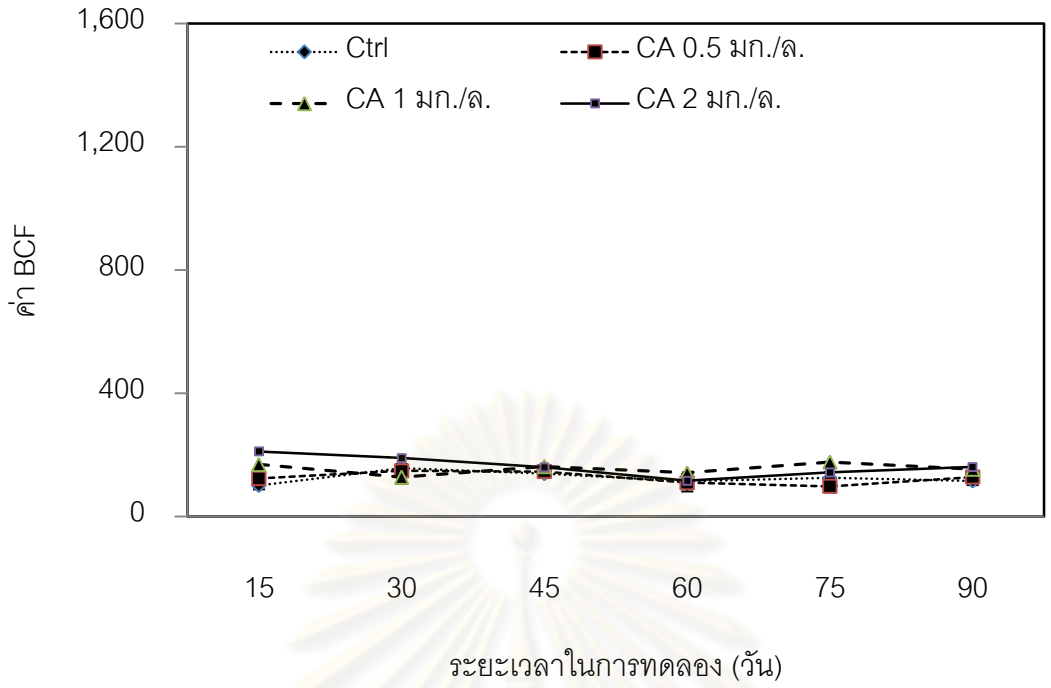
ระยะเวลา	ปริมาณแคดเมียมในส่วนส่วนใต้น้ำ (ราก) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
(วัน)	Ctrl	CA	EDTA	EDTA+CA
ระดับความเข้มข้นของสารคีเลต 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร				
15	358.51^{a}±6.2	428.38^{a} ± 18.7	635.70^{b}±33.7	554.80^{c}±23.7
30	405.61^{a}±6.8	504.28^{b}±20.5	605.15^{c}± 2.5	533.55^{bc}±18.5
45	411.77^{a}±5.0	493.13^{b}±13.6	574.22^{c}±13.6	521.06^{ab}±13.6
60	419.49^{a}±4.6	468.28^{ab}± 9.3	523.64^{bc}± 9.8	540.75^{c}±10.3
75	391.34^{a}±9.1	455.92^{a}±11.0	549.15^{b}±16.0	523.47^{b}±18.0
90	353.85^{a}±6.6	387.14^{a}± 4.3	561.67^{b}± 4.3	539.69^{b}±13.6
ระดับความเข้มข้นของสารคีเลต 1 มิลลิกรัมต่อลิตร				
15	358.51^{a}±6.2	435.22^{b} ± 3.2	643.22^{c} ±13.2	612.82^{c} ±12.3
30	405.61^{a}±6.8	549.38^{b} ± 7.4	595.43^{bc} ±27.4	615.50^{c} ± 2.4
45	411.77^{a}±5.0	555.40^{b} ±11.0	564.12^{b} ±21.1	597.07^{b} ±18.0
60	419.49^{a}±4.6	561.83^{b} ± 5.5	522.50^{b} ±14.5	522.87^{b} ±24.4
75	391.34^{a}±9.1	557.02^{b} ± 8.9	536.47^{b} ±18.0	490.93^{b} ±13.0
90	353.85^{a}±6.6	428.92^{a} ±25.1	521.78^{b} ±15.6	525.81^{b} ±35.0
ระดับความเข้มข้นของสารคีเลต 2 มิลลิกรัมต่อลิตร				
15	358.51^{a}±6.2	478.39^{b} ±30.4	645.82^{c} ± 3.4	621.71^{c} ±21.2
30	405.61^{a}±6.8	581.55^{b} ± 7.7	582.31^{b} ± 7.8	585.87^{b} ± 7.7
45	411.77^{a}±5.0	575.65^{b} ± 7.0	571.76^{b} ± 7.0	565.94^{b} ± 7.1
60	419.49^{a}±4.6	598.57^{b} ±11.3	500.23^{c} ±11.2	517.20^{c} ±11.2
75	391.34^{a}±9.1	603.19^{b} ±23.1	533.64^{bc}± 3.1	473.15^{c} ±47.5
90	353.85^{a}±6.6	471.15^{bc}± 5.9	503.58^{c} ±43.0	419.41^{ab}±19.7

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างสารคีเลตที่เติมลงในการทดลอง

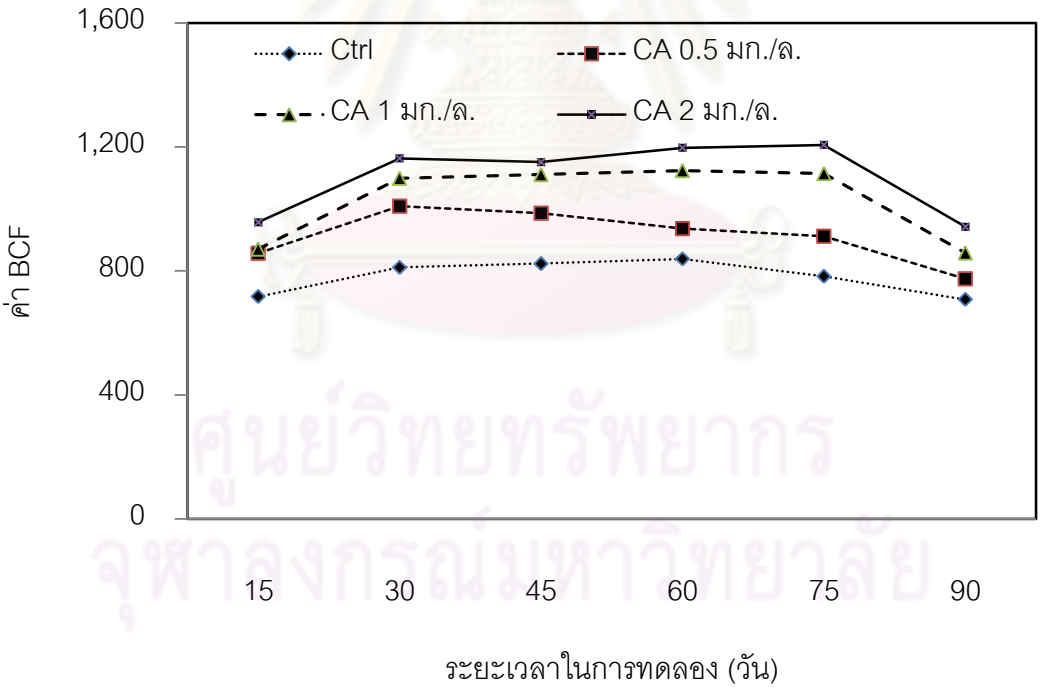
4.2.5 ผลของ EDTA และ CA ต่อศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา (Bioconcentration factor; BCF)

1) ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA

การศึกษาค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา พบว่า ในชุดการทดลองที่เติม CA พบว่า ในส่วนหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวามีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากที่สุด คือ 210.74 ที่ระยะเวลา 15 (ดังรูปที่ 4.29) ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือชุดการทดลองที่เติม CA ระดับความเข้มข้น 1 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเท่ากับ 168.56 และ 123.42 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าในช่วงเวลาอื่นไม่มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดจากชุดควบคุม แต่ก็ยังพบว่า มีค่าศักยภาพที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยมีค่าเท่ากับ 100.06, 156.52, 138.37, 113.93, 125.02 และ 114.73 ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง สำหรับค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา ในชุดการทดลองที่เติม CA พบว่า ในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีการสะสมที่ส่วนรากมากกว่า ในขณะที่มีการลำเลียงไปสู่ส่วนอื่นๆ น้อย ทำให้ศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น แต่ในระยะสุดท้ายของการทดลองอาจมีค่าที่ลดลง เนื่องจากผักตบชวามีความสามารถลดลงอันเกิดจากการที่พืชมีการสะสมปริมาณแคดเมียมไว้มาก โดยชุดการทดลองที่เติม CA ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากที่สุด เท่ากับ 956.78, 1163.10, 1151.31, 1197.13, 1206.38 และ 942.30 ตามลำดับของระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.30) โดยค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมในชุดการทดลองที่เติม CA มีปริมาณน้อยในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา แต่จากค่าที่สูงในส่วนใต้น้ำ (ราก) จึงแสดงให้เห็นว่าการเติม CA มีส่วนช่วยต่อการเพิ่มศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา โดยเฉพาะในส่วนใต้น้ำ (ราก) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hsiao et al. (2007) ที่ได้ทำการศึกษาการดูดดึงโลหะหนักโดยใช้ผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) ร่วมกับสารคีเลต 4 ชนิด ได้แก่ สาร DTPA, EDTA, CA และ Oxalic acid พบว่า สารคีเลตทุกชนิด รวมทั้ง CA สามารถช่วยเพิ่มศักยภาพในการสะสมโลหะหนักของพืช



