



## การกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยระบบบึงประดิษฐ์และตัวดูดซับทางชีวภาพ Heavy metals removal from wastewater by constructed wetland and biosorbent

เบญจวรรณ นิลวงศ์<sup>1</sup> และ กรรณิการ์ แก้วกิม<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช นครศรีธรรมราช 80280

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเขี้ยวเฉลิมพระเกียรติ

สมุทรปราการ 10540

Benjawan Ninwong<sup>1</sup> and Kannika Keawkim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Nakhon Si Thammarat 80280

<sup>2</sup> Division of Physical Science, Faculty of Science and Technology, Huachiew Chalermprakiet University, Samutprakarn 10540

### บทคัดย่อ

น้ำทิ้งที่ถูกปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรมมักมีการเจือปนของโลหะหนักอันตราย เช่น สังกะสี นิกเกิล แคดเมียม ตะกั่ว เหล็ก ทองแดง พรอท สารหนู และโครเมียม เป็นต้น เพื่อเป็นการลดปริมาณการสะสมของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมและลดการปนเปื้อนของโลหะหนักในห่วงโซ่อาหาร ควรมีกระบวนการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งวิธีการกำจัดโลหะหนักสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทำให้ตกตะกอน การแลกเปลี่ยนไอออน หรือใช้พืชบำบัด โดยที่การกำจัดโลหะด้วยพืชเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะเป็นวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ราคาถูก ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่สูง ในงานวิจัยนี้จึงได้ระบุวิธีการกำจัดโลหะของพืชและวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พืช 2 วิธี ซึ่งประกอบด้วย การกำจัดโลหะหนักแบบทางตรงคือ ระบบบึงประดิษฐ์ และทางอ้อมคือ การใช้มวลชีวภาพ (ตัวดูดซับทางชีวภาพ) ซึ่งทั้งสองวิธีสามารถนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้

**คำสำคัญ:** การกำจัดโลหะหนัก ตัวดูดซับทางชีวภาพ ระบบบึงประดิษฐ์

### Abstract

Sewage containing mixtures of hazardous heavy metals such as zinc, nickel, cadmium, iron, mercury arsenic and chromium, most of them are released from the factory. In order to reduce the accumulation of heavy metals in the environment should be preserved to eliminate these before being discharged into natural water. It also reduces contamination of heavy metals in food chain for less. There are several processes for heavy metals removal for example precipitation, ion-exchange or the use of plant in water treatment. The removal of heavy metals by plants as a way of appealing, it is environmentally friendly, low cost and high efficiency removal of heavy metals. In this work, the removal of heavy metals



by plants and two methods for wastewater treatment with plants were identified. The ways of heavy removal by plants have direct method as constructed wetlands and indirect method as biosorbent. Both methods can be used in heavy metals removal from wastewater.

**Keywords:** Heavy metals removal, Biosorbent, Constructed wetland

## บทนำ

มลภาวะที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศอย่างมาก ได้แก่ การปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำที่มากับน้ำทิ้ง ซึ่งปล่อยมาจากภาคอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง เหมืองแร่ การไฟฟ้า และสี เป็นต้น หรือจากภาคการเกษตร เช่น การใช้ยาฆ่าแมลง และสารกำจัดวัชพืช เป็นต้น หรือแม้กระทั่งจากกิจกรรมประจำวันของมนุษย์ เช่น การซักล้าง และการอุปโภคอื่น ๆ เป็นต้น ซึ่งทำให้ยากต่อการควบคุมปริมาณของโลหะหนักที่รั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำ ลำคลอง และเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารต่อไป ซึ่งโลหะหนักที่พบมากและเป็นอันตรายหากสะสมในปริมาณที่สูง เช่น สังกะสีอาจเกิดอาการจับไข้ หนาวสั่น และอาเจียน แคดเมียมอาจทำให้ไตทำงานผิดปกติ และปวดกระดูกสันหลังแขนขา ตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกายแล้ว ส่วนใหญ่จะยึดจับกับเม็ดเลือดแดง จะไปลดการสร้างฮีม (heme) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเม็ดเลือดแดง นอกจากนี้ยังส่งผลต่อตับ ภาวะเจริญพันธุ์ ทำให้มีความพิการแต่กำเนิดได้ პროททำให้เกิดอาการบวมและเจ็บที่มือและใบหน้า บางคนอาจเป็นเหน็บชาจนเป็นอัมพาต และสารหนูจะส่งผลให้เกิดผื่นแดงและคัน และอาจเกิดสะเก็ดที่ผิวหนังจนมีลักษณะคล้ายโรคมะเร็ง นอกจากนี้ยังทำลายเม็ดเลือดแดงจนเกิดอาการโรคโลหิตจางอีกด้วย เป็นต้น [1] แม้ว่าจะมีหน่วยงานเข้ามากำกับดูแล เช่น กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [2] โดยการกำหนดค่าการปนเปื้อนของโลหะในแหล่งน้ำธรรมชาติแต่ด้วยการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมและภาคการเกษตร จึงยากที่จะควบคุมปริมาณของโลหะหนักให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงเป็นสิ่งที่ต้องผลักดัน

นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน วิธีการกำจัดโลหะหนักมีหลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical

precipitation) [3] หรือการทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นวิธีการที่ง่าย แต่ต้องใช้สารเคมีที่มาก มีค่าดำเนินการสูง วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange) [4] หรือวิธีการทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical methods) [5] ข้อดีคือ เป็นการกำจัดไอออนแบบเลือกจำเพาะ ทำให้กำจัดไอออนที่สนใจได้ดี แต่มีค่าใช้จ่ายสูง วิธีการกรองด้วยเมมเบรน (membrane filtration) หรือการแยกด้วยศักย์ไฟฟ้า (electrodialysis) [6] ซึ่งเป็นวิธีที่มีความสามารถในการแยกไอออนที่สนใจได้ดี แต่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูง วิธีการกระตุ้นด้วยแสงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (photocatalysis) [7] เป็นวิธีที่สามารถกำจัดโลหะและสารประกอบอินทรีย์ได้พร้อมกัน มีความเป็นพิษน้อย แต่ค่อนข้างใช้เวลานานในการดำเนินการ และใช้งานได้จำกัด จากวิธีที่กล่าวมาล้วนมีข้อจำกัดด้านค่าดำเนินการและเวลาที่ใช้ ดังนั้นจึงมีผู้วิจัยจำนวนมากได้พยายามหาวิธีเพื่อเพิ่มทางเลือกในการกำจัดโลหะหนัก การบำบัดโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมด้วยพืชจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง โดยมีข้อดีคือ ต้นทุนต่ำ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่ดี และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบวิธีการกำจัดโลหะของพืช และรวบรวมวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พืช 2 วิธีคือ การกำจัดโลหะหนักแบบทางตรงด้วยระบบบึงประดิษฐ์ และทางอ้อมคือ การใช้มวลชีวภาพ (ตัวดูดซับทางชีวภาพ) ในการเป็นตัวดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย

## วิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พืช

การบำบัดน้ำเสียโดยใช้พืช (phytoremediation) หมายถึง กระบวนการใช้พืชเพื่อกำจัดความเป็นพิษของสารปนเปื้อนและตกค้างในสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการทางธรรมชาติเป็นหลัก โดยการใช้พืช



เป็นตัวกรอง และดูดซับโลหะจากน้ำเสีย ทำให้โลหะเกาะติดอยู่บนส่วนต่าง ๆ ของพืช และเกิดกระบวนการอื่น ๆ ตามมา เช่น การแลกเปลี่ยนประจุระหว่างโลหะกับอนุภาคของพืช พืชที่นำมาใช้ในระบบนี้จะต้องเป็นพืชที่มีรากแน่น โดยรากจะทำหน้าที่ดูดซับโลหะไว้ และถูกเก็บไว้ในช่องว่างของเซลล์พืช และหากโลหะมีปริมาณมากขึ้นก็จะถูกทำลายไปเก็บไว้ที่ท่อลำเลียงน้ำ โดยทั่วไปสามารถจำแนกวิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยพืชได้ดังนี้ [8]

การกรองด้วยรากพืช (rhizofiltration) เป็นวิธีการกำจัดโลหะโดยตรงด้วยรากของพืช โดยอาศัยการดูดซับสารปนเปื้อนจากน้ำเสียนั้น ยังมีระบบรากที่ยาวและหนาแน่นก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการกำจัดโลหะหนัก

การสกัดด้วยพืช (phytoextraction) เป็นวิธีการที่อาศัยการเติบโตของพืช ซึ่งพืชจะใช้รากดูดซับและสะสมโลหะไว้ แล้วโยกย้ายไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช จากรากไปสู่ลำต้นและใบ เมื่อพืชโตขึ้นสามารถตัดออกได้ เป็นการกำจัด

บริเวณของพืชที่ปนเปื้อนโลหะหนักออกไปได้โดยไม่ต้องปลูกต้นใหม่ เหลือไว้แต่รากซึ่งสามารถงอกเป็นต้นใหม่ได้ พืชที่นิยมใช้วิธีการนี้ต้องเป็นพืชที่โตไว ทนทาน สามารถสะสมโลหะหนักไว้ในส่วนต่าง ๆ ของลำต้นได้

การตรึงด้วยพืช (phytostabilization) เป็นวิธีการกำจัดโลหะหนักโดยลดการเคลื่อนไหวของสารพิษในสิ่งแวดล้อม โดยใช้ส่วนรากของพืชตรึงโลหะไว้กับดิน ป้องกันไม่ให้ถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำใต้ผิวดิน หรือเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารต่อไป

การทำให้ระเหยด้วยพืช (phytovolatilization) เป็นวิธีการใช้พืชกำจัดโลหะอันตรายที่ระเหย ได้แก่ พรอทซีลีเนียม และสารหนู เป็นต้น ให้กลายเป็นสารประกอบที่ไม่อันตรายที่ระเหยได้ไปอยู่ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งแต่ละวิธีการกำจัดโลหะหนักด้วยพืชย่อมมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ดังแสดงในตารางที่ 1 [8]

ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีในการบำบัดน้ำเสียด้วยพืช

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
การกรองด้วยรากพืช	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เป็นวิธีการที่ใช้สำหรับพืช ทั้งพืชบกและพืชน้ำ</li> <li>2. ไม่พบการปนเปื้อนของสารพิษบริเวณเหนือของพืช</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต้องมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสม</li> <li>2. ทำให้พืชเจริญเติบโตในบริเวณที่มีสารปนเปื้อน</li> </ol>
การสกัดด้วยพืช	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เป็นวิธีการที่ไม่แพงมาก</li> <li>2. สารปนเปื้อนถูกกำจัดออกจากดินได้อย่างถาวร</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. พืชที่ดูดซับโลหะหนักเข้าไปจะโตช้า มีลำต้นเล็ก และจำนวนรากน้อย</li> <li>2. ทำให้ต้องตัดต้นพืชทิ้ง</li> <li>3. พืชมักสะสมโลหะได้ดีเพียงชนิดเดียว</li> </ol>
การตรึงด้วยพืช	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ไม่ต้องกำจัดต้นพืชทิ้ง</li> <li>2. การเกิดขึ้นของต้นพืชสามารถลดการกัดกร่อนของดินได้</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. สารพิษยังคงปนเปื้อนอยู่ในดิน</li> <li>2. กำจัดโลหะได้เพียงชั่วคราวเท่านั้น</li> <li>3. ต้องใช้สารเคมีช่วยในการตรึงโลหะ</li> </ol>
การทำให้ระเหยด้วยพืช	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. สารปนเปื้อนสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่อันตราย</li> <li>2. สารปนเปื้อนที่ถูกปล่อยไปยังชั้นบรรยากาศสามารถถูกทำให้สลายตัวได้ด้วยกระบวนการธรรมชาติ เช่นกระบวนการ photodegradation</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. สารปนเปื้อนอาจสะสมอยู่ในพืชพันธุ์ใด เช่น ผลไม้</li> <li>2. เป็นวิธีการที่ไม่ได้ผลกับสารที่อยู่ในระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ</li> </ol>



### ชนิดของพืชและการสะสมโลหะในพืช

พืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการสะสมโลหะหนัก และวิธีการกำจัดโลหะออกจากสิ่งแวดล้อมได้แตกต่างกัน ดังนั้นชนิดของพืชจึงมีความสำคัญต่อการกำจัดโลหะ การเลือกชนิดของพืชนั้นควรเลือกพืชที่สามารถพบได้ในท้องถิ่น เพราะพืชจะมีความเคยชินกับสภาพอากาศในบริเวณนั้นหรือพื้นที่บริเวณโดยรอบ ทำให้พืชสามารถเติบโตได้ดี พืชที่นิยมนำมาใช้เพื่อกำจัดโลหะหนักในน้ำมักจะใช้พืชน้ำที่ขึ้นอยู่ตามแหล่งน้ำ โดยอาจจะลอยที่ผิวน้ำ ได้ผิวน้ำ หรือไหลขึ้นเหนือน้ำ หรืออาจเจริญเติบโตอยู่ตามน้ำขัง หรืออาจเป็นพืชที่มีระบบรากที่ยาวและหนาแน่น และเป็นพืชที่หาได้ง่าย [9] จากการรวบรวมงานวิจัยที่ได้มีการนำพืชมาใช้กำจัดโลหะหนัก พบว่ามีวิธีการเบื้องต้นในการศึกษา คือ จะนำพืชไปปลูกและปล่อยให้เจริญเติบโตในบริเวณที่ต้องการบำบัดโลหะหนัก และเมื่อครบตามระยะเวลาที่ศึกษาก็จะนำพืชเหล่านั้นมาตรวจหาปริมาณโลหะหนักที่สะสมอยู่ในพืชนั้น ซึ่งมีผู้วิจัยได้ศึกษาพืชชนิดต่างๆ ในเรื่องการสะสมของโลหะเพื่อใช้ประโยชน์ในการกำจัดโลหะหนัก เช่น Swin และคณะ [10] พบว่าผักตบชวามีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง ได้ดีกว่าแคดเมียม โดยพบการสะสมที่ราก ก้านดอก และใบ นอกจากนี้ Aurangzeb และคณะ [11] ยังพบว่า ผักตบชวามีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโครเมียม สารหนู อะลูมิเนียม และตะกั่วอีกด้วย รวมทั้งพบว่าจอกมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดตะกั่วและทองแดง โดยพบการสะสมในรากและบริเวณหน่อ Ugya และคณะ [12] รายงานว่าจอกสามารถสะสมโลหะหนักในใบได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดปรอท แคดเมียม แมงกานีส เงิน และสังกะสีได้

Hegazy และคณะ [13] พบว่ารูปฤาษีมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสังกะสี เหล็ก ตะกั่ว และทองแดง โดยสะสมในรากมากที่สุด รองลงมาพบมากในบริเวณแ่งและใบ นอกจากนี้ Li และคณะ [14] ยังพบว่ารูปฤาษียังสามารถกำจัดแคดเมียมได้อีกด้วย Verma และคณะ [15] พบว่าแหนมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมได้ดีกว่าตะกั่ว โดยพบการสะสมมากในบริเวณรากมากกว่าในใบ Abu และคณะ [16] พบว่าพืชในตระกูลสาหร่าย เช่น

