การเปรียบเทียบความทนทานและประสิทธิภาพของสาหร่ายหางกระรอก และสาหร่ายพุงชะโดในการบำบัดน้ำที่มีแคดเมียมปนเปื้อน

Comparison of the Tolerance and Efficiency of *Hydrilla verticillata* (L.f.) and *Ceratophyllum demersum* (L.) for Treating Cadmium-Contaminated Water

จีราพัชร์ พลอยนิลเพชร[1] รัชชนก ทองบุญ[1] อรณิชา เพอเกลี้ยง[1] และนุชจรินทร์ เพชรเกลี้ยง[1*]

Jirapatch Ployninpetch[1], Ratchanok Thongboon[1], Ornnicha Perkliang[1] and Nutjarin Petkliang[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความทนทานและประสิทธิภาพของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโดในการดูดซับแคดเมียมในน้ำที่ปนเปื้อน โดยเลี้ยงสาหร่ายในสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0 (กลุ่มควบคุม) 2 4 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 7 วัน และวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในสาหร่ายและในน้ำ ผลการศึกษาพบว่าสาหร่ายหางกระรอกมีความทนทานต่อสารละลายแคดเมียมได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าการสะสมทางชีวภาพอยู่ระหว่าง 108.33-200.10 ส่วนสาหร่ายพุงชะโดมีความทนทานต่อสารละลายแคดเมียมได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าการสะสมทางชีวภาพอยู่ระหว่าง 185.10-264.91 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำของสาหร่ายทั้งสองชนิด พบว่าสาหร่ายหางกระรอกมีความทนทานและประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงกว่าสาหร่ายพุงชะโดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

คำสำคัญ: การบำบัดโดยพืช โลหะหนัก แคดเมียม สาหร่ายหางกระรอก สาหร่ายพุงชะโด

[1] สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

[1] Biology Program, Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University

[*] Corresponding author e-mail: nutjarin.pe@skru.ac.th

DOI: https://doi.org/10.65217/wichchajnstru.2026.v45i2.266472

Received: 25 February 2025, Revised: 14 June 2025, Accepted: 3 July 2025

Abstract

This study aimed to compare the tolerance and efficiency of *Hydrilla verticillata* (L.f.) and *Ceratophyllum demersum* (L.) for adsorbing cadmium from contaminated water. The aquatic plants were cultured in cadmium solutions at concentrations of 0 (control), 2, 4, and 10 mg/L for a period of 7 days, after which the cadmium content remaining in both the plants and the water was analyzed. The results revealed that *Hydrilla verticillata* (L.f.) exhibited the highest tolerance to the cadmium solution at a concentration of 2 mg/L and was most effective at removing cadmium at a concentration of 4 mg/L, with a bioconcentration factor (BCF) ranging from 108.33 to 200.10. Meanwhile, *C. demersum* (L.) showed the highest tolerance to the cadmium solution at a concentration of 2 mg/L, achieved the highest cadmium removal from water at a concentration of 10 mg/L, and had a BCF ranging from 185.10 to 264.91. Comparing the water treatment performance of the two species, *Hydrilla verticillata* (L.f.) was significantly more tolerant and effective at removing cadmium than *C. demersum* (L.) ($p < 0.05$).

Keywords: Phytoremediation, Heavy metal, Cadmium, *Hydrilla verticillata*, *Ceratophyllum demersum*

บทนำ

ประเทศไทยในปัจจุบันมีความเจริญก้าวหน้าไปสู่การขยายตัวด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว แต่ในขณะเดียวกันยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น มีการลักลอบปล่อยของเสียออกมาทั้งในรูปแบบของก๊าซพิษและสารเคมีจำพวกโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติโดยไม่มีการบำบัดและกำจัดสารที่ถูกต้องทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของประชาชนที่ใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำในการอุปโภคและบริโภค (ณัฐธิดา และคณิตา, 2560)

แคดเมียม (Cd) เป็นโลหะหนักที่นำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ แบตเตอรี่ อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา โรงงานอาหารกระป๋อง โรงงานน้ำปลา โรงงานน้ำตาล และเหมืองแร่ หรือนำมาใช้สำหรับเป็นโครงสร้างหรือโลหะผสมกับโลหะอื่นเพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนตามแหล่งต่าง ๆ โดยเฉพาะในน้ำเสีย (นพปฎล และคณะ, 2562; Peana *et al.*, 2023) เมื่อเข้าสู่ร่างกายสามารถเข้าแทนที่อะตอมของสังกะสีในเอนไซม์ได้ทำให้เกิดพิษต่อร่างกาย เช่น ทำให้เอนไซม์หลายชนิดไม่ทำงาน ขัดขวางการสร้างเม็ดเลือดแดง ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง ปวดตามข้อตามกระดูก สายตาพร่ามัว ท้องร่วง อาเจียน ตับวาย และมีโอกาสเสียชีวิตตามมา (ธีรนาถ, 2563; Genchi *et al.*, 2020)

การบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนด้วยพืช (phytoremediation) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้พืชในการลดหรือกำจัดการปนเปื้อนสารมลพิษต่าง ๆ ซึ่งการใช้พืชน้ำเป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ทนทาน และปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งยังสามารถช่วยควบคุมปริมาณของพืชน้ำและช่วยหมุนเวียนออกซิเจนและธาตุอาหารภายในน้ำได้ดี สาหร่ายเป็นหนึ่งในพืชน้ำที่มีบทบาทสำคัญในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก เนื่องจากสาหร่ายมีโครงสร้างของผนังเซลล์และไซโตพลาสซึมที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น หมู่คาร์บอกซิล (–COOH) หมู่ไฮดรอกซิล (–OH) และหมู่อะมิโน ($–NH_2$) ซึ่งสามารถจับกับไอออนของโลหะหนักได้ นอกจากนี้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตและทนทานได้ในสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูง จึงเหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อน (Ankit *et al*., 2022; Abd Elnabi *et al*., 2023) สาหร่ายหางกระรอก (*Hydrilla verticillata* (L.f.)) และสาหร่ายพุงชะโด (*Ceratophyllum demersum* (L.)) เป็นพืชน้ำที่พบมากในประเทศไทยและมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักได้ดี (Zhang *et al*., 2020; Abdulwahid, 2023) ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาเปรียบเทียบความทนทานและประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมระหว่างสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโด เพื่อหาพืชน้ำที่เหมาะสมและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมสารละลายตั้งต้นของสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่ง $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ จำนวน 1.372 กรัม ปรับปริมาตรน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร จากนั้นเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อใช้ในการทดลองที่มีความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 0 (กลุ่มควบคุม) 2 4 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายแคดเมียมจากสารละลายตั้งต้น (stock solution) จำนวน 0.0 2.4 4.8 และ 12.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ แล้วนำไปปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1,200 มิลลิลิตร

2. การศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับแคดเมียม

นำสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโดใส่ในกะละมังที่มีน้ำสะอาด พักทิ้งไว้ 7 คืน เพื่อปรับสภาพ จากนั้นนำสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโดที่มีน้ำหนักสด 20 กรัม ไปเลี้ยงในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 1,200 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 0 (กลุ่มควบคุม) 2 4 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแต่ละความเข้มข้นทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ เลี้ยงสาหร่ายทั้งสองชนิดในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส วางบนชั้นที่มีหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ความเข้มแสงประมาณ 2,000 ลักซ์ ให้แสงตลอดเวลา สังเกตและจดบันทึกลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสาหร่ายทั้งสองชนิดทุกวัน พร้อมบันทึกภาพ เมื่อครบ 7 วัน เก็บตัวอย่างน้ำและสาหร่ายทั้งสองชนิดเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม ชั่งน้ำหนักสดของสาหร่ายและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักแห้งและนำไปคำนวณค่าความทนทานโดยใช้สมการ (1)

3. การวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม

เติมกรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 65 ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่างน้ำ 50 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและนำไปย่อยบนเตาให้อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จนเหลือประมาณ 5-10 มิลลิลิตร หรือเห็นควันขาวขุ่นลอยขึ้นมา ตั้งไว้ให้เย็นในอุณหภูมิห้อง นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง

ลงในขวดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ชั่งตัวอย่างพืชที่อบแห้ง 0.5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ เติมกรดไนตริกปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางบนแผ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนได้ตัวอย่างใส นำตัวอย่างที่ย่อยสมบูรณ์แล้วออกมาตั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และกรองด้วยกระดาษกรองใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ตามวิธีของ AOAC 2015.01 (Briscoe, 2015) จากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์การปล่อยแสงเชิงอะตอมด้วยพลาสมาควบคู่เหนี่ยวนำ (inductively coupled plasma-optical emission spectrometer: ICP-OES) รุ่น Avio 500 ของบริษัท PerkinElmer สหรัฐอเมริกา

4. คำนวณความทนทานและประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม

คำนวณค่าความทนทาน (tolerance index) ของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโดโดยใช้สมการ (1) ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม (% removal) โดยใช้สมการ (2) และค่าการสะสมทางชีวภาพ (bioconcentration factor: BCF) ของแคดเมียมในสาหร่ายทั้งสองชนิดโดยใช้สมการ (3)

$$\text{ค่าความทนทาน} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของสาหร่ายชุดทดลอง}}{\text{น้ำหนักแห้งของสาหร่ายชุดควบคุม}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e คือ ความเข้มข้นโลหะหนักสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$\text{ค่าการสะสมทางชีวภาพ} = \frac{\text{Metal } C_{biota}}{\text{Metal } C_{media}} \quad (3)$$

เมื่อ Metal C_{biota} คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในเนื้อเยื่อพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

Metal C_{media} คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

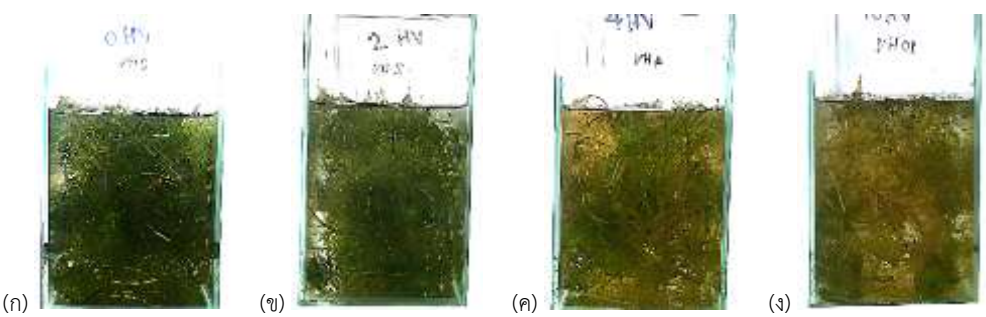
การศึกษาครั้งนี้วางแผนการทดลองแบบแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) แสดงผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PSPP (version 2.0.1)

ผลการวิจัย

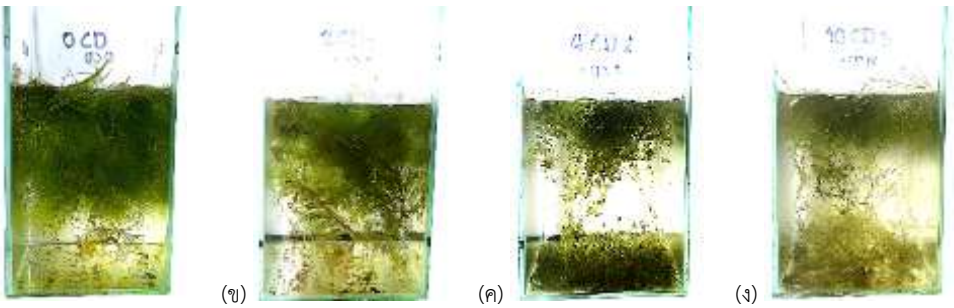
1. ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโด

จากการสังเกตลักษณะของสาหร่ายหลังลงเลี้ยงในน้ำเสียสังเคราะห์ (ภาพที่ 1 และ 2) พบว่า เมื่อครบระยะเวลา 7 วัน สาหร่ายหางกระรอกมีความทนทานมากกว่าสาหร่ายพุงชะโด โดยในกลุ่มควบคุมที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่ายหางกระรอกมีการเจริญเติบโตมากขึ้น ใบมีสีเขียวและมีรากงอกออกมาเป็นจำนวนมาก ขณะที่สารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าใบของสาหร่ายหางกระรอกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองในวันที่ 4 หลังลงเลี้ยงในน้ำเสียสังเคราะห์ ส่วนที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าใบเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองในวันที่ 3 และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลในวันที่ 6 หลังลงเลี้ยงในน้ำเสียสังเคราะห์ และที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าใบเปลี่ยนเป็นสีเหลืองในวันที่ 3 และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลในวันที่ 5 หลังลงเลี้ยงในน้ำเสียสังเคราะห์ (ตารางที่ 1)

สำหรับสาหร่ายพุงชะโด ในกลุ่มควบคุมที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีการเจริญเติบโต ใบมีสีเขียวและมีการแตกยอดเพิ่มขึ้น ขณะที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ใบของสาหร่ายพุงชะโดเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองในวันที่ 4 หลังลงเลี้ยงในน้ำเสียสังเคราะห์ และที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าใบเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองตั้งแต่วันที่ 3 หลังลงเลี้ยงในน้ำเสียสังเคราะห์ ส่วนสาหร่ายที่เลี้ยงในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีการตาย โดยใบเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลในวันที่ 3 หลังลงเลี้ยงในน้ำเสียสังเคราะห์ และมีการตายของต้นจำนวนมากในช่วงวันที่ 6-7 (ตารางที่ 2)



