



2. วัตถุประสงค์ ขอบเขตการศึกษา ความหมายของคำและการนำมาใช้ในการศึกษา สมมติฐานการวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

2.1 วัตถุประสงค์

- (1) เพื่อหาความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว ที่ผักตบชวาสามารถเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนน้ำหนักต่อพื้นที่ (Biomass) ได้
- (2) เปรียบเทียบการกำจัดและอัตราการดูดซับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว ระหว่างกลุ่มผักตบชวาที่มีขนาดน้ำหนักแต่ละต้นต่างกัน โดยแต่ละกลุ่มมีความหนาแน่นในรูปน้ำหนักต่อพื้นที่ (Biomass) เท่ากัน
- (3) เปรียบเทียบการกำจัดและอัตราการดูดซับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว ระหว่างกลุ่มผักตบชวาที่มีความหนาแน่นในรูปน้ำหนักต่อพื้นที่ (Biomass) ต่างกัน
- (4) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดและอัตราการดูดซับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่วของผักตบชวา เมื่อมีโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดนี้อยู่ร่วมกัน
- (5) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการประยุกต์ ผักตบชวาสำหรับกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

2.2 ขอบเขตการศึกษา

(1) ผักตบชวาที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ตลอดจนการทดลองถูกเก็บจากคลองในบริเวณหมู่บ้านส้มमार เขตบางกะปิ

(2) ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองในอ่าง Polyethylene ก้นปึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร และเลี้ยงผักตบชวาคด้วยอาหารสำหรับพืชน้ำตามสูตรของ Kaigate (1981) และ Tridech (1980) ที่บริเวณระเบียงชั้น 4 ของห้องทดลองภาควิชาวิทยาศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

(3) ระยะเวลาในการทดลองแต่ละขั้นตอนการทดลองใช้เวลา 3 สัปดาห์

(4) เติมน้ำประปาที่ปราศจากคลอรีนให้ได้ 56 ลิตร ตลอดเวลา

การทดลอง

(5) ควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง pH ในอ่างทดลองให้อยู่ในช่วง 6-7 ไม้ให้สูงหรือต่ำเกินไป โดยใช้กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 10% ปรับ

(6) การทดลองนี้แต่ละขั้นตอนการทดลองทำการทดลอง 2 ชุด ชุดละ 2 ซ้ำ

(7) การเก็บข้อมูลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในผักตบชวาไม้ได้แยกกรากลำต้น และใบออกจากกัน

(8) การรายงานผลปริมาณโลหะหนักในผักตบชวาเป็นมิลลิกรัมของโลหะหนักต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ของผักตบชวา และรายงานปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในสารละลายเป็นส่วนในล้านส่วน (พี.พี.เอ็ม, ppm.)

2.3 ความหมายของคำและการนำมาใช้ในการศึกษา

- (1) ผักตบชวา ที่ใช้ในการศึกษาคือ Eichhornia crassipes (Mart.) Solms.
- (2) ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร เท่ากับ 1 มิลลิลิตร และ 1 ลูกบาศก์เดซิเมตร เท่ากับ 1 ลิตร
- (3) น้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน (deionized distilled water) ในที่นี้จะเรียกว่า น้ำกลั่น
- (4) พี.พี.เอ็ม. (ppm. = part per million) เป็นอัตราส่วนน้ำหนักต่อน้ำหนักใช้เป็นหน่วยของปริมาณสารหนึ่งในน้ำหรือตัวทำละลายบางส่วน ในกรณีที่ตัวทำละลายมีความดวงจำเพาะเท่ากับ 1 อาจใช้เป็นอัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตรได้ เช่น ความเข้มข้นแก้วในน้ำ 1 พี.พี.เอ็ม. เท่ากับ 1 มิลลิกรัม/ลิตร (ล้านมิลลิกรัม)
- (5) สารละลายไฮโดรโปนิค (Hydroponic Solution) หมายถึง อาหารที่ใช้เลี้ยงพืชในรูปสารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำได้จากการเตรียมขึ้นตามสูตรต่างกันไป
- (6) ความหนาแน่น (Biomass) ของผักตบชวา หมายถึง ปริมาณผักตบชวาซึ่งอยู่ในพื้นที่ที่กำหนด โดยวัดออกมาในรูป น้ำหนักต่อพื้นที่ เช่น Biomass ของผักตบชวาต่อพื้นที่หนึ่งเท่ากับ 1.4 กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง)/ตารางเมตร
- (7) ความเป็นกรดเป็นด่าง (P.H.) ของสารละลายหรือน้ำ คือ ค่าลบของลอการิทึม (Logarithm) ของความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน

$$PH = - \log [H^+]$$

$[H^+]$ มีค่ามากกว่า 10^{-7} หรือ pH ต่ำกว่า 7 สารละลายเป็นกรด

$[H^+]$ มีค่าเท่ากับ 10^{-7} หรือ pH เท่ากับ 7 สารละลายเป็นกลาง

$[H^+]$ มีค่าน้อยกว่า 10^{-7} หรือ pH สูงกว่า 7 สารละลายเป็นด่าง
- (8) น้ำหนักเปียก (Wet weight) หมายถึง น้ำหนักของผักตบชวาภายหลังจากนำขึ้นจากสารละลายหรือน้ำ และนำมาทำการไล่น้ำออกจากบริเวณรากของผักตบชวาให้แห้งมากที่สุด เช่น การบีบไล่น้ำบริเวณรากออก

(9) น้ำหนักแห้ง (Dry weight) หมายถึง น้ำหนักของผักตบชวา ซึ่งผ่านการอบไอน้ำแห้งด้วยตู้อบ (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

(10) การปลูกพืชทดลองแบบสองชุดชุดละ 2 ซ้ำ หมายถึง การปลูกพืชทดลองในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน และใส่ปัจจัยเดียวกันแก่พืชที่ปลูก 2 อย่างทดลอง และทำการทดลองต่อไปอีกครั้งโดยทำเช่นเดิม 2 อย่างทดลอง

2.4 สมมติฐานการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ตั้งสมมติฐาน 4 ประการดังนี้

(1) ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว ที่แตกต่างกันจะมีผลทำให้ผักตบชวาเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนน้ำหนักต่อพื้นที่ (Biomass) ต่างกันโดยความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในปริมาณต่ำในสารละลายจะทำให้ผักตบชวาเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนน้ำหนักได้มากกว่าความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด ในปริมาณสูงกว่าในสารละลาย

(2) กลุ่มผักตบชวาที่มีขนาดน้ำหนัก ต่อต้นต่างกัน และมีความหนาแน่นในรูปน้ำหนักต่อพื้นที่ (Biomass) เท่ากันจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับกำจัดปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว ต่างกัน

(3) กลุ่มผักตบชวาที่มีความหนาแน่นในรูปน้ำหนักต่อพื้นที่ (Biomass) ต่างกันจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับ และกำจัดปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่วต่างกัน

(4) ประสิทธิภาพในการดูดซับและกำจัดปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่วของผักตบชวาจะแตกต่างกัน เมื่อมีโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดนี้อยู่รวมกันในปริมาณที่แตกต่างกัน

2.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลของการศึกษาวิจัยนี้คาดว่าจะได้ประโยชน์มาก คือ

- (1) ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อเป็นข้อพิจารณาสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมในการควบคุมและการจัดการเรื่องการปล่อยน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักตะกั่ว แคดเมียม และทองแดงซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสุมน้ำลาล่อง
- (2) อาจเป็นแนวทางสำหรับการนำผักตบชวาไปประยุกต์ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำทิ้งที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป
- (3) ถ้าประสิทธิภาพการใช้งาน รวมทั้งการควบคุมระบบเป็นไปได้ด้วยดี และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบบำบัดแบบอื่น ๆ ก็นับว่าเป็นระบบบำบัดแบบหนึ่งที่เหมาะสมในแง่เศรษฐกิจ
- (4) เหมาะสมกับประเทศไทยซึ่งมีสภาพภูมิประเทศภูมิอากาศรวมทั้งสภาวะแวดล้อมที่ผักตบชวาเจริญเติบโตได้ดีมาก และผลพลอยได้ที่มีมูลค่ามหาศาลสำหรับประเทศไทยคือ การลดปัญหายุงยากเนื่องจากผักตบชวาซึ่งกำลังก่อความเดือดร้อนรำคาญ ซึ่งรัฐต้องสิ้นเปลืองงบประมาณในการแก้ปัญหานี้อยู่เป็นจำนวนมากเงินไม่น้อย

3. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการศึกษาการวิจัยได้แบ่งขั้นตอนออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

- (1) การจัดแบ่งกลุ่มผักตบชวาเพื่อใช้ในการทดลอง
- (2) การศึกษาประสิทธิภาพของผักตบชวาในการกำจัดโลหะหนัก : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว

ซึ่งได้วางรูปแบบออกเป็น 5 ขั้นตอนการทดลองคือ

- 2.1 ขั้นตอนการทดลองที่ 1 หาความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว ที่ผักตบชวาแต่ละกลุ่มสามารถเจริญเติบโต และเพิ่มน้ำหนักได้เมื่อครบเวลา 3 สัปดาห์