คาบอมบ้าแดง สาหร่ายเดนซ่า และสาหร่ายหางกระรอกสามารถกำจัดสารหนู อะลูมิเนียม และสังกะสี ซึ่งสาหร่ายเดนซ่าและสาหร่ายหางกระรอกมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะสารหนูและสังกะสี สำหรับคาบอมบ้าแดงมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโลหะอะลูมิเนียม โดยพบการสะสมมากในบริเวณรากและใบ นอกจากนี้ Li และคณะ [14] รายงานว่าสาหร่ายพวงชะโดซึ่งจัดอยู่ในตระกูลพืชน้ำ ยังสามารถกำจัดทองแดง สังกะสี และแคดเมียมได้ โดยให้ข้อสรุปไว้ว่าพืชตระกูลสาหร่าย ซึ่งเป็นพืชที่จมน้ำจะมีประสิทธิภาพสูงในการสะสมโลหะทองแดงและแคดเมียมได้มากกว่าพืชในตระกูลอื่น

จากการศึกษาประสิทธิภาพของพืชในการนำมากำจัดโลหะหนักนั้น จะเห็นได้ว่าพืชส่วนใหญ่ เช่น รูปฤาษี จอก แหน ผักตบ และพืชในตระกูลหญ้ามีการสะสมของโลหะหนักในบริเวณรากมากกว่าลำต้น หน่อ หรือใบ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากมีระบบรากที่แน่น และเป็นบริเวณแรกที่มีการดูดซับโลหะหนักจากน้ำหรือดิน จึงเป็นบริเวณที่พบโลหะสะสมได้มากที่สุด อีกทั้งด้วยสมบัติทางกายภาพบางประการเป็นตัวขัดขวางการส่งผ่านโลหะไปยังส่วนอื่น ๆ ของลำต้น เช่น ช่องว่างของเซลล์ในลำต้น หรือแม้กระทั่งการเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงในบริเวณใบของพืช อาจเป็นตัวป้องกันปริมาณของโลหะหนักในใบ [17] จึงเป็นสาเหตุให้การสะสมของโลหะหนักในรากมากที่สุด ทั้งนี้หากพืชนั้นจมอยู่ในน้ำทั้งลำต้น เช่น พืชในตระกูลสาหร่าย จะพบการสะสมในใบมากกว่าส่วนอื่น เพราะว่ามีพื้นที่ผิวและบริเวณที่มากขึ้นในการดูดซับโลหะนั่นเอง

### การนำพืชไปประยุกต์ใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำ

พืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้แตกต่างกัน ในทางปฏิบัติเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำไปใช้บำบัดโลหะหนักในน้ำ จึงมีการประยุกต์วิธีการเพื่อให้เกิดความเหมาะสม และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการนำพืชไปใช้ได้เป็น 2 แบบ คือระบบบึงประดิษฐ์และไบโอซอร์พชัน (biosorption) ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไปนี้

## 1. ระบบบึงประดิษฐ์ (constructed wetland)

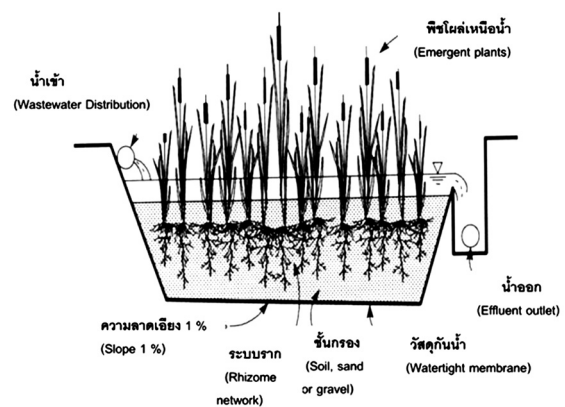
โดยทั่วไปในธรรมชาติจะมีแหล่งรองรับน้ำเสียหรือบึงธรรมชาติ ซึ่งมีพืชหลากหลายชนิดเจริญเติบโตอยู่ในบริเวณโดยรอบ ทำหน้าที่ดูดซับและกรองสารมลพิษในแหล่งน้ำหรือน้ำเสียได้ในระดับหนึ่ง แต่ทั้งนี้แหล่งที่รองรับน้ำเสียนี้อาจอยู่ใกล้กับแหล่งปล่อยโลหะ มีฉะนั้นจะมีค่าใช้จ่ายในการขนถ่ายน้ำเสียมาบำบัดด้วยบึงธรรมชาติ ดังนั้นระยะทางระหว่างแหล่งปล่อยโลหะกับบึงธรรมชาติจึงเป็นอุปสรรคในการที่จะเลือกบำบัดด้วยระบบบึงธรรมชาติ ดังนั้นเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการรวบรวมของเสีย และขนถ่ายของเสียจากแหล่งกำเนิดของเสียมายังแหล่งกำจัด การประดิษฐ์บึงขึ้นมาเองจึงเป็นอีกทางเลือกในการบำบัดของเสีย ซึ่งบึงที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถสร้างได้เกือบทุกที่ แม้จะมีพื้นที่จำกัด