รูปที่ 4.29 ค่า BCF ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA

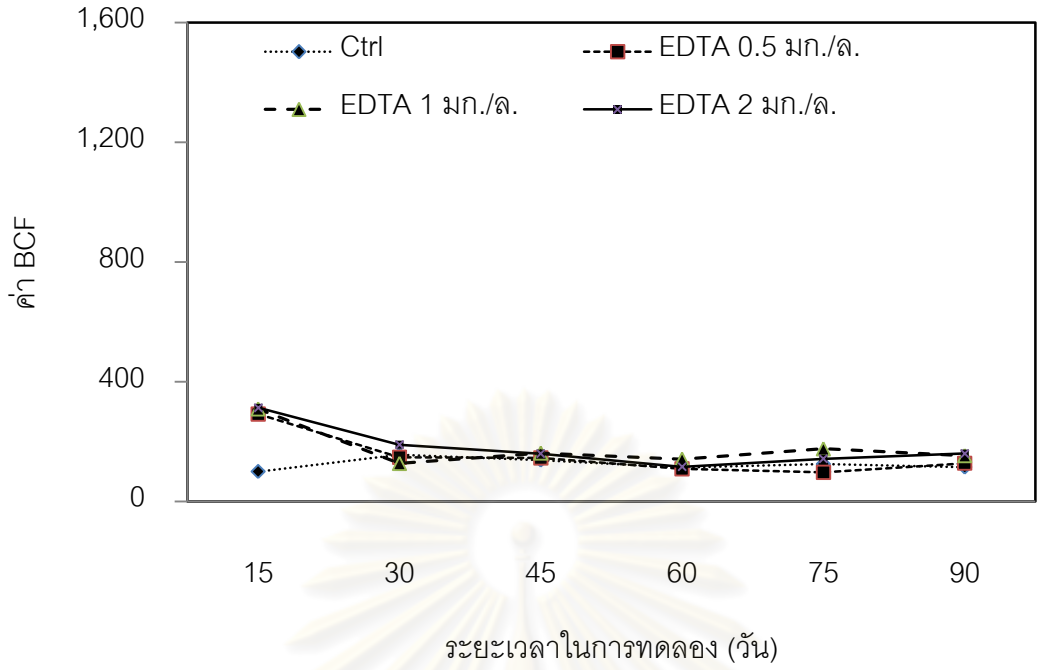


รูปที่ 4.30 ค่า BCF ส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA

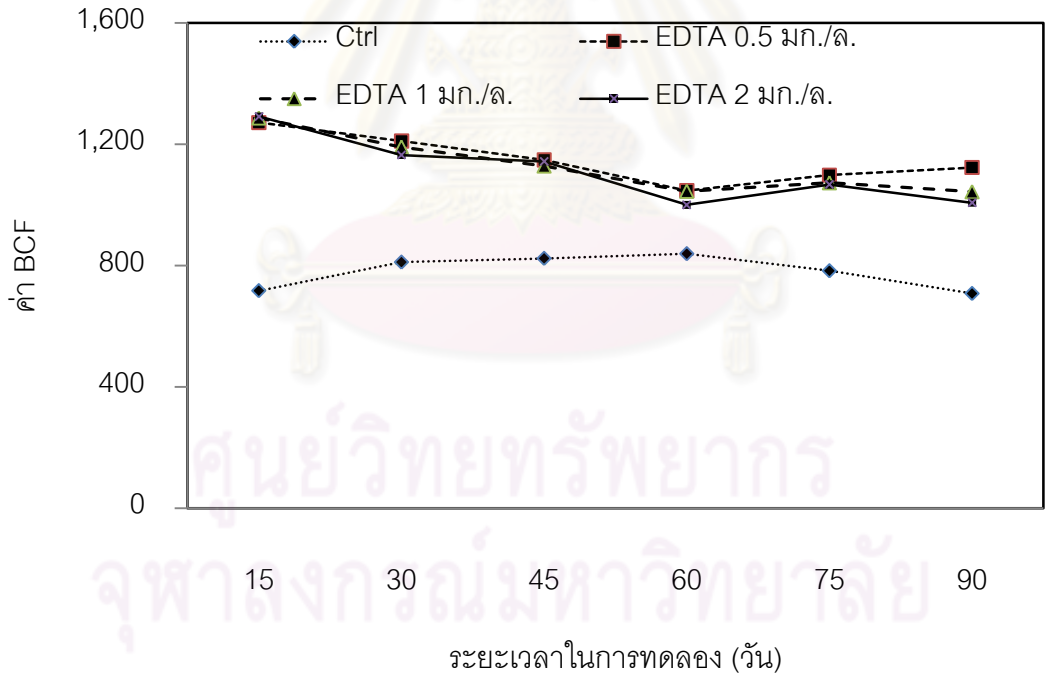
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA

ผลการศึกษาค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA พบว่า ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวามีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากที่สุด คือ 313.36 ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 15 วัน (ดังรูปที่ 4.31) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 1 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเท่ากับ 309.20 และ 292.22 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับชุดการทดลองที่เติม CA แต่ยังคงมีค่าค่อนข้างมากในระยะเวลาของการทดลองที่ 30 และ 45 วัน ทั้งนี้ เนื่องจากสาร EDTA มีส่วนช่วยในการลำเลียงแคดเมียมไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืชได้ดี ทั้งนี้ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA พบว่า ในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีแนวโน้มลดลงในช่วงการทดลองที่ 60 วัน และเพิ่มขึ้นที่ 75 และ 90 วัน ของการทดลอง อาจเนื่องมาจากผักตบชวามีอัตราการดูดดึงไปสู่ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ได้น้อยลงทำให้แคดเมียมมีปริมาณการสะสมสูงขึ้นในส่วนใต้น้ำ (ราก) ซึ่งในชุดการทดลองนี้ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมที่น้อยในส่วนใต้น้ำ (ราก) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลำเลียงแคดเมียมไปสู่ส่วนเหนือน้ำที่มาก (ลำต้นและใบ) โดยชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 1291.63, 1164.62, 1143.51, 1000.46, 1067.28 และ 1007.17 ตามลำดับของระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.32) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kai-Sung et al. (2008) ที่ได้ศึกษาการใช้สาร EDTA และไตรตอน (Triton X-100) เพื่อเพิ่มการดูดดึงแคดเมียมโดยการใช้ต้นผักบุ้ง (*Ipomoea aquatica*) ในสารละลายที่มีระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0.3, 1 และ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่า การเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 10 และ 100 ไมโครโมลต่อลิตร ทำให้ค่า BCF ในรากของพืช เท่ากับ 0 และ 274 ตามลำดับ ในสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับในสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า BCF ในรากของพืช เท่ากับ 40 และ 534 ตามลำดับ และแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า BCF ในรากของพืช เท่ากับ 96 และ 488 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมสาร EDTA ที่ความเข้มข้นที่สูงขึ้นทำให้ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของพืช (BCF) สูงขึ้น



รูปที่ 4.31 ค่า BCF ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA

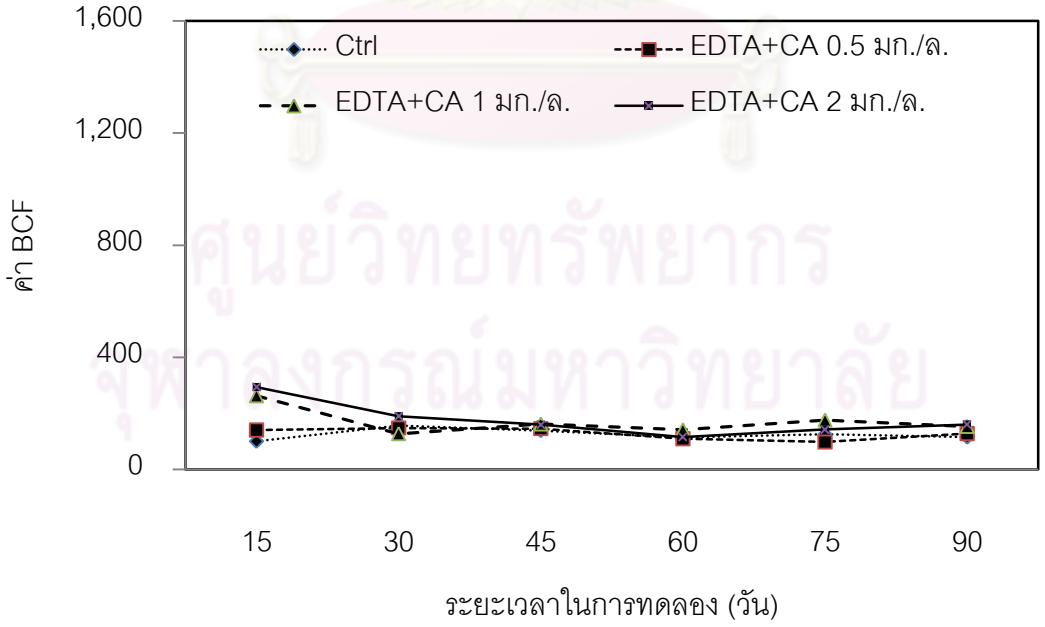


รูปที่ 4.32 ค่า BCF ส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA

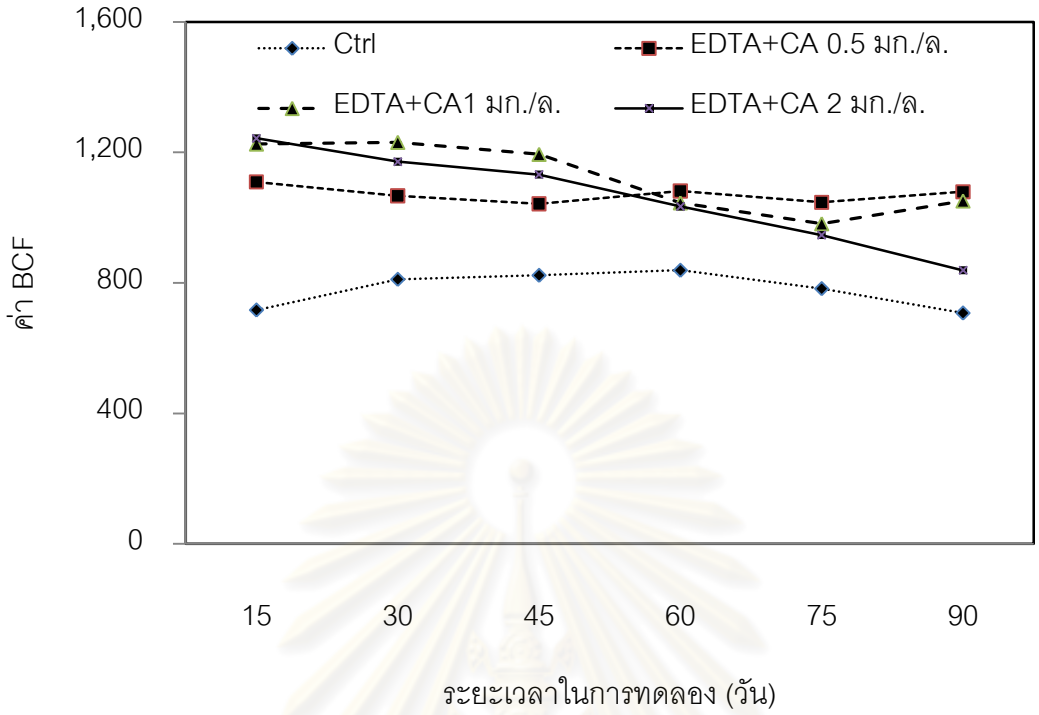
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ร่วมกับ CA