2.2 ขั้นตอนการทดลองที่ 2 การทดลองเปรียบเทียบการกำจัดและ
การดูดซับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด : แคมเมียม ทองแดง และตะกั่ว ระหว่างกลุ่มผักตบชวา
ที่มีขนาดน้ำหนักต่อต้นต่างกัน โดยแต่ละกลุ่มมีความหนาแน่นในรูปน้ำหนักต่อพื้นที่ (Biomass) เท่ากัน

2.3 ขั้นตอนการทดลองที่ 3 การทดลองเปรียบเทียบการกำจัดและ
การดูดซับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด : แคมเมียม ทองแดง และตะกั่ว ระหว่างกลุ่มผักตบชวาที่มี
ความหนาแน่นในรูปน้ำหนักต่อพื้นที่ (Biomass) ต่างกัน

2.4 ขั้นตอนการทดลองที่ 4 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดและ
การดูดซับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด : แคมเมียม ทองแดง และตะกั่ว เมื่อมีโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดนี้
อยู่รวมกัน

2.5 ขั้นตอนการทดลองที่ 5 การศึกษาประสิทธิภาพของผักตบชวาในการ
ประยุกต์สำหรับกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การจัดแบ่งกลุ่มผักตบชวาเพื่อใช้ในการทดลอง

นำผักตบชวาจากคลองบริเวณหมู่บ้านสัมมากร เขตบางกะปิจำนวน 12 ต้น เต็มไหล (Stolon) และหน่อกิ่งทั้งหมด นำมาเลี้ยงในวงไมสี่เหลี่ยมซึ่งอยู่ในคลองเดิม รोजนผักตบชวาแตกไหลและงอกหน่อออกมา จนหน่อมีอายุระหว่าง 7-10 วัน เด็ดหน่อขึ้นมาซึ่งน้ำหนักและจกคาแต่ละต้นไว้ แล้วนำมาเลี้ยงไว้ในวงไมสี่เหลี่ยมตามเดิมจนมีอายุระหว่าง 14-17 วัน (ซึ่งเป็นช่วงที่ผักตบชวาเริ่มงอกไหลใหม่) นำมาซึ่งและจกคาน้ำหนักแต่ละต้นไว้ แล้วนำมาเลี้ยงเช่นเดิมจนมีอายุระหว่าง 21-24 วัน และ 28-31 วัน (ผักตบชวาเริ่มมีดอก) ตามลำดับ พร้อมทั้งจกคาน้ำหนักของแต่ละต้นไว้ทุกครั้ง และนำมาจัดแบ่งกลุ่มผักตบชวาเพื่อใช้ในการทดลองทำการเลี้ยงเช่นเดิมอีกครั้งและสามารถสรุปการจัดแบ่งกลุ่มผักตบชวาได้ดังนี้

- กลุ่มที่ 1 ผักตบชวาอายุระหว่าง 7-10 วัน จะมีน้ำหนักเปียกต่อต้นประมาณ 5-15 กรัม
- กลุ่มที่ 2 ผักตบชวาอายุระหว่าง 14-17 วันจะมีน้ำหนักเปียกต่อต้นประมาณ 20-42 กรัม
- กลุ่มที่ 3 ผักตบชวาอายุระหว่าง 21-24 วันจะมีน้ำหนักเปียกต่อต้นประมาณ 48-65 กรัม
- กลุ่มที่ 4 ผักตบชวาอายุระหว่าง 28-31 วันจะมีน้ำหนักเปียกต่อต้นประมาณ 79-98 กรัม

นำผักตบชวาที่มีช่วงน้ำหนักดังกล่าวของแต่ละกลุ่มจากบริเวณคลองเดิมมาทดลองในชั้นการทดลองต่อไป

2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของผักตบชวาในการกำจัดโลหะหนัก : แคลเซียม ทองแดงและตะกั่ว

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้วางรูปแบบการวิจัยออกเป็น 5 ขั้นตอนการทดลองคือ

2.2.1 ขั้นตอนการทดลองที่ 1 ทาความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด : แคลเซียม ทองแดง และตะกั่ว ที่ผักตบชวาแต่ละกลุ่มเจริญเติบโตและเพิ่มน้ำหนักได้ เมื่อครบเวลา 3 สัปดาห์

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

2.2.1.1 การเตรียมโลหะหนัก

แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว ถูกเตรียมใหม่ด้วยความเข้มข้น 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 ppm. เพื่อใช้สำหรับทดลองในข้อ 2.2.1.2