ภาพที่ 1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสาหร่ายหางกระรอกที่เลี้ยงในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 0 (ก) 2 (ข) 4 (ค) และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ง) ครบ 7 วัน



ภาพที่ 2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสาหร่ายพุงชะโดที่เลี้ยงในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 0 (ก) 2 (ข) 4 (ค) และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ง) ครบ 7 วัน

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของสาหร่ายหางกระรอกที่เลี้ยงในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ระยะเวลาการสัมผัส (วัน)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0 (กลุ่มควบคุม)	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
2	++++	++++	++++	++++	+++	+++	+++	+++
4	++++	++++	++++	+++	+++	+++	++	++
10	++++	++++	++++	+++	+++	++	++	-

หมายเหตุ: ++++ เจริญเติบโตดี ใบมีสีเขียว
+++ เริ่มเจริญเติบโตไม่ดี ใบมีสีเหลือง
++ เจริญเติบโตไม่ดี ใบเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล
- เจริญเติบโตไม่ดี พบการตายของต้นจำนวนมาก

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของสาหร่ายพุงชะโดที่เลี้ยงในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ระยะเวลาการสัมผัส (วัน)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0 (กลุ่มควบคุม)	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
2	++++	++++	++++	+++	+++	+++	+++	+++
4	++++	++++	++++	+++	+++	++	++	-
10	++++	++++	+++	++	++	-	-	-

หมายเหตุ: ++++ เจริญเติบโตดี ใบมีสีเขียว
+++ เริ่มเจริญเติบโตไม่ดี ใบมีสีเหลือง
++ เจริญเติบโตไม่ดี ใบเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล
- เจริญเติบโตไม่ดี พบการตายของต้นจำนวนมาก

2. ปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโด

เมื่อนำตัวอย่างสาหร่ายทั้งสองชนิดมาชั่งน้ำหนักแห้ง พบว่าสาหร่ายหางกระรอกมีน้ำหนักแห้งมากกว่าสาหร่ายพุงชะโด โดยน้ำหนักแห้งของสาหร่ายหางกระรอกที่เลี้ยงในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 2 4 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 1.38±0.10 1.25±0.05 และ 1.02±0.17 กรัม ตามลำดับ ขณะที่กลุ่มควบคุมมีน้ำหนักแห้ง 1.28±0.13 กรัม โดยน้ำหนักแห้งของสาหร่ายหางกระรอกที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรลดลงแตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

สำหรับสาหร่ายพุงชะโดที่เลี้ยงในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 2 4 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 0.66±0.07 0.61±0.01 และ 0.46±0.06 กรัม ตามลำดับ ขณะที่กลุ่มควบคุมมีน้ำหนักแห้ง 0.86±0.06 กรัม โดยน้ำหนักแห้งของสาหร่ายพุงชะโดที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตรลดลงแตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโดในสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

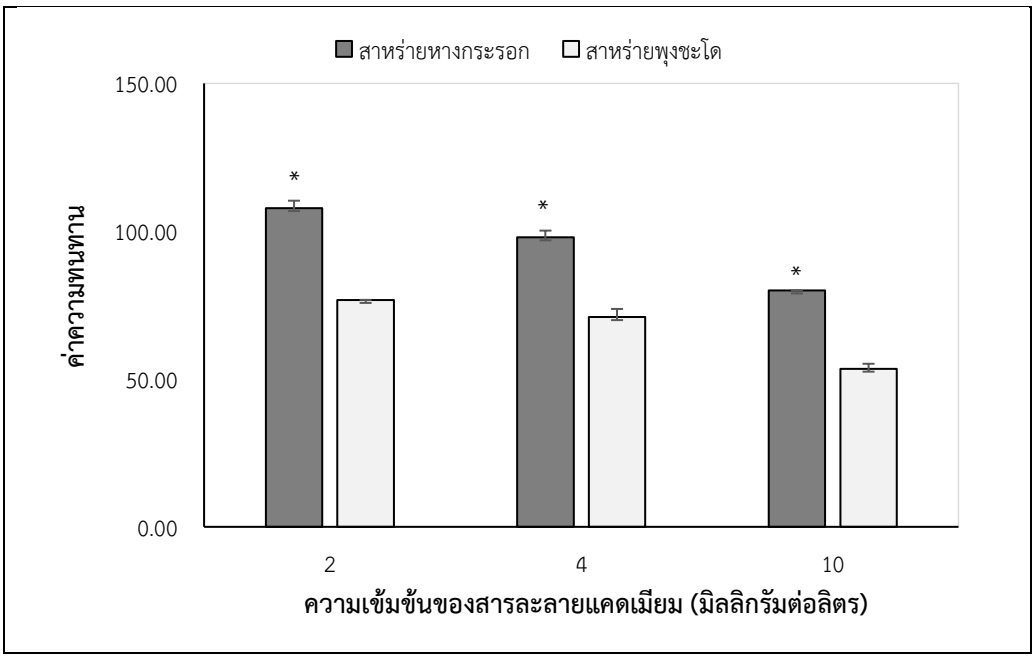
ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำหนักแห้งเฉลี่ย (กรัม)	
	สาหร่ายหางกระรอก	สาหร่ายพุงชะโด
0 (กลุ่มควบคุม)	1.28±0.13[a]	0.86±0.06[a]
2	1.38±0.10[a]	0.66±0.07[b]
4	1.25±0.05[a]	0.61±0.01[b]
10	1.02±0.17[b]	0.46±0.06[c]