ระบบบึงประดิษฐ์เป็นระบบที่สร้างขึ้นมาเพื่อเลียนแบบระบบบึง เป็นการนำพืชไปกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นโดยตรง โดยอาศัยกลไกของพืชในการกำจัดสารมลพิษที่ปนเปื้อน ทำให้สารมลพิษในสิ่งแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตลดน้อยลง ซึ่งพืชที่นำมาใช้ในระบบบึงประดิษฐ์จะมีหลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ ทั้งนี้พืชที่เลือกนำมาใช้ในระบบนี้จะต้องมีความทนทาน และขึ้นได้ทุกที่ที่มีน้ำขัง เช่น ธูปฤๅษี กก ผักตบ จอก แหน บัว และแฝก เป็นต้น [7] การบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์จะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าระบบบึงธรรมชาติที่มีพื้นที่ขนาดเท่ากัน เพราะสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของบ่อควบคุมการไหลของระบบน้ำ หรือปรับเปลี่ยนกระบวนการต่าง ๆ ภายในบ่อได้ตามต้องการ ในปี พ.ศ. 2550 ชาลินี และ ศศิธร [18] ได้ศึกษาการบำบัดโครเมียมและอาร์เซนิกด้วยหญ้าแฝกและธูปฤๅษีในระบบบึงประดิษฐ์ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิกมีค่าอยู่ในช่วง 7.44-11.68 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.98-1.19 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นปลูกหญ้าแฝกและธูปฤๅษีในน้ำเสียสังเคราะห์นั้นเป็นระยะเวลา 100 วัน พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียในบ่อทดลองที่ปลูก

ด้วยหญ้าแฝกหอมพันธุ์สงขลา 3 และบ่อที่ปลูกด้วยธูปฤๅษีมีค่าลดลงมากกว่าร้อยละ 98 ส่วนบ่อควบคุมที่ไม่ปลูกพืชมีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุด คือร้อยละ 69.3 ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพืชทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพต่ำในการบำบัดอาร์เซนิก นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 2013 Sukumaran [19] ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง และแคดเมียมที่มาจากน้ำทิ้งของโรงงานด้วยระบบบึงประดิษฐ์ โดยใช้ธูปฤๅษี ผักตบชวา จอกหูหนูยักษ์ และจอก โดยทำการปลูกพืชเหล่านี้ในบ่อทดลอง เป็นเวลา 15 วัน ซึ่งพบว่าผักตบมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดโลหะตะกั่วออกจากน้ำทิ้ง ส่วนธูปฤๅษีมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดทองแดงและแคดเมียม

สำหรับลักษณะของระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้กันมีหลายรูปแบบ ขึ้นกับการออกแบบระบบน้ำออก ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท [20] คือ

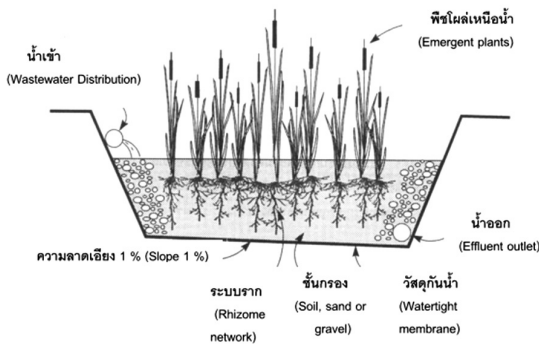
1) แบบน้ำไหลเหนือผิวดิน (ภาพที่ 1) ซึ่งจะปลูกด้วยพืชที่ไหลผ่านน้ำ เช่น กก แฝก ธูปฤๅษี พืชลอยน้ำ โดยรากลอยอยู่ใต้น้ำ เช่น จอก ผักตบชวา และพืชที่มีราก ใบ และลำต้นอยู่ใต้น้ำ เช่น พืชประเภทสาหร่าย เป็นต้น ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีค่า BOD อยู่ในช่วง 5-100 มิลลิกรัมต่อลิตร



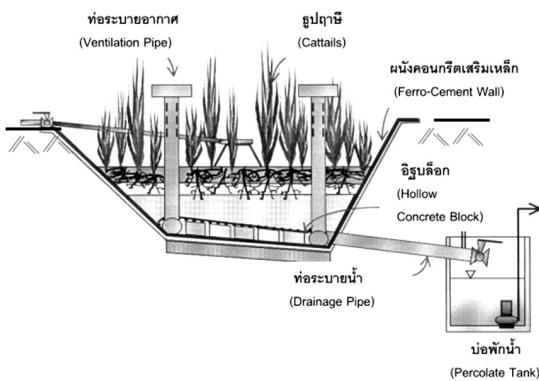
ภาพที่ 1 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลเหนือผิวดิน



2) **แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน** (ภาพที่ 2 และ 3) โดยแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ การไหลตามแนวราบ ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีค่า BOD อยู่ในช่วง 30-175 มิลลิกรัมต่อลิตร และการไหลตามแนวตั้ง ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีค่า BOD อยู่ในช่วง 500-70,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะปลูกด้วยต้นพืชไหลพื้นน้ำ



ภาพที่ 2 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ดินแบบแนวราบ



ภาพที่ 3 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ดินแบบแนวตั้ง

ระบบบึงประดิษฐ์เป็นระบบที่ง่าย ซึ่งอาศัยกระบวนการทางธรรมชาติ และต้นทุนต่ำ แต่เนื่องจากใช้พืชเป็นวัสดุหลักในการกักเก็บโลหะหนัก และเมื่ออายุพืชหมดลงโลหะหนักก็จะสะสมในบริเวณบึงประดิษฐ์นั้นต่อไป [15] แต่การกำจัดโลหะหนักด้วยระบบบึงประดิษฐ์นั้นก็ยังมีข้อจำกัดด้านสภาพภูมิอากาศของแต่ละประเทศ ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและระบบการไหลของน้ำ เพราะหากประเทศนั้นมีอากาศที่เย็นจัดจนเป็นน้ำแข็ง พืชอาจไม่เจริญเติบโต