2.2.1.2 การเตรียมการทดลอง

นำผักตบชวาจากคลองบริเวณเดิม เลือกและชั่งน้ำหนัก ผักตบชวาแต่ละต้นเพื่อจัดแบ่งกลุ่ม ชั่งน้ำหนักแต่ละกลุ่มใหม่ น้ำหนักรวมเท่ากับ 300 กรัม เลี้ยงในอ่างทดลองที่เตรียมไว้ทั้งสิ้น 20 ใบ เพื่อใช้ทดลองหาความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ผักตบชวาแต่ละกลุ่มสามารถเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนน้ำหนักได้ ดังแผนภาพที่ 2.1 ทำการทดลองเป็นเวลา 3 สัปดาห์ เมื่อครบกำหนดการทดลอง เก็บผักตบชวาน้ำหนักเปียก และน้ำหนักแห้ง ความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ทำให้ผักตบชวาน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากกว่า 300 กรัม (น้ำหนักเปียก) ถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการทดลองถัดไป

2.2.2 ขั้นตอนการทดลองที่ 2 การทดลองเปรียบเทียบการกำจัดและการดูดซับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว ระหว่างกลุ่มของผักตบชวา โดยแต่ละกลุ่มมีความหนาแน่นในรูปน้ำหนักต่อพื้นที่ (Biomass) เท่ากัน

คัดเลือกผักตบชวาแต่ละต้นเพื่อจัดแบ่งกลุ่มน้ำหนัก ชั่งน้ำหนักแต่ละกลุ่มใหม่ น้ำหนักรวมเท่ากับ 300 กรัม เลี้ยงในอ่างทดลองที่เตรียมไว้ทั้งสิ้น 15 ใบ สำหรับการทดลองหาการกำจัดและการดูดซับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด โดยผักตบชวาแต่ละกลุ่มถูกเลี้ยงในอ่างทดลองที่มีระดับความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนัก ดังผลการทดลองจากขั้นตอนการทดลองที่ 1 ทำการทดลองเป็นเวลา 3 สัปดาห์ ดังแผนภาพที่ 2.2 วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่สะสมในผักตบชวาและโลหะหนักที่เหลือน้อยในสารละลายเมื่อเสร็จสิ้นการทดลองแต่ละสัปดาห์ กลุ่มผักตบชวาที่กำจัดโลหะหนักได้มากที่สุดถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการทดลองถัดไป

ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนัก (ppm.)

		0.50	1.00	3.00	5.00	ชุดควบคุม
ผักตบชวา	กลุ่มที่ 1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	กลุ่มที่ 2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	กลุ่มที่ 3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	กลุ่มที่ 4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

แผนภาพการทดลองที่ 2.1 การทดลองหาความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ผักตบชวาแต่ละกลุ่มสามารถเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนน้ำหนักได้เมื่อครบเวลา 3 สัปดาห์

เวลา (สัปดาห์)

		1	2	3
ผักตบชวา	กลุ่มที่ 1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	กลุ่มที่ 2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	กลุ่มที่ 3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	กลุ่มที่ 4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ชุดควบคุมปราศจากพืช	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

แผนภาพการทดลองที่ 2.2 การทดลองเปรียบเทียบการกำจัดและการดูดซับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดระหว่างกลุ่มผักตบชวาที่มีขนาดน้ำหนักต่อต้นต่างกันโดยแต่ละกลุ่มมีความหนาแน่นในรูปน้ำหนักต่อพื้นที่ (Biomass) เท่ากัน

2.2.3 ขั้นตอนการทดลองที่ 3 การทดลองเปรียบเทียบการกำจัดและ

การดูดซับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด : แคลเซียม ทองแดง และตะกั่ว ระหว่างกลุ่มผักตบชวา
ที่มีความหนาแน่นในรูปน้ำหนักต่อพื้นที่ (Biomass) ต่างกัน

คัดเลือกผักตบชวาแต่ละต้นซึ่งมีน้ำหนักอยู่ในกลุ่มที่กำหนดโลหะหนักได้มากที่สุดเมื่อครบเวลา 3 สัปดาห์ ดังผลการทดลองจากขั้นตอนการทดลองที่ 2 จัดกลุ่มน้ำหนักของผักตบชวาออกเป็น 3 กลุ่มคือ 300 กรัม (เป็นความหนาแน่นที่เหมาะสมสำหรับผักตบชวาในอ่างทดลอง) 400 กรัม (เป็นความหนาแน่นขนาดปานกลางสำหรับผักตบชวาในอ่างทดลอง) 500 กรัม (เป็นความหนาแน่นค่อนข้างมากสำหรับผักตบชวาในอ่างทดลอง) ตามลำดับ นำมาเลี้ยงในอ่างทดลองที่มีระดับความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ผักตบชวาสามารถเจริญเติบโตเพิ่มน้ำหนักได้ ดังผลการทดลองจากขั้นตอนการทดลองที่ 1 โดยเลี้ยงในอ่างทดลองที่เตรียมไว้ทั้งสิ้น 12 ใบ สำหรับการทดลองหาอัตราการดูดซับและลดปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด ดังแผนภาพที่ 2.3 วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่สะสมในผักตบชวาและโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายเมื่อเสร็จสิ้นการทดลองแต่ละสัปดาห์