หมายเหตุ: - รายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)
- ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3. ความทนทานของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโดในสารละลายแคดเมียม

จากการศึกษาความทนทานของสาหร่ายทั้งสองชนิดที่มีต่อแคดเมียม พบว่าสาหร่ายหางกระรอกที่เลี้ยงในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 2 4 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความทนทาน เท่ากับ 107.81±2.51 97.92±2.29 และ 79.95±0.02 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความทนทานสูงสุดที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนสาหร่ายพุงชะโดที่เลี้ยงในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 2 4 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความทนทานเท่ากับ 76.74±0.03 70.93±2.77 และ 53.49±1.68 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความทนทานระหว่างสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโด พบว่าสาหร่ายหางกระรอกมีความทนทานมากกว่าสาหร่ายพุงชะโด โดยสาหร่ายหางกระรอกมีค่าความทนทานอยู่ระหว่าง 79.95-107.81 ขณะที่สาหร่ายพุงชะโดมีค่าความทนทานอยู่ระหว่าง 53.49-76.74 ซึ่งสาหร่ายหางกระรอกมีค่าความทนทานแตกต่างจากสาหร่ายพุงชะโดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังภาพที่ 3

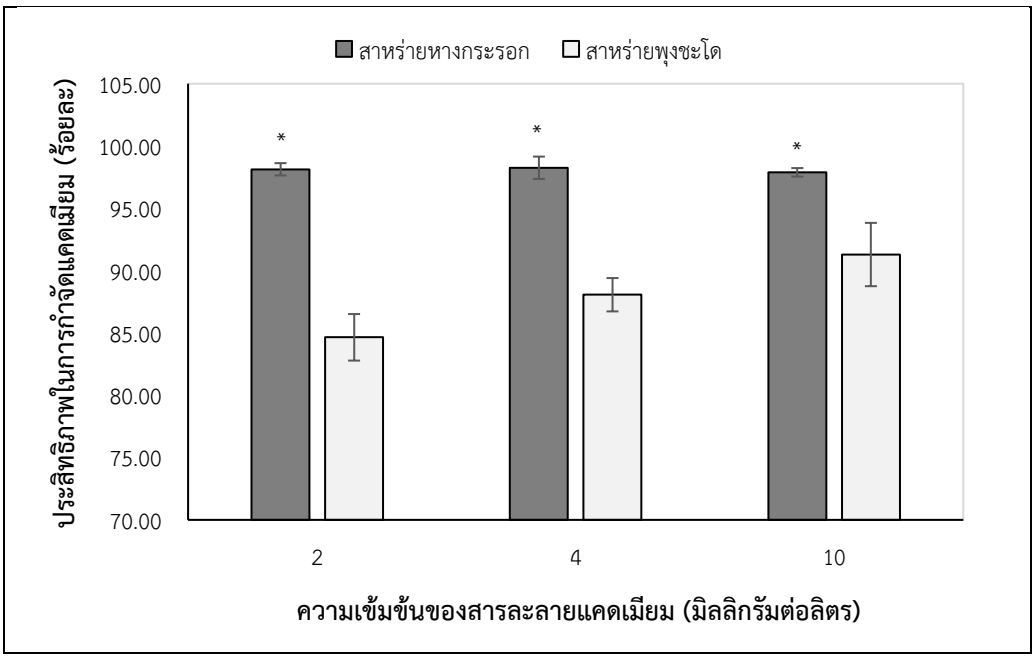


ภาพที่ 3 เปรียบเทียบความทนทานระหว่างสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโดในสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