และไม่สามารถเดินระบบได้ และอีกข้อจำกัดหนึ่งคือ ปริมาณแอมโมเนียในน้ำเสีย ถ้าหากมีมากก็จะทำให้มีปัญหาต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ [15]

**2. การใช้มวลชีวภาพของพืชน้ำในการดูดซับโลหะหนัก**

มวลชีวภาพคือ ส่วนต่าง ๆ เช่น เปลือก ผล ราก ใบ ลำต้น และเส้นใย เป็นต้น ของพืชที่ตายแล้วมาใช้ดูดซับโลหะ เรียกว่าวิธีการนี้ว่า ไบโอบซอร์ชัน (biosorption) เป็นการกำจัดโลหะของพืชที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการ phyto-remediation ของพืช แต่จะอาศัยลักษณะของพืชที่มีองค์ประกอบที่สำคัญคือ มีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เนื่องจากในองค์ประกอบเหล่านี้มีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญต่อการจับและตรึงโลหะไว้ เช่น หมู่อะมิโน (amino) คาร์บอกซิล (carboxyl) ฟีนอลิก (phenolic) พอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) แอลกอฮอล์ (alcohols) และอีเทอร์ (ether) เป็นต้น ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะมีอะตอมของไฮโดรเจนที่จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะในสารละลาย หรือสามารถให้คู่อิเล็กตรอนเพื่อสร้างเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะในสารละลายได้ [1]

พืชโดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบดังกล่าวอยู่แล้ว จึงสามารถนำส่วนต่าง ๆ ของพืชมาใช้เป็นมวลชีวภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ ทั้งนี้สิ่งที่ควรพิจารณาในการเลือกพืชนั้นจะต้องไม่ทำลายทรัพยากรธรรมชาติ ดังนั้นมวลชีวภาพที่นำมาใช้ในการดูดซับมักเป็นส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ใบ [21] เปลือกผลไม้ [22] วัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิต เช่น ชานอ้อย [23] เป็นต้น ทั้งนี้ควรเป็นพืชที่พบมากในท้องถิ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากเป็นมวลชีวภาพที่ได้มาจากวัชพืชต่าง ๆ มีมากในธรรมชาติ โดยรบกวนระบบนิเวศในบริเวณนั้น ๆ อยู่แล้ว เช่น พืชน้ำจืดพวกจอก แหน ผักตบชวา และผักเป็ดน้ำ เป็นต้น ซึ่งนอกจากจะใช้ประโยชน์ในการดูดซับโลหะหนักแล้ว ยังเป็นการลดมลภาวะแก่แม่น้ำลำคลองได้อีกด้วย ดังนั้นจึงขอกกล่าวเฉพาะการใช้มวลชีวภาพจากพืชน้ำ โดยมีการรายงานการนำมวลชีวภาพที่มาจากพืชน้ำมาใช้ประโยชน์ แสดงดังตารางที่ 2



ตารางที่ 2 การนำมวลชีวภาพของพืชไปประยุกต์ใช้กำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย

พืช	ส่วนของพืชที่ใช้	โลหะหนักที่ศึกษา	ประสิทธิภาพของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) หรือ (เปอร์เซ็นต์)
ผักตบชวา [24]	รากและลำต้น	ทองแดง และสังกะสี	99.42 และ 83.01 มิลลิกรัมต่อกรัม
จอก [25]	ใบ	ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี	มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ตามลำดับ
แหวน [26]	รากและลำต้น	ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และเหล็ก	94, 72, 65 และ 50 เปอร์เซ็นต์
ผักเป็ดน้ำ [27]	ลำต้นและใบ	นิกเกิล สังกะสี และโครเมียม	9.73, 18.57 และ 17.71 มิลลิกรัมต่อกรัม

ในการนำมวลชีวภาพมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักนั้น จะต้องผ่านกระบวนการเตรียมตัวดูดซับ เพื่อให้ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากขึ้น ซึ่งมีวิธีการคือนำตัวดูดซับมาทำให้แห้ง แล้วบดให้ละเอียด เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับโลหะหนัก ทั้งนี้ประสิทธิภาพของมวลชีวภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ขนาดของมวลชีวภาพที่นำมาใช้ดูดซับโลหะ ซึ่งต้องมีขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับโลหะหนัก ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่ต้องการบำบัด ซึ่งต้องมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม ปริมาณของตัวดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ [28] เป็นต้น หากปัจจัยเหล่านี้มีความเหมาะสม กระบวนการดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยมวลชีวภาพก็จะมีประสิทธิภาพสูง ประสิทธิภาพของตัวดูดซับของพืชแต่ละชนิดสามารถรายงานในหน่วยของ adsorption capacity (มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งเป็นปริมาณโลหะหนักในหน่วยมิลลิกรัมที่ถูกดูดซับได้ต่อปริมาณชีวมวล 1 กรัม หรือเปอร์เซ็นต์ การนำมวลชีวภาพของพืชไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียนั้น แสดงดังตารางที่ 2 การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยมวลชีวภาพในการดูดซับโลหะหนักนั้น หลังเสร็จกระบวนการสามารถนำตัวดูดซับมาใช้ได้ใหม่โดยล้างด้วยสารละลายกรด เช่น กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก [29] เป็นต้น เพื่อชะโลหะหนักที่ถูกดูดซับให้ออกมา ทำให้สามารถนำมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง

(3-15 ครั้ง) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของมวลชีวภาพที่นำมาใช้ด้วย [28] ดังนั้นการใช้มวลชีวภาพที่มาจากพืชจึงไม่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ ทั้งนี้หากเทียบกับการดูดซับด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ถึงแม้ว่าวิธีการนำพืชมาใช้บำบัดไม่ยุ่งยาก อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติของพืช และให้ประสิทธิภาพสูงในการดูดซับโลหะ แต่ก็ยากในการกำจัดโลหะที่สะสมอยู่ในพืช โดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การนำมวลชีวภาพไปใช้ในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย เป็นวิธีการที่ประหยัดในการบำบัดน้ำเสีย สามารถนำมาใช้ซ้ำ ใช้เวลาที่สั้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับที่ใช้สามารถกำจัดโลหะหนักได้หลายชนิด และมีประสิทธิภาพที่สูงในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย แต่ยังมีข้อจำกัดคือตัวดูดซับที่นำมาใช้มักไม่ได้อยู่ในรูปที่พร้อมใช้งาน ต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอน เช่น ทำให้แห้ง บดให้ละเอียดเพื่อให้ได้ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็ก เป็นต้น หรือตัวดูดซับบางชนิดอาจต้องมีการดัดแปรด้วยสารเคมี นอกจากนี้เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงในการนำไปใช้บำบัดโลหะหนัก จำเป็นต้องศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับตัวดูดซับแต่ละชนิดด้วย

### บทสรุป

การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยพืชเป็นวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและประหยัด เมื่อเทียบกับวิธีต่างๆ ที่ได้มีการนำมาใช้กำจัดโลหะหนักด้วยกลไกธรรมชาติต่าง ๆ



ของพืช เช่น เป็นตัวกรอง สกัด ตรึง หรือสามารถเปลี่ยนธาตุอันตรายบางชนิดให้อยู่ในรูปที่ไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้สามารถลดโลหะหนักที่มีสิ่งแวดล้อมได้ แต่ความสามารถของพืชแต่ละชนิดในการกำจัดโลหะหนักก็ไม่เท่ากัน อาจด้วยสมบัติทางกายภาพของพืชที่แตกต่างกัน การนำพืชไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในแหล่งน้ำนั้นทำได้ 2 วิธี คือ ประดิษฐ์บึงขึ้นมาเอง โดยเลียนแบบบึงธรรมชาติ ซึ่งจะสร้างขึ้นใกล้กับแหล่งกำเนิดของเสีย แล้วปลูกพืชที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโลหะหนักในบึงประดิษฐ์ ระบบนี้เป็นการกำจัดโลหะด้วยพืชโดยตรงด้วยกลไกธรรมชาติของพืชดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อีกวิธีคือ ใช้มวลชีวภาพหรือซากของพืชมาดัดแปลงให้มีความเหมาะสมในการใช้งาน โดยนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ เพื่อดูดซับโลหะหนักที่มีในแหล่งน้ำ ซึ่งทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมาก็มีข้อจำกัดที่ต่างกันคือ หากบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบึงประดิษฐ์ โลหะหนักหรือสารพิษก็ยังคงสะสมในต้นพืช ซึ่งต้องหาวิธีในการกำจัดต้นพืชนั้นต่อไปโดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ ส่วนการใช้มวลชีวภาพที่มาจากพืช ถึงแม้ว่าใช้เวลาเร็วในการกำจัดโลหะหนัก แต่ต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอนในการเตรียมตัวดูดซับ และต้องหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับของพืชนั้น ๆ อย่างไรก็ตามการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เป็นสิ่งที่ควรพึงกระทำเพื่อลดมลพิษของแหล่งน้ำ โดยเฉพาะผู้ประกอบการโรงงานต่าง ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม การกำจัดโลหะหนักด้วยพืชก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปริมาณโลหะหนักในแหล่งน้ำ เพียงเท่านั้นก็สามารถลดปริมาณความเป็นมลพิษของแหล่งน้ำลง และลดอันตรายของโลหะหนักที่อาจจะเข้ามาสู่ห่วงโซ่อาหารได้

#### เอกสารอ้างอิง

1. Nguyen TAH, Ngo HH, Guo WS, Zhang J, Liang S, Yue QY, et al. Applicability of agricultural waste and by-products for adsorptive removal of heavy metals from wastewater. *Bioresour Technol* 2013;148:574-85.
2. กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3: กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม [อินเทอร์เน็ต]. 2539 [เข้าถึงเมื่อ 15 มิ.ย. 2559]. เข้าถึงได้จาก: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water.html)
3. Pang MF, Teng PS, Teng TT, Mohd OAK. Heavy metals removal by hydroxide precipitation and coagulation-flocculation methods from aqueous solutions. *Water Qual Res J Can* 2009;44(2):174-82.
4. Muzenda E, Kabuba J, Ntuli F, Mollagee M, Mulaba AF. Cu(II) removal from synthetic waste water by ion exchange process. In: proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, October 19-21, 2011; San Francisco, USA; 2011. p 1-5.
5. Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Sep Purif Technol* 2004;38(1):11-41.
6. Gering LK, Scamehorn FJ. Use of electro dialysis to removal heavy metals from water. *Separ Sci Technol* 1988;23(14-15):2231-67.
7. Shuaiwen Z. Photocatalytic treatment of wastewater contaminated with organic waste and heavy metal from semiconductor industry. M.Eng. Thesis, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, University of Singapore. Singapore; 2004.
8. Singh D, Tiwari A, Gupta R. Phytoremediation of lead wastewater using aquatic plants. *J Agr Sci Tech* 2012;8(1):1-11.
9. สุชาติ ศรีเพ็ญ. พรหมไม่น้ำในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: อมรินทร์บุ๊คเซนเตอร์; 2542.





10. Swin G, Adhikari S, Mohanty P. Phytoremediation of copper and cadmium from water using water hyacinth, *Eichhornia Crassipes*. Inter J Agr Sci Tech 2014;2(1):1-7.
11. Aurangzeb N, Nisa S, Bibi Y, Javed F, Hussain F. Phytoremediation potential of aquatic herbs from steel foundry effluent. Braz J Chem Eng 2014;31(4)881-6.
12. Ugya AY, Imam TS, Tahir SM. The Use of *Pistia stratiotes* to remove some heavy metals from Romi stream: a case study of Kaduna refinery and petrochemical company polluted stream. IOSR J Environ Sci Toxic Food Technol 2015;9(1):48-51.
13. Hegazy AK, Abdel-Ghani NT, El-Chaghaby GA. Phytoremediation of industrial wastewater potentiality by *Typha domingensis*. Int J Environ Sci Tech 2011;8(3)639-48.
14. Li J, Yu H, Luan Y. Meta-analysis of the copper, zinc, and cadmium absorption capacities of aquatic plants in heavy metal-polluted water. Int J Environ Res Public Health 2015;12:4958-73.
15. Verma R, Suthar S. Lead and cadmium removal from water using duckweed-*Lemna gibba* L.: Impact of pH and initial metal load. Alexandria Eng J 2015;54:1297-305.
16. Abu AF, Yusoff I, Fatt NT, Othman F, Ashraf MA. Arsenic, zinc, and aluminium removal from gold mine wastewater effluents and accumulation by submerged aquatic plants (*Cabomba piauhyensis*, *Egeria densa*, and *Hydrilla verticillata*). Biomed Res Int 2013;2013:1-7.
17. Kidd P, Barceló J, Bernal MP, Navari-Izzo F, Poschenrieder C, Shilev S, et al. Trace element behavior at the root-soil interface: implications in phytoremediation. Environ Exp Bot 2009;67:243-59.
18. ชาลินี คักดีแสน, ศศิธร พุทธรังษี. การบำบัดโครเมียมและอาร์เซนิกด้วยหญ้าแฝกและธูปฤๅษีในบึงประดิษฐ์. ใน: เอกสารการประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1 วันที่ 31 สิงหาคม 2550. โรงแรมเดอะทวิน ทาวเวอร์. กรุงเทพฯ; 2550. หน้า 1-6.
19. Sukumaran D. Phytoremediation of heavy metals from industrial effluent using constructed wetland technology. Appl Ecol Env Res 2013;1(5):92-7.
20. U.S. EPA. Wastewater technology fact sheet, Wetland: subsurface flow; 2000. EPA/ 832/F-00/ 023.
21. Li X, Liu S, Na Z, Lu D, Liu Z. Adsorption, concentration, and recovery of aqueous heavy metal ions with root power of *Eichhornia crassipes*. Ecol Eng 2013;60:160-6.
22. Iqbal M, Saeed A, Kalim I. Characterization of adsorptive capacity and investigation of mechanism of  $Cu^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  and  $Zn^{2+}$  adsorption on mango peel from constituted metal solution and genuine electroplating effluent. Sep Sci Technol 2009;44(15):3770-9.
23. Bhagyalakshmi MG, Sarma PN. Removal of Ni(II) from aqueous solutions using sugarcane bagasse. J Chem Pharm Res 2015;7(2):140-7.
24. Buasri A, Chaiyut N, Tapang K, Jaroensin S, Panphrom S. Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using water hyacinth as a low cost biosorbent. Civil Environ Res 2012;2(2)17-25.



25. Sufyan MS, Sedik AK, Rafid HO, Ahmed AH. Lettuce leaves as biosorbent material to remove heavy metal ions from industrial wastewater. *Baghdad Sci J* 2014;11(3):1164-70.
26. Jameel MD. Removal of some heavy metal ions from their aqueous solutions by duckweed. *J Toxicol Environ Health Sci* 2011;3(6):164-70.
27. Wang XS, Qin Y. Removal of Ni(II), Zn(II) and Cr(VI) from aqueous solution by *Alternanthera philoxeroides* biomass. *J Hazard Mater* 2007;138(3):582-8.
28. Chakresh KJ, Davendea SM, Anuj KV. Application of plant based biosorbents in the removal of heavy metals: a review. *Environ Process* 2016;3:495-523.
29. Lam YF, Lee LY, Chua SJ, Lim SS, Gan S. Insights into the equilibrium, kinetic and thermodynamics of nickel removal by environmental friendly *Lansium domesticum* peel biosorbent. *Ecotoxicol Environ Saf* 2016;127:61-70.