2.2.4 ขั้นตอนการทดลองที่ 4 การทดลองหาประสิทธิภาพในการกำจัดและการดูดซับ

ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด : แคลเซียมทองแดง และตะกั่ว เมื่อมีโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดนี้อยู่รวมกัน

คัดเลือกผักตบชวาแต่ละต้นซึ่งมีน้ำหนักอยู่ในกลุ่มที่กำหนดโลหะหนักได้มากที่สุดเมื่อครบเวลา 3 สัปดาห์ ดังผลการทดลองจากขั้นตอนการทดลองที่ 2 ซึ่งน้ำหนักแต่ละกลุ่มให้มือน้ำหนักรวมเท่ากับ 300 กรัม นำมาเลี้ยงในอ่างทดลองที่เตรียมไว้ทั้งสิ้น 24 ใบ โดยแต่ละอ่างทดลองมีระดับความเข้มข้นของโลหะหนัก แคลเซียม ทองแดง และตะกั่ว อยู่รวมกันซึ่งแปรตามความเข้มข้นดังนี้

$$1. X + Y + Z$$

$$2. \frac{X}{2} + Y + Z$$

$$3. X + \frac{Y}{2} + Z$$

$$4. \frac{X}{2} + \frac{Y}{2} + Z$$

		เวลา (สัปดาห์)		
		1	2	3
ผักตบชวา	300 กรัม	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	400 กรัม	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	500 กรัม	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ชุดควบคุมปราศจากพืช	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



แผนภาพการทดลองที่ 2.3 การทดลอง เปรียบเทียบการกำจัดและการดูดซับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดระหว่างกลุ่มผักตบชวาที่มีความหนาแน่นในรูปน้ำหนักต่อพื้นที่ (Biomass) ต่างกัน

		เวลา (สัปดาห์)		
		1	2	3
ปริมาณโลหะหนัก (ppm.)	$X + Y + Z$	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ชุดควบคุมปราศจากพืช	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	$\frac{X}{2} + Y + Z$	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ชุดควบคุมปราศจากพืช	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	$X + \frac{Y}{2} + Z$	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ชุดควบคุมปราศจากพืช	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	$\frac{X}{2} + \frac{Y}{2} + Z$	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

แผนภาพการทดลองที่ 2.4 การทดลองหาประสิทธิภาพในการกำจัดและการดูดซับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดเมื่อมีโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดอยู่รวมกัน

เมื่อ x = ปริมาณความเข้มข้นสูงสุดของแคดเมียม (Cd) ซึ่งผักตบชวาสามารถเจริญเติบโตได้ในเวลา 3 สัปดาห์ ดังผลการทดลองจากขั้นตอนการทดลองที่ 2

y = ปริมาณความเข้มข้นสูงสุดของทองแดง (Cu) ซึ่งผักตบชวาสามารถเจริญเติบโตได้ในเวลา 3 สัปดาห์ ดังผลการทดลองจากขั้นตอนการทดลองที่ 2

z = ปริมาณความเข้มข้นสูงสุดของตะกั่ว (Pb) ซึ่งผักตบชวาสามารถเจริญเติบโตได้ในเวลา 3 สัปดาห์ ดังผลการทดลองจากขั้นตอนการทดลองที่ 2

ทำการทดลองดังแผนภาพการทดลองที่ 2.4 ทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่สะสมในผักตบชวาและโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลาย เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองแต่ละสัปดาห์

หมายเหตุ เนื่องจากตะกั่วจะไม่แสดงผลของความเป็นพิษต่อผักตบชวา แม้จะใช้เป็นจำนวนมากในการทดลอง (Kay, Hallier & Garrard, 1984) จึงใช้ตะกั่วจำนวนมากที่สุดของการทดลองนี้ร่วมกับโลหะชนิดอื่น

2.2.5 ขั้นตอนการทดลองที่ 5 การศึกษาประสิทธิภาพของผักตบชวาในการประยุกต์สำหรับกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

การทดลองนี้ได้นำน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะประเภทสังกะสีและทองเหลืองจากโรงงานไทยสดาวร สมุทรปราการ ซึ่งเป็นน้ำทิ้งที่รวมทั้งน้ำล้างโรงงานและน้ำที่ออกมาจากระบบการผลิต และถูกเก็บกักไว้ในบ่อก่อนที่จะปล่อยลงสู่ลำคลอง ได้ดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้