หมายเหตุ: - * แสดงค่าเฉลี่ยของทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4. การกำจัดแคดเมียมของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโด

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของสาหร่ายทั้งสองชนิด พบว่าสาหร่ายหางกระรอกที่เลี้ยงไว้ในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 2 4 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม เท่ากับร้อยละ 98.13±0.49 98.26±0.90 และ 97.89±0.34 ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนสาหร่ายพุงชะโดที่เลี้ยงในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 2 4 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม เท่ากับร้อยละ 84.65±1.87 88.07±1.34 และ 91.29±2.54 ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมระหว่างสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโดที่ความเข้มข้น 2 4 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสาหร่ายหางกระรอกสามารถกำจัดแคดเมียมได้มากกว่าสาหร่ายพุงชะโดในทุกระดับความเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังภาพที่ 4

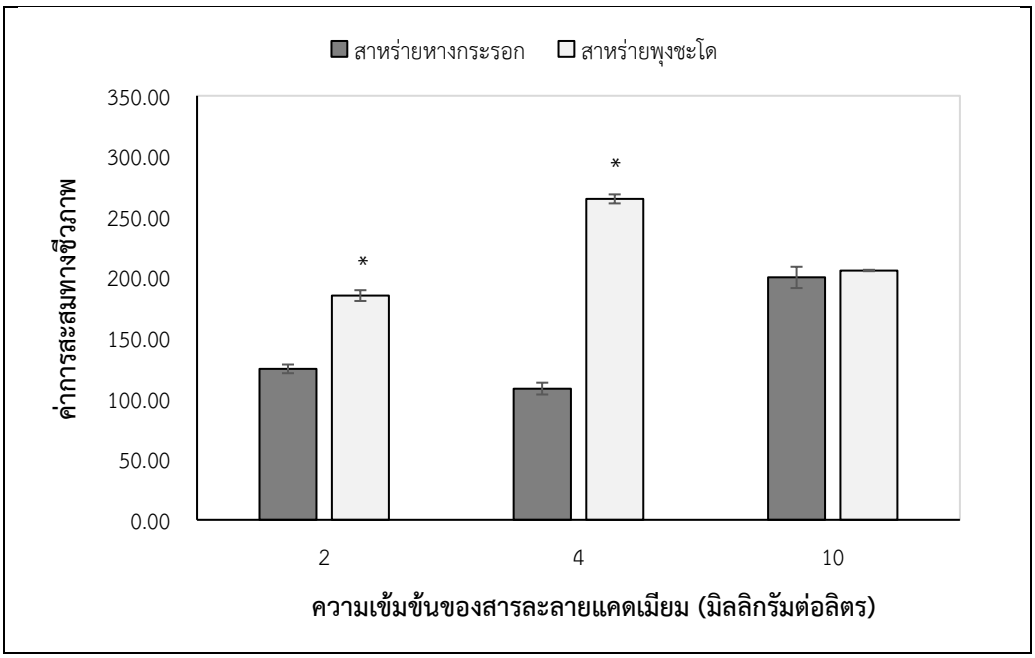


ภาพที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายแคดเมียม

หมายเหตุ: - * แสดงค่าเฉลี่ยของทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

5. การสะสมทางชีวภาพของแคดเมียมในสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโด

จากการศึกษาค่าการสะสมทางชีวภาพของแคดเมียมในสาหร่ายทั้งสองชนิด พบว่าสาหร่ายหางกระรอกมีค่าการสะสมทางชีวภาพสูงสุดที่ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 200.10±8.79 รองลงมาคือที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 124.61±3.59 และต่ำสุดที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 108.33±4.89 สำหรับสาหร่ายพุงชะโด พบว่ามีค่าการสะสมทางชีวภาพสูงสุดที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 264.91±3.71 รองลงมาคือที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 205.80±0.56 และต่ำสุดที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 185.10±4.45 เมื่อเปรียบเทียบค่าการสะสมทางชีวภาพของสาหร่ายทั้งสองชนิดที่ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 2 4 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่ความเข้มข้น 2 และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่ายพุงชะโดมีค่าการสะสมทางชีวภาพมากกว่าสาหร่ายหางกระรอก แต่ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่ายทั้งสองชนิดมีค่าการสะสมทางชีวภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบค่าการสะสมทางชีวภาพระหว่างสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพุงชะโดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายแคดเมียม

หมายเหตุ: - * แสดงค่าเฉลี่ยของทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

การอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่าสาหร่ายหางกระรอกมีค่าความทนทานต่อสารละลายแคดเมียมได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าความต้านทาน 107.81 มีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมได้ดีที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 98.26 และมีค่าการสะสมทางชีวภาพเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 108.33-200.10 ส่วนสาหร่ายพุงชะโดมีความทนทานต่อสารละลายแคดเมียมได้มากที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความต้านทาน 76.74 มีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมได้ดีที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 91.29 และมีค่าการสะสมทางชีวภาพเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 185.10-264.91

ผลการศึกษาความทนทานของสาหร่ายทั้งสองชนิดพบว่า สาหร่ายหางกระรอกมีความทนทานต่อแคดเมียมมากกว่าสาหร่ายพุงชะโด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Bunluesin *et al*. (2004) ที่เปรียบเทียบการสะสมของแคดเมียมในพืชน้ำ 13 ชนิด พบว่าสาหร่ายหางกระรอกมีการเจริญเติบโตและทนต่อสารละลายแคดเมียมได้มากกว่าสาหร่ายพุงชะโด

การสะสมของโลหะหนักในพืชทำให้มีการสะสมของอนุมูลอิสระชนิดออกซิเจนที่ว่องไว (reactive oxygen species: ROS) และอาจส่งผลให้เกิดการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ กรดนิวคลีอิก และคลอโรพลาสต์ ในสาหร่ายหางกระรอกพบว่า เมื่อมีการสะสมของแคดเมียมมากขึ้นจะส่งผลให้มีการสร้างมาลอนไดแอลดีไฮด์ (malondialdehyde: MDA) จากกระบวนการลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน (lipid peroxidation) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเสียหายต่อเยื่อหุ้มเซลล์จากชนิดออกซิเจนที่ว่องไวเมื่อเกิดภาวะ

กดดัน (oxidative stress) (Deng *et al*., 2014; Song *et al*., 2018) นอกจากนี้ สาหร่ายหางกระรอกมีการสร้างเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (superoxide dismutase: SOD) คะตาเลส (catalase: CAT) และเพอร์ออกซิเดส (peroxidase: POD) ที่ใบและลำต้น เพื่อใช้ในการต้านอนุมูลอิสระ ทำให้สามารถทนต่อความเป็นพิษของแคดเมียมได้ดี (Qin *et al*., 2017; Zhang *et al*., 2020)

สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม พบว่าสาหร่ายหางกระรอกมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงกว่าสาหร่ายพุงชะโด โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 98.26 ที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่สาหร่ายพุงชะโดมีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 91.29 ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของพูนฉวี และโศกฐพร (2562) ที่เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับแคดเมียมของต้นธูปฤาษีกับสาหร่ายหางกระรอก และพบว่าสาหร่ายหางกระรอกมีการลดลงของปริมาณแคดเมียมในน้ำมากกว่า นอกจากนี้ ผลการศึกษาพบว่าสาหร่ายหางกระรอกมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแคดเมียมในน้ำได้มากกว่าสาหร่ายพุงชะโด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผู้เขียนนำมาอ้างอิง โดยพบการลดลงของปริมาณแคดเมียมในน้ำสำหรับสาหร่ายหางกระรอกและต้นธูปฤาษีในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ตามที่รายงานไว้ในต้นฉบับ สำหรับค่าการสะสมทางชีวภาพ พบว่าสาหร่ายพุงชะโดมีค่าการสะสมทางชีวภาพมากกว่าสาหร่ายหางกระรอกที่ความเข้มข้น 2 และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าการสะสมทางชีวภาพของสาหร่ายทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกันตามผลการศึกษาที่รายงานไว้ในต้นฉบับ

สรุปผลการวิจัย

สาหร่ายหางกระรอกมีความทนทานต่อแคดเมียมและสามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีกว่าสาหร่ายพุงชะโด อย่างไรก็ตาม แม้สาหร่ายพุงชะโดจะมีการสะสมทางชีวภาพของแคดเมียมได้ดีกว่า แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับความทนทานที่น้อยกว่า สาหร่ายพุงชะโดจึงน่าจะมีความเหมาะสมในการนำไปบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนแคดเมียมที่มีความเข้มข้นต่ำ เช่น น้ำทิ้งจากบ้านเรือน และน้ำทิ้งจากโรงพยาบาล เป็นต้น ในขณะที่สาหร่ายหางกระรอกมีความทนทานมากกว่าและสามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียได้ดีกว่า จึงเหมาะสมที่จะนำไปบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนแคดเมียมที่มีความเข้มข้นสูง เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยวิธีธรรมชาติและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบพืชและทดลองกับโลหะหนักชนิดอื่น ๆ รวมทั้งเพิ่มระยะเวลาในการศึกษา เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำมาประยุกต์ใช้พืชน้ำในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีความทนทาน มีประสิทธิภาพ และต้นทุนต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ณัฐธิดา นิลประดับแก้ว และคณิตา ตังคณานุรักษ์. (2560). การใช้ประโยชน์เปลือกหอยนางรมเพื่อกำจัดแคดเมียมและตะกั่วด้วยกระบวนการดูดซับ. *วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย*, 31(1), 29-36.