ผลจากการศึกษาค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA พบว่า ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวามีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากที่สุด คือ 298.78 ที่ระดับความเข้มข้นรวม 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 15 วัน (ดังรูปที่ 4.33) รองลงมาคือ ระดับความเข้มข้น 1 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเท่ากับ 262.78 และ 140.48 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับชุดการทดลองที่เติม CA และชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA แต่ยังคงมีค่าค่อนข้างมากในระยะเวลาของการทดลองที่ 30 และ 45 วัน เช่นเดียวกับชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ทั้งนี้ เนื่องจาก สาร EDTA มีส่วนช่วยในการลำเลียงแคดเมียมไปสู่ส่วนต่างๆ ได้ดี ทั้งนี้ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตทั้งสองชนิดร่วมกัน พบว่า ในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงระยะเวลาของการทดลอง เนื่องจากผักตบชวามีอัตราการดูดดึงที่น้อยลง รวมถึงปริมาณสารคีเลตที่ใช้มีค่าลดลง โดยค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมน้อยนั้นแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลำเลียงโลหะหนักที่มากขึ้น โดยชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตทั้งสองชนิดที่ระดับความเข้มข้นรวม 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 1243.41, 1171.74, 1131.87, 1034.41, 946.30 และ 838.81 (ดังรูปที่ 4.34) ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง



รูปที่ 4.33 ค่า BCF ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA



รูปที่ 4.34 ค่า BCF ส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA

4) เปรียบเทียบผลของ EDTA และ CA ต่อศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวา

จากการศึกษาค่าเฉลี่ยศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาทั้งต้น เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตในแต่ละระดับความเข้มข้น พบว่าค่าศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับชุดการทดลองที่เติม CA ทั้งนี้ชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA พบว่า ศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาที่ระดับความเข้มข้นที่ 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ดังตารางที่ 13) และเมื่อพิจารณาถึงค่าศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาที่มีค่ามากที่สุดในแต่ละชุดการทดลอง พบว่า มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 802.49 ที่ 15 วัน ของชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 768.60 ที่ 15 วัน และชุดการทดลองที่เติม CA ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 682.15 ที่ 75 วัน ดังนั้น จากการศึกษาค่าเฉลี่ยศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาทั้งต้นทั้ง 3 ชุดการทดลอง สามารถ

แสดงให้เห็นได้ว่า สาร EDTA มีผลต่อการเพิ่มศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาได้มากกว่า CA ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชิดชนก อัศวโภคี (2007) ที่ทำการศึกษาผลของการใช้สารคีเลต ได้แก่ สาร EDTA, EDDS และ CA เพื่อช่วยในการดูดดึงแคดเมียมด้วยทานตะวัน (*Helianthus annuus* Linn.) โดยการเติมสารละลายแคดเมียมไนเตรต ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ภายหลังจากปลูกพืชเป็นเวลา 35 วัน และเติมสารคีเลตทั้ง 3 ชนิด ที่ระดับความเข้มข้น 0.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ผลการศึกษาพบว่า ทานตะวันมีความสามารถในการสะสมแคดเมียมทั้งต้นมากที่สุดคือ 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และยังพบว่า การเติมสาร EDTA มีส่วนช่วยในการดูดดึงได้มากกว่า CA นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jean et al. (2008) ที่ทำการศึกษาผลของการใช้สารคีเลต ได้แก่ EDTA และ CA เพื่อช่วยดูดดึงโครเมียม และนิกเกิล ด้วยพืช *Darura Innoxia* โดยการปลูกลงในดินที่ปนเปื้อน 1.5 กิโลกรัม และเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ CA ที่ระดับความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า การเติมสาร EDTA ทำให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงได้ดีกว่าการเติม CA

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 ศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาเฉลี่ยทั้งต้น (BCF)

ระยะเวลา (วัน)	ศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักตบชวาเฉลี่ยทั้งต้น (BCF)			
	Ctrl	CA	EDTA	EDTA+CA
ระดับความเข้มข้นของสารคีเลต 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร				
15	408.54±42.9 [a]	490.09±42.3 [b]	781.81±30.6 [c]	625.04±35.5 [d]
30	482.82±30.4 [a]	584.31±23.5 [b]	723.72±40.8 [c]	614.39±48.7 [b]
45	486.43±37.6 [a]	564.36±33.4 [b]	685.01±26.2 [c]	592.42±10.4 [b]
60	481.63±31.1 [a]	532.81±44.6 [ab]	595.39±25.4 [bc]	615.27±41.0 [c]
75	452.68±36.1 [a]	512.10±31.0 [b]	619.64±18.2 [c]	590.71±26.6 [c]
90	417.91±33.7 [a]	451.09±35.7 [b]	628.92±23.9 [b]	609.72±8.9 [b]
ระดับความเข้มข้นของสารคีเลต 1 มิลลิกรัมต่อลิตร				
15	408.54±42.9 [a]	519.50±19.3 [b]	797.82±15.8 [c]	744.21±35.9 [c]
30	482.82±30.4 [a]	632.79±52.0 [b]	714.89±28.0 [c]	712.21±42.2 [c]
45	486.43±37.6 [a]	628.21±33.9 [b]	680.14±1.92 [b]	673.50±43.9 [b]
60	481.63±31.1 [a]	621.13±27.8 [b]	596.91±21.6 [b]	599.37±20.4 [b]
75	452.68±36.1 [a]	628.15±45.9 [b]	607.95±44.9 [b]	560.13±40.6 [b]
90	417.91±33.7 [a]	505.60±29.7 [b]	597.31±33.4 [c]	606.77±48.4 [c]
ระดับความเข้มข้นของสารคีเลต 2 มิลลิกรัมต่อลิตร				
15	408.54±42.9 [a]	583.76±23.3 [b]	802.49±27.9 [c]	768.60±13.0 [c]
30	482.82±30.4 [a]	672.73±43.4 [b]	734.20±23.4 [b]	689.45±37.6 [b]
45	486.43±37.6 [a]	658.86±56.2 [b]	689.56±17.8 [b]	652.15±14.1 [b]
60	481.63±31.1 [a]	657.41±33.6 [b]	578.51±32.1 [c]	596.24±34.5 [bc]
75	452.68±36.1 [a]	682.15±40.8 [b]	618.41±43.7 [bc]	553.77±51.9 [c]
90	417.91±33.7 [a]	539.13±24.5 [bc]	586.76±38.0 [c]	503.53±15.4 [b]

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างสารคีเลตที่เติมลงในการทดลอง

4.2.6 ผลของ EDTA และ CA ต่อการลำเลียงแคดเมียมในผักตบชวา (Translocation factor; TF)

ผลของ EDTA และ CA ต่อการลำเลียงแคดเมียมในผักตบชวา นอกจากการพิจารณาถึงความสามารถในการสะสมปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) ของผักตบชวา ยังสามารถพิจารณาได้จากการศึกษาค่า Translocation factor (TF) หรือค่าการลำเลียง โดยการคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นและใบ กับปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนรากของพืช ในกรณีที่ปริมาณการสะสมของแคดเมียมเพิ่มขึ้นในส่วนของลำต้นและใบ แต่มีปริมาณการสะสมแคดเมียมลดลงในส่วนของราก แสดงว่าอัตราส่วนหรือค่า TF จะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นได้ว่ามีการลำเลียงแคดเมียมจากรากไปไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชได้มากขึ้น

จากการศึกษาค่า TF ในการวิจัยครั้งนี้ พบว่า ชุดควบคุมมีค่า TF เท่ากับ 0.14, 0.19, 0.18, 0.15, 0.16 และ 0.18 ตามลำดับของระยะเวลาในการทดลองที่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน สำหรับในชุดการทดลองที่เติม CA พบว่า ค่า TF มีมากกว่าในชุดควบคุม คือ 0.19 และ 0.22 ในระดับความเข้มข้นของ CA ที่ 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ 15 วัน ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า CA มีส่วนช่วยให้พืชมีการลำเลียงแคดเมียมได้เพิ่มขึ้นแม้เพียงในช่วงระยะเวลาแรกของการทดลอง โดยสอดคล้องกับการศึกษาของ Jean et al. (2008) ที่ทำการศึกษาการดูดดึงโครเมียม และนิกเกิล ด้วยพืช *Darura Innoxia* โดยการปลูกลงในดินที่ปนเปื้อน พบว่า ในชุดควบคุมที่ไม่เติมสารคีเลตมีค่า TF เท่ากับ 0.17 และ 0.33 ในการลำเลียงโครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ ทั้งนี้ยังพบอีกว่า เมื่อมีการเติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ค่า TF ในการลำเลียงโครเมียมเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.21, 0.35 และ 0.62 ตามลำดับความเข้มข้น และค่า TF ในการลำเลียงนิกเกิลเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.43 ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม

สำหรับชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า มีค่า TF มากกว่าชุดควบคุมทั้ง 3 ชุดการทดลอง ที่ระยะเวลา 15, 30 และ 45 วันของการทดลอง โดยมีค่าเท่ากับ 0.23, 0.24 และ 0.24 ตามลำดับที่ 15 วัน และมีค่าเท่ากับ0.19, 0.20 และ 0.26 ตามลำดับที่ 30 วัน และมีค่า 0.19, 0.21 และ 0.21 ตามลำดับที่ 45 วัน (ดังตารางที่ 4.14) แสดงให้เห็นได้ว่าการเติมสาร EDTA ทำให้พืชมีการลำเลียงแคดเมียมได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sun et al. (2009) ที่ศึกษาการดูดดึงแคดเมียมของพืช *Solanum nigrum* L. และมีการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน เพื่อช่วยการดูดดึงแคดเมียมในช่วงการ

เจริญเติบโตต่างๆ (Stage) โดยพบว่า ค่า TF มีค่าเท่ากับ 2.1 และ 1.6 ตามลำดับความเข้มข้นของสาร EDTA ในช่วง Seeding stage ของพืช และมีค่า TF เท่ากับ 2.0 และ 1.9 ตามลำดับความเข้มข้นของสาร EDTA ในช่วง Flowering stage ของพืช ซึ่งมีค่ามากกว่าในชุดการทดลองที่ไม่เติมสาร EDTA ที่มีค่า TF เท่ากับ 1.3

สำหรับในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 มีค่า TF น้อยไม่แตกต่างจากชุดควบคุม เนื่องจากปริมาณ CA และสาร EDTA ที่ใส่ไปชนิดละ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณที่น้อยมากจนอาจไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณการสะสมแคดเมียมของพืชเมื่อระยะเวลาเริ่มต้น ในขณะที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า มีค่า TF มากกว่าชุดควบคุมที่ 15 ซึ่งมีค่าที่มากใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA โดยมีค่าเท่ากับ 0.21 และ 0.24 ตามลำดับความเข้มข้นของแคดเมียม (ดังตารางที่ 4.14) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาค่า TF ในทุกๆ ชุดการทดลอง สามารถแสดงให้เห็นว่า การเติมสาร EDTA มีส่วนช่วยในการลำเลียงแคดเมียมไปสู่ส่วนต่างๆ ได้มากกว่าการเติม CA ดังแสดงด้วยค่า TF ที่มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก CA มีโครงสร้างของโมเลกุลที่ซับซ้อนน้อยกว่าสาร EDTA ทำให้เมื่อมีการดูดดึงแคดเมียมมายังส่วนรากของพืช อาจมีการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในบริเวณรากหรือกลไกอื่นๆ ของพืชเอง ทำให้แคดเมียมที่ถูกดูดดึงมาพร้อมกันถูกตรึงอยู่ในบริเวณรากได้มากกว่า หรืออาจเป็นเพราะแคดเมียมมีการเปลี่ยนรูปที่อาจเคลื่อนย้ายได้ยาก เช่น แคดเมียมออกไซด์ (CdO) ในขณะที่สาร EDTA เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่จับกับแคดเมียมได้นานกว่าทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปที่เคลื่อนย้ายได้ง่าย จึงมีโอกาสเกิดการลำเลียงไปยังส่วนต่างๆ ได้มากกว่า CA (Jones et al., 1996)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 ค่า Translocation factor (TF) ของผักตบชวาในแต่ละชุดการทดลอง

ความเข้มข้นของคีเลต (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่า Translocation factor (TF)					
		15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน	45 วัน	90 วัน
0 (ชุดควบคุม)		0.14	0.19	0.18	0.15	0.18	0.18
CA	0.5	0.14	0.16	0.14	0.14	0.12	0.17
CA	1	0.19	0.15	0.13	0.11	0.14	0.18
CA	2	0.22	0.15	0.15	0.10	0.13	0.14
EDTA	0.5	0.23	0.19	0.19	0.13	0.12	0.12
EDTA	1	0.24	0.20	0.21	0.14	0.13	0.15
EDTA	2	0.24	0.26	0.21	0.16	0.16	0.17
EDTA+CA	0.5	0.13	0.15	0.14	0.14	0.13	0.13
EDTA+CA	1	0.21	0.16	0.13	0.15	0.14	0.15
EDTA+CA	2	0.24	0.18	0.15	0.15	0.17	0.20

4.2.7 สมดุลมวล (Mass balance) และประสิทธิภาพของ CA และสาร EDTA ต่อการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา

จากการทำสมดุลมวล เพื่อศึกษาปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในระบบทั้งหมด โดยการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ และปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในผักตบชวาทั้ง 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) โดยผลการศึกษาดังกล่าวได้คำนวณในทุกชุดการทดลอง (ดังตารางที่ 4.15) พบว่า ในชุดควบคุม มีปริมาณแคดเมียมสูญหายไป เท่ากับ 7.29 เปอร์เซ็นต์ ชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมสูญหาย เท่ากับ 6.61, 5.08 และ 4.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมสูญหายเท่ากับ 6.49, 8.53 และ 17.79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนในชุดการทดลองที่เติม CA ร่วมกับสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณแคดเมียมสูญหายเท่ากับ 4.13, 11.31 และ 13.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งปริมาณแคดเมียมที่สูญหายไปในทุกๆ ชุดของการทดลองอาจเนื่องมาจาก แคดเมียมอาจมีการติดอยู่กับอนุภาคของของแข็งแขวนลอยซึ่งเป็นตะกอนที่มีอยู่มากในน้ำเสียสังเคราะห์ (Di-Palma and Mecozzi, 2007) รวมถึงตะกอนจากเศษซากของผักตบชวา ซึ่งใน

การศึกษาไม่ได้มีการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในของแข็งแขวนลอยและตะกอนที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังอาจมีปริมาณแคดเมียมบางส่วนที่ปนเปื้อนไปกับอุปกรณ์และภาชนะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองและการเก็บตัวอย่าง (ทิพวรรณ พจนาภรณ์, 2551) รวมถึงปริมาณแคดเมียมที่สูญเสียไปจากการล้างตัวอย่างของผักตบชวาให้สะอาดก่อนนำมาวิเคราะห์ ทำให้ปริมาณแคดเมียมบางส่วนอาจสูญหายไปจากระบบได้

ทั้งนี้จากการทำสมดุลมวลในการทดลอง สามารถแสดงถึงเปอร์เซ็นต์คงเหลือของแคดเมียมที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ และสามารถอธิบายถึงประสิทธิภาพของการเติม CA และสาร EDTA ได้ดังต่อไปนี้

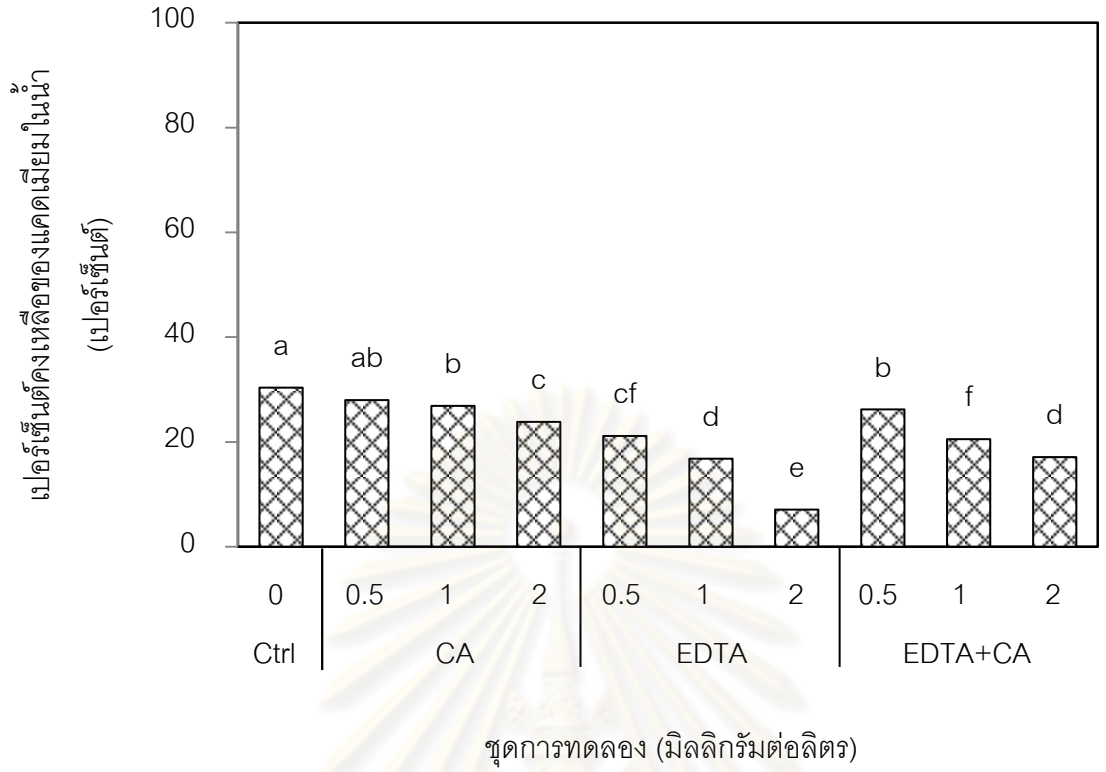
1) เปอร์เซ็นต์คงเหลือของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์คงเหลือของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการทำสมดุลมวล (ตารางที่ 4.15) พบว่า ในชุดควบคุมมีเปอร์เซ็นต์คงเหลือของแคดเมียมในน้ำมากที่สุด คือ 30.38 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากไม่มีการเติมสารคีเลตใดๆ จึงทำให้ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมทั้งต้นของผักตบชวามีค่าน้อยที่สุด แตกต่างจากชุดการทดลองที่มีการเติมสารคีเลตในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งช่วยเพิ่มศักยภาพการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาทำให้ความสามารถในการสะสมแคดเมียมในพืชมีมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคงเหลือของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าลดลงกว่าชุดควบคุม โดยในชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีเปอร์เซ็นต์คงเหลือของแคดเมียม เท่ากับ 28.02, 26.92 และ 23.86 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.35) ซึ่งมีการคงเหลือของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์มากที่สุด เมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดดึงผักตบชวาได้มากที่สุด ทำให้มีปริมาณคงเหลือของแคดเมียมในน้ำน้อยที่สุด เท่ากับ 21.12, 16.82 และ 7.08 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับความเข้มข้นของสาร EDTA ที่ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hernandez et al. (2006) ที่ทำการศึกษาการใช้สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 250, 500 และ 750 ไมโครโมลต่อลิตร ในการช่วยเพิ่มการดูดดึงตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมด้วยการปลูกพืช *Cynara carduncylus* ในสารละลาย ผลการศึกษาพบว่า EDTA ช่วยในการดูดดึงโลหะหนักได้ดีขึ้นทำให้ปริมาณของโลหะที่อยู่ในน้ำลดลง