คัดเลือกผักตบชวาแต่ละต้นซึ่งนำหนักอยู่ในกลุ่มที่ดูดซับโลหะหนักได้มากที่สุด เมื่อครบกำหนด 3 สัปดาห์ ดังผลการทดลองจากขั้นตอนการทดลองที่ 2 ซึ่งนำหนักแต่ละกลุ่มให้มีน้ำหนักรวมเท่ากับ 300 กรัม นำมาเลี้ยงในอ่างทดลองที่เตรียมไว้ทั้งสิ้น 24 ใบ โดยแต่ละอ่างทดลองใส่น้ำทิ้งจากโรงงานซึ่งมีระดับความเข้มข้นของน้ำทิ้งต่าง ๆ ดังนี้คือ 100%, 75%, 50%, และ 25% ตามลำดับ ดังแผนภาพการทดลองที่ 2.5 วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่สะสมในผักตบชวาและโลหะหนักที่เหลือในสารละลาย เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองแต่ละสัปดาห์

		เวลา (สัปดาห์)		
		1	2	3
ปริมาณความเข้มข้น ของน้ำทิ้ง	100%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ชุกควบคุมปราศจากพีช	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	75%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ชุกควบคุมปราศจากพีช	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	50%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ชุกควบคุมปราศจากพีช	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	25%	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	ชุกควบคุมปราศจากพีช	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

แผนภาพการทดลองที่ 2.5 การศึกษาประสิทธิภาพของผักตบชวาในการกำจัดโลหะหนัก
ในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

2.3 เครื่องใช้วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี

2.3.1 อุปกรณ์สำหรับเลี้ยงผักตบชวา ภาชนะอ่าง Polyethylene
เส้นผ่าศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร สูงจากก้นถึงปากถัง 30 เซนติเมตร จำนวน 24 ใบ

2.3.2 อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างน้ำและผักตบชวา

ก. ขวดพลาสติกกลมสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำความจุประมาณ 1,000
มิลลิลิตร จำนวนประมาณ 50 ใบ พร้อมจุกเกลียวพลาสติก

ข. ถังพลาสติกขนาดใหญ่สำหรับเก็บผักตบชวาจำนวนประมาณ 350 ใบ

ขวดพลาสติกเมื่อใช้เสร็จแล้วทุกครั้งต้องล้างด้วยผงซักฟอกและน้ำสะอาด
 ครั้งสุดท้ายล้างด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 50% และล้างกรดออกด้วยน้ำกลั่น คว้าให้แห้งแล้วจึงนำ
 ไปใช้ครั้งต่อไป

2.3.3 อุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูล

ก. พี.เอช มิเตอร์ pH. Meter CG 727

ข. เครื่องชั่งยี่ห้อ Sartorius 2354

ค. เทอร์โมมิเตอร์

ง. ขวดพลาสติกกลมสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำความจุประมาณ 1,000

มิลลิลิตรจำนวน 24 ใบ

2.3.4 อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์

ก. กระดาษอลูมิเนียม (Aluminium foil) ใช้สำหรับหุ้มท่อ

พีชอบ

ข. ตู้อบพีชไอน้ำ (Hot air oven) ตั้งอุณหภูมิ 103 องศา-

เซลเซียส อบนาน 48 ชั่วโมง

ค. เครื่องบดพีช (Blender) สำหรับบดพีชที่อบแห้งแล้ว

ง. เครื่องชั่งไฟฟ้า ชั่งพีชที่บดแล้วตัวอย่างละ 1 กรัม เพื่อนำมาชั่ง

ต่อไป และใช้เตรียมอาหารสำหรับพีชน้ำและสารเคมี

จ. เตาซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นความร้อน (Hot plate) ใช้สำหรับ

ชั่งพีชและตัวอย่างน้ำ

ฉ. กระดาษกรอง whatman 42 ขนาด 11 เซนติเมตร

ข. ขวดแก้วสีขามีฝาปิดเป็นจุกเกลียว สำหรับใส่ตัวอย่างที่ย่อยแล้ว เพื่อหาปริมาณโลหะหนัก เพื่อเตรียมฉีดเข้าเครื่อง Atomic Absorption spectrophotometer

ข. เครื่องแก้วไตแก้ว ปีเปต ขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร ปีกเกอร์ ขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร พร้อมควยกระจกนาฬิกา กระจกอกตวงขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร ฟอลิวเมตริก ฟลาซคขนาด 50, 1000 มิลลิลิตร กรวยตวง

Ol. Atomic Absorption spectrophotometer (AAS.)แบบ Perkin-Elmer 373

2.3.5 การเตรียมอาหารสำหรับพืชน้ำ (Hydroponic solution)

สำหรับผักตบชวาใช้สูตรอาหารตามที่ Kaigate (1981) & Tridech (1980) ไขปลุกพืชน้ำ คังภาคผนวก