ธีรนาถ สุวรรณเรือง. (2563). โลหะหนักปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อสุขภาพ. *วารสารวิจัยและพัฒนาระบบสุขภาพ*, 13(1), 76-82.

นพปฎล เสงี่ยมศักดิ์ พิชญา ศรีเสน และฝนทิพย์ แนบสนิท. (2562). พฤติกรรมการดูดซับตะกั่วด้วยเถ้าชีวมวล. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 30(2), 25-33.

พูนฉวี สมบัติศิริ และโศกฐพร ศิลปภิรมย์สุข. (2562). การเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมโดยต้นธูปฤาษีกับสาหร่ายหางกระรอก. *วารสารคณะวิทยาศาสตร์*, 4(1), 1-12.

Abd Elnabi, M.K., Elkaliny, N.E., Elyazied, M.M., Azab, S.H., Elkhalifa, S.A., Elmasry, S., Mouhamed, M.S., Shalamesh, E.M., Alhorieny, N.A., Abd Elaty, A.E., Elgendy, I.M., Etman, A.E., Saad, K.E., Tsigkou, K., Ali, S.S., Kornaros, M. and Mahmoud, Y.A.G. (2023). Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A review. *Toxics*, 11(7), 580, doi: https://doi.org/10.3390/toxics11070580.

Abdulwahid, K.D. (2023). Phytoremediation of cadmium pollutants in wastewater by using *Ceratophyllum demersum* L. as an aquatic macrophytes. *Water Conservation and Management*, 7(2), 83-88, doi: https://doi.org/10.26480/wcm.02.2023.83.88.

Ankit, Bauddh, K. and Korstad, J. (2022). Phycoremediation: Use of algae to sequester heavy metals. *Hydrobiology*, 1(3), 288-303, doi: https://doi.org/10.3390/hydrobiology1030021.

Briscoe, M. (2015). Determination of heavy metals in food by inductively coupled plasma mass spectrometry: First action 2015.01. *Journal of AOAC International*, 98(4), 1113-1120, doi: https://doi.org/10.5740/jaoac.int.2015.01.

Bunluesin, S., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., Lanza, G.R., Upatham, E.S. and Soonthornsarathool, V. (2004). Plant screening and comparison of *Ceratophyllum demersum* and *Hydrilla verticillata* for cadmium accumulation. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 73, 591-598, doi: https://doi.org/10.1007/s00128-004-0469-y.

Deng, G., Li, M., Li, H., Yin, L. and Li, W. (2014). Exposure to cadmium causes declines in growth and photosynthesis in the endangered aquatic fern (*Ceratopteris pteridoides*). *Aquatic Botany*, 112, 23-32, doi: https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2013.07.003.

Genchi, G., Sinicropi, M.S., Lauria, G., Carocci, A. and Catalano, A. (2020). The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 3782, doi: https://doi.org/10.3390/ijerph17113782.

Peana, M., Pelucelli, A., Chasapis, C.T., Perlepes, S.P., Bekiari, V., Medici, S. and Zoroddu, M.A. (2023). Biological effects of human exposure to environmental cadmium. *Biomolecules*, 13(1), 36, doi: https://doi.org/10.3390/biom13010036.

Qin, L., Li, K., Li, Y., Gao, S., Liang, R. and He, X. (2017). Bioaccumulation and tolerance characteristics of *Hydrilla verticillata* (L.F.) exposed to cadmium toxicity. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(4), 2642-2651.

Song, Y., Zhang, L.L., Li, J., He, X.J., Chen, M. and Deng, Y. (2018). High-potential accumulation and tolerance in the submerged hydrophyte *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle for nickel-contaminated water. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161, 553-562, doi: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.032.

Zhang, H., Zhang, L.L., Li, J., Chen, M. and An, R.D. (2020). Comparative study on the bioaccumulation of lead, cadmium and nickel and their toxic effects on the growth and enzyme defence strategies of a heavy metal accumulator, *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 9853-9865, doi: https://doi.org/10.1007/s11356-019-06968-0.