ตารางที่ 4.15 สมดุลมวลของแคดเมียม (Mass balance) ในการทดลอง

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมเริ่มต้น (มิลลิกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในผักตบชวา (มิลลิกรัม)			ปริมาณแคดเมียมคงเหลือในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคดเมียมในผักตบชวา (เปอร์เซ็นต์)			ปริมาณแคดเมียมคงเหลือในน้ำ (เปอร์เซ็นต์)	รวมปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในระบบ (เปอร์เซ็นต์)
		ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)	ส่วนใต้น้ำ (ราก)	รวมทั้งต้น		ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)	ส่วนใต้น้ำ (ราก)	รวมทั้งต้น		
Ctrl	5.0	1.01	2.11	3.12	0.15	20.13	42.20	62.33	30.38	92.71
CA 0.5	5.0	0.75	2.32	3.07	0.14	15.00	46.37	61.37	28.02	93.39
CA 1.0	5.0	0.84	2.53	3.38	0.13	16.81	50.69	67.50	26.92	94.92
CA 2.0	5.0	0.80	2.77	3.57	0.12	16.08	55.31	71.39	23.86	95.25
EDTA 0.5	5.0	0.95	2.67	3.62	0.11	19.02	53.37	72.39	21.12	93.51
EDTA 1.0	5.0	1.03	2.70	3.73	0.08	20.55	54.09	74.65	16.82	91.47
EDTA 2.0	5.0	1.04	2.72	3.76	0.04	20.83	54.30	75.13	7.08	82.21
EDTA+CA 0.5	5.0	0.85	2.64	3.48	0.13	16.92	52.75	69.67	26.20	95.87
EDTA+CA 1.0	5.0	0.82	2.59	3.41	0.10	16.33	51.80	68.13	20.56	88.69
EDTA+CA 2.0	5.0	0.95	2.46	3.41	0.09	18.95	49.25	68.20	17.14	86.40

หมายเหตุ: ปริมาณแคดเมียมในผักตบชวาเป็นปริมาณที่คำนวณเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 90 วัน (ปริมาณแคดเมียมในผักตบชวาที่ระยะเวลาอื่น แสดงในภาคผนวก ค)



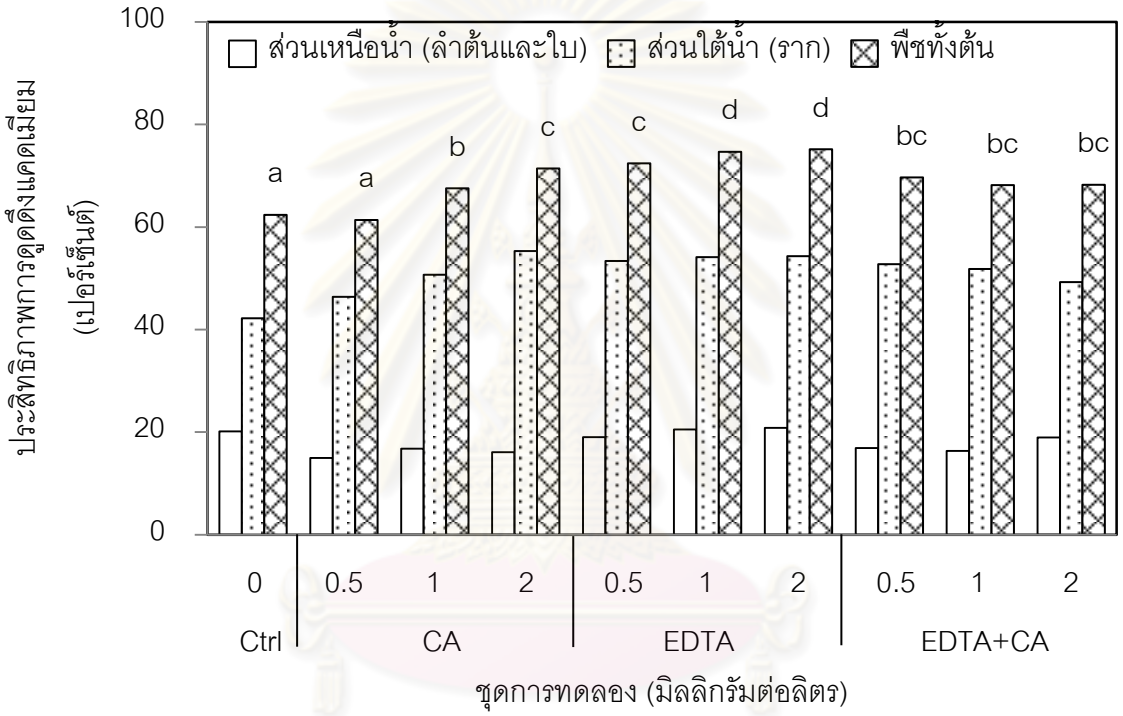
รูปที่ 4.35 เปอร์เซ็นต์คงเหลือของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลอง

2) ผลของ CA และสาร EDTA ต่อประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของ CA และสาร EDTA ต่อการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา จากการเปรียบเทียบปริมาณการดูดดึงแคดเมียมทั้งหมดของผักตบชวาในทั้ง 2 ส่วน คือ ส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) โดยนำมาคำนวณประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมทั้งหมด (ดังรูปที่ 4.36) พบว่า ชุดควบคุมมีประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียม เท่ากับ 62.33 เปอร์เซ็นต์ ส่วนชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร พืชมีประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมเท่ากับ 61.37 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุม แต่ที่ระดับความเข้มข้น 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า พืชมีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมเท่ากับ 67.5 และ 71.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุม สำหรับในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า พืชมีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมคิดเป็น 72.39, 74.65 และ 75.13 เปอร์เซ็นต์

ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าการเติมสาร EDTA สามารถช่วยทำให้ผักตบชวามีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมได้ดีกว่าการเติม CA ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชิดชนก อัศวโภคี (2007) ที่ทำการศึกษาผลของการใช้สารคีเลต 3 ชนิด ได้แก่ EDTA, EDDS และ CA เพื่อช่วยในการดูดดึงแคดเมียมด้วยทานตะวัน (*Helianthus annuus* Linn.) ภายหลังจากการปลูกพืชเป็นเวลา 35 วัน และเติมสารคีเลตทั้ง 3 ชนิด ที่ระดับความเข้มข้น 0.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ทานตะวันมีความสามารถในการสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการเติมสาร EDTA มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมได้มากกว่าสาร EDDS และ CA



รูปที่ 4.36 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาในแต่ละชุดการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของ EDTA และ CA ต่อการดูดดึงแคดเมียมในน้ำด้วยผักตบชวา แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม และส่วนที่ 2 การศึกษาผลของสาร EDTA และ CA ต่อการดึงดูดแคดเมียมด้วยผักตบชวา สามารถสรุปผลการศึกษา ได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

จากการศึกษาเพาะเลี้ยงผักตบชวาในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 0.5, 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ผักตบชวาสามารถเติบโตได้ คือ ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0.5 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยผักตบชวาแสดงอาการความเป็นพิษที่น้อย คือ 30.67 และ 33.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่มีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้น 132.08 และ 130.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับความเข้มข้น และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 30 วัน ประสิทธิภาพของการดูดดึงแคดเมียมมีค่ามากที่สุด คือ 36.40 และ 35.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับความเข้มข้น โดยผักตบชวามีแนวโน้มของการดูดดึงแคดเมียมได้เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ซึ่งจากปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งสองส่วนของผักตบชวาที่มีปริมาณมาก ทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษที่ผักตบชวาได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การเติบโตของผักตบชวามีเปอร์เซ็นต์การเติบโตน้อยลง และศักยภาพในการสะสมทางชีวภาพของผักตบชวามีค่าลดลง ตั้งแต่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีความเหมาะสมต่อการเติบโตของผักตบชวา

5.1.2 การศึกษาผลของสาร EDTA และ CA ต่อการดึงดูดแคดเมียมด้วยผักตบชวา

1) ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา

จากการศึกษาในทุกชุดการทดลองที่เติมสารคีเลต พบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมเพิ่มขึ้น จากการพิจารณาปริมาณสะสมแคดเมียมในผักตบชวา โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนใต้น้ำ (ราก) ได้มากกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ซึ่งความสามารถต่อการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาในส่วนใต้น้ำ (ราก) ในทุกชุดการทดลองพบว่า มีความสามารถในการดูดดึงเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลา 90 วันของการทดลอง สำหรับในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา ในชุดการทดลองที่เติม CA มีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ 15 วันของการทดลอง สำหรับชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA และชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตทั้ง 2 ชนิด มีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมเพิ่มขึ้นตลอดช่วงระยะเวลาที่ 45 วันของการทดลอง

2) ผลของ CA และสาร EDTA ต่อการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา

การเติม CA และสาร EDTA มีผลต่อการช่วยดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา จากการที่ผักตบชวามีการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ได้เพิ่มมากขึ้น โดยในส่วนใต้น้ำ (ราก) พบว่า การเติม CA และสาร EDTA ช่วยให้มีปริมาณการสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลา 90 วันของการทดลอง สำหรับปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา พบว่า การเติม CA ช่วยให้ปริมาณการสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ 15 วัน ขณะที่การเติมสาร EDTA และการเติมสารคีเลตทั้ง 2 ชนิด ช่วยให้ปริมาณการสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ 45 วันของการทดลอง

สำหรับการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารคีเลตที่เติมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารคีเลตที่เพิ่มมากขึ้นมีแนวโน้มช่วยในการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้จากการศึกษาความเป็นพิษของ CA และสาร EDTA ต่อผักตบชวา พบว่า ผักตบชวาไม่มีอาการแสดงความเป็นพิษจากสารคีเลตทั้งสองชนิด แต่พบว่า สารทั้งสองชนิดส่งผลให้น้ำหนักหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของ

ผักตบชวามีค่าลดลง อันเนื่องมาจากปริมาณการสะสมแคดเมียมที่เพิ่มมากขึ้นในผักตบชวาจากการที่สารคีเลตทั้งสองชนิดมีส่วนช่วยให้ผักตบชวาดูดดึงแคดเมียมได้มากขึ้น

3) เปรียบเทียบความสามารถของ CA และสาร EDTA ต่อการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา

จากการศึกษา พบว่า การเติมสาร EDTA มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวาได้มากกว่าการเติม CA เมื่อพิจารณาถึงปริมาณการสะสมแคดเมียม และค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพ ซึ่งในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA มีค่ามากกว่าชุดการทดลองที่เติม CA เมื่อเปรียบเทียบกันในทุกระดับความเข้มข้น และทั้ง 2 ส่วนของผักตบชวา ได้แก่ ส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) นอกจากนี้ยังพบว่า สาร EDTA มีส่วนช่วยในการลำเลียงแคดเมียมจากส่วนใต้น้ำ (ราก) ไปสู่ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวาได้มากกว่า CA จากปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ที่มีค่ามากกว่าในทุกระดับความเข้มข้น โดยชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดที่ 15 วันของการทดลอง มีค่าเท่ากับ 146.1, 154.6 และ 156.68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับความเข้มข้น สำหรับชุดการทดลองที่เติม CA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมในผักตบชวามากที่สุดที่ 15 วันของการทดลอง มีค่าเท่ากับ 61.71, 84.8 และ 105.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับความเข้มข้น รวมทั้งการศึกษาค่า Translocation factor พบว่า ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA มีค่ามากกว่าชุดการทดลองที่เติม CA โดยมีค่าเท่ากับ 0.23, 0.24 และ 0.24 ที่ 15 วัน ตามลำดับความเข้มข้น สำหรับการศึกษาการเติมสาร CA ร่วมกับสาร EDTA ในอัตราส่วน 1:1 ไม่มีผลทำให้ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมทั้งหมดของผักตบชวาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการเติมสาร EDTA เพียงชนิดเดียว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการศึกษาการใช้สารคีเลตชนิดอื่น เพื่อเปรียบเทียบความสามารถ และประสิทธิภาพ ซึ่งอาจให้ผลที่ดีหรือมีความเหมาะสมกว่า CA และสาร EDTA เช่น สาร NTA (Nitrilotriacetic acid) กรดมาลิก (Malic acid) และกรดฮิวมิก (Humic acid) เป็นต้น

2) ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการเติมสารคีเลต ยกตัวอย่างเช่น การแบ่งเติมสารในแต่ละครั้งเปรียบเทียบกัน เช่น เติม 1, 2 และ 3 ครั้ง โดยให้มีปริมาณคีเลตรวมทั้งหมดที่เท่ากัน หรือวิธีการเติมสารคีเลตโดยการรักษาระดับความเข้มข้นให้คงที่ตลอดการทดลอง เป็นต้น

3) ควรมีการศึกษากับพืชชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะพืชที่เป็น Hyperaccumulator plants เนื่องจากพืชแต่ละชนิดอาจตอบสนองต่อสารคีเลตในการดูดดึงโลหะหนัก และมีความทนทานได้แตกต่างกัน

4) ควรมีการศึกษาในน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนจริง เพื่อศึกษาถึงความสามารถของผักตบชวาและสารคีเลตที่ใช้ เนื่องจากในน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนจริงนั้นมีปัจจัยที่มากกว่า เช่น ปริมาณจุลินทรีย์ ปริมาณสารอินทรีย์ รวมไปถึงโลหะอื่นที่เจือปน ซึ่งย่อมส่งผลต่อความสามารถและประสิทธิภาพของผักตบชวาและสารคีเลต

5) จากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่า การเติมสาร EDTA และการเติมสารคีเลตทั้ง 2 ชนิด ช่วยให้ปริมาณการสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ 45 วันของการทดลอง ดังนั้น การศึกษาในครั้งต่อไปที่เพิ่มเติมในด้านอื่น เช่น การศึกษาในน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนจริง เป็นต้น อาจไม่จำเป็นต้องศึกษาในระยะเวลาที่มากไปกว่า 45 วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ก่องกานดา ชยามฤต และ นันท์นภัส ภัทรหิรัญไตรสิน. 2552. ลักษณะประจำวงศ์พรรณไม้ เล่มที่ 3. สำนักงานวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.

คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิยาลัยเกษตรศาสตร์.

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2541. แคดเมียม (Cadmium). จุลสาร. กรุงเทพมหานคร.

จัดการคุณภาพน้ำ, กอง กรมควบคุมมลพิษ. 2545. คู่มือการนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืนและครบวงจรโดยให้เกิดประโยชน์สูงสุด. จุลสารเพื่อการเผยแพร่กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ.

จารุวรรณ วงศ์ธเนศ. 2549. การใช้พืชบำบัดสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

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

ชิดชนก อัศวโภคี. 2550. ผลของตัวคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมของทานตะวัน *Helianthus annuus* Linn. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เชาวน์ ชิโนรักษ์ และพรรณี ชิโนรักษ์. 2541. ชีววิทยา เล่ม 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ศิลปาบรรณาคาร.

ดวงพร สุวรรณกุล และ รังสิต สุวรรณเขตนิคม. 2544. วัชพืชในประเทศไทย. ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทิพวรรณ พจนาภรณ์. 2551. ผลของอีดีทีเอและอีดีทีเอสต่อการดูดดึงโครเมียมและตะกั่วโดยใช้สับปะรดที่ปลูกในดินปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นัยนันท์ อริยกานนท์. 2007. การศึกษาประสิทธิภาพการสะสมทองแดง สังกะสี และนิกเกิลของวัชพืชในประเทศไทย. รายงานวิจัยกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พรรณวิมล ตันหัน. 2549. การบำบัดตะกั่วโดยใช้ต้นสาปเสือ (*Chromolaena odorata*). วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2548. วิวัฒนาการของเทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของเสียอันตราย. วารสารสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ฉบับที่ 1 ปีที่ 9. เล่มประจำเดือน มกราคม-มีนาคม 2548: 29-32.

วงศ์พะงา เพ็งสาย. 2544. ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกหอม *Vetiveria zizaniodes* (Linn.) Nash และแฝกดอน *Vetiveria nemoralis* A. Camus ในการกำจัดโครเมียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้ายในโรงงานฟอกหนัง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วราภรณ์ ศรีตัมภวา และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2551. การดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน. วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา) 8, 1 (มกราคม-มีนาคม):1-6.

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

วันเพ็ญ ภูติจันทร์. 2540. พฤกษศาสตร์ (Botany) ฉบับปรับปรุง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2540.

แววลี ประมูล. 2548. การสะสมของแคดเมียมในผักบุ้งที่ปลูกในน้ำที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริมาศ สิทธิกรม. 2550. การแพร่กระจายของปริมาณแคดเมียม ทองแดง และตะกั่วในดินตะกอน บริเวณอ่าวตราด จังหวัดตราด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์. 2535. สรีรวิทยาของพืช (Plant Physiology). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจ และสังคมแห่งชาติ. 2535. แผนพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 7 (2535-2539). กรุงเทพฯ: สำนักนายกรัฐมนตรี.

สำนักคณะกรรมการอาหารและยา, กระทรวงสาธารณสุข. 2552. รายการข้อมูลเอกสารและหลักฐานเพื่อการขึ้นทะเบียนวัตถุอันตราย. ท้ายประกาศสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา เรื่อง การกำหนดรายการข้อมูลเอกสารและหลักฐานเพื่อการขึ้นทะเบียนวัตถุอันตราย พ.ศ. 2552. หน้า 2/5.

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

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

สุรภี โรจน์อารยานนท์. 2532. มลพิษสภาวะแวดล้อม. สภาวะแวดล้อมของเรา, หน้า 114-115. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

โสภาพรรณ จิรนิรัติศัย. 2534. ปริมาณตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม สังกะสีในน้ำและดินตะกอนจากชั้นคุณภาพลุ่มน้ำต่างๆ ของลุ่มน้ำแม่กลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

อุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, กรม. 2549. การปนเปื้อนแคดเมียมในดิน. รายงานการศึกษาวิจัยสาเหตุการปนเปื้อนแคดเมียมในดินพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. กรุงเทพมหานคร.

ภาษาอังกฤษ

Adriano, D. C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. 2nd ed. New York: Springer.

Alloway, B. J. 1995. Cadmium. In Alloway, B.J., Heavy Metals in Soils, pp. 122-151. London: Chapman&Hall.

BASF, A.G. 1973. Toxicology. In Arbeitsschutz, B.J. and Chemikaliengesetz. Risk Assessment Ethylene Diamine Tetraacetic Acid (EDTA). [Online]. Available from: http://ecb.jrc.it/documents/ExistingChemicals/RISK_ASSESSMENT/DRAFT/RO061_0302_env_hh.pdf [2010, December 2]

Bell, M., Barry, G. and McLaughlin, M. 2001. Managing cadmium in summer grain legumes for premium quality produce[Online]. Australia. Available from: http://www.clw.csiro.au/publications/general2002/grain_legumes_brochure.pdf [2010, December 2]

Brown, J.C., Von, D., Jolley, C. and Mel Lytle, C. 1991. Comparative evaluation of iron solubilizing substances (phytosiderophores) released by oats and corn: Iron-efficient and iron-inefficient plants. Plant and Soil. 130: 157-163.

Chain, B.W., Sileo, L., Franson, J.C. and Moore, J. 1983. Effects of dietaly cadmium on mallard duckings. Environ. Res. 32: 286-297.

Chapman, G.A. 1978. Toxicities on cadmium, copper and zinc to four juvenile stages of Chinook salmon and steclhead. Trans. Am. Fish. Soc. 107(6): 841-847.

Chemical. 2003. Chelating agents. [Online]. Available from: http://www.chemicalland21.com/specialtychem/perchem/CHELATING%20AGENTS.html [2010, December 2]

Delgado, M., Bigeriego, M. and Guardiola, E. 1993. Uptake of Zn, Cr and Cd by Water hyacinths. *Wat. Res.* Vol.27, No.2: 269-272.

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

Duarte, B., Delgado, M. and Cacador, I. 2007. The role of citric acid in cadmium and nickel uptake and translocation in *Halimione portulacoides*. Chemosphere. 69: 836-840.

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

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

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

Hasan, S. H., Talat, M. and Rai, S. 2006. Sorption of cadmium and zinc from aqueous solutions by water hyacinth (*Eichchornia crassipes*). Bioresource Technology. 98: 918–928.

Hernandez, A. J., Carlos, G., Oihana, B. and Jose, M. B. 2006. EDTA-induced heavy metal accumulation and phytotoxicity in cardoon plants. Environmental and Experimental Botany. 60: 26-32.

Hoffman, D.J., Rattner, B.A., Bur, G.A. and Cairns, J. 1995. Handboks of Ecotoxicology. Lewis Publishers, Baca Raton.

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

International Cadmium Association. 2006. Cadmium [Online]. Brussels, Belgium. Available from: http://www.cadmium.org/[2010, December 3]

James, M. B. 1999. The Element Cadmium [Online]. United Kingdom. Available from: http://www.jamesmbrown.co.uk/cd_pigments/cadmium.htm [2010, December 3]

Jean, L., Bordas, F., Gautier-Moussard, C., Vernay, P., Hitmi, A. and Bollinger, J. C. 2008. Effect of citric acid and EDTA on chromium and nikel uptake and translocation by *Datura innnoxia*. Environmental Pollution. 153: 555-563.

Jones, D.L., Darrah, P.H. and Kochian, V.L. 1996. Critical evaluation of organic acid mediated iron dissolution in rhizosphere and its potentential role in root iron uptake. Plant Soil. 180: 57-66.

Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. 2000. Trace elements in soils and plants. 3rd ed. New York: CRC Press.