2.3.6 การเตรียมสารละลายโลหะหนักมาตรฐาน

การเตรียม แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว มาตรฐานโดยวิธี APHA-AWWA-WPCF (1976)

2.3.6.1 การเตรียมสารละลายแคดเมียม (Cd)

ละลาย 1.000 กรัม ของ Cadmium metal ลงใน 1 + 1 HCl ปริมาณที่น้อยที่สุดแล้วเจือจางเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นจะได้อาหารละลายมาตรฐาน 1.000 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 1 มิลลิกรัม

2.3.6.2 การเตรียมสารละลายทองแดง (Cu)

ละลาย 1.000 กรัมของ Copper metal ลงใน 1+1 HNO₃ 15 มิลลิลิตรแล้วเจือจางเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นจะได้อาหารละลายมาตรฐาน 1.000 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 1 มิลลิกรัม

2.3.6.3 การเตรียมสารละลายตะกั่ว (Pb)

ละลาย 1.598 กรัม ของ Lead nitrate ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3 conc.) 1.5 มิลลิลิตร แล้วเจือจางเป็น 1000 มิลลิลิตร ใช้น้ำกลั่นจะได้อาหารละลายมาตรฐาน 1000 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 1 มิลลิกรัม

2.4 วิธีการให้อาหารพืช

การให้อาหารผักตบชวาจะให้เพียงครั้งเดียว คือ ตอนเริ่มเลี้ยงผักตบชวาในอ่างทดลอง จากการทดลองเลี้ยงผักตบชวาก่อนทำการเลี้ยงผักตบชวาจริง ปรากฏว่าการให้อาหารลักษณะเช่นนี้ก็เป็น การเพียงพอสำหรับผักตบชวาตลอด 3 สัปดาห์ในการที่จะเจริญเติบโตแตกหน่อและเพิ่มน้ำหนัก

2.5 การควบคุมความเป็นกรด-ด่าง

ก่อนการใส่ผักตบชวาในสารละลายโลหะหนักต้องปรับความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ระหว่าง 6-7 ก่อนโดยใช้ 6 N NaOH หรือ H_2SO_4 10% หลังจากนั้นเช็คราว ๆ ทุกวันด้วยกระดาษ พี.เอช. โดยใช้กระดาษ พี.เอช. จุ่มลงไปใ้อ่างทดลอง ถ้าอ่างใดมีความเป็นกรดหรือด่างมากเกินไปให้ทำการควบคุม พี.เอช. คือ เก็บตัวอย่างสารละลายไฮโดรโปนิกในอ่างที่เลี้ยงผักตบชวา รวมถึงถังควบคุมด้วย ถึงละ 500 มิลลิลิตร นำมาวัดค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยพี.เอช. มิเตอร์ เมื่อทราบค่าแล้วถ้าอ่างใดความเป็นกรดสูงกว่า 7 ก็นำมาปรับด้วยกรดซัลฟูริก 10% โดยวิธีไตเตรทและใช้กระดาษ พี.เอช. เช็คราว ๆ (เพื่อความรวดเร็ว) จนกระทั่งช่วงพี.เอชอยู่ระหว่าง 6-7 จลปริมาณที่ใช้สารละลาย 500 มิลลิลิตร มาคำนวณคว่าสารละลาย 56000 มิลลิลิตร จะใช้กรด 10% ของ H_2SO_4 เท่าไร เมื่อคำนวณได้แล้วนำกรดปริมาณเท่ากับที่คำนวณได้ใส่ในอ่างทดลองใบที่นำมาปรับ พี.เอช. นั้น การใส่กรดลงในอ่างทดลองควรทำให้เจือจางมาก ๆ ก่อนแล้วจึงค่อยเทกรดลงไปพร้อมทำการกวนและเช็ค พี.เอช. โดยใช้กระดาษพี.เอช. ถ้าพี.เอช.อยู่ในช่วง 6-7 โดยที่เทกรดยังไม่หมดก็ให้หยุดเท่านั้น

2.6 การเก็บตัวอย่างน้ำ

ใช้ขวดพลาสติกขนาด 1000 มิลลิลิตรเก็บในระยาระดับความลึกใตราบของ ผักตบชวาซึ่งอยู่บริเวณคอนไปทางก้นอ่าง โดยที่ก่อนเก็บตัวอย่างน้ำต้องเติมน้ำให้ได้ขีดปริมาตรเดิม และคนให้น้ำหมุนเวียนทั่วอ่างทดลองก่อน

2.7 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่วในสารละลาย

วิธีที่ใช้ตามวิธีใน Standard Method (APHA-AWWA-WPCF, 1976) ดังนี้

(1) นำตัวอย่างสารละลายใส่ขวดพลาสติกขนาด 1000 มิลลิลิตร ถ้าหากยังไม่ทำการย่อยวิเคราะห์ที่มีต้องคงสภาพด้วยกรดไนตริกเข้มข้น ($\text{HNO}_3 \text{conc}$) ให้มีพี.เอช. เท่ากับ 1-2 และแช่ตู้เย็นไว้ แต่หากทำการวิเคราะห์ให้น้ำตัวอย่างปิดฝาขวดให้แน่นเซยาหลาย ๆ ครั้ง แล้วตวงนำมา 200 มิลลิลิตรด้วยกระบอกตวงขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่ปิเปกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

(2) เติมกรดไนตริกเข้มข้น ($\text{HNO}_3 \text{conc}$) 5 มิลลิลิตร

(3) ตั้งบนเตาซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นความร้อน (Hot plate) ระเหยน้ำจนเกือบแห้งโดยอุณหภูมิต้องไม่สูงจนน้ำเดือด

(4) รอให้ตัวอย่างน้ำในปิเปกเกอร์เย็นลงแล้วเติมกรดไนตริกเข้มข้นอีก 5 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระจกนาฬิกา แล้วนำตัวอย่างตั้งบน Hot plate อีกครั้ง เพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่งเกิดการหมุนเวียนของตัวอย่างน้ำ (Refluxing action) ตั้งจนกระทั่งการย่อยเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์โดยสังเกตอุณหภูมิที่สารละลายที่ย่อยมีสีใส

(5) เติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไปอีก 1-2 มิลลิลิตร ลดอุณหภูมิให้ต่ำลงแล้วอุ่น ๆ เพื่อละลายโลหะหนักที่ตกค้างในตัวอย่าง

(6) ล้างกระจกนาฬิกาที่ครอบด้วยน้ำกลั่นโดยล้างลงไปในตัวอย่าง

(7) รอให้ตัวอย่างเย็นและดำเนินการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman 42 เพื่อแยกเอาซิลิกา และสารที่ไม่ละลายในกรดออกไป กรองใส่ใน Volumetric flask ขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ย่อยและผ่านการกรองแล้วให้ได้ 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน แล้วเทใส่ขวดสีชาซึ่งมีฝาปิดแบบเกลียว

(8) นำไปหาปริมาณโลหะหนัก ด้วย Atomic Absorption spectrophotometer ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในสารละลายเท่ากับ $\frac{\text{พี.พี.เอ็ม}}{4}$

2.8 การเก็บตัวอย่างพืช

เมื่อครบกำหนดระยะเวลาทดลอง ทำการเก็บผักตบชวาจากอ่างทดลองทั้งหมด ล้างด้วยน้ำประปาและล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง ซึ่งและจับบันทึกค่าน้ำหนักเปียกและค่าน้ำหนักแห้ง

2.9 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก : แคดเมียม ทองแดง และตะกั่วในพืช

- (1) นำผักตบชวาอบให้แห้งด้วยตู้อบ (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตามวิธีของ Suttipong (1980)
- (2) ปล่อยให้แห้งไว้ให้เย็นแล้วนำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด (Blender)
- (3) ชั่งผักตบชวาที่บดละเอียดแล้ว 1 กรัม มาย่อยด้วยกรดผสมระหว่างกรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3 conc) และกรดเพอคลอริกเข้มข้น (HClO_4 conc) อัตราส่วน 4 ต่อ 1 ตามวิธีของ Goodman et al. (1971) & Motto et al. (1970) ให้ได้สารละลายจำนวน 25 มิลลิลิตร ใส่ในเบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
- (4) เปิดด้วยกระดาษกรองแล้วตั้งสารละลายบน Hot plate อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนได้สารละลายใส และทิ้งไว้ให้เย็น
- (5) กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง whatman 42 ลงใน Volumetric flask ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นทำปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นสะอาดให้เข้ากัน แล้วเทใส่ขวดสีชาซึ่งมีฝาปิดแบบเกลียว
- (6) นำไปหาปริมาณโลหะหนักด้วย Atomic Absorption spectrophotometer ค่าที่อ่านได้จะเป็น พี.พี.เอ็ม. หรือปริมาณโลหะหนักเป็นมิลลิกรัม ต่อพืชในรูปสารละลาย 1 ลิตร หรือไมโครกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร เพราะฉะนั้นปริมาณโลหะหนักในพืชแห้ง 1 กรัม เท่ากับไมโครกรัม/สารละลายพืช 1 มิลลิลิตร คูณด้วย 50 มิลลิลิตร

2.10 การเก็บข้อมูลอุณหภูมิ

วัดอุณหภูมิเป็นองศาเซลเซียสและจดทุกวัน

2.11 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ใช้สถิติแบบ Trend Analysis ซึ่งจะบอกความสัมพันธ์ของ
ข้อมูลในตารางทั้งในแนวดิ่งและแนวนอน