Kai-Sung, W., Lung-Chiu, H. and Hong-Shen, L. 2008. Phytoextraction of cadmium by *Ipomoea aquatica* (water spinach) in hydroponic solution: Effects of cadmium speciation. Chemosphere. 72 (2008), 666–672.

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

Lombi, E., Zhao, F. J., Dunham, S.J. and McGrath, S.P. 2001. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soil: Natural Hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. Journal of Environmental Quality. 30: 1919-1926.

Lu, X., Kruatrachue, M., Pokethitiyok, P. and Homyok, K. 2004. Remove of cadmium and zinc by water hyacinth, *Eichhornia crassipes*. Science Asia. 30: 93-103.

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

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

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

Mishra, V. K., Upadhyaya, A. R., Pandey, S. K. and Tripathi, B. D. 2008. Heavy metal pollution induced due to coal mining effluent on surrounding aquatic ecosystem and its management through naturally occurring aquatic macrophytes. Bioresource Technology. Volume 99 (2008), Issue 5: 930–936.

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

Muttamara, S. and Leong, S. M. 1997. Environmental monitoring and impact assessment of solid waste disposal site. Environ Monit Assess 48: 1-24.

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

National Institute for Occupational Safety and Health. 2002. Encyclopedia of Public Heaith. [Online]. Available from: http://gotoknow.org/file/sansanee1194.gif. [2010, December 2]

Nriagu, J.O. 1980. Cadmium in the Environment, Part I; Ecological Cycling Environmental Science and Technology Series. Wiley Interscience Publ., New York. 525 p.

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

Peter, R. W. and Shem, L. 1992. Use of chelating agents for remediation of heavy metal soil, in Vandegrift, G. F., Reed, D. T. and Tasker, I. R., (eds.). Environmetal remediation: Removing organic and metal ion pollutants, ACS Symposium Series. 509: 70-84.

Sampanpanish, P. and Tippayasa, K. 2007. Chromium uptake on speciation and phytotoxicity by hydroponics with aquatic plants. In Proceeding at The 34th Australasian Chemical Engineering Conference (CHEMECA 2007). p. 72.

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

Steve, G. 2007. It' s Elemental Cadmium[Online]. Newport News, VA: Jefferson Lab. Available from: http://education.jlab.org/itselemental/ele048.html [2010, December 3]

Sun, Y., Zhou, Q. and Wang, L. 2009. The influence of different growth stage and dosage stage of EDTA on Cd uptake and accumulation in Cd-hyperaccumulator (*Solanem nigrum* L.). Bull Environ Cintam Toxicol. 82: 348-353.

Traina, S. J. 1999. The Environmental Chemistry of Cadmium. In McLaughlin, M. J., and Singh, B. R. (eds.), Cadmium in Soils and Plants, pp. 11-37. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Turgut, C., Katie, P. M. and Teresa, J. C. 2004. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus*. Environmental Pollution. 131: 147-154.

United States National Library of Medicine. 2007. Citric Acid. [Online]. Available from: http://chem.sis.nlm.nih.gov/chemidplus/jsp/common/Toxicity.jsp [2010, December 2]

Unites States Environmental Protection Agency. 2000. Intriduction to Phytoremediation [Online]. Available from: http://clu-in.org/download/remed/introphyto.pdf [2010, December 2]

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. 3015A, Washington D.C., USA.

Welch, R. M. and Norvell, W. A. 1999. Mechanisms of Cadmium Uptake, Translocation and Deposition in Plants. In McLaughlin, M. J., and Singh, B. R. (eds.), Cadmium in Soils and Plants, pp. 125-150. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

White, D.H., Finley, M.T. and Ferell, J.F. 1978. Histopathlogic of dictary cadmium on kidneys and tests of mallard ducks. Journal of Toxicol. Environ. Health. 4: 551-558.

Wolverton, B. C. and McDonald, R.C. 1975. Water hyacinth for upgrading sewage lagoon to meet advance waste water treatment standard Part 1. NASA Technical Memorandum. TM-X-72729 (1975).

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

World Health Organization. 1992. Cadmium-Environmental Aspects. Environmental Health Criteria 135. Finland.

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

Yang, X., Feng, Y., He, Z. and Stoffella, P.J. 2005. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. Journal of Trace Elementals in Medicine and Biology. 18:339-353.

Zacchini, M., Pietrini, F., Scarascia, G.M., Iori, V., Pietrosanti, L. and Massacci A. 2009. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics. Water Air Soil Pollut. 197: 23-34.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สูตรการคำนวณในการศึกษา

1. การคำนวณปริมาณสารประกอบแคดเมียม

น้ำหนักสารประกอบแคดเมียมที่ต้องใช้ (กรัม) สามารถหาได้จากสูตร

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

เมื่อ A คือ ปริมาณของแคดเมียมที่ต้องการใช้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

S คือ ปริมาตรที่ใช้ (ลิตร)

MM คือ มวลอะตอมของแคดเมียม (กรัม)

MW คือ มวลโมเลกุลของสารประกอบแคดเมียมไนเตรท (กรัม) ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) เท่ากับ 308.479

เมื่อ Cd = 112.411, N = 14.007, O = 15.999, H = 1.008

2. การคำนวณสารประกอบคีเลต

น้ำหนักสารประกอบแคดเมียมที่ต้องใช้ (กรัม) สามารถหาได้จากสูตร

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

เมื่อ A คือ ปริมาณของสารคีเลตที่ต้องการใช้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

S คือ ปริมาตรที่ใช้ (ลิตร)

MC คือ มวลอะตอมของสารคีเลตที่ใช้ (กรัม)

MW คือ มวลโมเลกุลของสารประกอบคีเลตที่ใช้ (กรัม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. **การคำนวณการเจริญเติบโต**

3.1) การเจริญสัมพัทธ์ สามารถหาได้จากสูตร

$$\frac{\text{น้ำหนักของพืชเมื่อสิ้นสุดการทดลอง}}{\text{น้ำหนักของพืชเมื่อเริ่มการทดลอง}}$$

3.2) เปอร์เซ็นต์การเจริญเติบโต สามารถหาได้จากสูตร

$$\frac{(\text{น้ำหนักสดของพืชในแต่ช่วงระยะเวลา-น้ำหนักของพืชเมื่อเริ่มการทดลอง}) \times 100}{\text{น้ำหนักของพืชเมื่อเริ่มการทดลอง}}$$

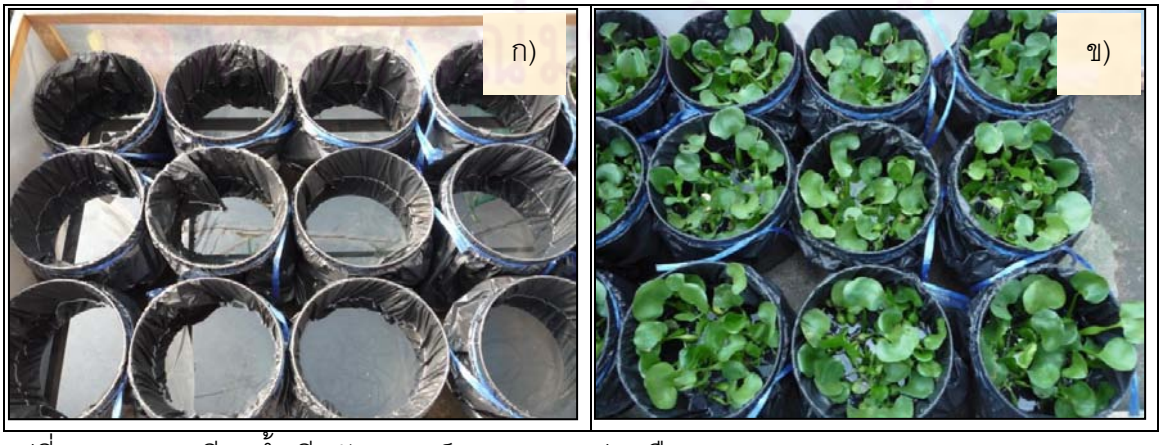
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

รูปประกอบในการศึกษา

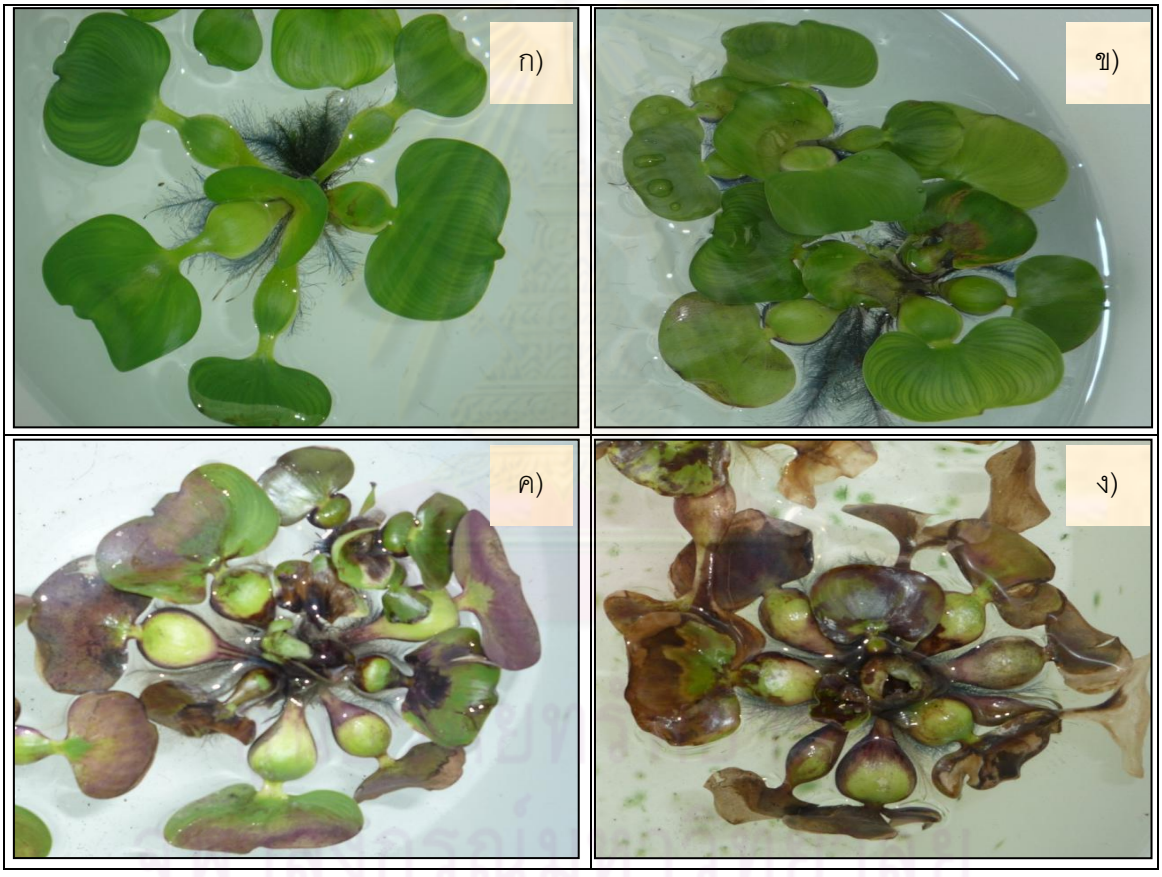
รูปที่ ข1 ก) สถานที่เก็บผักตบชวา และ ข) การเพาะเลี้ยงก่อนนำไปใช้ทดลอง

รูปที่ ข2 ก) ผักตบชวาที่คัดเลือกไปใช้ทดลอง และ ข) ขนาด และความโตของพืชทดลอง



รูปที่ ข3 ก) การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ และ ข) การปลูกพืชทดลอง

รูปที่ ข4 โรงเรือนทดลอง

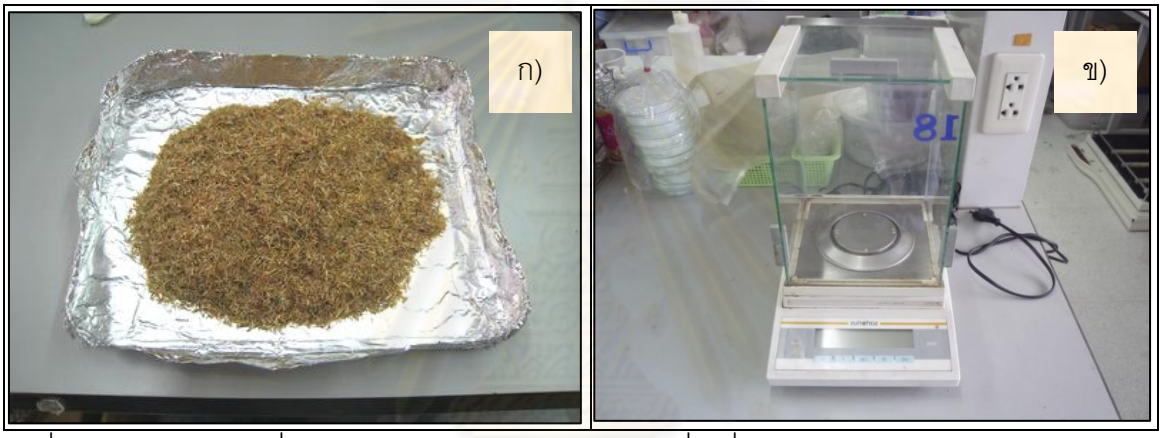


รูปที่ ข5 อาการแสดงความเป็นพิษจากแคดเมียมของผักตบชวาในการทดลอง

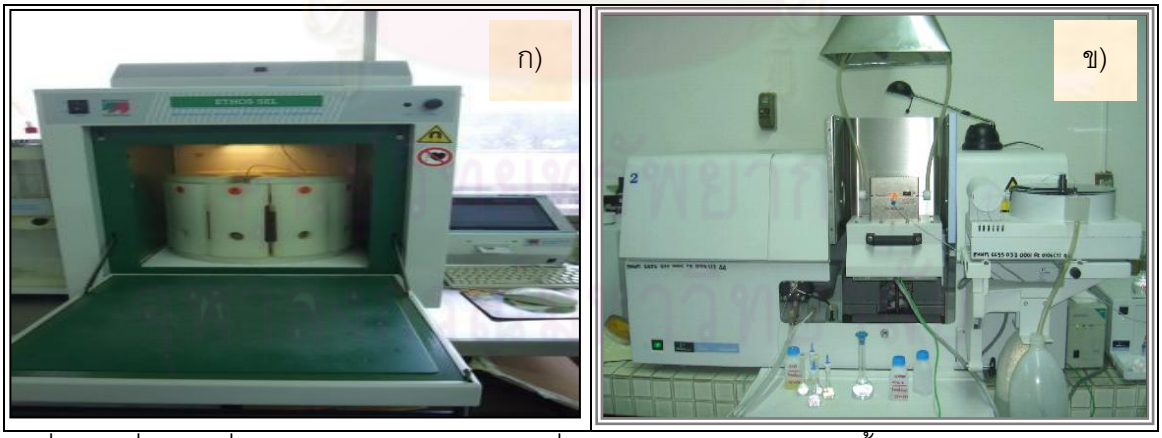
ก) ลักษณะปกติ ข) เริ่มแสดงอาการความเป็นพิษ

ค) แสดงอาการเป็นพิษชัดเจน ง) อาการเป็นพิษที่มากทั้งต้น

รูปที่ ข6 ก) การเก็บตัวอย่างพืช และ ข) การเก็บตัวอย่างน้ำ



รูปที่ ข7 ก) ตัวอย่างพืชที่อบ และบดละเอียดแล้ว และ ข) เครื่องชั่งสารเคมี และตัวอย่างพืช



รูปที่ ข8 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ก) เครื่องย่อยตัวอย่างพืชและน้ำ ด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) และ ข) เครื่องวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมจากตัวอย่างพืชและน้ำ เครื่องอะตอมมิกแอปซอร์ปชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer)

ภาคผนวก ค

ปริมาณแคดเมียมและประสิทธิภาพการดูดดึงของผักตบชวา

ตาราง ค1 ปริมาณแคดเมียมและประสิทธิภาพการดูดดึงของผักตบชวาในส่วนใต้น้ำ (ราก)

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมของผักตบชวาในส่วนใต้น้ำ (ราก) (มิลลิกรัม)						รวมทั้งหมด (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพการดูดดึงของผักตบชวาในส่วนใต้น้ำ (ราก) (เปอร์เซ็นต์)						รวมทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)
	15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน	75 วัน	90 วัน		15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน	75 วัน	90 วัน	
Ctrl	0.22	0.32	0.34	0.44	0.47	0.33	2.11	4.36	6.32	6.71	8.87	9.40	6.55	42.20
EDTA 0.5	0.33	0.42	0.44	0.52	0.59	0.37	2.67	6.59	8.32	8.87	10.34	11.80	7.44	53.37
EDTA 1	0.36	0.41	0.44	0.53	0.63	0.33	2.70	7.22	8.21	8.79	10.56	12.64	6.67	54.09
EDTA 2	0.40	0.39	0.43	0.49	0.68	0.32	2.72	7.99	7.88	8.55	9.81	13.57	6.49	54.30
CA 0.5	0.29	0.33	0.44	0.42	0.50	0.35	2.32	5.73	6.57	8.85	8.36	9.94	6.93	46.37
CA 1	0.27	0.35	0.42	0.61	0.53	0.35	2.53	5.42	7.03	8.44	12.28	10.59	6.92	50.69
CA 2	0.29	0.38	0.45	0.63	0.65	0.38	2.77	5.79	7.55	8.91	12.63	12.94	7.50	55.31
EDTA+CA 0.5	0.30	0.37	0.36	0.59	0.61	0.40	2.64	6.10	7.48	7.15	11.72	12.28	8.03	52.75
EDTA+CA 1	0.33	0.42	0.44	0.50	0.58	0.32	2.59	6.52	8.45	8.77	9.95	11.62	6.49	51.80
EDTA+CA 2	0.32	0.39	0.42	0.50	0.56	0.33	2.52	6.41	7.71	8.45	9.92	11.18	6.63	50.31

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค2 ปริมาณแคดเมียมและประสิทธิภาพการดูดดึงของผักตบชวาในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมของผักตบชวาในส่วนใต้น้ำ (ลำต้นและใบ) (มิลลิกรัม)						รวมทั้งหมด (มิลลิกรัม)	ประสิทธิภาพการดูดดึงของผักตบชวาในส่วนใต้น้ำ (ลำต้นและใบ) (เปอร์เซ็นต์)						รวมทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)
	15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน	75 วัน	90 วัน		15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน	75 วัน	90 วัน	
Ctrl	0.07	0.19	0.20	0.19	0.19	0.18	1.01	1.46	3.74	3.92	3.79	3.72	3.51	20.13
EDTA 0.5	0.19	0.18	0.19	0.17	0.18	0.05	0.95	3.70	3.68	3.81	3.37	3.51	0.94	19.02
EDTA 1	0.23	0.20	0.20	0.16	0.17	0.07	1.03	4.53	3.96	4.03	3.25	3.46	1.32	20.55
EDTA 2	0.20	0.21	0.18	0.19	0.20	0.07	1.04	3.97	4.13	3.65	3.76	3.90	1.42	20.83
CA 0.5	0.09	0.11	0.13	0.14	0.13	0.14	0.75	1.89	2.24	2.67	2.75	2.67	2.78	15.00
CA 1	0.12	0.13	0.15	0.14	0.18	0.13	0.84	2.33	2.56	2.99	2.82	3.61	2.51	16.81
CA 2	0.15	0.11	0.15	0.12	0.20	0.07	0.80	3.03	2.16	3.03	2.44	3.92	1.50	16.08
EDTA+CA 0.5	0.07	0.17	0.09	0.17	0.19	0.15	0.85	1.49	3.38	1.89	3.33	3.78	3.05	16.92
EDTA+CA 1	0.14	0.13	0.10	0.15	0.17	0.13	0.82	2.80	2.60	2.08	2.90	3.41	2.52	16.33
EDTA+CA 2	0.15	0.16	0.11	0.17	0.23	0.13	0.95	3.03	3.14	2.20	3.41	4.58	2.60	18.95

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกัลปพฤกษ์ คงเมือง เกิดเมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีการศึกษา 2549 หลังจากนั้น ได้เข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 ในระหว่างการศึกษาได้เข้าร่วมเสนอผลงานวิจัย ในการประชุมวิชาการระดับชาติ โดยได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานดังต่อไปนี้

กัลปพฤกษ์ คงเมือง และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. “ผลของ EDTA และ Citric acid ต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักตบชวา” หนังสือประมวลผลการประชุมทางวิชาการ (Proceeding) ในการประชุม “แม่ฟ้าหลวงวิชาการ ประจำปี พ.ศ. 2553 : 12 ปีตามรอยสมเด็จย่า” จัดโดยส่วนบริการงานวิจัย มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ณ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย วันที่ 19-20 พฤศจิกายน 2553.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย